

Vol. 24(1) • Bogotá-Colombia • Enero-junio de 2021

# Colombia FORESTAL



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



UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

# Colombia FORESTAL



Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales  
Colomb. For. Volumen 23 Número 2. Bogotá, D.C. Julio-Diciembre de 2020 ISSN 0120-0739  
Publicación semestral

## Editor

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

## Comité editorial

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

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

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

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

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

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

Nelly Rodríguez Eraso, Ph.D.  
Universidad Nacional de Colombia. Colombia.

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

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

## Preparación editorial y diseño

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

## Coordinación editorial-CIDC

Fernando Piraquive

## Corrección de estilo para español

Fabián Gullaván

## Corrección de estilo en inglés

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

## Fotografía de la Cubierta

Carlos Eduardo Maya Muñoz, LF.  
Nombre: Perfiles de los andes  
Ubicación: San Félix, Salamina, Caldas.

## Diagramación electrónica y diseño de cubierta

Andrés Mauricio Enciso

## Grupo de árbitros del presente número

Alicia Calle Díaz, Ph.D.  
CIPAV. Colombia

Carlos Sanquetta, Ph.D.  
Universidad Federal de Paraná. Brasil

Héctor Barrero Medel, Ph.D.  
Universidad de Pinar del Río. Cuba

Hernando Vergara Varela, Ph.D.  
Universidad del Cauca. Colombia

Horacio Gilabert Peralta, Ph.D.  
Pontificia Universidad Católica de Chile. Chile

Jeimy Blanco Florez, Ph.D.  
Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Colombia

Juan Carlos Tamarit Urias, Ph.D.  
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, México

Karim Musálem, Ph.D.  
World Wildlife Fund. Paraguay

Marcia Carolina Muñoz, Ph.D.  
Universidad de La Salle. Colombia

Oscar Alberto Aguirre Calderón, Ph.D.  
Universidad Autónoma de Nuevo León. México

Patricia Vega Gutiérrez, Ph.D.  
Universidad Estatal de Oregón. Estados Unidos de América

Paula Meli, Ph.D.  
Universidad de La Frontera. Chile

Roel Campos Rodríguez, Ph.D.  
Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica

Silvana Nisgoski, Ph.D.  
Universidad Federal de Paraná. Brasil

## Comité científico

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



Atribución-Compartir Igual

# Contenido

## Artículos de Investigación Científica y Tecnológica

|   |    |
|---|----|
| IMAGED BASED IDENTIFICATION OF COLOMBIAN TIMBERS USING THE XYLOTRON:<br>A PROOF OF CONCEPT INTERNATIONAL PARTNERSHIP<br><b>Identificación de maderas colombianas utilizando el Xylotron: Prueba de concepto de una colaboración internacional</b><br>Rafael Arévalo, Esperanza N. Pulido, Juan F. Solórzano G., Richard Soares, Flavio Ruffinatto, Prabu Ravindra, Alex C. Wiedenhoef | 5  |
| ANÁLISIS PERCEPTUAL DEL PROCESO DE TRANSFERENCIA DE CONOCIMIENTO EN MADERAS<br>A INSTITUCIONES EN COSTA RICA<br><b>Perceptual analysis of the process of transfer of knowledge in woods to institutions in Costa Rica</b><br>Lupita Vargas-Fonseca, Juan Carlos Valverde, Diego Camacho-Cornejo, Cinthya Salas-Garita, Alexander Berrocal-Jiménez                                     | 17 |
| PREDICCIÓN DE BIOMASA Y CARBONO EN PLANTACIONES CLONALES DE <i>Tectona Grandis</i> L.f.<br><b>Biomass and carbon prediction in clonal plantations of <i>Tectona grandis</i> L.f.</b><br>William Fonseca González, Carlos Ávila Arias, Rafael Murillo Cruz, Marilyn Rojas Vargas   | 31 |
| BIOMASA AÉREA DE FAMILIAS BOTÁNICAS EN UN BOSQUE SIEMPREVERDE PIEMONTANO<br>SOMETIDO A GRADOS DE INTERVENCIÓN<br><b>Aerial biomass of botanical families in piedmont evergreen forest subject to intervention levels Biomasa aérea de familias botánicas</b><br>Yudel García-Quintana, Yasiel Arteaga-Crespo, Bolier Torres-Navarrete, Carlos Bravo-Medina, Marco Robles-Morillo      | 45 |
| VARIACIÓN DE BIOMASA EN UN PERIODO DE VEINTIÚN AÑOS EN UN BOSQUE ATLÁNTICO<br>DEL ALTO PARANÁ (PARAGUAY)<br><b>Biomass variation over a twenty-one years period in an Upper Parana Atlantic Forest, Paraguay</b><br>Victoria Rika Kubota, Rubén Darío Caballero González, Aracery Elizabeth Fernández Lomaquiz  | 60 |
| MODELAMIENTO DE LA PRODUCTIVIDAD DE <i>Gmelina Arborea</i> CON BASE EN VARIABLES<br>BIOFÍSICAS Y DE RODAL<br><b>Modeling the productivity of <i>Gmelina arborea</i> Roxb. using biophysical and stand variables</b><br>Alonso Barrios Trilleras, Ana Milena López Aguirre, Camila Andrea Báez Aparicio  | 71 |

|  |     |
|--|-----|
| IDENTIFICACIÓN DE VACÍOS DE INVESTIGACIÓN APLICADA PARA RESTAURAR ECOSISTEMAS TERRESTRES EN COLOMBIA<br><b>Identifying gaps of applied research to restore terrestrial ecosystems in Colombia</b><br>Juan Garibello, Laura Riaño, Julián Cuellar, José Ignacio Barrera-Cataño, Wilson Ramírez  | 88  |
| EVALUACIÓN DE LA TRAYECTORIA DE LA RESTAURACIÓN EN UN BOSQUE ANDINO A TRAVÉS DE REDES MUTUALISTAS DE DISPERSIÓN DE SEMILLAS<br><b>Evaluation of the restoration trajectory of an Andean forest through seed dispersal mutualistic networks</b><br>Astrid Ramírez y Angela Parrado-Rosselli   | 108 |
| ANÁLISIS PARTICIPATIVO DE SERVICIOS ECOSISTÉMICOS EN UN ÁREA PROTEGIDA DEL BOSQUE SECO TROPICAL (BS-T), COLOMBIA<br><b>Participatory analysis of ecosystem services in a protected area of the tropical dry forest (TDF), Colombia</b><br>Luis Mario Cárdenas-Camacho, Sebastián Díaz, Wilson Gómez Anaya, John Eduard Rojas-Rojas, René López-Camacho | 123 |
| DECLARACIÓN DE BUENAS PRÁCTICAS EDITORIALES Y NORMAS ÉTICAS DE COLOMBIA FORESTAL   | 157 |
| INSTRUCCIONES PARA LOS AUTORES   | 160 |

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





UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS



## Imaged based identification of colombian timbers using the xylotron: A proof of concept international partnership

### Identificación de maderas colombianas utilizando el Xylotron: Prueba de concepto de una colaboración internacional

Rafael Arévalo<sup>1,2\*</sup>, Esperanza N. Pulido R.<sup>3</sup>, Juan F. Solórzano G.<sup>3</sup>, Richard Soares<sup>2</sup>, Flavio Ruffinatto<sup>4</sup>, Prabu Ravindran<sup>1,2</sup>, and Alex C. Wiedenhoeft<sup>1,2,5,6,7</sup>

Arévalo, R., Pulido R., E. N., Solórzano G., J, F, Soares, R., Ruffinatto, F., Ravindran, P. and Windenhoeft, A. C. (2021). Imaged based identification of colombian timbers using the xylotron: A proof of concept international partnership. *Colombia Forestal*, 24(1), 5-16

**Recepción:** 20 de julio 2020

**Aprobación:** 02 de noviembre 2020

#### Abstract

Field deployable computer vision wood identification systems can be relevant in combating illegal logging in the real world. This work used 764 xylarium specimens from 84 taxa to develop an image data set to train a classifier and identify 14 commercial Colombian timbers. We took images of specimens from various xylaria outside Colombia, trained and evaluated an initial identification model and then collected additional images from a Colombian xylarium (BOFw) and incorporated these images to refine and produce a final model. The specimen classification accuracy of this final model was ~ 97%, which demonstrates that including local specimens can augment the accuracy and reliability of the XyloTron system. Our study demonstrates the first deployable computer vision model for wood identification in Colombia, which is developed on a timescale of months rather than years by leveraging on international cooperation.

We conclude that field testing and advanced forensic and machine learning training are the next logical steps.

**Key words:** Deep learning, Forensic wood anatomy, Machine Learning, Transfer learning, Wood identification.

#### Resumen

Sistemas de identificación automatizada de maderas pueden fortalecer la lucha contra el tráfico ilegal de maderas. Este trabajo utilizó 764 especímenes de xilotecas, correspondientes a 84 taxones, para desarrollar un modelo de identificación para 14 especies comerciales de Colombia. Se comenzó colectando imágenes de especímenes provenientes de xilotecas fuera de Colombia, que se utilizaron para entrenar y evaluar un modelo inicial. Se colectaron imágenes adicionales provenientes de una xiloteca Colombiana (BOFw), que se utilizaron para refinar y producir el modelo final. La capacidad de reconocimiento de

1 Department of Botany, University of Wisconsin, Madison, WI 53706, USA.

2 Center for Wood Anatomy Research, USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI 53726, USA.

3 Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, Bogotá D.C., Colombia.

4 DISAFA, University of Torino, Largo Paolo Braccini 2, 10095 Grugliasco (TO), Italy.

5 Department of Forestry and Natural Resources, Purdue University, USA.

6 Departamento de Ciências Biológicas (Botânica), Universidade Estadual Paulista – Botucatu, Brasil.

7 Department of Sustainable Bioproducts, Mississippi State University, Starkville, MS, USA.

\* Correspondencia: [arevaloburba@wisc.edu](mailto:arevaloburba@wisc.edu)

este modelo fue del ~97%, demostrando que incluir muestras locales aumenta la precisión y confiabilidad del sistema [XyloTron]. Este estudio presenta el primer modelo de vision computarizada para identificación de maderas en Colombia, desarrollado en una escala de tiempo corta y bajo cooperación

internacional. Concluimos que pruebas en campo y capacitación forense y en aprendizaje automatizado, son los siguientes pasos lógicos a seguir.

**Palabras clave:** Anatomía forense de madera, Aprendizaje profundo, Aprendizaje automatizado, Identificación de madera, Transferencia de aprendizaje.

---

## INTRODUCTION

It has been estimated that more than 40% of wood production in Colombia emanates from illegal sources (WWF-Colombia, 2013). In a country where 52% of the area is occupied by natural forests and in which illegal logging is one of the principal drivers of deforestation (IDEAM, 2020), extraction and commercialization of wood generates a significant environmental and socio-economic impact and is an explicit threat to biodiversity through habitat loss. To guarantee legality of forest products supply chain, it is necessary to obtain official permits and authorizations from Regional Environmental Authorities that enforce national standards that governing the use, management, transport and sale of forest products. In addition, Colombia has been developing wood identification tools for commercial timbers (Covima, 2020; *Especies Maderables*, 2016; López Camacho *et al.*, 2014; WWF-Colombia, 2013) and implementing policies and initiatives (e.g. Operation Artemisa) that would ensure that forests are protected and wood and wood-derived products are legally sourced. Compliance with and enforcement of international and local laws for legal wood products depend, in part, on the rapid and reliable identification of wood to validate claims of legality (Windenhoef *et al.*, 2019). Such technical or forensic expertise in turn hinges on the design, validation and deployment of robust scientific wood forensic pipelines to identify timber and combat fraud throughout the supply chain (Lowe *et al.*, 2016).

In a typical scenario, when environmental authorities inspect wood in trade, they evaluate

a shipment based on a reported commercial or common name used in the region. Unlawful operators typically falsify paperwork, claiming that the wood in a shipment is of lower value species when, in reality, the shipment contains higher-value/endangered and (sometimes) superficially similar species. The only way to detect such a fraud is to inspect a shipment and make provisional identification of the wood to determine if it is consistent with information provided on the paperwork. To make the greatest impact in preventing illegal trade, these inspections of wood must take place in uncontrolled environmental conditions (i.e. at the point of harvest, in a lumber mill and at the port of shipment) in a matter of seconds to establish probable cause for seizure, detention and further forensic analyses, or release the consignment into trade as compliant. If possible, specimens from a detained consignment should be subjected to further forensic analysis in a laboratory using genetic/microscopy/spectral techniques to enable a legally valid identification (Dormontt *et al.*, 2015).

In Colombia, as in most of the world, if any field screening of timber is undertaken at all, then it is human-based, with customs, environmental and police authorities requiring significant training and regular practice in the use of traditional wood anatomical identification methods to achieve a useful level of proficiency. Unfortunately, there is a significant dearth of such human expertise and lack of infrastructure in most control and surveillance posts to perform accurate and reliable identifications. Consequently, field screening of timber more often relies on subjective evaluation of few

and often poorly defined characteristics of wood, such as color/appearance, grain/texture, luster and odor—with no reference to anatomical features of the wood. The lack of sufficient human expertise compared to the demand for timber screening is a major bottleneck in ensuring legal timber trade and has established the clear need for reliable field-deployable wood identification technologies (Wiedenhoeft *et al.*, 2019).

Computer vision-based wood identification is an attractive technology for the development of quick, reliable and field-deployable tools for field screening of wood (de Andrade *et al.*, 2020; Filho *et al.*, 2014; Hermanson and Wiedenhoeft, 2011; Khalid *et al.*, 2008; Ravindran *et al.*, 2018; Souza *et al.*, 2020). The availability of affordable, open source, field-deployable, field tested and image-based wood identification platforms (Ravindran *et al.*, 2020) with identification accuracies that match or exceed those of other expensive technologies (Ravindran & Wiedenhoeft, 2020) have further established the potential of computer vision-based systems as effective and scalable field screening technologies, especially in human-mediated contexts.

In this project, we trained a macroscopic image-based identification model of fourteen commercially important Colombian timbers for use in conjunction with the XyloTron system (Ravindran *et al.*, 2020). Our data collection and model development was done as part of a World Wildlife Fund (WWF)-funded international partnership to develop new technology, knowledge and methodologies that can support capacity building for timber tracking and timber forensics in the Colombian timber market. The pilot study described here yields valuable insights into how an international cooperation can develop a deployable solution to a real-world problem on a timescale of months rather than years. To the best of our knowledge, this is the first report on using a computer vision/machine learning model for wood identification in Colombia.

## MATERIALS AND METHODS

The transverse surface of specimens from 14 genera (84 taxa, 764 specimens) from xylaria at USDA Forest Products Laboratory (MADw and SJRW), Wood Laboratory of the Universidad Distrital Francisco José de Caldas (BOFw), Tervuren wood collection (Tw) and Xiloteca Dr. Calvino Mainieri, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (BCTw) were polished using progressively finer-grit sandpapers (240, 400, 600, 800, 1000 and 1500) using compressed air and adhesive tape to, as much as possible, remove dust from the cell lumina between each grit. Imaging of polished surfaces was done using the XyloTron (Ravindran *et al.*, 2020), a macroscopic imaging and computer vision system was used for the wood identification. Each image (with dimensions 2048 × 2048 pixels) shows 6.35 × 6.35 mm of tissue. Details of the selected taxa and image dataset are provided in table 1 and Appendix 1, respectively. Species level identification for the selected taxa was not required (and not possible), hence the 4108 images from the 84 taxa were categorized into 14 genus-level classes for machine learning purposes. The image dataset was separated into a training and testing set, such that 80% of the specimens in the dataset contributed images to the training data only, while the remaining 20% of specimens contributed images to the testing set only. The mutual exclusivity between the training and testing data at the specimen level (as opposed to just the image level) prevents the neural network from learning features to identify the individual specimens, thereby making accuracy of the trained model more informative of its real-world wood identification performance.

We trained and evaluated a convolutional neural network (CNN) that comprise a ResNet (He *et al.*, 2016) backbone pre-trained on the ImageNet dataset (Russakovsky *et al.*, 2015) with a custom classifier head using transfer learning (Pan & Yang, 2010) to classify images of the transverse surfaces



| Genus                                      | Species                                       | Synonyms                  |
|--|---|---------------------------|
| Qualea                                     | <i>P. torta</i> (Mart.) Radlk.                |                           |
|  | <i>P. torta</i> subsp. <i>glabra</i> T.D.Penn | <i>P. gutta</i>           |
|  | <i>P. trilocularis</i> Cronquist              |                           |
|  | <i>Q. acuminata</i> Spruce ex Warm.           |                           |
|  | <i>Q. albiflora</i> Warm.                     |                           |
| Rhizophora                                 | <i>Q. paraensis</i> Ducke                     |                           |
|  | <i>Q. wittrockii</i> Malme                    |                           |
| Virola                                     | <i>R. mangle</i> L.                           |                           |
|  | <i>V. bicuhyba</i> (Schott) Warb.             |                           |
| Vochysia                                   | <i>V. calophylla</i> (Spruce) Warb.           |                           |
|  | <i>V. calophylloidea</i> Markgr.              |                           |
|  | <i>V. carinata</i> (Spruce ex Benth.) Warb.   |                           |
|  | <i>V. elongata</i> (Benth.) Warb.             |                           |
|  | <i>V. flexuosa</i> A.C. Sm.                   |                           |
|  | <i>V. gardneri</i> (A.DC.) Warb.              |                           |
|  | <i>V. guatemalensis</i> (Hemsl.) Warb.        |                           |
|  | <i>V. koschnyi</i> Warb.                      |                           |
|  | <i>V. loretensis</i> A.C. Sm.                 |                           |
|  | <i>V. macrocarpa</i> A.C. Sm.                 |                           |
|  | <i>V. michelii</i> Heckel                     | <i>V. melinonii</i>       |
|  | <i>V. mollissima</i> (Poepp. ex A.DC.) Warb.  |                           |
|  | <i>V. multcostata</i> Ducke                   |                           |
|  | <i>V. multinervia</i> Ducke                   |                           |
|  | <i>V. officinalis</i> Warb.                   |                           |
|  | <i>V. oleifera</i> (Schott) A.C.Sm.           | <i>Bicuiba oleifera</i>   |
|  | <i>V. pavonis</i> (A.DC.) A.C.Sm.             |                           |
|  | <i>V. sebifera</i> Aubl.                      |                           |
|  | <i>V. surinamensis</i> (Rol. ex Rottb.) Warb. | <i>Myristica gracilis</i> |
|  | <i>V. venosa</i> (Benth.) Warb.               |                           |
|  | <i>V. cayennensis</i> Warm.                   |                           |
|  | <i>V. cf. ferruginea</i> Mart.                |                           |
|  | <i>V. densiflora</i> Spruce                   |                           |
| <i>V. ferruginea</i> Mart.                 |   |                           |
| <i>V. floribunda</i> Mart.                 |   |                           |
| <i>V. guatemalensis</i> Donn.Sm.           | <i>V. hondurensis</i>                         |                           |
| <i>V. guianensis</i> Aubl.                 | <i>V. melinonii</i>                           |                           |
| <i>V. inundata</i> Ducke                   |   |                           |
| <i>V. laurifolia</i> Warm.                 |   |                           |
| <i>V. maxima</i> Ducke                     |   |                           |
| <i>V. obidensis</i> (Huber ex Ducke) Ducke |   |                           |
| <i>V. obscura</i> Warm.                    |   |                           |
| <i>V. rufescens</i> W.A. Rodrigues         |   |                           |
| <i>V. speciosa</i> Warm.                   |   |                           |
| <i>V. splendens</i> Spruce ex Warm.        |   |                           |
| <i>V. surinamensis</i> Stafleu             |   |                           |
| <i>V. thyrsoides</i> Pohl                  |   |                           |
| <i>V. tomentosa</i> (G.Mey) DC.            |   |                           |
| <i>V. vismiifolia</i> Spruce ex Warm.      |   |                           |

## RESULTS

The specimen classification accuracy was 97.3%. The specimen confusion matrix is shown in [figure 1](#), and a total of four specimens were misclassified. The XyloTron, without any optimization for computational performance, requires approximately 2–3 seconds of computational time on a consumer laptop for each image identification, when used in the field.

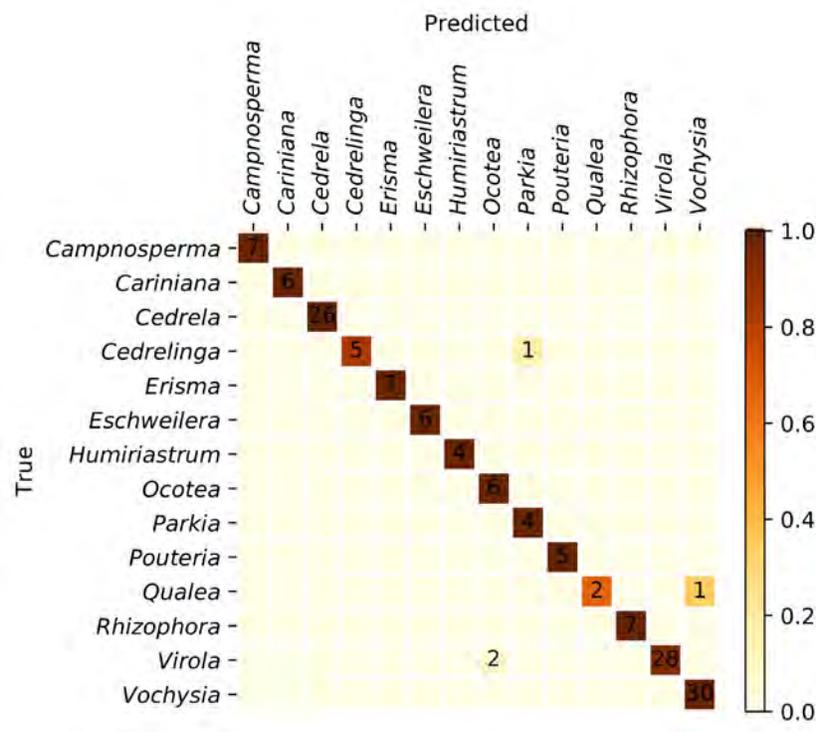
## DISCUSSION

This project developed a highly accurate, machine-learning based wood identification model that can/or should be used to improve timber trade in Colombia. This goal, in the span of less than one year, was established with thanks to a strong international collaboration and partnership. Working together, we were able to build a pilot model

in USA, test it in Colombia, improve it with additional data from Colombia’s wood collections and then develop the final model we present here.

The accuracy of the model presented here ([figure 1](#)) greatly exceeds the average accuracy and reliability of wood identification experts working in a laboratory setting, as shown in a recent survey conducted in USA ([Wiedenhoeft et al., 2019](#)). We are not aware of any country with trained field personnel able to separate these woods with few misclassifications. Only three class-pairs of woods were confused: *Cedrelinga*-as-*Parkia*, *Qualea*-as-*Vochysia*, and *Virola*-as-*Ocotea*.

*Cedrelinga* and *Parkia* ([figure 2](#), top) have similar tangential vessel diameter and vessel density and both have vascentric to lozenge aliform parenchyma. It is interesting to note that a model incorporating UV illumination ([Ravindran et al., 2020](#)) would separate this class-pair, since *Cedrelinga* heartwood is fluorescent and *Parkia* is not. *Qualea* and *Vochysia* ([figure 2](#), middle) have

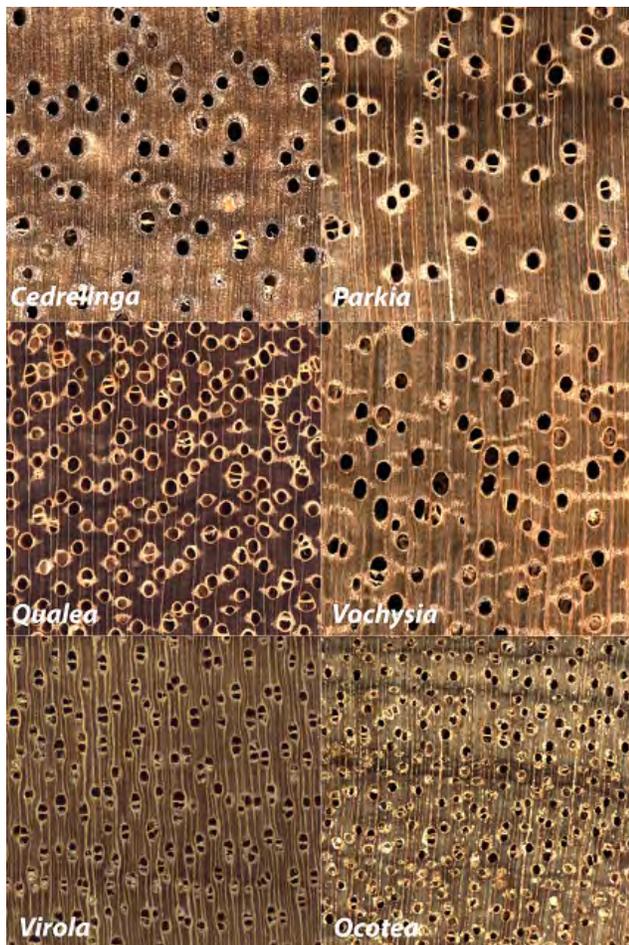


**Figure 1.** Specimen confusion matrix for the XyloTron wood identification model of 14 Colombian timbers. Overall accuracy was 97.3%. Four specimens were misclassified within three different class-pairs.

macroscopically similar ray widths and abundance, as well as lozenge aliform to short confluent parenchyma and indeed even in the laboratory. Moreover, using full light microscopic identification, it can be challenging to separate these genera (Quirk, 1980). *Virola* and *Ocotea* (Figure 2, bottom) are both somewhat macroscopically similar woods, without any evident characters from the transverse surface to separate the two. If tangential surfaces were added to XyloTron models, the separation of this class-pair would presumably become certain, since *Virola* has tanniferous tubes in the

rays that appear as dark dots on the tangential surface, whereas *Ocotea* lacks them.

To make better use of the advances from this project, the next logical step would be to conduct a robust field test of the model in Colombia—at markets, lumber yards and at other points of trade control. This would necessitate validation of the XyloTron’s field results by expert human evaluators, ideally by forensic wood identification in the laboratory. It would also be a powerful capacity building exercise for several Colombian colleagues to make a research visit to the Center for Wood Anatomy Research (CWAR) in order to engage in a robust program of advanced training in wood anatomy and machine learning, which are the two sets of expertise needed to adopt and adapt the XyloTron for the Colombian context. With field performance data and increased in-country knowledge of the design, function and machine learning model used by the XyloTron, we could determine the most efficient way to use resources to expand the breadth of Colombian taxa identifiable by the XyloTron.



**Figure 2.** XyloTron images of the pair (top, middle and bottom) of true class (left) and predicted class (right) for each of the three class-pair misidentifications in the model.

**Note** that, for each class-pair, the wood anatomical patterns seen with the XyloTron are similar.

## CONCLUSIONS

With the right partnership, it is possible to develop, implement and complete a machine vision wood identification project with the potential to strengthen control mechanisms for trade and commercialization of wood in the country of origin and within a timescale of months rather than years. This is the first report of such an efficient program of work with a highly accurate machine vision wood identification model as a result. Our identification model had *in silico* accuracy greater than 97%, an accuracy far higher than any, but by the best forensic experts in a laboratory setting.

Field testing of the model and verification of the model’s results by laboratory testing is a critical next step, ideally followed by a research sabbatical in CWAR to expand knowledge on XyloTron operation and development. With this enhanced

capacity, it will be possible to establish best practices for how best to expand the breadth of Colombian woods identifiable by the XyloTron.

## ACKNOWLEDGMENTS

This publication resulted from research supported by the World Wildlife Fund (WWF) through their WWF-US Innovation Funds. Special thanks to A. Smith at WWF-US and M. Pacheco at WWF-Colombia for their support throughout the different phases of this project. We thank the anonymous reviewers whose comments helped to improve and clarify this manuscript.

## CONTRIBUTION BY AUTHOR

R.A. and A.C.W. initiated the project. P.R. developed the machine learning analyses. A.C.W., R.S. and R.A. conducted the forensic analysis of the wood and established the scope of the identification models. E.N.P.R. and J.F.S.G. collected images from additional/new Colombian specimens. R.A., R.S., F.R., and J.F.S.G. prepared samples for imaging and imaged the specimens. A.C.W. curated the collected data. P.R. and A.C.W. conducted data analysis and synthesis. R.A., A.C.W., and P.R. wrote the paper. All authors read, contributed, and approved the final manuscript.

## REFERENCES

- Covima.** (2020). Minambiente. (V.2.9.4) [mobile software]
- de Andrade, B.G., Basso, V.M. & de Figueiredo Latorraca, J.V.** (2020). Machine vision for field-level wood identification. *IAWA Journal*, 1-18. <https://doi.org/10.1163/22941932-bja10001>
- Devries, T. & Taylor, G.W.** (2017). Improved regularization of convolutional neural networks with cutout. *arXiv e-prints*, abs/1708.04552.
- Dormontt, E.E., Boner, M., Braun, B., Breulmann, G., Degen, B., Espinoza, E., Gardner, S., Guillery, P., Hermanson, J.C., Koch, G., Lee, S.L., Kanashiro, M., Rimbawanto, A., Thomas, D., Wiedenhoef, A.C., Yin, Y., Zahnen, J. & Lowe, A.J.** (2015). Forensic timber identification: It's time to integrate disciplines to combat illegal logging. *Biological Conservation*, 191, 790–798.
- Species Maderables 2.** (2016). Kudos Ltda. (V.0.1.3) [mobile software]
- Filho P.L.P., Oliveira L.S., Nisgoski S. & Britto A.S.** (2014). Forest species recognition using macroscopic images. *Machine Vision and Applications*, 25, 1019–1031. <https://doi.org/10.1007/s00138-014-0592-7>
- He K., Zhang X., Ren S. & Sun J.** (2016). Deep residual learning for image recognition. En: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 770-778.
- Hermanson J.C. & Wiedenhoef A.C.** (2011). A brief review of machine vision in the context of automated wood identification systems. *IAWA Journal*, 32(2), 233–250.
- IDEAM.** (2020). *Resultados de monitoreo de deforestación, 2019*. Retrieved from: <http://www.ideam.gov.co/documents/10182/105413996/presentacionbalancecedeforestacion2019/7c9323fcd0a1-4c95-b1a1-1892b162c067>
- Khalid M., Lee E.L.Y., Yusof R. & Nadaraj M.** (2008). Design of an intelligent wood species recognition system. *International Journal of Simulation System, Science and Technology*, 9(3), 9–19.
- López Camacho R., Pulido Rodríguez E.N., González Martínez R.O., Nieto Vargas J.E. & Vásquez M.Y.** (2014). *Maderas. Especies comercializadas en el territorio CAR. Guía para su identificación*. Bogotá D.C.: Editorial Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Lowe A.J., Dormontt E.E., Bowie M.J., Degen B., Gardner S., Thomas D., Clarke C., Rimbawanto A., Wiedenhoef A.C., Yin Y. & Sasaki N.** (2016). Opportunities for improved

transparency in the timber trade through scientific verification. *BioScience*, 66(11), 990–998. <https://doi.org/10.1093/biosci/biw129>

**Pan S.J. & Yang Q.** (2010). A survey on transfer learning. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 22(10), 1345–1359.

**Quirk J.T.** (1980). Wood anatomy of the Vochysiaceae. *IAWA Bulletin*, 1(4), 172–179.

**Ravindran P. & Wiedenhoeft A.C.** (2020) Comparison of two forensic wood identification technologies for ten Meliaceae woods: computer vision versus mass spectrometry. *Wood Science and Technology*, 54(5), 1139–1150. <https://doi.org/10.1007/s00226-020-01178-1>

**Ravindran P., Costa A., Soares R. & Wiedenhoeft A.C.** (2018). Classification of CITES-listed and other neotropical Meliaceae wood images using convolutional neural networks. *Plant Methods*, 14, 25. <https://doi.org/10.1186/s13007-018-0292-9>

**Ravindran P., Ebanyenle E., Ebeheakey A.A., Abban K.B., Lambog O., Soares R., Costa A. & Wiedenhoeft A.C.** (2019). Image based identification of Ghanaian timbers using the XyloTron: Opportunities, risks and challenges. En: M. De-Arteaga, T. Afonja, A. Coston (eds.). *Proceedings of NeurIPS*

*2019 Workshop on Machine Learning for the Developing World: Challenges and Risks of ML4D*. arXiv:2001.00249.

**Ravindran P., Thompson B.J., Soares R.K. & Wiedenhoeft A.C.** (2020) The XyloTron: Flexible, open-source, image-based macroscopic field identification of wood products. *Frontiers in Plant Science*, 11, 1015. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01015>

**Russakovsky O., Deng J., Su H., Krause J., Satheesh S., Ma S., Huang Z., Karpathy A., Khosla A., Bernstein M., Berg A.C. & Fei-Fei L.** (2015). ImageNet large scale visual recognition challenge. *International Journal of Computer Vision*, 115(3), 211–252.

**Souza D.V., Santos J.X., Vieira H.C., Naide T.L., Nisgoski S. & Oliveira L.E.S.** (2020). An automatic recognition system of Brazilian flora species based on textural features of macroscopic images of wood. *Wood Science and Technology*, 54, 1065–1090.

**Wiedenhoeft A.C., Simeone J., Smith A., Parker-Forney M., Soares R., Fishman A.** (2019). Fraud and misrepresentation in retail forest products exceeds U. S. forensic wood science capacity. *PLoS ONE*, 14(7), e0219917.

**WWF-Colombia-ProgramaSubregionalAmazonasNorte&ChocóDarién.** (2013). *MaderasdeColombia*. Retrieved from: [www.wwf.org.co/?213040/Maderas-de-Colombia](http://www.wwf.org.co/?213040/Maderas-de-Colombia)

**Appendix 1.** List of taxa included in this study with collection and voucher information: taxon [synonym]— xylarium accessions. Xylarium acronyms: BCTw = Xiloteca Dr. Calvino Mainieri, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. - IPT, Sao Paulo, Brazil; FORIGw = Forestry Research Institute of Ghana, Kumasi, Ghana; MADw, SJRW = Forest Products Laboratory Wood Collection and Samuel J. Record Memorial Wood Collection, USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, USA; Tw = Tervuren Xylarium, Royal Museum for Central Africa, Tervuren, Belgium; BOFW = Laboratorio de Maderas, Universidad Distrital Francisco José de Caldas (UDBC), Bogotá D.C., Colombia.

***Camposperma panamense*** Standl.—BCTw:19002; MADw:37946, 55237; BOFW:3463, 3464, 3465, 3466, 3467, 3476, 3477, 3478, 3479, 3503, 3504, 3505, 3506, 3507, 3508, 3509, 3510, 3511, 3515, 3519, 3521, 3522, 3525, 3528, 3529, 11346, 18466, 24842, 37946; SJRW:10500, 42731, 42964, 51609, 55237, 6770, 6924. ***Cariniana domestica*** (Mart.) Miers—MADw:18729. ***Cariniana pyriformis*** Miers—MADw:3911; MADw:10618, 21093, 30792, 3910, 3911, 3915; SJRW:1602, 3968, 414, 500; Tw:30211; BOFW:1082, 1500, 3480, 3481, 3482, 3483, 3484, 3485, 3486, 3487, 3488, 3489, 3490, 3516, 3523, 3526, 3527. ***Cedrela odorata*** L.—BCTw:10483, 11494, 12456, 13474, 15280, 16144, 16639, 16855, 17002, 17655, 18055, 20019, 5543, 8220, 9552, 9555; FORIGw:24; MADw:10357, 10615, 10773, 10901, 11062, 12357, 13785, 14786, 15031, 16010, 17649, 18448, 19052, 19355, 19685, 20551, 20564, 20742, 21569, 22016, 22229, 23066, 23116, 23209, 26495, 26506, 33880, 3591, 42297, 42711, 42726, 7145; SJRW:10658, 10834, 10902, 11248, 12438, 1308, 15676, 15871, 1928, 1929, 20074, 2051, 2167, 23951, 2942, 3035, 3134, 3277, 329, 32935, 33914, 34671, 34734, 349, 35041, 35164, 35994, 36522, 37954, 38455, 39509, 39628, 40783, 40907, 410, 411, 41170, 43372, 43613, 4378, 4763, 4765, 4780, 47899, 47902, 47904, 4993, 5109, 53579, 53611, 53763, 55162, 5947, 6661, 6835, 727, 7485, 7622, 7648, 7937, 825, 8455, 8901, 8995, 9527, 9614; BOFW:3468, 3469, 3470, 3471, 3472, 3473, 3474, 3475, 3491, 3492, 3493, 3494, 3495, 3496, 3497, 3524. ***Cedrelinga cateniformis*** (Duce) Ducke—BCTw:10938, 12515, 13374, 13485, 13583, 13916, 15074, 19683, 9944; MADw:13596, 14091, 22148, 22362, 25406, 37949, 46450, 46463; SJRW:20715, 37813, 37840, 37843, 37845, 43389, 43390, 43423, 48679, 49373, 52841; Tw:14000; BOFW:3501, 3514. ***Erisma uncinatum*** Warm.—BCTw:10074, 12514, 12778, 13129, 13396, 13431, 13481, 14015, 14153, 14154, 14155, 16038, 16542, 18639, 18968, 20028, 2123, 82, 8411; MADw:19108, 19282, 19285, 19294, 19574, 21481, 37956; SJRW:39610, 50577, 50932, 51781, 55661, 55686; Tw:20635; BOFW:3498, 3499, 3500. ***Eschweilera albiflora*** (DC.) Miers [***E. pachysepala***]—MADw:12834; SJRW:37094. ***Eschweilera amazonica*** R. Knuth—MADw:48836. ***Eschweilera cf. atropetiolata*** S.A.Mori—MADw:32630. ***Eschweilera coriacea*** (DC.) S.A.Mori—MADw:19657, 30859, 30860, 30861, 30862, 30863; SJRW:35450, 36645, 36688, 45742, 45743, 45744. ***Eschweilera juruensis*** R. Knuth—MADw:12460, 12497, 18646, 18771, 18776. ***Eschweilera micrantha*** (O.Berg.) Miers [***E. polyantha***]—MADw:12447, 12453, 30879; SJRW:36630, 36637. ***Eschweilera parvifolia*** Mart. ex DC. [***E. krukovii***]—MADw:12337, 12366, 18574, 18932; SJRW:36491, 36534. ***Eschweilera pedicellata*** (Rich.) S.A.Mori [***E. longipes***]—MADW:45232. ***Eschweilera rhododendrifolia*** (R.Knuth) A.C.Sm—MADW:30880. ***Humiriastrum procerum*** (Little) Cuatrec.—BCTw:18508; MADw:10373, 10391, 10392, 17586, 22103; SJRW:40923, 40941, 40942, 43073, 43153, 4315301; BOFW:3517. ***Ocotea aciphylla*** (Nees & Mart.) Mez [***O. costulata***]—BCTw:16386, 11489, 16987; MADw:42778, 43348, 12552, 12683, 12813, 23414, 31112; SJRW:21617, 23632, 36752, 36913,

37067. *Ocotea canaliculata* (Rich.) Mez—BCTw:12523; MADw:311041. *Ocotea caracasana* (Nees) Mez—BCTw:9721. *Ocotea cymbarum* Kunth [*O. barcellensis*]—BCTw:13827; MADw:13171, 14052, 2520. *Ocotea diospyrifolia* (Meisn.) Mez—BCTw:12157. *Ocotea fasciculata* (Nees) Mez—BCTw:13818. *Ocotea floribunda* (Sw.) Mez—BCTw:7820. *Ocotea fragrantissima* Ducke—BCTw:12510, 14121; MADw:13388, 31120; SJRW:31952. *Ocotea glomerata* (Nees) Mez—BCTw:16406. *Ocotea longifolia* Kunth—MADw:45198, 48726. *Parkia multijuga* Benth—BCTw:10829, 11470, 12382, 13797; MADw:12417, 48781; SJRW:21333, 22759, 36595; Tw:34659; BOFW:1489. *Parkia paraensis* Ducke—BCTw:14095, 14096, 14097, 17236, 17245, 17254. *Parkia velutina* Benoist—BCTw:16356; MADw:31528, 46452. *Pouteria cuspidata* (A.DC.) Baehni—MADw:43378, 47594, 47596. *Pouteria guianensis* Aubl—BCTw:7821, 8952; MADw:20483, 21523, 23587, 23679. *Pouteria hispida* Eyma [*P. solimoesensis*] MADw:32128, 32221. *Pouteria macrocarpa* (Mart.) D.Dietr.—BCTw:10162, 6573. *Pouteria macrophylla* (Lam.) Eyma—BCTw:10045; MADw:5711, 6597, 7669. *Pouteria torta* (Mart.) Radlk.—MADw:12473, 12584, 32871. *Pouteria torta* subsp. *glabra* T.D.Penn [*P. gutta*]—MADw:2354, 23637, 32875. *Pouteria trilocularis* Cronquist—MADw:18697, 18716, 19022, 19040, 23674, 31747. *Qualea acuminata* Spruce ex Warm.—MADw:12846, 19280; SJRW:37111; BOFW:3451. *Qualea albiflora* Warm.—MADw:12133, 19281, 19559, 19620, 21417. *Qualea paraensis* Ducke—MADw:19263; SJRW:22737, 36735, 40096. *Qualea wittrockii* Malme—MADw:23384; SJRW:16789. *Rhizophora mangle* L.—MADw:10364, 10365, 10374, 10375, 10607, 11352, 13200, 13825, 22561, 24779, 33901, 36612, 7388; SJRW:10806, 12295, 1261, 16627, 17167, 19583, 1997, 21524, 22531, 37881, 40914, 40915, 40924, 40925, 42990, 46830, 55617, 55619, 5970, 6860, 8033, 9609; BOFW:3512, 3513, 3518. *Virola bicuhyba* (Schott) Warb.—BCTw:11622, 2640, 3901, 4633, 6067. *Virola calophylla* (Spruce) Warb.—SJRW:17504. *Virola calophylloidea* Markgr.—BCTw:13758; SJRW:36951. *Virola carinata* (Spruce ex Benth.) Warb.—BCTw:16334; SJRW:37114. *Virola elongata* (Benth.) Warb.—BCTw:13759, 16315; MADw:34033; SJRW:17937, 17946, 17968, 18020, 18040, 22069, 35591, 35639, 35760, 36573, 36778, 36947, 43203. *Virola flexuosa* A.C. Sm.—SJRW:36850. *Virola gardneri* (A.DC.) Warb.—BCTw:12008, 13666; SJRW:3256, 3504, 3948. *Virola guatemalensis* (Hemsl.) Warb.—SJRW:10659. *Virola koschnyi* Warb.—MADw:34049, 7374; SJRW:13289, 21477, 35025, 36392, 3679, 43478, 47889, 7604, 7801, 8829, 8838. *Virola lorentensis* A.C. Sm.—SJRW:18155, 18212, 34139. *Virola macrocarpa* A.C. Sm.—SJRW:43245. *Virola michelii* Heckel [*V. melinonii*]—SJRW:32900, 47632, 47633, 47637; BCTw:16628, 16722. *Virola molissima* (Poepp. ex A.DC.) Warb.—SJRW:18098. *Virola multicostata* Ducke—BCTw:16319; SJRW:36919. *Virola multinervia* Ducke—BCTw:16529; SJRW:21359. *Virola officinalis* Warb.—SJRW:18463. *Virola oleifera* (Schott) A.C.Sm. [*Bicuiba oleifera*]—SJRW:1945, 36061, 4708, 674. *Virola pavonis* (A.DC.) A.C.Sm.—BCTw:13749; SJRW:37121. *Virola sebifera* Aubl.—BCTw:13752, 16613, 17003; MADw:37900; SJRW:12281, 23889, 39680, 39936, 40831, 41178, 42820, 43461, 43736, 45178, 45179, 455, 46503, 51682, 6825. *Virola surinamensis* (Rol. ex Rottb.) Warb. [*Myristica gracilis*]—BCTw:16557, 16925, 5547; SJRW:10174, 1251, 21126, 21127, 32869, 35522, 41119, 41427, 44167, 45793, 47573, 50921, 55545, 23888 Tw:10985;. *Virola venosa* (Benth.) Warb.—SJRW:36989. *Virola sp.*—BCTw:10874, 10877, 11213, 11239, 11466, 11614, 11615, 11973, 12801, 16289, 19631, 2898, 2914, 3273, 3505, 3610, 3615, 4079, 4744, 4794, 4969, 586, 6855, 6858, 7065, 9103, 9459, 9909; SJRW:15639, 18065, 1820, 18500, 20091, 2682, 36187, 38221, 38222, 43006, 43318, 43396, 45425, 47684, 52409, 6917. *Vochysia cayennensis* Warm.—BCTw:12771. *Vochysia cf. ferruginea* Mart.—MADw:14011. *Vochysia densiflora* Spruce—BCTw:12773. *Vochysia ferruginea* Mart.—BCTw:16159, 16644, 17787; MADw:17553, 17567, 18469, 23086, 23087, 23109, 23390, 23391, 23393, 23394, 32441, 37902, 37903, 37904, 42299, 5740;

SJRw:13269, 35585, 35705, 41990, 42965, 43017, 43139, 43219, 43458, 43462, 46818, 50980, 53826, 55240. **Vochysia floribunda** Mart.—BCTw:325; MADw:23392. **Vochysia guatemalensis** Donn.Sm. [**V. hondurensis**]—BCTw:2049; MADw:10799, 10825, 11496, 4099; MADw:7399, 10290, 16165, 16664, 16672, 18471, 23124, 23397, 2370, 33891, 36075, 36076; SJRw:3681, 3701, 8919, 668, 7412, 7569, 12008, 34840, 34877, 35119, 36402, 40836, 45629, 45630, 45777, 49487, 49495, 55242. **Vochysia guianensis** Aubl.[**V. melinonii**]—BCTw:12034, 12513, 12775, 15290, 16007, 16642, 17630, 7826, 9982, 11476, 17634; MADw:14788, 19575, 21370, 23396, 2371, 25408. **Vochysia inundata** Ducke—BCTw:16662. **Vochysia laurifolia** Warm—BCTw:12260, 24, 3627. **Vochysia maxima** Ducke—BCTw:11475, 12566, 14150, 16043, 17725. **Vochysia obidensis** (Huber ex Ducke) Ducke—BCTw:14147, 14148, 15210; MADW:23403. **Vochysia obscura** Warm.—BCTw:13272. **Vochysia rufescens** W.A. Rodrigues—BCTw:16309. **Vochysia speciosa** Warm.—BCTw:12776. **Vochysia splendens** Spruce ex Warm.—BCTw:16532 **Vochysia surinamensis** Stafleu —MADW:46658, 47571, 8461. **Vochysia thyrsoides** Pohl—BCTw:14955, 15964. **Vochysia tomentosa** (G.Mey) DC.—BCTw:12086, 12772, 18699. **Vochysia vismiifolia** Spruce ex Warm.—BCTw:12033, 12656, 13969, 15093, 16053, 2862, 5015; MADw:21413, 23407, 23408; SJRw:38274, 44356. **Vochysia sp.**—BCTw: 83, 84, 327, 597, 2772, 3483, 3490, 3493, 3598, 4557, 4960, 5983, 6081, 8405, 9326, 9896, 11815, 12050, 13320, 13432, 13920, 13981, 16270, 19550, 19551.





## Análisis perceptual del proceso de transferencia de conocimiento en maderas a instituciones en Costa Rica

### Perceptual analysis of the process of transfer of knowledge in woods to institutions in Costa Rica

Lupita Vargas-Fonseca<sup>1</sup>, Juan Carlos Valverde<sup>2\*</sup>, Diego Camacho-Cornejo<sup>1</sup>,  
Cinthya Salas-Garita<sup>1</sup>, Alexander Berrocal-Jiménez<sup>1</sup>

Vargas-Fonseca, L., Valverde, J. C., Camacho-Cornejo, D., Salas-Garita, C. y Berrocal-Jiménez, A. (2021). Análisis perceptual del proceso de transferencia de conocimiento en maderas a instituciones en Costa Rica. *Colombia Forestal*, 24(1), 17-30.

**Recepción:** 23 de septiembre 2019

**Aprobación:** 19 de septiembre 2020

#### Resumen

Se analizó de forma perceptual la transferencia de conocimiento en tecnología de la madera en instituciones educativas estatales de Costa Rica. Se realizaron capacitaciones activo-pasivas en temas de secado, preservado y calidad de la madera, llevando a cabo tres evaluaciones de aprendizaje (precurso, postcurso y 30 semanas luego del postcurso). Con estas se valuó la percepción, conocimiento adquirido y limitaciones de los sistemas empleados. Se obtuvo una gran similitud entre las temáticas de secado y preservado con conocimientos previos superiores al 65 %, aprendizajes del 85 % y retenciones de conocimiento del 75 %; caso contrario se evidenció con la temática de calidad, la cual presentó un conocimiento previo del 20 %, aprendizaje del 83.5 % y retención del 75.6 %; los temas de secado y preservado mostraron la mejor percepción, considerados como simples, aplicables, útiles y entendibles; mientras que el tema de calidad se consideró complicado, complejo, inaplicable pero útil. Finalmente, se encontró que el aprendizaje de secado y preservado debe ser una combinación de

50 %-50 % entre teoría-práctica; mientras la calidad debería ser 25 %-75 % teoría-práctica.

**Palabras clave:** educación activa, educación pasiva, aprendizaje, ciencias forestales.

#### Abstract

The transfer of knowledge in wood technology in state institutions of Costa Rica was perceptually analyzed. Conducting active-passive training in topics of drying, preserving and quality of wood, using three learning assessments (precursor, post-course and 30 weeks post-course); the perception, knowledge acquired and limitations of the systems used were evaluated. Obtaining a great similarity between the topics of drying and preserving with previous knowledge over 65 %, learning of 85 % and knowledge retention of 75 %, different from the quality theme that presented a previous knowledge of 20 %, learning of 83.5 % and 75.6 % retention; The subjects of drying and preserved the best perception, considered as simple, applicable useful and understandable, while quality was considered complicated, complex, irrelevant but useful. Finally,

1 Escuela de Ingeniería Forestal, Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.

2 Laboratorio de Ecofisiología Forestal y Aplicaciones Ecosistémicas (Ecoplant). Cartago, Costa Rica.

\* [jcvalverde@tec.ac.cr](mailto:jcvalverde@tec.ac.cr). Autor de correspondencia.

it was found that drying and preserving learning should be a 50-50 % combination between theory and practice; while the quality should be 25-75 % theory-practice.

**Keywords:** active education, passive education, learning, forestry.

## INTRODUCCIÓN

En América Latina la madera se ha constituido como un material comúnmente usado para el desarrollo de edificaciones habitacionales, mueblería, estructuras recreativas, entre otros (García *et al.*, 2019). Se trata de un material que se caracteriza por ser de fácil adquisición, con propiedades físicas y mecánicas que permiten tener una trabajabilidad amplia, con un costo accesible y adaptable a las condiciones climáticas de la región (Bakar y Kumar, 2019). Sin embargo, existe un desconocimiento generalizado sobre su correcto uso (Estriegana *et al.*, 2019). Leal Filho *et al.* (2018) mencionan que la utilización exitosa de la madera en construcción se asocia al conocimiento del usuario en cuanto a las propiedades y características del material que adquiere, sus ventajas y desventajas y con ello define el uso óptimo del material.

El proceso de transferencia de conocimiento en tecnología de la madera generalmente ha sido limitado, se ha desarrollado de forma empírica, con conceptos generales y en algunos casos ambiguos (Sinakou *et al.*, 2018), con sistemas de aprendizaje formados a partir de experiencias propias del usuario y con técnicas de prueba y error de resultados. El conocimiento técnico ha sido limitado, por lo general, para el consumidor final debido a un desconocimiento de tecnicismos, unidades de medida y practicidad de la información, lo que ha reducido el uso de la madera en múltiples áreas (Beverelli *et al.*, 2017; Leal Filho *et al.*, 2018), aspecto que es diferente en otros materiales más homogéneos como el concreto o el acero (Torkar y Krašovec, 2019). Por ello, es necesario

el desarrollo de sistemas de aprendizaje que generen una transferencia eficiente de técnicas, tecnologías y elementos fundamentales de uso de la madera (Bakar y Kumar, 2019).

Los sistemas de aprendizaje habitualmente se han enfocado en dos líneas: pasivo y activo (Gutsch *et al.*, 2019). El aprendizaje pasivo consiste en un proceso de transferencia teórico en el que el usuario desarrolla observaciones e hipótesis del conocimiento transmitido a través de ejemplos, explicaciones y teoría; pero, en el proceso, el conocimiento es completamente sistematizado en presentaciones, trabajos de revisión o discusiones (Torkar y Krašovec, 2019). En cambio, el aprendizaje activo es un proceso en el cual se desarrollan prácticas, el usuario aprende conocimiento a través de experimentación, observación, interactuando con objetos y materiales que permitirán crear un entendimiento de los conceptos transmitidos (Zazo-Muncharaz *et al.*, 2015; Estriegana *et al.*, 2019). Las tendencias actuales de aprendizaje buscan establecer un vínculo entre el aprendizaje activo y el pasivo, con el fin de que el usuario se empodere del conocimiento, pueda utilizarlo y adaptarlo a situaciones reales, creando con ello receptibilidad neurológica, capacidad de asimilación, conciencia de entendimiento y capacidad de retención de información (Camacho-Cornejo *et al.*, 2017).

La transferencia de conocimientos en ciencias forestales presenta una serie de retos y limitaciones en su proceso de formación. Aspectos como el grado de educación, capacidad receptiva a la retroalimentación y corrección, así como interés y preconcepción previa del usuario a ser capacitado limitan en muchos casos que la transferencia sea eficiente y efectiva (Gutsch *et al.*, 2019). En un estudio desarrollado por Post *et al.* (2019) sobre procesos de educación en manejo sostenible se identificó que la falta de interés previa a la capacitación en conjunto con pocas habilidades blandas para el trabajo en equipo se convirtió en la mayor limitación en el éxito de la transferencia de conocimientos. Además, la retención

de conocimiento disminuyó por dificultades del equipo de trabajo en cuanto a motivación y experiencias previas. Por su parte, [Neroni et al. \(2019\)](#) denotan que la precepción previa en temas de viverización y manejo de especies tiende a disminuir la viabilidad del material y con ello se generan pérdidas económicas, por lo que es necesario disponer de conocimientos previos sobre habilidades y tipo de aprendizaje óptimo de los grupos a capacitar.

En el caso específico de instituciones del Estado, el proceso de formación y transferencia en tecnología de la madera es esencial como método para estimular la demanda de la madera en este sector. [Beverelli et al. \(2017\)](#) indican que la demanda de madera en la parte gubernamental es fundamental para procesos de mitigación de emisiones de CO<sub>2</sub>, estimulación del mercado interno y sustentabilidad el desarrollo constructivo. Por lo cual, el presente estudio tuvo como objetivo analizar perceptualmente la transferencia y eficiencia de conocimiento en tecnología de la madera a instituciones estatales en Costa Rica.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Temáticas desarrollados y grupo de estudio

Se abordaron tres temáticas de aprendizaje que fueron definidas por [Silva et al. \(2011\)](#): secado, definido por el proceso en el cual se reduce el contenido de humedad de la madera; preservado (definido como el proceso en que se aplican químicos para aumentar la durabilidad del material en el tiempo); y normas de calidad de la madera (Inte C98:2011), terminología de maderas (Inte 04-07-02-2014, 2014 e Inte C99:2014), para madera aserrada para uso general (INTE 06-07-01-2011, 2011). Se utilizaron como ejemplos 10 especies forestales (*Acacia mangium* Willd., *Alnus acuminata* Kunth., *Pochota fendleri* (Seem.) W.S. Alverson & M.C. Duarte., *Cupressus lusitánica*

Mill., *Gmelina arborea* Roxb., *Swietenia macrophylla* King, *Tectona grandis* L. f., *Terminalia amazonia* (J.F. Gmel.) Exell, *Terminalia oblonga* (Ruiz & Pav.) Steud. y *Vochysia guatemalensis* Donn. Sm.). Estas son usadas actualmente en proyectos de reforestación comercial, también son tenidas en cuenta en el manejo de bosques naturales y en el desarrollo de productos maderables. En las temáticas se abarcaron aspectos como los tipos de secado y preservado existentes, aplicabilidad de la normativa, sus características, ventajas y desventajas; además de la existencia de normas que los evalúen y como se ponen en funcionamiento estas en sistemas productivos.

El proceso de aprendizaje se realizó con tres proveedurías de instituciones estatales del país y se dirigió a grupos con un promedio de 15 participantes, con edades entre los 25 a 50 años, de ambos géneros, con formación en ingeniería, arquitectura, construcción, administración o afines, con conocimiento mínimo en ciencias forestales o de implementación de la madera en usos múltiples. El proceso de selección de dichos participantes se dio en función de su disposición a participar en todas las actividades del curso y estar ligados en actividades laborales que vincularan los conocimientos en los temas.

### Proceso de aprendizaje implementado

Se puso en marcha un sistema de aprendizaje de tipo significativo-observacional ([Berasategi et al., 2016](#)), el cual consistió en dos etapas: la primera de aprendizaje pasivo, enfocada en la impartición de clases magistrales sobre terminologías y conceptos básicos en los temas de secado, preservado de madera y calidad visual de la madera. La segunda fase se fundamentó en el desarrollo de aprendizaje activo, conformado por actividades grupales prácticas en las que se aplicaba el proceso de evaluación y operación del secado y preservado de la madera, así como una guía supervisada del control y evaluación de la calidad de la madera.

## Análisis perceptual

El análisis de percepción de cada una de las tres temáticas analizadas se desarrolló con parejas de adjetivos opuestos. Los adjetivos calificativos se seleccionaron con el fin de entender el grado de evolución en conocimiento de cada temática y, a su vez, dimensionar los puntos de mejora y elementos que deben ser replanteados. Las parejas de adjetivos se ubicaron de forma indirecta en las preguntas pre, post y luego de 30 semanas post curso. Las parejas de adjetivos fueron: simple-complejo, interesante-aburrido, entendible-inentendible, útil-inútil, aplicable-inaplicable, práctico-complificado, explicable-inexplicable. En cada encuesta se realizaron cuatro preguntas en las que estuvieron implícitas las parejas de adjetivos, con el fin de tener una muestra significativa durante el estudio.

## Evaluación del aprendizaje

Se desarrolló en tres fases: la primera se aplicó previo a la impartición del conocimiento de cada una de las temáticas; la segunda se realizó una vez implementada la lección activo-pasiva de cada tema; y la tercera se desarrolló 30 semanas después de la finalización del curso. Estas evaluaciones se hicieron al mismo grupo de estudio y los aspectos considerados fueron:

- I) Conocimiento básico del tema: conocimiento de definiciones y conceptos base, utilidad de definiciones en licitaciones e impacto de la temática en la aplicabilidad de la madera.
- II) Aplicación real de las temáticas en las actividades laborales: entendimiento práctico de conceptos, relación de conocimientos para explicar casos y limitaciones de los tecnicismos para la toma de decisiones.
- III) Facilidad de obtención de conocimiento de las temáticas por cuenta propia: rangos de aceptabilidad de maderas, fuentes de comparación de datos y fuentes de consulta de aclaración de dudas o información extra.
- IV) Consideración de relevancia de la temática en el proceso de desarrollo de licitaciones: elementos que se consideran importantes tener en cuenta en la actividad laboral, variables desconocidas que cree son útiles e impacto de la mejora en la licitación con el conocimiento adquirido (CA).
- V) Consideración del grado de dificultad de la temática: problemas de entendimiento, limitaciones de aplicabilidad y dificultad para transmitir conocimiento a segundas personas.
- VI) Interés de aprender las temáticas para uso en licitaciones: empatía con el CA, posibilidad de aplicar el nuevo conocimiento en las actividades laborales y posibilidad de aumentar el CA por interés personal.

## Análisis estadístico

En primer lugar, se hizo una caracterización previa del curso a partir de un análisis descriptivo de conocimientos y habilidades prácticas de la temática, interés de aprendizaje y percepción de dificultad. Para definir si existía significancia en los resultados se realizó un análisis de varianza de una vía (Andeva), en el caso de presentar diferencias significativas en los resultados se aplicó la prueba de Tukey. La estimación del CA se desarrolló con los datos adquiridos del precurso, postcurso y 30 semanas luego del post curso, con lo que se generó la ecuación 1 (Camacho-Cornejo *et al.*, 2017) en la cual conforme el valor del CA tienda a 100 la información cuantificable asimilada es mayor.

$$CA (\%) = ((VC_{Pas} + VC_{Act})/2) \cdot 100 \quad (1)$$

donde, CA es el conocimiento adquirido (%),  $VC_{Pas}$  es el valor de conocimiento pasivo y  $VC_{Act}$  es el valor de conocimiento activo.

Los valores de VC activo y pasivo se generaron a partir de la ecuación 2, la cual se obtuvo de estudios previos de Camacho-Cornejo *et al.* (2017) con productores maderables de Costa Rica.

$$VC_{Act/Pas} = CP * 0.1 + AA_{Act/Pas} * 0.25 + CRC_{Act/Pas} * 0.15 \quad (2)$$

donde, VC es el valor de conocimiento activo o pasivo, CP es el conocimiento previo, AA es el aprendizaje adquirido activo o pasivo y CRC es la capacidad de racionamiento adquirido (conocimiento realmente aprendido).

La determinación de las curvas de capacidad teórica de retención (CTR) de aprendizaje en función del porcentaje de información suministrada (tanto activa como pasiva) se realizó en la encuesta postcurso, pues se consideró un momento oportuno para la evaluación por lo recién de la transferencia del conocimiento. En la encuesta se aplicaron preguntas cuyo fin fue entender cuánta era la capacidad máxima de asimilación del conocimiento teórico y práctico y con ello definir los puntos de aprendizaje máximo de cada temática. Para ello se realizó la prueba no paramétrica de Siegel-Tukey para comparación de dos paquetes de información y definir el grado de similitud.

Se procuró que el análisis perceptual de los cursos fuese no paramétrico. A cada una de las ocho parejas de adjetivos evaluados pre, post y 30 semanas luego del post curso se les aplicó la prueba de Kuiper para determinar el grado de distribución y relación entre los valores estimados en cada adjetivo y así estimar las diferencias entre las tres etapas. Además, se realizó un análisis tipo Sann (Analysis/Deployment) a partir del principio de clasificación de VC activo y pasivo; de igual modo, se simuló en combinaciones de 0-100 %, 25-75 %, 50-50 %, 75-25 % y 100-0 % (aprendizaje activo-pasivo, respectivamente), con ello se generaron matrices de funcionalidad, dificultad y retención del conocimiento que definiera la mezcla óptima de conocimiento teórico-práctico de cada temática evaluada.

Finalmente, a todas las encuestas se les aplicó un análisis de Cronbach para determinar la fiabilidad y eliminar las preguntas que generaron datos erróneos o atípicos, siendo el valor mínimo de aceptación 0.80. Los análisis estadísticos se realizaron con los programas Statistica versión 3.1

(Statsoft, 2015), con un nivel de significancia de 0.05.

## RESULTADOS

### Caracterización previa del grupo al proceso de aprendizaje

La caracterización previa de los grupos de estudio (tabla 1) mostró conocimientos distintos en cada una de las temáticas analizadas. Se identificaron dos agrupaciones de similitud, la primera conformada por los temas de secado y preservado, y una segunda por la norma de calidad. Las variables de conocimiento básico del tema, aplicación de las temáticas y facilidad para conseguir información que disponía el grupo fue significativamente mayor con secado y preservado (superior al 55 %), comparado con el conocimiento en la norma de calidad que fue menor al 20.5 %. El grupo de estudio prácticamente no contó con conocimiento suficiente sobre aspectos básicos, aplicación y consecución de información de normas de calidad de la madera; un tema el cual es considerado como totalmente nuevo.

De igual manera, con las variables de consideración de relevancia de la temática y grado de dificultad se encontró que el tema de normas de calidad presentó una predisposición distinta; mientras que el tema de secado y preservado se consideró significativamente más importante (promedio de 79.67 %) y significativamente menos complejo (promedio de 47.83 %), en comparación con la norma de calidad, la cual se consideró poco importante y complicado (69.11 % y 85.77 %, respectivamente). Finalmente, no se encontraron diferencias significativas entre los tres temas en cuanto a la concepción de interés de estas, siendo en promedio del 83.34 %.

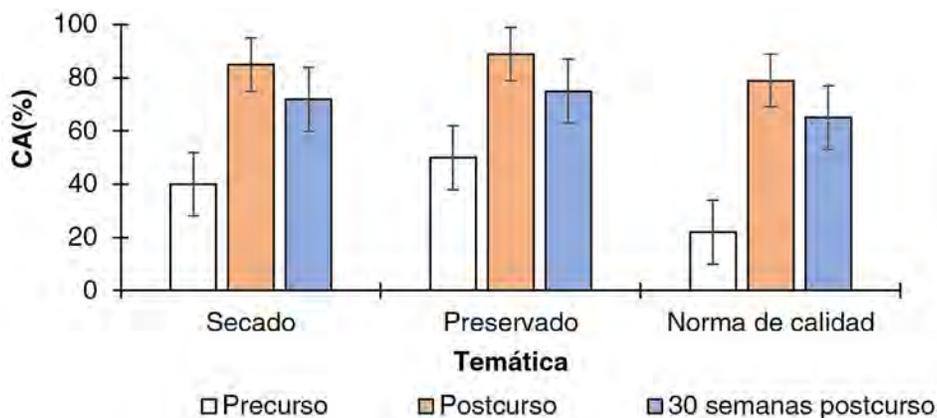
### Análisis del CA y determinación de curvas de máximo aprendizaje

Se determinó el CA (figura 1), el cual varió significativamente en cada temática desarrollada.

**Tabla 1.** Valores medios de los parámetros considerados en la línea base de conocimientos del grupo de estudio aplicado en tres temáticas forestales al personal de instituciones estatales en Costa Rica

| Parámetro evaluado   | Temática         | Valor perceptual           |
|--|------------------|----------------------------|
| Conocimiento básico del tema   | Secado           | 62.61 <sup>a</sup> (9.44)  |
|  | Preservado       | 58.50 <sup>a</sup> (10.10) |
|  | Norma de calidad | 20.20 <sup>b</sup> (12.13) |
| Aplicación real de las temáticas en las actividades laborales                          | Secado           | 55.80 <sup>a</sup> (8.99)  |
|  | Preservado       | 50.11 <sup>a</sup> (9.15)  |
|  | Norma de calidad | 18.80 <sup>b</sup> (10.88) |
| Facilidad de obtención del conocimiento de las temáticas por cuenta propia             | Secado           | 55.08 <sup>a</sup> (8.22)  |
|  | Preservado       | 62.44 <sup>a</sup> (9.10)  |
|  | Norma de calidad | 16.88 <sup>b</sup> (7.88)  |
| Consideración de relevancia de la temática en el proceso de desarrollo de licitaciones | Secado           | 80.11 <sup>a</sup> (10.01) |
|  | Preservado       | 79.22 <sup>a</sup> (9.88)  |
|  | Norma de calidad | 69.11 <sup>b</sup> (7.89)  |
| Consideración del grado de dificultad de la temática                                   | Secado           | 48.99 <sup>a</sup> (10.33) |
|  | Preservado       | 46.66 <sup>a</sup> (12.22) |
|  | Norma de calidad | 85.77 <sup>b</sup> (9.00)  |
| Interés de aprender las temáticas para uso en licitaciones                             | Secado           | 80.28 <sup>a</sup> (8.77)  |
|  | Preservado       | 83.89 <sup>a</sup> (8.90)  |
|  | Norma de calidad | 85.85 <sup>a</sup> (9.12)  |

Valores entre paréntesis representa la desviación estándar; letras diferentes indican diferencias significativas con un  $\alpha=0.05$ .



**Figura 1.** Conocimiento adquirido (CA) en la etapa de precurso, postcurso y 30 semanas luego del postcurso con tres temas de aprendizaje forestal a los grupos de personas que forman parte de instituciones estatales en Costa Rica.

Con el tema de secado el CA previo al curso fue significativamente menor (40.0 %) y aumentó a más del doble (82.5 %) posterior al curso, con una retención de conocimiento del 78.6 %; la cual no mostró diferencias significativas con la evaluación

postcurso, pues se obtuvo una retención de conocimiento elevada. Caso similar presentó la temática de preservado, el CA precurso fue del 43.5 %, posterior al curso se incrementó significativamente a un 87.6 % con una retención en 30 semanas

del 75.9 %; valor estadísticamente no significativo al obtenido en postcurso, siendo una retención de conocimiento elevada.

Finalmente, en relación con la calidad visual de la madera se evidenció un CA muy bajo, de apenas el 24.7 %, el cual una vez impartido el curso aumentó al 80.4 %; pero, se presentó una disminución significativa de retención del 70.6 %. Este es un valor moderado pero similar al obtenido por secado y preservado en el mismo periodo de tiempo.

Se determinaron las curvas teóricas de retención (CTR) de conocimiento en función del porcentaje de exposición de información de forma activa y pasiva (figura 2). Para la temática de secado (figura 2a) se obtuvo que la asimilación máxima de conocimiento activo es del 58.9 %, con un CTR máximo del 84.6 %. Sin embargo, posterior a este valor se presentó una pérdida de CTR producto de la incapacidad del grupo meta de asimilar de forma eficiente la información. En el caso del aprendizaje pasivo el punto máximo fue al 73 % con un CTR de 78.8 %, mostrando para la temática de secado que el grupo de estudio presentó una capacidad de asimilar mayor cantidad información pasiva que activa. En el caso del tema de preservado (figura 2b) el comportamiento varió, las curvas de aprendizaje activo y pasivo mostraron un comportamiento similar, el CTR aumentó conforme el porcentaje de exposición se acrecentó hasta el intervalo de 55.9 al 59.7 %, alcanzando un CRT máximo de 80.1 % en aprendizaje activo y 77.1 % en aprendizaje pasivo; posterior de dicho rango el CRT tendió a disminuir mostrando en la temática un aprendizaje balanceado entre ambas variables.

Finalmente, con el tema de caracterización visual de la madera (figura 2c) se obtuvieron valores de CRT máximo similares en aprendizaje activo y pasivo de 79.9 %, con la diferencia de que el porcentaje de exposición fue significativamente menor en el aprendizaje pasivo (punto máximo en 42.7 %) con respecto al aprendizaje activo (valor máximo de 57.3 %), siendo una temática en la cual el grupo de estudio mostró mayor adaptación al aprendizaje activo que al pasivo.

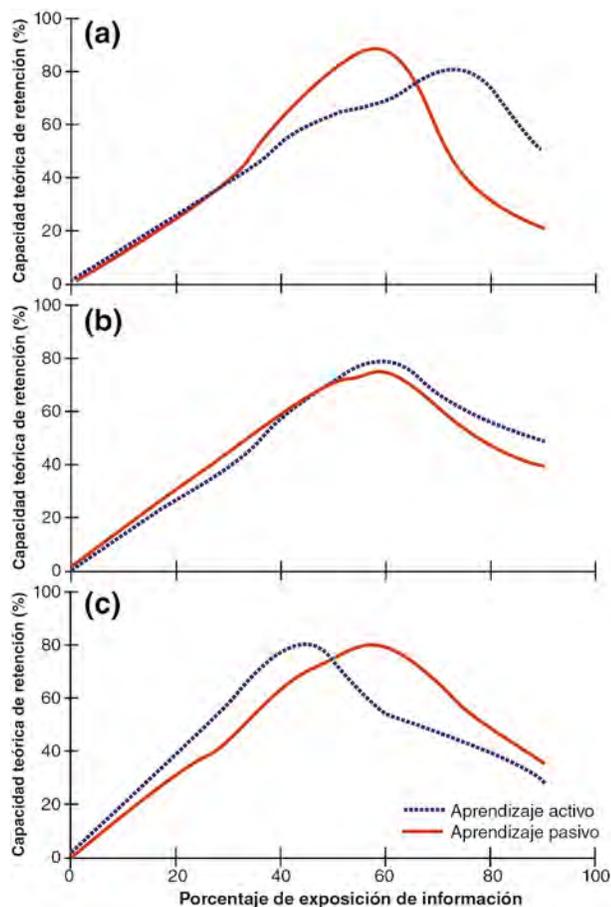
## Percepción del conocimiento obtenido durante el aprendizaje

En la figura 3 se presenta la caracterización perceptual de los cursos pre, post y 30 semanas posteriores al curso. Se determinó de forma general las siguientes características:

- I. La percepción de las tres temáticas mejoró significativamente posterior a la impartición de los cursos. Se consideraron los temas más simples, interesantes, entendibles, útiles y aplicables (figura 3a, 3b, 3c, 3d y 3f).
- II. No se encontraron diferencias significativas en la percepción de practicidad y aplicabilidad (figura 3g y 3h) de los temas entre el pre y postcurso (excepción en practicidad de secado), lo cual indica que se debe mejorar el proceso de transferencia de conocimiento de forma que el receptor tenga más clara la información.
- III. La temática que mostró una mejora en percepción fue la de calidad visual de la madera, la cual mejoró hasta en un 62.2 % con respecto a su concepción previa.
- IV. La temática que mostró menor mejora de percepción fue la de secado, la cual apenas incrementó en un 38.9 %.
- V. Los calificativos de simplicidad, interés y entendimiento fueron los que mostraron mayor incremento, en promedio de un 52.6 %.

## Matriz de optimización de aprendizaje

Producto de la caracterización perceptual y el análisis de la capacidad de retención de las tres temáticas se procedió a desarrollar una matriz de entendimiento de los modelos de aprendizaje (tabla 2). Se analizaron bajo los principios de la funcionalidad, grado de dificultad y capacidad de retención del conocimiento. Se obtuvo para la temática de secado que la mejor combinación funcional es de 50-50 % o 25-75 % entre aprendizaje pasivo y activo.



**Figura 2.** Capacidad teórica de retención en función del porcentaje de exposición de la información de tres temas de aprendizaje forestal a los grupos de personas que forman parte de instituciones estatales en Costa Rica.

Esta combinación es considerada como un sistema muy viable en el que se pueden dominar conceptos teóricos y entender su aplicación con casos reales en el desarrollo de licitaciones; pues, para dicha temática el realizar prácticas en que el usuario aprenda y entienda el impacto del secado es fundamental para que se mejoren las propiedades de la madera.

En el caso del tema de preservación la combinación 50-50 % de aprendizaje pasivo-activo mostró mejores niveles de funcionalidad, menor impacto de dificultad y una capacidad de retención elevada; bajo este proceso equilibrado se

generarían mejores índices de aprovechamiento de conocimiento.

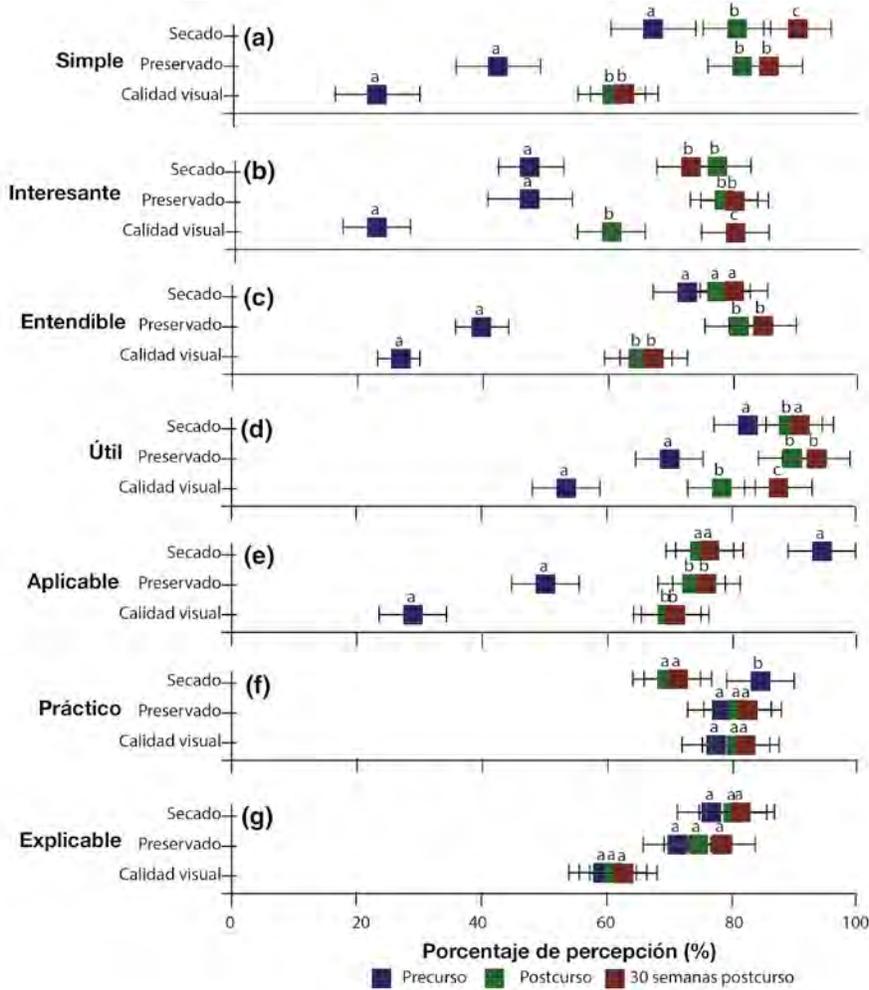
Para la temática de calidad visual se determinó que la combinación de 25-75 % de aprendizaje pasivo-activo mostraría mejores resultados, debido a la facilidad de entender el proceso mediante la aplicación del conocimiento teórico, en el cual el usuario pueda dimensionar la complejidad del tema, analizar casos y tener respuesta a situaciones reales de forma fluida. Esta combinación se mostró como la de mayor funcionalidad con un alto porcentaje de retención de conocimiento y con el menor grado de dificultad.

Finalmente, es importante destacar que cursos totalmente activos o pasivos que únicamente se enfoque en la práctica o teoría causarían una funcionalidad muy baja, la cual es debida a la omisión del contenido o limitación en la transferencia de criterios de análisis serían percibidos como complejos por la poca disponibilidad de información complementaria y presentarían una menor retención, lo que generaría inconsistencias y vacíos en el proceso de aprendizaje.

## DISCUSIÓN

### Caracterización del aprendizaje

Se encontraron diferencias significativas entre la temática de secado y preservado con respecto al tema de calidad visual de la madera. Ello se debe al grado de conocimiento previo que presentaron los grupos, pues para ambos temas era mayor en los grupos. Németh (2014) menciona que los conocimientos previos de una temática que es aprendida tienen influencia directamente en la capacidad de entendimiento y asimilación del conocimiento. Es decir, si el usuario cuenta con bases de conocimiento y, en especial, motivación para ampliar el conocimiento existente, la asimilación aumentará y con ello la retención de información será mejor.



**Figura 3.** Caracterización perceptual en la etapa de precurso, postcurso y 30 semanas luego del postcurso con tres temas de aprendizaje forestal a tres grupos de estudio.

**Tabla 2.** Matriz de funcionalidad, dificultad y retención de conocimiento en combinación de teoría y práctica de tres temáticas de ciencias forestales

|                           |          | Relación de aprendizaje |                          |                          |                          |                   |
|---------------------------|----------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------|
| Funcionalidad             | Temática | Totalmente pasivo       | Pasivo 25 %- Activo 75 % | Pasivo 50 %- Activo 50 % | Pasivo 75 %- Activo 25 % | Totalmente activo |
|                           |          | Secado                  | Nula                     | Parcial                  | Total                    | Total             |
| Preservado                | Leve     | Parcial                 | Total                    | Parcial                  | Nula                     |                   |
| Calidad visual            | Nula     | Leve                    | Parcial                  | Total                    | Nula                     |                   |
|                           |          | Relación de aprendizaje |                          |                          |                          |                   |
| Grado de dificultad       | Temática | Totalmente pasivo       | Pasivo 25 %- Activo 75 % | Pasivo 50 %- Activo 50 % | Pasivo 75 %- Activo 25 % | Totalmente activo |
|                           |          | Secado                  | Alto                     | Moderado                 | Bajo                     | Bajo              |
| Preservado                | Alto     | Moderado                | Bajo                     | Moderado                 | Alto                     |                   |
| Calidad visual            | Alto     | Bajo                    | Moderado                 | Moderado                 | Alto                     |                   |
|                           |          | Relación de aprendizaje |                          |                          |                          |                   |
| Retención de conocimiento | Temática | Totalmente pasivo       | Pasivo 25 %- Activo 75 % | Pasivo 50 %- Activo 50 % | Pasivo 75 %- Activo 25 % | Totalmente activo |
|                           |          | Secado                  | Bajo                     | Moderado                 | Alto                     | Alto              |
| Preservado                | Bajo     | Moderado                | Alto                     | Moderado                 | Bajo                     |                   |
| Calidad visual            | Bajo     | Bajo                    | Moderado                 | Alto                     | Bajo                     |                   |

En el caso de la temática de calidad visual, la cual presentó un conocimiento menor, se evidenció una preconcepción de que sería una temática más compleja, pero con la aplicación de un sistema de aprendizaje activo se generó un aumento en el conocimiento y una retención superior al 70 %. [Kashiwaba et al. \(2012\)](#) remarcan que para temáticas nuevas en las cuales el usuario tenga percepciones negativas o de temor se debe transmitir el conocimiento de forma proactiva, de manera que el usuario se sienta cómodo, animado y empático con el conocimiento.

Con respecto a la capacidad de aprendizaje y retención del conocimiento, la aplicabilidad fue un factor de gran relevancia. [McElwain et al. \(2016\)](#) enfatizan en que un elemento clave para que el usuario aprenda y tenga empatía con la información es la capacidad de aplicarlo en sus actividades diarias. La constante reiteración de un concepto o elemento facilita la capacidad de retención de la información, por esta razón, en varias temáticas el aspecto práctico presentó mejores retenciones en comparación con la parte teórica; lo cual se evidenció en las curvas de CTR ([figura 2](#)). Al implementar en sus actividades laborales los temas de secado y preservado a los usuarios les resulta más fácil asimilar y reintegrar mejor la información práctica que los conceptos teóricos que son menos utilizados o, en algunos casos, dentro los carteles de licitación no se mencionan o explican a profundidad. Por su parte, [Wahlgren et al. \(2016\)](#) y [Schendel y McCowan \(2016\)](#) mencionan que en este tipo de actividades (en las cuales el elemento práctico tiene más reintegración que el elemento teórico) se debe promover en el usuario un análisis crítico de la actividad de forma consciente que reincorpore el concepto teórico y balancee la retención de información.

Otro factor que es mencionado por [Kashiwaba et al. \(2012\)](#) es la relación funcionalidad-tiempo. Este concepto se basa en la capacidad de desarrollar el CA en el tiempo ([Prisăcariu, 2014](#)), pues conforme el tema que se imparte sea funcional y aplicable ([figura 3](#))

el manejo de la temática será mejor, se disminuirá la tasa de error conceptual y presentará mayor fluidez neuronal en el momento de aplicar el conocimiento. La poca relación de funcionalidad-tiempo provoca que el conocimiento se pierda en el tiempo y su potencialidad de uso disminuya, lo cual ahonda la imposibilidad de mejorar la capacidad de retención. [Cakula et al. \(2015\)](#) destacan en este aspecto que temas complicados o de percepción compleja deben ser explotados en funcionalidad para mantenerse en el tiempo, de lo contrario la retención será mínima. Razón por la cual en el tema de la norma de calidad se muestra menores valores de aprendizaje, menor retención y mayor pérdida de retención y expectativa de aprendizaje. Además, el sistema empleado, en conjunto con su poca implementación laboral, genera funcionalidad baja en el tiempo; causando así el no ser recordado de forma adecuada por los usuarios. Por todo esto, la combinación activa-pasiva de 75-25 % mejoraría la aplicabilidad y uso del conocimiento al momento de evaluar materiales de licitaciones o controles de calidad. Lo contrario se evidenció con los temas de secado y preservado de la madera, los cuales por su impacto y uso constante en sus actividades laborales tienden a ser funcionales en el tiempo.

### Efectos de la percepción en la capacidad de retención

Las tres temáticas mostraron mejoría significativa de la percepción posterior a la realización de proceso de aprendizaje y 30 semanas luego del mismo. El incremento se debe al principio de corrección de preconcepciones ([Neroni et al., 2019](#)), en el que la explicación teórica complementada por prácticas, casos y ejemplos puede corregir la precognición o ambigüedades que existían hacia los temas por desconocimiento o implementación de fuentes de errores de conocimiento. [Gutsch et al. \(2019\)](#) destacan que la percepción negativa a procesos de aprendizaje se da por tres factores primordiales:

- I. Miedo, concepción de que el tema será complicado, complejo, difícil de aplicar y con alta exigencia de tiempo.
- II. Fuentes erróneas de información, se da previo al aprendizaje a partir de conocimiento o experiencias de personas cercanas al usuario, lo cual incide en generar una preconcepción o inhibición de vivir lo mismo que las anteriores personas.
- III. Poca capacidad de aprendizaje. El poco interés (combinado con limitaciones neuroquímicas y flexibilidad neuronal) imitan, o en el peor de los casos, impiden el correcto proceso de aprendizaje. Para lo cual, [Estriegana et al. \(2019\)](#) destacan que se deben desarrollar estrategias activo-pasivas en las que la percepción sea positiva, se estimule a resolver problemas de forma creativa, se maneje la presión en forma razonable y se dé un estímulo al usuario para continuar el aprendizaje posterior a la capacitación. De modo que, conforme mayor sea el dinamismo y menor la presión o regulación del conocimiento el aprendizaje se incrementará.

### Limitaciones del aprendizaje en conocimientos forestales

Si bien las tres temáticas evaluadas presentaron comportamientos distintos ([tabla 2](#)), que se mostraron en los diferentes niveles de retención del conocimiento y en el impacto de la relación de aprendizaje activo y pasivo, también se evidencia un grado de similitud a nivel perceptual y se puede decir que son temas complementarios. [Berasategi et al. \(2016\)](#) destacan temas de aprendizaje paralelos que se puedan correlacionar en lecciones educativas que deben mostrarse mediante sistemas de aprendizaje neuronal, en los que se asocie cada contenido, se busque correlacionarlos y que el usuario los entienda en un solo conjunto articulado.

En la educación en temáticas forestales se debe evitar un desgaste cognitivo producto de procesos

de educación estáticos, poco participativos o creativos, en los que los usuarios sientan que los conceptos o actividades realizadas son complicadas, poco útiles ni funcionales. En el caso de este proyecto los temas de secado, preservado y normas de calidad de la madera se presintieron como temas similares, por lo cual el sistema de aprendizaje usado fue funcional entre sí. Sin embargo, la percepción por parte de los usuarios no fue conforme, pues el tema de secado y preservado son paralelos por su común aplicabilidad en las actividades labores; en cambio, la norma de calidad no presenta el mismo patrón ([figura 2](#)) ya que mostró mayor complejidad y un conocimiento previo bajo, así como la necesidad de aumentar el aprendizaje pasivo más que el activo. [García et al. \(2019\)](#) mencionan que en estos casos se deben hacer modificaciones y analizar la carga de conceptos teóricos y prácticos, así como analizar las actividades prácticas desarrolladas y el manejo conceptual implementado; ya que temas con percepción variable no garantizan la utilización de los conceptos adquiridos a largo plazo y muestran pérdidas de retención superiores al 70 %.

Por tanto, es necesario hacer un análisis y replanteamiento de las técnicas empleadas con el fin de mejorar el aprendizaje y capacidad de retención del conocimiento, ya que los sistemas tradicionales no garantizan un efecto sustancial en el aumento del conocimiento a los grupos meta ([Camacho-Cornejo et al., 2017](#)). [Zazo Muncharaz et al. \(2015\)](#) comentan la necesidad de mejorar aspectos como: el reforzamiento extensionista, el manejo de conceptos claros, la paridad entre conceptos teóricos y prácticos, la eliminación de evaluaciones subjetivas y enfocarse en el desarrollo de sistemas de aprendizaje que permitan definir las fortalezas y debilidades del proceso empleado a partir de los cuales se pueda mejorar por medio de una constante actualización y reforzamiento de conceptos forestales adquiridos. Esto con el fin de mejorar la capacidad y retención del conocimiento de los usuarios meta en el tiempo.

## CONCLUSIONES

La aplicación del sistema de aprendizaje activo-pasivo en tres temáticas forestales mostró respuestas distintas. Con el tema de secado se presentó una mayor retención (superior al 65 %) y un desarrollo de aprendizaje, lo cual incidió en que el sistema puesto en marcha se interpretara como muy útil y simple. Caso similar ocurrió con la temática de preservado, la cual mostró un aprendizaje con una retención superior al 62.9 % y una percepción final del tema como complicado pero muy útil. Estos resultados se debieron al conocimiento previo de los usuarios, en conjunto con la posibilidad de aplicación de conceptos en actividades diarias que incidieron en que estos conceptos sean funcionales en el tiempo.

Contrario a lo mencionado, la temática de norma de calidad presentó menor funcionalidad con el sistema de aprendizaje utilizado, lo que causó menor retención del conocimiento (60.0 %) y una percepción variable del curso debido a que su conocimiento previo fue bajo (al no aplicarse en sus labores diarias) y su funcionalidad no fue la óptima. Por ello, es necesario hacer revaloraciones o cambios en el sistema empleado para aumentar la retención y funcionalidad del tema.

Con este estudio se muestra la necesidad de analizar y adaptar el contenido forestal al usuario meta. Adicional a ello, que el conocimiento sea lo más claro, con la posibilidad de ser aplicado por el usuario y que pueda usarlo en sus actividades. Por último, se debe tener un control en el proceso de transferencia en el que se conozcan los puntos débiles de cada tema y, con ello, se desarrollen estrategias didácticas para mejorar la retención del conocimiento.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión (VIE), a la Unidad de Vinculación Forestal y al Laboratorio de Ecofisiología Forestal y

Aplicaciones Ecosistémicas (Ecoplant) por el apoyo logístico y presupuestario para la realización del proyecto.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión (VIE), a la Unidad de Vinculación Forestal y al Laboratorio de Ecofisiología Forestal y Aplicaciones Ecosistémicas (Ecoplant) por el apoyo logístico y presupuestario para la realización del proyecto.

## CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés.

## CONTRIBUCIÓN DE CADA AUTOR

L.V.F. contribuyó con la redacción de manuscrito. J.C.V. en la redacción manuscrito y análisis estadísticos. D.C.C., C.S.G. y A.B.J. con la impartición de conocimientos y realización de la evaluación de pruebas de conocimientos.

## REFERENCIAS

- Bakar, F. y Kumar, V.** (2019). The use of humour in teaching and learning in higher education classrooms: Lecturers' perspectives. *Journal of English for Academic Purposes*, 40, 15-25. <https://doi.org/10.1016/j.jeap.2019.04.006>
- Berasategi, N., Alonso, N. y Roman, G.** (2016). Service-learning and Higher Education: Evaluating Students Learning Process from their Own Perspective. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 228, 424-429. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2016.07.065>
- Beverelli, C., Fiorini, M. y Hoekman, B.** (2017). Services trade policy and manufacturing

- productivity: The role of institutions. *Journal of International Economics*, 104, 166-184. <https://doi.org/10.1016/j.jinteco.2016.11.001>
- Cakula, A., Jakobson, S. y Florea, M.** (2015). Automated Learning Support System for Adult Education Institutions and Enterprises. *Procedia Computer Science*, 77, 191-198. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.12.383>
- Camacho-Cornejo, L., Salas-Garita, C., Vargas-Fonseca, L. y Valverde-Otárola, J.** (2017). Medición del conocimiento adquirido en tecnología de la madera por industriales forestales en Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, 30, 35-46. <https://doi.org/10.18845/tm.v30i3.3271>
- Estriegana, R., Medina-Merodio, J. y Barchino, R.** (2019). Student acceptance of virtual laboratory and practical work: An extension of the technology acceptance model. *Computers y Education*, 40, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.02.010>
- García, E., Moizer, J., Wilkins, S. y Haddoud, M.** (2019). Student learning in higher education through blogging in the classroom. *Computers y Education*, 136, 61-74. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.03.011>
- Gutsch, M., Larondelle, N. y Haase, D.** (2019). Of bugs and men: How forest pests and their management strategies are perceived by visitors of an urban forest. *Urban Forestry y Urban Greening*, 41, 248-254. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.03.00>
- Inte 04-07-02-2014** (2014). *Uso general de la madera Inte CTN 06*. nteco.
- Inte 06-07-01-2011** (2011). *Madera estructural –Clasificación en grados estructurales para la madera aserrada mediante una evaluación visual*. Inteco.
- Kashiwaba, K., Kozawa, K. y Uchida, H.** (2012). Evaluation of learning environment for ESD (Education for Sustainable Development) using activity index of salivary. *Higher Education*, 5, 1087-1090. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-3010-6\\_229](https://doi.org/10.1007/978-94-007-3010-6_229)
- Leal Filho, W., Raath, S., Lazzarini, B., Vargas, V., de Souza, L., Anholon, R. y Klavins, M.** (2018). The role of transformation in learning and education for sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 199, 286-295. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.017>
- McElwain, A., Finnegan, V., Whittaker, A., Kerpelman, J., Adler-Baeder, F. y Duke, A.** (2016). Evaluation and lessons learned from an undergraduate service learning course providing youth-focused relationship education. *Evaluation and Program Planning*, 58, 116-124. <https://doi.org/10.1016/j.evalprogplan.2016.06.002>
- Németh, B.** (2014). Research and Development of Adult Education through Higher Education Institutions: A Challenge and Perspective for Better Adult Learning and Education. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 142, 97-103. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.07.594>
- Neroni, J., Meijs, C., Gijssels, J., Kirschner, P. y de Groot, R.** (2019). Learning strategies and academic performance in distance education. *Learning and Individual Differences*, 73, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2019.04.007>
- Post, L., Guo, P., Saab, N. y Admiraal, W.** (2019). Effects of remote labs on cognitive, behavioral, and affective learning outcomes in higher education. *Computers y Education*, 140, 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.103596>
- Prisăcariu, A.** (2014). Approaches of Quality Assurance Models on Adult Education Provisions. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 142, 133-139. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.07.623>
- Schendel, R. y McCowan, T.** (2016). Expanding higher education systems in low- and middle-income countries: the challenges of equity and quality. *Higher Education*, 72, 407-411. <https://doi.org/10.1007/s10734-016-0028-6>
- Silva, W., Silva, L., Silva, C. y Nascimento, P.** (2011). Optimization and simulation of drying processes using diffusion models: application to wood drying using forced air at low temperature. *Wood Science and Technology*, 45, 787-800. <https://doi.org/10.1007/s00226-010-0391-x>
- Sinakou, E., Boeve-de Pauw, J., Goossens, M. y Van Petegem, P.** (2018). Academics in the field of Education for Sustainable Development: Their conceptions of sustainable development. *Journal of Cleaner Production*, 184, 321-332. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.279>

**Statsoft** (2015). Statistica, version 9.0. Londres: Statsoft.

<http://www.statsoft.com>

**Torkar, G. y Krašovec, U.** (2019). Students' attitudes toward forest ecosystem services, knowledge about ecology, and direct experience with forests. *Ecosystem Services*, 37, 1-19.

<https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2019.100916>

**Wahlgren, B., Mariager-Anderson, K. y Sørensen, S.** (2016). Expanding the traditional role of the adult

education teacher—The development of relational competences and actions. *Teaching and Teacher Education*, 60, 303-311.

<https://doi.org/10.1016/j.tate.2016.09.005>

**Zazo Muncharaz, J., de los Rios Carmenado, I. y Rivera, M.** (2015). Education Planning Evolution for Forest Engineering in Spain. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 197, 1710-1715.

<https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.07.224>





UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS



## Predicción de biomasa y carbono en plantaciones clonales de *Tectona grandis* L.f.

### Biomass and carbon prediction in clonal plantations of *Tectona grandis* L.f.

William Fonseca González<sup>1\*</sup>, Carlos Ávila Arias<sup>1</sup>, Rafael Murillo Cruz<sup>1</sup>,  
Marilyn Rojas Vargas<sup>2</sup>

Fonseca-González, W., Ávila-Arias, C., Murillo-Cruz, R. y Rojas-Vargas, M. (2021). Predicción de biomasa y carbono en plantaciones clonales de *Tectona grandis* L.f. *Colombia Forestal*, 24(1), 31-44.

**Recepción:** 20 de febrero 2020

**Aprobación:** 16 de septiembre 2020

#### Resumen

Los modelos matemáticos para predecir biomasa son en la actualidad una opción que facilita y mejora el cálculo de la capacidad de mitigación del cambio climático de un ecosistema, pues generan información fundamental para establecer índices nacionales de almacenamiento de carbono. El objetivo de este estudio fue evaluar la biomasa de los distintos componentes del árbol (hojas, ramas, fuste, raíz) por medio de método destructivo e indirecto para construir modelos predictivos de biomasa y carbono, generados por medio del método de mínimos cuadrados ordinarios, cuyo diámetro normal fue la variable regresora. Las ecuaciones seleccionadas explicaron más del 94 % de la variabilidad observada en biomasa o carbono, con errores de estimados inferiores al 5 %. El fuste aportó el 57.4 % a la biomasa total del árbol y las hojas el 5 %. La fracción de carbono fue muy similar entre los componentes leñosos (ramas-fuste-raíz), variando de 44.9 % a 45.7 % y en las hojas alcanzó el 40.7 %.

**Palabras clave:** alometría, cambio climático, Costa Rica, reforestación, servicios ambientales.

#### Abstract

Mathematical models for biomass and carbon prediction are currently options that facilitate and improves the calculation of the climate change mitigation capacity of an ecosystem, by generating essential information to establish national carbon storage indices. The objective of the study was to evaluate the biomass of the different tree elements (leaves, branches, stem, root) through destructive and indirect methods, to construct predictive biomass and carbon models. The models were developed using the method of ordinary least squares, using the normal diameter as the regressor variable. These equations explained more than 94 % of the variability observed in biomass or carbon, with errors of estimates below 5 %. The stem contributed with 57.4 % to the tree total biomass, and the leaves contributed with 5 %. The carbon fraction was very similar among the woody components (branches -stem-root), which varied from 44.9 % to 45.7 % and in the leaves it reached 40.7 %.

**Key words:** allometry, climate change, Costa Rica, reforestation, environmental services.

1 Instituto de Investigación y Servicios Forestales, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica. Dirección postal 86-3000.

2 Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica. Dirección postal 86-3000. [marilyn.rojas.vargas@una.ac.cr](mailto:marilyn.rojas.vargas@una.ac.cr)

\* [wfonseca@una.ac.cr](mailto:wfonseca@una.ac.cr). Autor para correspondencia

## INTRODUCCIÓN

El cambio climático producido por el calentamiento global es uno de los problemas más serios que afronta la población mundial (Intergovernmental Panel of Climate Change [IPCC], 2013, 2014; Sreejesh *et al.*, 2013); y, desafortunadamente, por más opciones que se presentan para aportar su solución parece imposible a corto plazo. Una de las propuestas se centra en el mejoramiento del manejo de la tierra, pues se ha reportado un sustancial monto de secuestro de carbono tanto en la biomasa como en el suelo, con lo que se convierte en una alternativa real para reducir la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera (Pastian *et al.*, 2000). Por ello, son bastantes las expectativas creadas sobre la función de los ecosistemas forestales como parte de la solución por su capacidad de secuestro de carbono (Basu, 2009; Le Quééré *et al.*, 2012), tanto en su tallo principal, madera, corteza, ramas, follaje y raíces. Lo anterior mantiene la esperanza en algunos grupos de ambientalistas, mientras otros ven como negocio el comercio del carbono. En todo caso, los llamados créditos verdes siguen generando controversia en diferentes sectores de la población; entre otras cosas, por la falta de información sobre la capacidad de secuestro de carbono de un ecosistema dado (Basu, 2009; Merger, 2008) en condiciones ambientales tan cambiantes como en el trópico.

Los bosques artificiales o plantados (plantaciones forestales puras y sistemas agroforestales) también proveen servicios ambientales útiles para la sociedad. En ese sentido, plantaciones jóvenes pueden secuestrar significativas cantidades de carbono atmosférico, mientras que las maduras se convierten en importantes reservorios (Sreejesh *et al.*, 2013). Especies de rápido crecimiento como *Tectona grandis* han tenido gran auge gracias a su madera de excelentes características físico-mecánicas, apta para gran variedad de usos (entre ellos los decorativos), ampliamente difundida en ambientes tropicales y de buen mercado y precio internacional.

En Costa Rica es la especie más plantada con fines de producción forestal; para el año 2017 se reportaron 45 853 ha (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, 2017). Además, es notorio que se realiza mucha investigación con dicha especie en temas como: mejora genética, reproducción, conservación del polen, necesidades nutricionales, etc. No obstante, su capacidad de mitigación del cambio climático en las condiciones actuales de producción (sistemas clonales principalmente) no ha sido un tema prioritario; adicional a ello, dicho potencial varía con respecto al material genético utilizado, el clima y suelo del sitio, así como el manejo realizado al sistema de producción (Sreejesh *et al.*, 2013). Este vacío de información, aunado a la política de C-neutralidad del Estado (Costa Rica, 2009; Kowollik, 2014), motivó la inversión de recursos para obtener datos sobre factores de expansión de biomasa, fracción de carbono en la biomasa y modelos matemáticos para estimar y pronosticar la biomasa y el carbono (todos objetivos de esta investigación). Esta información es básica para facilitar y mejorar la estimación de la reserva de carbono y se convierten, al mismo tiempo, en indicadores nacionales para dictar políticas y tomar decisiones.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

La zona de estudio comprende el Pacífico norte, la zona norte y sur de Costa Rica, en sitios donde se ubican plantaciones establecidas con material clonal. Estos, generalmente, son inferiores a 10 años de edad; también hay de mayor edad con material de semilla seleccionada, pero con muy buen manejo silvicultural. Los sitios se caracterizan por presentar una variación térmica estacional fuerte, con un periodo seco de hasta seis meses; cuya precipitación promedio supera los 3200 mm anuales (1500-2500 mm en el Pacífico norte) y la temperatura media es mayor a 24 °C, elevada luminosidad,

con suelos predominantes del orden Inceptisol, Ultisol y Entisol ([Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica, 2019](#)).

## Evaluación de la biomasa

Dado el alto valor económico de la madera en la cuantificación de biomasa de *T. grandis* se emplearon tres técnicas, descritas a continuación:

- Método destructivo: consiste en derribar el árbol y pesarlo en campo (peso húmedo en kg) cada componente por separado (fuste, ramas, hojas y raíz). Esta práctica es más empleada para árboles de tamaño pequeño, sin valor comercial, o en árboles de porte mayor, pero cuyo propietario permitió subdividirlo en secciones pequeñas para facilitar su peso ([Parada et al., 2010](#)). De cada componente se tomó una muestra de aproximadamente de un kg para determinar la materia seca (a 60 °C durante 72 horas) y su respectiva fracción de carbono ([Fonseca et al., 2009](#)).
- En árboles derribados con madera aprovechable y que no se permitió hacer secciones pequeñas se determinó el volumen en secciones de dos metros con la fórmula de Smalian y, del mismo modo, la biomasa se calculó como el producto del volumen por la densidad específica de la madera ([Chave et al., 2004](#); [Petrokofsky et al., 2012](#); [Chave et al., 2014](#)). La densidad específica usada para la especie fue de 0.54 gr.cm<sup>-3</sup> en función de lo reportado en la literatura ([Castro y Raïgosa, 2000](#); [Rodríguez et al., 2014](#)). La sección no comercial del fuste se pesó en el campo, al igual que el componente de hojas, ramas y raíz. También se recolectaron muestras de biomasa para determinar la materia seca en laboratorio.
- En plantaciones, independientemente de la edad y porte de los árboles en donde el propietario no permitió derribar los árboles, se determinó el diámetro en pie en secciones de dos metros con la ayuda de un dendrómetro modelo Criterion RD 1000. La biomasa del fuste se calculó según

lo indicado en el anterior punto. La biomasa total del árbol (incluida ramas, hojas y raíz) se calculó haciendo uso de factores expansión de biomasa ([Dixon, 1995](#); [Segura et al., 2000](#); [Segura y Kanninen, 2002](#)) calculados para los árboles derribados según lo indicado en los anteriores puntos.

El factor de expansión se utiliza para calcular la biomasa de componentes como ramas, hojas y raíz cuando se usa el método no destructivo. Es el cociente entre la biomasa aérea total y la biomasa del fuste, entre la biomasa del fuste y la biomasa de la raíz ([Fonseca et al. 2009](#); [Segura et al., 2000](#); [Segura y Kanninen, 2002](#)).

A cada árbol, independientemente de la técnica usada para determinar la biomasa, se le midió el diámetro normal a 1.3 m sobre el nivel del suelo (DAP). En cada sitio o plantación se trató de elegir individuos que abarcaran la amplitud diamétrica observada según la edad de la plantación. Para los árboles derribados se extrajo la raíz con una retroexcavadora y pulif (tipo teclé manual que funciona de forma horizontal); posteriormente, se lavó para eliminar componentes como piedra y tierra. Se continuó con el proceso de pesado aproximadamente dos horas después de secadas al aire.

## Determinación de la fracción de carbono en biomasa

La muestra seca de cada componente de biomasa se trituró a 10 micras para determinar la materia orgánica. El análisis de esta se realizó haciendo uso de la metodología propuesta por [Walkley y Black \(1934\)](#).

## Ajuste de modelos

Los modelos se ajustaron mediante el método de mínimos cuadrados ordinarios con el programa estadístico Statgraphcs Centurion XVI. Se ensayaron aproximadamente 20 modelos para predecir la biomasa y el carbono de cada componente del

árbol (hojas, ramas, fuste, raíz), para la biomasa leñosa del árbol (fuste, ramas y raíz) y para el individuo total, usando como variable independiente el diámetro normal (DAP a 1.3 m sobre el nivel del suelo). El rango diamétrico osciló entre 1.1 cm y 47.2 cm.

En la selección de la ecuación de mejor ajuste se tomó como referencia la metodología expuesta por Salas (2002) y Segura y Andrade (2008), considerando los siguientes estadísticos:  $R^2$  (coeficiente de determinación), EEE (error estándar de los estimados), EMA (error medio absoluto), DW (estadístico Durbin Watson), n (tamaño de la muestra), IF (índice de Furnival), E % (error del modelo o sesgo), AIC (criterio de información de Akaike). Además de esto, se calculó el ECM (error cuadrático medio), la DA (diferencia agregada) y el PRESS (la suma de cuadrados de los residuos de los predichos); estos últimos no se muestran en los resultados para simplificar la tabla en la cual aparecen los otros estadígrafos.

## RESULTADOS

### Proporción de biomasa por componente

El alto tamaño de muestra empleado en esta investigación (con un total de 503 observaciones) aseguró la representatividad de los individuos en toda

la amplitud diamétrica observada en las plantaciones evaluadas. El fuste registró el mayor aporte a la biomasa total del árbol (57.4 %), seguido por la raíz y las ramas; por su parte, la contribución de las hojas fue muy baja (5 %). La variabilidad observada entre el aporte porcentual de cada componente a la biomasa total fue mínima, independientemente del tamaño del árbol; ello demuestra la desviación estándar y el error de muestreo, cuyo valor más alto fue de 8.06 % para las hojas (tabla 1).

### Fracción de carbono por componente

Se registraron valores muy similares entre los componentes leñosos evaluados (ramas-fuste-raíz), los cuales variaron entre 44.9 % y 45.7 %, con una fracción de carbono en las hojas de 40.7 %. La variabilidad observada fue muy baja para las hojas, ramas y fuste y un poco más alta en la raíz; lo que sugiere que el cálculo de la fracción de carbono se realizó con bastante precisión, lo anterior reforzado por errores inferiores al 6.8 % (tabla 2). Las ecuaciones para estimar biomasa y carbono (tabla 3) producen variaciones en la fracción de carbono por componente dependiendo del diámetro normal de los árboles. Esta variación es mínima y en promedio representa 0.8; 0,4; -0,1 %, en el fuste, hojas y ramas-raíz, respectivamente; valores que están dentro del margen de error (E %) determinados para los modelos (tabla 3).

**Tabla 1.** Componentes de biomasa utilizados para desarrollar las ecuaciones de biomasa

| Estadístico | Variable Dap (cm) | Biomasa por componente (kg) |                 |                  |                  |                   | Biomasa total |
|-------------|-------------------|-----------------------------|-----------------|------------------|------------------|-------------------|---------------|
|             |                   | Hojas                       | Ramas           | Fuste            | Raíz             | Componente leñoso |               |
| Mínimo      | 1.20              | 0.03                        | 0.09            | 0.33             | 0.13             | 9.2               | 10.71         |
| X ( %)      | 22.37             | 24.06<br>(5.0)              | 73.73<br>(15.3) | 276.36<br>(57.4) | 107.09<br>(22.2) | 457.12<br>(95.0)  | 481.24        |
| Máximo      | 47.20             | 123.62                      | 421.97          | 1590.3           | 603.02           | 2615.12           | 2203.72       |
| SD          | 9.10              | 21.73                       | 65.00           | 237.30           | 91.52            | 309.04            | 314.46        |
| E ( %)      |                   | 8.63                        | 4.15            | 4.07             | 8.06             |                   | 5.8           |

X: promedio, SD: desviación estándar, E (%): error de muestreo.

Entre paréntesis y en negrita el aporte porcentual de cada componente a la biomasa total. El tamaño de la muestra fue de 503.

## Modelos predictivos de biomasa y carbono

La [tabla 3](#) y [figura 1](#) muestran las estimaciones de los parámetros y las estadísticas de bondad de ajuste tanto para el modelo elegido por árbol como por componente. Todas las estimaciones de los parámetros fueron significativas ( $\alpha = 0.05$ ). A pesar de que todos

los modelos registraron buen ajuste en la biomasa total del árbol, en el componente leñoso (fuste y raíz) el valor de  $R^2$  fue ligeramente superior; caso contrario para el EEE, EMA. Igual comportamiento se da en los modelos de carbono, pero con ligeras variaciones en el ajuste ( $R^2$  más bajo), valores de EEE y EMA más altas y cifras de ECM, E (%) y AIC más bajas.

**Tabla 2.** Fracción de carbono (%) en la biomasa

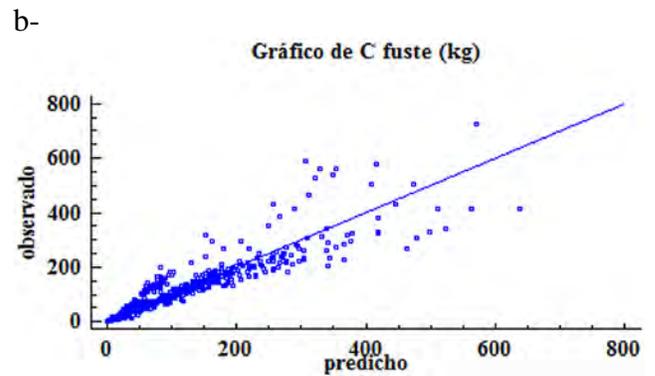
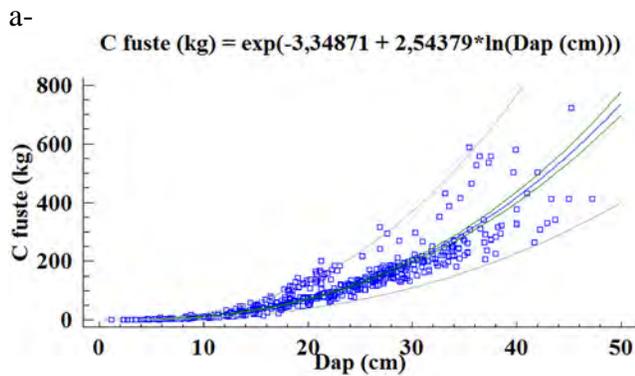
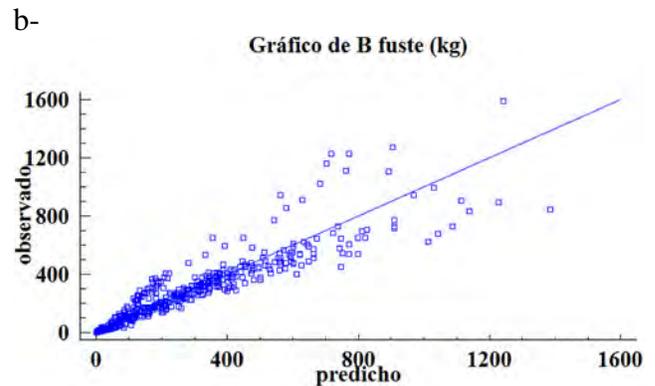
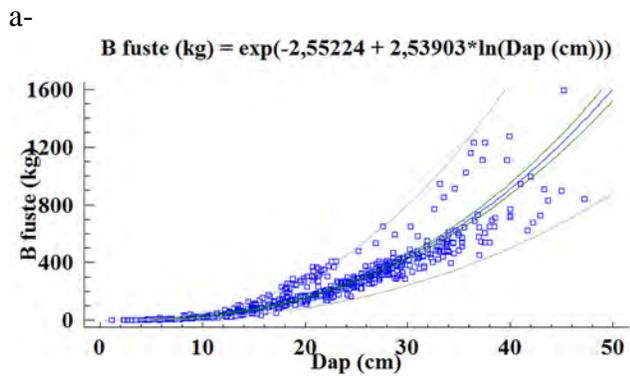
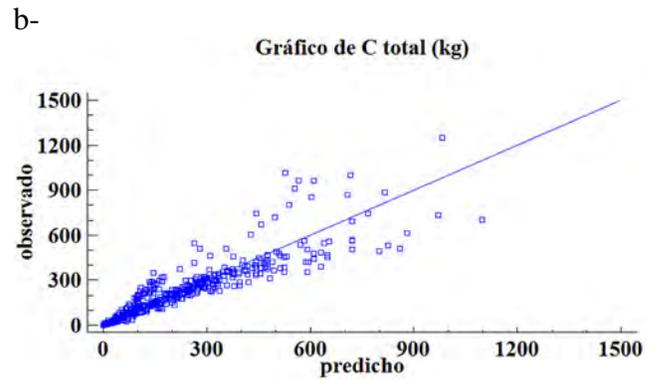
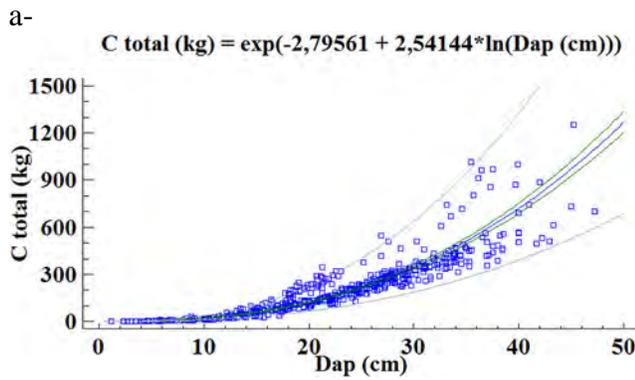
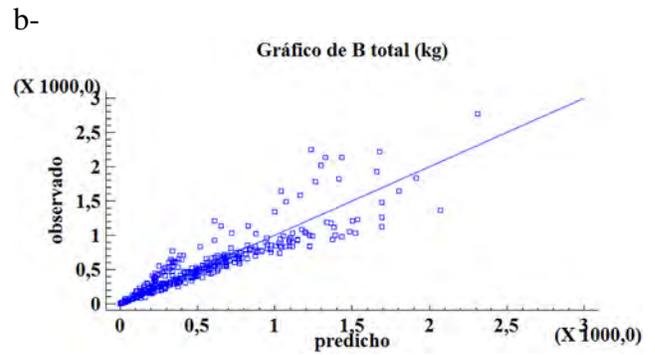
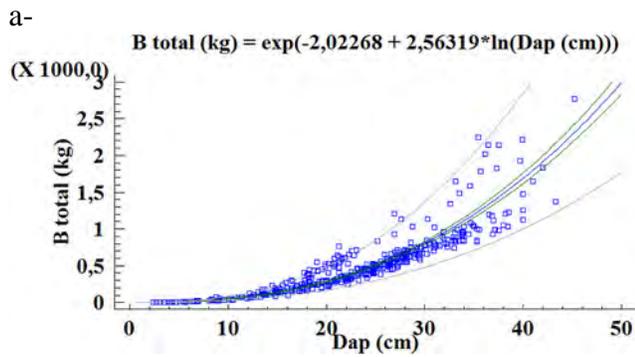
| Estadístico  | Hojas | Ramas | Fuste | Raíz |
|--------------|-------|-------|-------|------|
| <b>n</b>     | 23    | 45    | 46    | 12   |
| <b>X</b>     | 40.7  | 44.9  | 45.4  | 45.7 |
| <b>SD</b>    | 2.7   | 3.1   | 2.9   | 4.9  |
| <b>E (%)</b> | 2.9   | 2.1   | 1.9   | 6.8  |

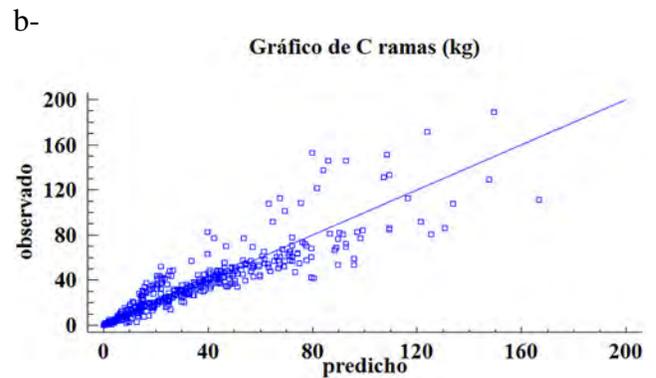
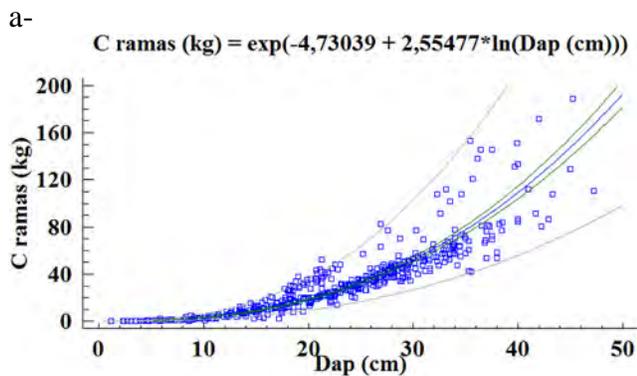
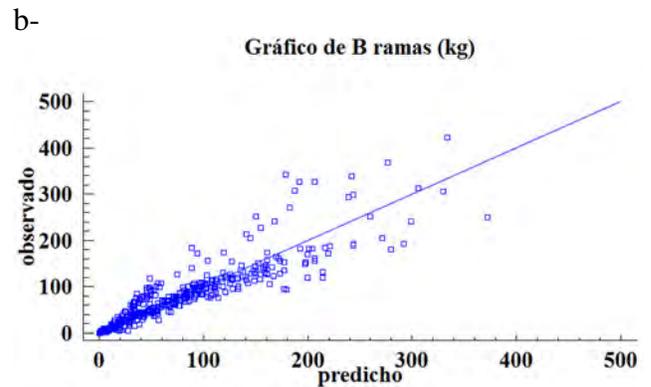
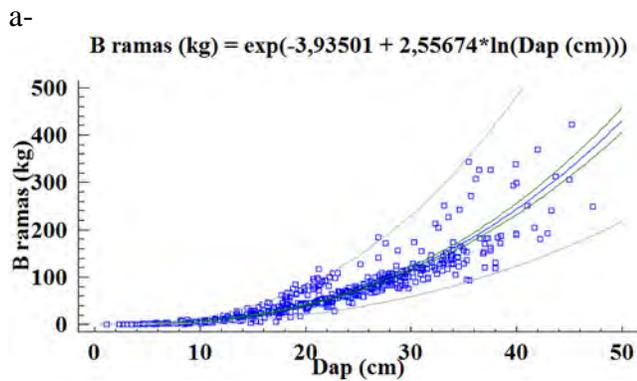
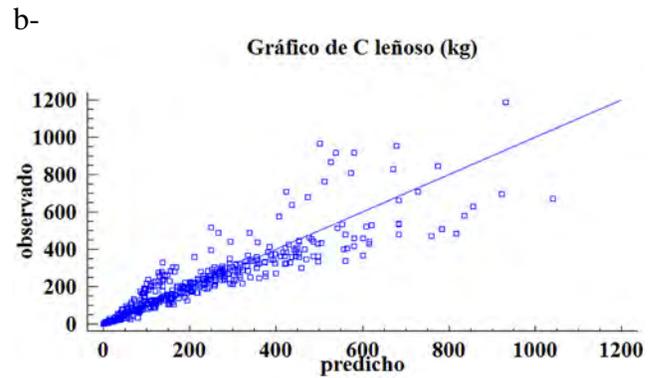
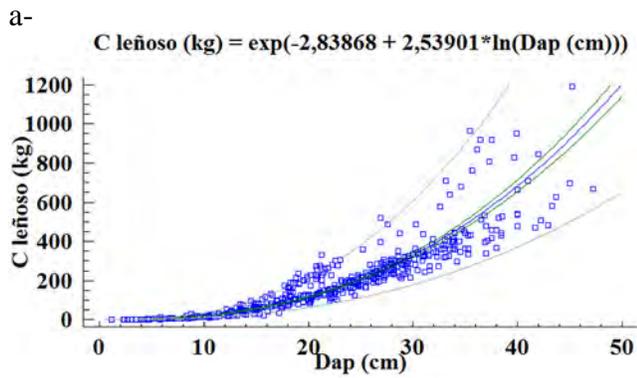
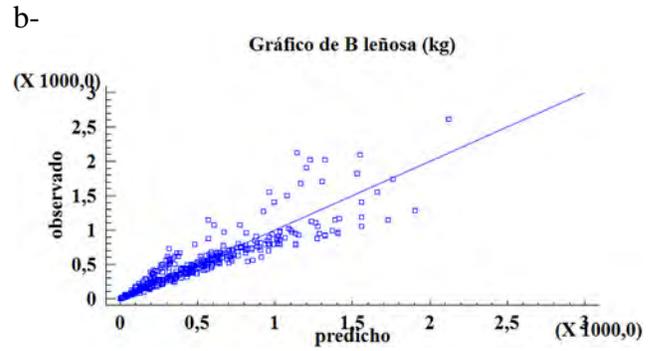
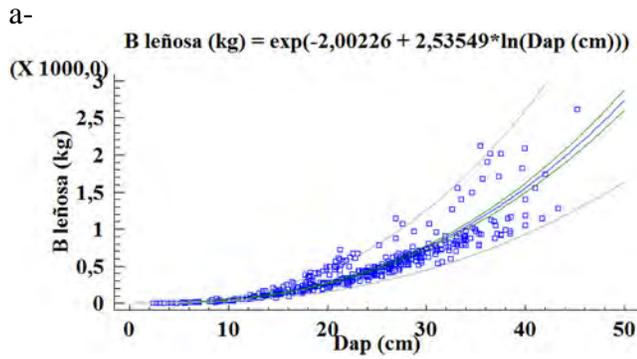
**n:** tamaño de la muestra; **X:** promedio; **SD:** desviación estándar; **E (%):** error de muestreo.

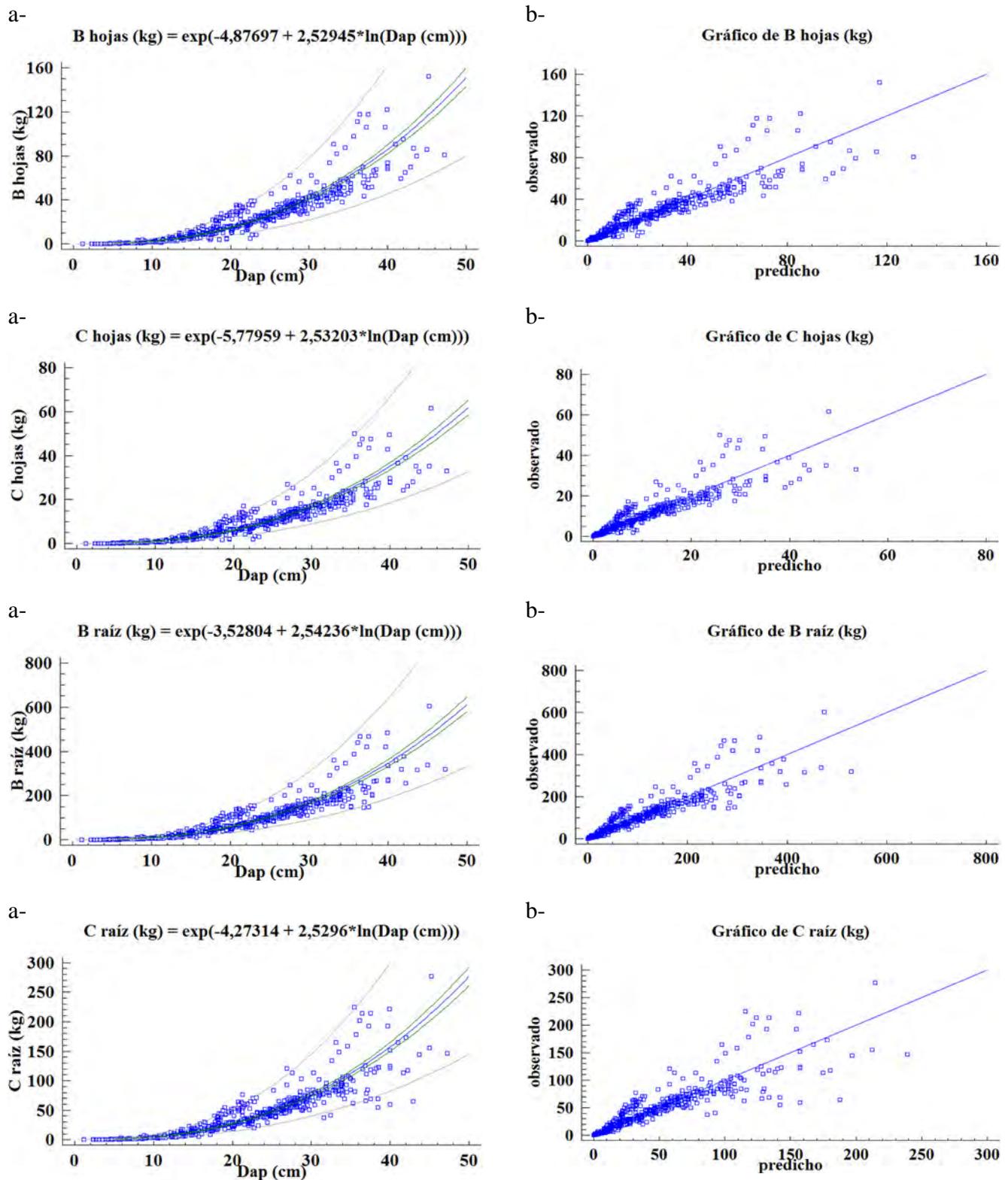
**Tabla 3.** Modelos para estimar biomasa (kg) y carbono (kg) para distintos componentes del árbol y para el árbol completo. Todos los modelos poseen una  $P < 0.0001$ . El tamaño de muestra fue de 503 individuos

| Modelo  | $R^2$ | EEE   | EMA   | DW                        | ECM   | IF   | E % | AIC |
|---|-------|-------|-------|---------------------------|-------|------|-----|-----|
| B total = $\exp(-2.02268 + 2.56319 \cdot \ln(\text{Dap}))$  | 95.8  | 0.265 | 0.196 | 0.604<br>( $P < 0.0001$ ) | 165.2 | 72.1 | 2.9 | 5.1 |
| C total = $\exp(-2.79561 + 2.54144 \cdot \ln(\text{Dap}))$  | 95.1  | 0.310 | 0.226 | 0.802<br>( $P < 0.0001$ ) | 83.3  | 38.1 | 3.8 | 4.4 |
| B fuste = $\exp(-2.55224 + 2.53903 \cdot \ln(\text{Dap}))$  | 95.4  | 0.303 | 0.220 | 0.571<br>( $P < 0.0001$ ) | 97.6  | 47.5 | 4.5 | 4.6 |
| C fuste = $\exp(-3.34871 + 2.54379 \cdot \ln(\text{Dap}))$  | 95.2  | 0.309 | 0.225 | 0.839<br>( $P < 0.0001$ ) | 47.7  | 22   | 3.9 | 3.9 |
| B leñoso = $\exp(-2.00226 + 2.53549 \cdot \ln(\text{Dap}))$ | 95.7  | 0.261 | 0.192 | 0.603<br>( $P < 0.0001$ ) | 161.8 | 67.1 | 3.4 | 5.1 |
| C leñoso = $\exp(-2.83868 + 2.53901 \cdot \ln(\text{Dap}))$ | 95.1  | 0.310 | 0.226 | 0.801<br>( $P < 0.0001$ ) | 79.2  | 36.2 | 3.8 | 4.4 |
| B ramas = $\exp(-3.93501 + 2.55674 \cdot \ln(\text{Dap}))$  | 94.1  | 0.347 | 0.238 | 0.651<br>( $P < 0.0001$ ) | 27.5  | 14.3 | 0.7 | 3.3 |
| C ramas = $\exp(-4.73039 + 2.55477 \cdot \ln(\text{Dap}))$  | 94.3  | 0.341 | 0.234 | 0.885<br>( $P < 0.0001$ ) | 12.5  | 6.3  | 3.7 | 2.5 |
| B hojas = $\exp(-4.87697 + 2.52945 \cdot \ln(\text{Dap}))$  | 94.8  | 0.323 | 0.227 | 0.626<br>( $P < 0.0001$ ) | 9.9   | 4.8  | 5.0 | 2.3 |
| C hojas = $\exp(-5.77959 + 2.53203 \cdot \ln(\text{Dap}))$  | 94.7  | 0.325 | 0.229 | 0.742<br>( $P < 0.0001$ ) | 4.0   | 2.0  | 4.7 | 1.4 |
| B raíz = $\exp(-3.52804 + 2.54236 \cdot \ln(\text{Dap}))$   | 95.2  | 0.310 | 0.224 | 0.586<br>( $P < 0.0001$ ) | 37.1  | 18.2 | 4.8 | 3.6 |
| C raíz = $\exp(-4.27314 + 2.5296 \cdot \ln(\text{Dap}))$    | 94.5  | 0.328 | 0.234 | 0.778<br>( $P < 0.0001$ ) | 18.8  | 8.8  | 3.8 | 2.9 |

B total-C total: biomasa-carbono del árbol completo; B fuste-C fuste: biomasa-carbono del fuste; B ramas-C ramas: biomasa-carbono de ramas; B raíz-C raíz: biomasa-carbono de raíz; B hojas-C hojas: biomasa-carbono de hojas; B leñoso-C leñoso: biomasa-carbono de componente leñoso; exp: exponente; Dap: diámetro normal a 1.30 m sobre el nivel del suelo (cm); ln: logaritmo natural;  $R^2$ , EEE, EMA, DW, n, IF, E % y AIC fueron definidos en la metodología.







**Figura 1.** Modelos para estimar biomasa y carbono por componente de árbol y árbol completo a partir del diámetro: a) el gráfico para el modelo ajustado, b) el gráfico de valores predichos vs observados.

Los resultados indican una fuerte relación positiva entre el diámetro y la biomasa o el carbono, la cual se confirma con el coeficiente de determinación ( $R^2$ ). En este caso, para todos los modelos seleccionados, el diámetro explicó entre 94.1 % y 95.8 % de la varianza observada en biomasa o en carbono. El valor de los estadísticos EEE y EMA presentan cifras muy bajas ( $< 0.35$ ), lo que evidencia un error máximo en la estimación de 0.35 kg, según el componente evaluado. En todos los casos el error o sesgo fue igual o inferior al 5.1 %, condición que se observa en la [figura 1b](#) al ubicarse la nube de puntos muy cercana a la línea de tendencia central.

## DISCUSIÓN

### Proporción de biomasa por componente (factor de expansión de biomasa)

La proporción de componentes en la biomasa aérea varía según las especies ([Blujdea et al., 2012](#); [Mensah et al., 2016](#); [Sreejesh et al., 2013](#)). De la misma manera, conforme el árbol crece el aporte relativo a la biomasa aérea del fuste y las ramas aumentan; mientras que el de la de hoja y corteza disminuye. Según [Mensah et al. \(2016\)](#) y [Pajtki et al. \(2011\)](#), la biomasa leñosa generalmente se acumula a expensas de la biomasa de la hoja, asignando más recursos para madera y ramas a medida que aumenta el tamaño con el objetivo promover la altura y el crecimiento de la copa para superar la competencia por la luz con los árboles vecinos.

En este estudio el fuste representó el 57.4 % y las ramas el 15.3 % de la biomasa total, ambos con corteza. [González et al. \(2014\)](#) reportan para la misma especie una contribución inferior para el fuste pero mayor para las ramas (39.6 % y 28.6 %, respectivamente). Por su parte, [Sreejesh et al. \(2013\)](#) reportaron que un 75 % de la biomasa total correspondía a la suma de fuste y ramas, a los cinco años de edad, valor muy similar al aquí generado. Resulta pertinente mencionar la contribución de las raíces (22.2 %), componente que (por

la dificultad para ser evaluado) en la mayoría de las investigaciones es desestimado. [Sreejesh et al. \(2013\)](#) registraron un valor de 12 % para esta parte del árbol; lo que es significativamente inferior al aquí generado.

Estos valores siguen el mismo patrón demostrado para otras especies en el mundo. Autores como [Vargas et al. \(2017\)](#) reportan que la biomasa en el tallo de pino varió de 63 % (*Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl.) a 80.9 % (*Pinus lumholtzii* B.L.Rob. & Fernald) y las ramas el 14.9 %. En el caso de roble, el fuste acumuló el 59.5 % (*Quercus rugosa* (Masam.) J.C.Liao) y 65.3 % (*Quercus durifolia* Seemen) y las ramas el 22.2 %. Para *Eucalyptus grandis* el 88.8 % del carbono aéreo se encuentra en el fuste y el 8.9 % en las ramas ([Ramírez y Chagna, 2019](#)).

El follaje es el componente del árbol con menor aporte (5.0 % en este estudio), cifra consistente con lo reportado en la literatura: 3.3 % en *Pinus* y 4.0 % en *Quercus* ([Vargas et al., 2017](#)); 2.36 % en *Eucalyptus grandis* W. Hill ([Ramírez y Chagna, 2019](#)); 3.6 % en abedul (*Betula pubescens* Ehrh); 2.6 % en roble ([Gómez et al., 2013](#)); y 3 % en *Eucalyptus* ([Cerruto et al., 2015](#)).

Según [Dimobe et al. \(2018\)](#), el porcentaje de biomasa foliar disminuye conforme aumenta el diámetro del árbol. Ello debido a que las hojas se producen en las ramas más jóvenes, lo que implica que la masa de follaje por unidad de masa de rama disminuya a medida que los árboles crecen. De la misma manera, [Sreejesh et al. \(2013\)](#) registraron cambios significativos en el aporte de los distintos componentes a medida que avanza la edad.

### Fracción de carbono por componente

La concentración de carbono promedio de la biomasa de los diferentes componentes, obtenida en este estudio, se encuentra dentro de los límites reportados para otras especies, tanto en la nación como en otros países (fuste 45.5 %, ramas 44.9 %, hojas 40.7 % y raíz 45.7 %). Al respecto, [Sreejesh et al. \(2013\)](#) reportaron fracciones de carbono muy

similares a las aquí generadas: 46 % en promedio para fuste y ramas y 40 % para raíz; adicionalmente reportaron la de corteza con 32 %. Por su parte, López *et al.* (2018) determinaron en Guatemala un factor de conversión de la biomasa a carbono de 0.5311.

Para Costa Rica se reporta en *Alnus acuminata* Kunth, para todos los componentes, entre 37 % y 44.4 % (Fonseca *et al.*, 2013); así como para *Vochysia guatemalensis* Standl entre 43 % y 48.6 % y entre 45.9 % y 49.2 % para *Hieronyma alchorneoides* Allem. (Fonseca *et al.*, 2012).

### Modelos predictivos de biomasa y carbono

El ajuste logrado en los modelos elegidos se considera muy satisfactorio para todos componentes. El valor más bajo de  $R^2$  obtenido fue de 0.94 para hojas y ramas; por su parte, el más alto corresponde a 0.95 para la biomasa total (tabla 3). Los datos generados se encuentran dentro del intervalo reportado en estudios similares por diferentes autores. Para *T. grandis* se reportan muy pocos estudios similares que permitan comparar la bondad de la metodología empleada y los resultados obtenidos. En ese sentido, Malimbwi *et al.* (2016) reportaron modelos para predecir biomasa en plantaciones para la especie, a partir del diámetro normal, para un rango diamétrico entre 6 cm y 84.4 cm y registraron valores de  $R^2$  superiores a 0.91; el valor inferior se obtuvo para las ramas (0.87), situación similar a la presentada en la presente investigación. Por su parte, Ruiz *et al.* (2019) registraron valores de  $R^2$  promedio de 0.99 para los modelos generados para hojas, ramas, fuste y la biomasa total; no obstante ese buen ajuste, el error estándar obtenido fue de hasta 0.2561.

Lo más cercano para esta especie fue desarrollado por Pérez y Kanninen (2003) para Costa Rica, pero con árboles producidos con semilla y con un manejo de la plantación poco intensivo (característico de las décadas de 1980 y 1990, cuando apenas iniciaba el cultivo de la madera). Esta situación

resalta la pertinencia de los resultados obtenidos en la presente investigación.

Pérez y Kanninen (2003), con una muestra de 40 árboles, generaron modelos para el árbol y por componente con ajustes muy satisfactorios ( $R^2 > 85\%$ ), la cifra más baja para las hojas, muy similar a lo obtenido en este estudio ( $R^2 > 94\%$ ). Mientras que López *et al.* (2018), también con teca, para una plantación de 14 y 15 años desarrollaron un modelo de predicción de biomasa del fuste con un  $R^2$  ajustado de 0.89 usando como variables independientes el diámetro y la altura.

El follaje y ramas son componentes que muestran una correlación inferior con el diámetro, pues presentan ajustes inferiores al fuste, a la raíz o árbol completo. Esta situación se dio en el presente estudio y ha sido demostrado por Fonseca *et al.* (2009), quienes lograron ajustes ( $R^2$ ) de 0.89 y 0.92 para hojas y ramas y cifras mayores a 0.98 para la raíz, fuste y árbol completo, esto con *Vochysia guatemalensis*; o de 0.9 para hojas y ramas y mayor a 0.95 para los otros componentes para *Hieronima alchorneoides*. Según Muñoz *et al.* (2008), la biomasa de las fracciones de copa se consideró la más difícil de modelar.

El mismo comportamiento ocurre con modelos para especies en bosque natural. Para este ecosistema Fonseca *et al.* (2019) lograron ajustes de 0.87 y de 0.93 para hojas y ramas respectivamente, y un  $R^2$  mayor a 0.94 para los otros componentes (incluyendo la biomasa leñosa y el árbol completo). Por su parte, Jiménez *et al.* (2019) lograron ajustes similares ( $R^2 = 0.96$ ) para todos los componentes con *Guazuma ulmifolia* Lam. en bosque natural y en sistema silvopastoril.

### CONCLUSIONES

Se ratifica que los modelos alométricos son opciones prácticas para estimar o predecir la biomasa o el carbono en los ecosistemas forestales. El modelo elegido para cada componente del árbol y para el

árbol completo presentó una bondad de ajuste muy buena ( $R^2 > 94\%$ ) con bajo error de estimación ( $E < 5\%$ ). Tiene la ventaja de la simplicidad en su uso por utilizar como variable predictora el diámetro, el cual es muy fácil de medir e indispensable para muchos cálculos en el área forestal; además de estimar la biomasa o el carbono con precisión y confiabilidad si es usada en ecosistemas similares y para el rango de distribución diamétrica con que fue desarrollada. Así mismo, otra información pertinente como la fracción de carbono en la biomasa y los factores de expansión se convierten en indicadores nacionales que, junto con los modelos alométricos, permiten y facilitan calcular con mayor exactitud el aporte del ecosistema a la mitigación del cambio climático. Se debe tener especial atención al aporte de cada componente del árbol a la biomasa total al asignar recursos para cuantificarlos, pues el follaje es el componente al que se le debe asignar menor esfuerzo y recursos para inventariarlo.

## AGRADECIMIENTOS

Este proyecto fue financiado con el aporte financiero de la Universidad Nacional de Costa Rica, a través del Fondo de Investigación para el Desarrollo Académico (FIDA) y con el apoyo de los propietarios de las plantaciones, quienes facilitaron y permitieron la recolección de información de campo.

## CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

## CONTRIBUCIÓN POR AUTOR

Los autores son los únicos responsables de la obra en todos los aspectos que condujeron a la elaboración de su publicación.

## REFERENCIAS

- Basu, P.** (2009). A green investment. If growing forests in India can generate lucrative carbon credits, then why isn't everyone planting trees? News Feature. *Nature*, 457, 8, 144-146.
- Blujdea, V. N. B., Pili, R., Dutca, I., Ciuvat, L. y Abrudan, V.** (2012). Allometric biomass equations for Young broadleaved trees in plantations in Romania. *Forest Ecology and Management*, 264, 172-184. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.09.042>
- Castro, F. y Raigosa, J.** (2000). Crecimiento y propiedades físico-mecánicas de la madera de teca (*Tectona grandis*) de 17 años de edad en San Joaquín de Abangares, Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 24(2), 07-23.
- Cerruto, S., Boechat, C., Fehrmann, L., Gonçalves, L. A. y von Gadow, K.** (2015). Aboveground and belowground biomass and carbon estimates for clonal eucalyptus trees in Southeast Brazil. *Revista Arvore. Minas Gerais: Sociedade de Investigações Florestais*, 39, 2, 353-363. <http://doi.org/10.1590/0100-67622015000200015>
- Chave, J., Condit, R., Aguilar, S., Hernández, A., Lao, S. y Pérez, R.** (2004). Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, (359)1443, 409-420. <http://doi.org/10.1098/rstb.2003.1425>
- Chave, J., Réjou, M., Burquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M., Delitti, W., Duque, A., Eis, T., Fearnside, P., Goodman, R., Henry, M., Martínez, A., Mugasha, W., Mullerlandau, H., Mencuccini, M., Nelson, B., Ngomanda, A., Nogueira, E., Ortiz, E., Péliissier, R., Ploton, P., Ryan, C., Saldarriaga, J. y Vieilledent.** (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical forests. *Global Change Biology*, 20, 3177-3190. <https://doi.org/10.1111/gcb.12629>
- Dimobe, K., Mensah, S., Goetze, D., Ouédraogo, A., Kuyah, S., Porembski, S. y Thiombiano, A.** (2018). Aboveground biomass partitioning and additive models for *Combretum glutinosum* and *Terminalia*

- laxiflora* in West Africa. *Biomass Bioenergy*, 115, 151-159.
- Dixon, R.** (1995). Agroforestry systems: sources or sinks of greenhouse gases? *Agroforestry Systems*, 31, 99-116. <https://doi.org/10.1007/BF00711719>
- Fonseca, W., Alice, F. y Rey-Benayas, J. M.** (2009). Modelos para estimar la biomasa de especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en la zona Caribe de Costa Rica. *Bosque*, 30(1), 36-47. <https://doi.org/10.4067/s0717-92002009000100006>
- Fonseca, W., Rey-Benayas, J. M. y Alice, F.** (2012). Carbon accumulation in aboveground and belowground biomass and soil of different age native forest plantations in the humid tropical lowlands of Costa Rica. *New Forests*, 43, 197-211. <https://doi.org/10.1007/s11056-011-9273-9>
- Fonseca, W., Ruíz, L., Rojas, M. y Alice, F.** (2013). Modelos alométricos para la estimación de biomasa y carbono en *Alnus acuminata*. *Revista de Ciencias Ambientales*, 46(2), 37-50. <https://doi.org/10.15359/rca.46-2.4>
- Fonseca, W., Villalobos, R. y Rojas, M.** (2019). Potencial de mitigación del cambio climático de los ecosistemas forestales caducifolios en Costa Rica: modelos predictivos de biomasa y carbono. *Revista de Ciencias Ambientales*, 53(2), 111-131. <https://doi.org/10.15359/rca.53-2.6>
- Gómez, G. E. F., Crecente, C. y Diéguez, A. U.** (2013). Tarifas de biomasa aérea para abedul (*Betula pubescens* Ehrh.) y roble (*Quercus robur* L.) en el noroeste de España. *Madera y Bosques*, 19(1), 71-91.
- González, Á. J., Rojas, J., Jiménez, R. M. y Chavarría, F. J.** (2014). Evaluación del crecimiento, potencial de secuestro y fijación de carbono de dos especies forestales en el Sistema Agroforestal Taungya en Rivas, Nicaragua. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 11(26), 12-18. <http://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>
- Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica** (2019). *Clima en Costa Rica: Clima de Costa Rica y variabilidad climática*. Recuperado de <https://www.imn.ac.cr/clima-en-costa-rica>
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos** (2017). *Resultados de la Encuesta Nacional Agropecuaria*. Recuperado de <https://www.inec.cr/sites/default/files/documentos-biblioteca-virtual/coena20112018.pdf>
- Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC)** (2013). *Cambio climático 2013: bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Resumen para responsables de políticas*. Recuperado de [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5\\_SPM\\_brochure\\_es.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SPM_brochure_es.pdf)
- Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC)** (2014). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. IPCC Working Group II Contribution to AR5. Recuperado de <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>
- Jiménez, E., Fonseca, W. y Pazmiño, L.** (2019). Sistemas silvopastoriles y cambio climático: Estimación y predicción de biomasa arbórea. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*, 29(1), 45-55. <http://doi.org/10.17163/lgr.n29.2019.04>
- Kowollik, M.** (2014). Costa Rica carbono neutral: un país pequeño con metas grandes. Friedrich Ebert Stiftung (FES) América Central. *Perspectivas*, 8, 2-5. Recuperado de <https://library.fes.de/pdf-files/bueros/fesamcentral/11122.pdf>
- Le Quéré, C., Andres, R. J., Boden, T., Conway, T., Houghton, R. A., House, J. I., House, J. I., Marland, G., Peters, G. P., van der Werf, G., Ahlström, A., Andrew, R. M., Bopp, L., Canadell, J. G., Ciais, P., Doney, S. C., Enright, C., Friedlingstein, P., Huntingford, C., Jain, A. K., [...] y Zeng, N.** (2012). The global carbon budget 1959-2011. *Earth System Science Data Discussions*, 5, 1107-1157. <https://doi.org/10.5194/essdd-5-1107-2012>.
- López, H., Estuardo, E. y Alvarado, A.** (2018). Evaluación de carbono fijado en la biomasa aérea de plantaciones de teca en Chahal, Alta Verapaz, Guatemala. *Agronomía Costarricense*, 42(1), 137-153.
- Malimbwi, R., Eid, T. y Chamshama, S.** (2016). *Allometric volume and biomass models in Tanzania*. Morogoro, Tanzania: Department of Forest

- Mensuration and Management, Sokoine University of Agriculture.
- Mensah, S., Kakaï, R. G. y Seifert, T.** (2016). Patterns of biomass allocation between foliage and woody structure: The effects of tree size and specific functional traits. *Annals Forest Research*, 59, 1-12.
- Merger, E.** (2008). *Forestry Carbon Standards 2008. A comparison of the leading standards in the voluntary carbon market and the state of climate forestation projects*. Recuperado de <http://www.carbonfix.info/chameleon/outbox/public/55/Forestry-Carbon-Standards-Canterbury-University-Eduard-Merger-2008.pdf>
- Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones de Costa Rica** (2009). *Estrategia Nacional de Cambio Climático*. San José, Costa Rica: Editorial Calderón y Alvarado.
- Muñoz, F., Rubilar, R., Espinosa, M., Cancino, J., Toro, J. y Herrera, M.** (2008). The effect of pruning and thinning on above ground aerial biomass of *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) Maiden. *Forest Ecology and Management*, 255(3-4), 365-73. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.09.063>
- Pajtík, J., Konopka, B. y Lukac, M.** (2011). Individual biomass factors for beech, oak and pine in Slovakia: A comparative study in young naturally regenerated stands. *Trees*, 25, 277-288. <https://doi.org/10.1007/s00468-010-0504-z>
- Parada, S., Gallegos, A., Velázquez, M. y Hernández, E.** (2010). Guía para la medición de biomasa en plantaciones forestales de teca (*Tectona grandis* L.f.) y cedro (*Cedrela odorata* L.) para determinar su potencial de captura de carbono. CUCBA. Departamento Forestal. Universidad de Guadalajara, México.
- Pastian, K., Six, J., Elliott and, E. T. y Hunt, H. W.** (2000). Management options for reducing CO<sub>2</sub> emissions from agriculture soils. *Biogeochem*, 48, 147-163. <https://doi.org/10.1023/A:1006271331703>
- Pérez, L. D. y Kanninen, M.** (2003). Above-ground biomass of *Tectona grandis* plantations in Costa Rica. *Journal of Tropical Forest Science*, 15(1), 199-213. Recuperado de <https://www.jstor.org/stable/23616336>
- Petrokofsky, G., Kanamaru, H., Achard, F., Goetz, S., Joosten, H., Holmgren, P., Lehtonen, A., Menton, M., Pullin, A. y Wattenbach, M.** (2012). Comparison of methods for measuring and assessing carbon stocks and carbon stock changes in terrestrial carbon pools. How do the accuracy and precision of current methods compare? A systematic review protocol. *Environmental Evidence*, 1(6), 1-21. <http://doi.org/10.1186/2047-2382-1-6>
- Ramírez, L. J. y Chagna, E.** (2019). Secuestro de carbono en la biomasa aérea de una plantación de *Eucalyptus grandis* W. Hill. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, 7(1), 86-97.
- Rodríguez, R., Zamora, J. F., Silva, J. A., Salcedo, E. y Fuentes, F. J.** (2014). Propiedades físico-mecánicas de madera de teca de plantaciones comerciales. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(24), 13-25.
- Ruiz, B., Hernández, E., Salcedo, E., Rodríguez, R., Gallegos, A., Valdés, E. y Sánchez, R.** (2019). Almacenamiento de carbono y caracterización lignocelulósica de plantaciones comerciales de *Tectona grandis* L. f. en México. *Colombia Forestal*, 22(2), 15-29.
- Salas, C.** (2002). Ajuste y validación de ecuaciones de volumen para un relicto del bosque de Roble-Laurel-Lingue. *Bosque*, 23(2), 81-92. <http://doi.org/10.4067/S0717-92002002000200009>
- Segura, M. y Andrade, H.** (2008). ¿Cómo hacerlo? ¿Cómo construir modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes? *Agroforestería de las Américas*, 46, 89-96.
- Segura, M. y Kanninen, M.** (2002). Inventario para estimar carbono en ecosistemas forestales. En *Inventarios forestales para bosques latifoliados en América central*. Turrialba, Costa Rica: CATIE. Serie Técnica, Manual Técnico N.º 50.
- Segura, M., Kanninen, M., Alfaro, M. A y Campos, J. J.** (2000). Almacenamiento y fijación de carbono en bosques de bajura de la zona atlántica de Costa Rica. *Revista Forestal Centroamericana*, 30, 3-28.
- Sreejesh, K. K., Thomas, T. P., Rugmini, P., Prasanth, K. M. y Kripa, P. K.** (2013). Carbon Sequestration Potential of Teak (*Tectona grandis*) Plantations in

Kerala. *Research Journal of Recent Sciences*, 2, 167-170.

**Statgraphics Centurion XVI** (s.f.). *Downloads: Statgraphics Centurion XVI*. Recuperado de <http://www.statgraphics.com/download-statgraphics-centurion-xvi>

**Vargas, L. B., López, C. A., Corral, J. J., López, J. O., Aguirre, C. G y Álvarez, J. G.** (2017). Allometric equations for estimating biomass

and carbon stocks in the temperate forest of North-Western Mexico. *Forests*, 8(269), 2-20.

<https://doi.org/10.3390/f8080269>

**Walkley, A. y Black, A. I.** (1934). An examination of the method for determination soil organic matter, and a proposed codification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37, 29-38.





## Biomasa aérea de familias botánicas en un bosque siempreverde piemontano sometido a grados de intervención

### Aerial biomass of botanical families in piedmont evergreen forest subject to intervention levels

Yudel García-Quintana<sup>1\*</sup>, Yasiel Arteaga-Crespo<sup>1</sup>, Bolier Torres-Navarrete<sup>1</sup>,  
Carlos Bravo-Medina<sup>1</sup>, Marco Robles-Morillo<sup>2</sup>

García-Quintana, Y., Arteaga-Crespo, Y., Torres-Navarrete, B., Bravo-Medina, C. y Robles-Morillo, M. (2021). Biomasa aérea de familias botánicas en un bosque siempreverde piemontano sometido a grados de intervención. *Colombia Forestal*, 24(1), 45-59

**Recepción:** 14 de febrero 2020

**Aprobación:** 16 de septiembre 2020

#### Resumen

Se evaluó la biomasa aérea acumulada en lo concerniente a familias botánicas en un bosque siempreverde piemontano sometido a diferentes grados de intervención en la zona alta de la microcuenca del río Puyo. En cinco transectos de 0.1 ha se registraron las especies con DAP  $\geq 10$  cm. Se encontró menor número de familias en sitios con alto grado de perturbación. La biomasa aérea varió de 161.84 a 339.70 Mg.ha<sup>-1</sup>, presentándose mayor acumulación en individuos de menor clase diamétrica. Las familias con mayor índice de valor de importancia de biomasa fueron Moraceae, Arecaceae y Euphorbiaceae, reconocidas por su potencial en cuanto a estructura y carbono. El análisis de correspondencia canónica sin tendencia (DCA) indicó variación en la contribución de biomasa para cada sitio, existiendo un pequeño número de familias para mantener las reservas de carbono. Los resultados de este estudio brindan información relevante que facilita la toma

de decisiones con respecto la restauración de sitios perturbados.

**Palabras clave:** estructura diamétrica, perturbaciones, reservas de carbono, valor de importancia de biomasa.

#### Abstract

The accumulated aerial biomass was evaluated at the level of botanical families in an evergreen montane forest subject to different degrees of intervention in the upper Puyo river watershed. In five transects of 0.1 ha, species with diameter at breast height (DBH)  $\geq 10$  cm were recorded. Fewer families were found in sites with a high degree of disturbance. The aerial biomass varied from 161.84 to 339.70 Mg.ha<sup>-1</sup>, with greater accumulation in individuals of smaller diametric class. The families with the highest biomass importance value index were Moraceae, Arecaceae and Euphorbiaceae, recognized for their potential in terms of structure and carbon.

1 Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Estatal Amazónica (UEA), vía Tena Km 2 1/2, Puyo, Pastaza, Ecuador.

2 The Nature Conservancy, Quito, Ecuador.

\* [ygarcia@uea.edu.ec](mailto:ygarcia@uea.edu.ec) Autor de correspondencia.

Detrended correspondence analysis (DCA) indicated variation in the contribution of biomass for each site, having a small number of families to maintain carbon stocks. This provides relevant information

that facilitates decision making for restoration in disturbed sites.

**Key words:** diametric structure, disturbances, carbon reserves, importance value of biomass.

## INTRODUCCIÓN

Los bosques coadyuvan a mitigar el cambio climático global mediante el almacenamiento de carbono en la vegetación y en el suelo, así como en el intercambio con la atmósfera. La creciente preocupación y demanda por llevar a cabo estudios de biomasa posibilita comprender el funcionamiento de los bosques y, a su vez, entender cómo los cambios de uso del suelo pueden alterar la estructura, biodiversidad y los servicios ecosistémicos; esto último podría ser revertido o atenuado mediante un adecuado manejo (Krug, 2019; Mori *et al.*, 2017; Tong *et al.*, 2020). Los bosques se destacan por su gran capacidad de fijar carbono en sus estructuras leñosas (Trugman *et al.*, 2018); pues, el fuste de un árbol almacena aproximadamente el 84 % de biomasa, de la cual el 46 % es carbono (Tobías-Baeza *et al.*, 2019). Por ello, cualquier tipo de perturbaciones sobre el ecosistema genera daños ambientales que inciden en el ciclo del carbono (Fu *et al.*, 2017).

La cuenca del Amazonas se constituye como un reservorio con gran diversidad ecológica, pues aglutina el 50 % de los bosques del mundo y desempeña un papel estratégico en el secuestro de carbono (Lathuillière *et al.*, 2016). Los bosques húmedos tropicales tienen una elevada productividad de biomasa aérea y representan una fracción significativa de las existencias totales de reserva de carbono y nutrientes (Jones *et al.*, 2019); pero, aun así, son insuficientes los estudios que permitan profundizar sobre la producción de biomasa aérea (Chave *et al.*, 2005; Torres *et al.*, 2019). El carbono almacenado es un aspecto clave en los ecosistemas de bosques, pues resulta del balance entre la fotosíntesis y la respiración autotrófica; se identifica que parte del CO<sub>2</sub> capturado se usa para crear

biomasa viva, mientras que el resto se devuelve a la atmósfera. Cuando las hojas o ramas mueren y se descomponen aumenta el carbono del suelo y también se libera una pequeña cantidad a la atmósfera a través de la respiración heterotrófica (Bravo *et al.*, 2017).

Se desconoce el nivel de carbono almacenado en parte de las regiones tropicales, lo que limita la valoración y conservación de estos ecosistemas debido a la escasez de estimaciones de biomasa en vivo y su variación en los diferentes ambientes. Este se distribuye entre tres compartimentos: biomasa de plantas vivas (tallo, ramas, follaje, raíces), detritos de plantas (ramas y conos caídos, basura forestal, tocones de árboles, copas de árboles, troncos) y tierra (humus mineral orgánico, suelo mineral superficial y profundo) (Bravo *et al.*, 2017).

Las estimaciones de biomasa de los bosques tropicales son un medio útil para gestionar la reducción de las emisiones de carbono durante la deforestación y los cambios de uso del suelo, lo que permite aumentar las reservas de carbono, así como mantener los servicios ecosistémicos y la biodiversidad (Messinger *et al.*, 2016). Por esto es importante comprender los procesos que determinan los patrones actuales de almacenamiento de carbono y la estructura para predecir la respuesta de estos bosques a las condiciones ambientales cambiantes.

En la actualidad los estudios de acumulación de biomasa en la Amazonía ecuatoriana son muy importantes para comprender el ciclo del carbono y su papel en los cambios climáticos, pues hay un limitado conocimiento de las familias botánicas y especies arbóreas que más contribuyen a las reservas de carbono. Como se ha dicho, tener disponible este conocimiento incide en el éxito de los programas de restauración al aportar

información valiosa sobre la captura de carbono como herramienta para mitigar el empobrecimiento de los bosques amazónicos de la región (Yepes *et al.*, 2015).

Con todo lo anterior en cuenta, esta investigación se realizó en la zona alta de la microcuenca del río Puyo, la forma parte de un importante ecosistema del pie de monte amazónico de la provincia de Pastaza entre los 1100 a 1300 m de altitud; considerado como un sitio mega diverso por formar parte del *hotspot-Uplands Western Amazonia* (Myers *et al.*, 2000). La microcuenca del río Puyo es un escenario donde los seres humanos interactúan con ella y sus recursos naturales; es, además, reconocida por los múltiples beneficios sociales, ambientales y económicos. La importancia de esta área está dada por sus importantes funciones hidrológicas, biodiversidad, provisión de alimento, protección del ciclo de nutrientes, retención del carbono, regulación de plagas y polinización. Sin embargo, las actividades antropogénicas y los cambios de uso del suelo han incidido en el deterioro progresivo de gran parte de los ecosistemas de bosques, lo que ha causado serios daños en su cobertura vegetal, cambios en la estructura y composición del suelo producto de la expansión de la frontera agrícola, pérdidas considerables de la biodiversidad, deslizamientos de suelo, disminución de la biomasa acumulada y, por consiguiente, afectaciones en los servicios ecosistémicos (Burbano-Orjuela, 2016). Por ello, es importante conocer la contribución de las familias botánicas al stock de carbono y su valor ecológico como herramienta para apoyar los esfuerzos de restauración orientados a la búsqueda de especies y familias claves dentro del ecosistema de bosque objeto de esta investigación. Por lo que el objetivo del presente trabajo fue evaluar la biomasa aérea acumulada por familias botánicas en un bosque siempreverde piemontano sometido a diferentes grados de intervención en la zona alta de la microcuenca del río Puyo, en la Amazonía ecuatoriana.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Descripción del área de estudio

El estudio se realizó en un bosque siempreverde piemontano de la zona alta de la microcuenca del río Puyo, al norte de la cordillera oriental de los Andes, localizado dentro del territorio hidrográfico del río Pastaza donde se encuentra ubicado el sector Pindo Mirador, parroquia Mera, provincia Pastaza, Ecuador (figura 1). Esta zona es poco conocida en la región en cuanto a su composición, estructura y stock de carbono; además, tiene alta relevancia por sus importantes funciones hidrológicas. Presenta en promedio 1228.7 m de altitud, temperatura media anual de 23°C, precipitación promedio anual de 4119 mm y una humedad relativa de 84 % (Instituto Nacional de Meteorología en Hidrología del Ecuador, 2014).

En el área de estudio se instalaron cinco transectos permanentes, separados por una distancia de 100 m, con un tamaño de 0.1 ha (10 x 100 m), los cuales fueron sometidos a diferentes niveles de intervención. Las características fisiográficas, grado de perturbación y la composición florística de los sitios se presentan en la tabla 1. Las coordenadas geográficas, altitud y pendiente se obtuvieron con un GPS RTK con precisión de 1 cm, doble frecuencia, 72 canales, GPS + Glonass y receptor-100 Hz. Los datos de la composición florística fueron obtenidos mediante la fase de inventario, a partir de un muestreo sistemático considerando la accesibilidad y topografía del terreno. El grado de perturbación se evaluó por observación directa en los sitios, a partir de los criterios establecidos por González *et al.* (2016), con adecuaciones por los autores de esta investigación que corresponden con los disturbios asociados a los factores antrópicos y naturales presentes en el área de estudio. Se consideraron tres grados de perturbación (alta, medio y baja) en función de la presencia de talas, cambios de uso del suelo, pastoreo, extracción de productos

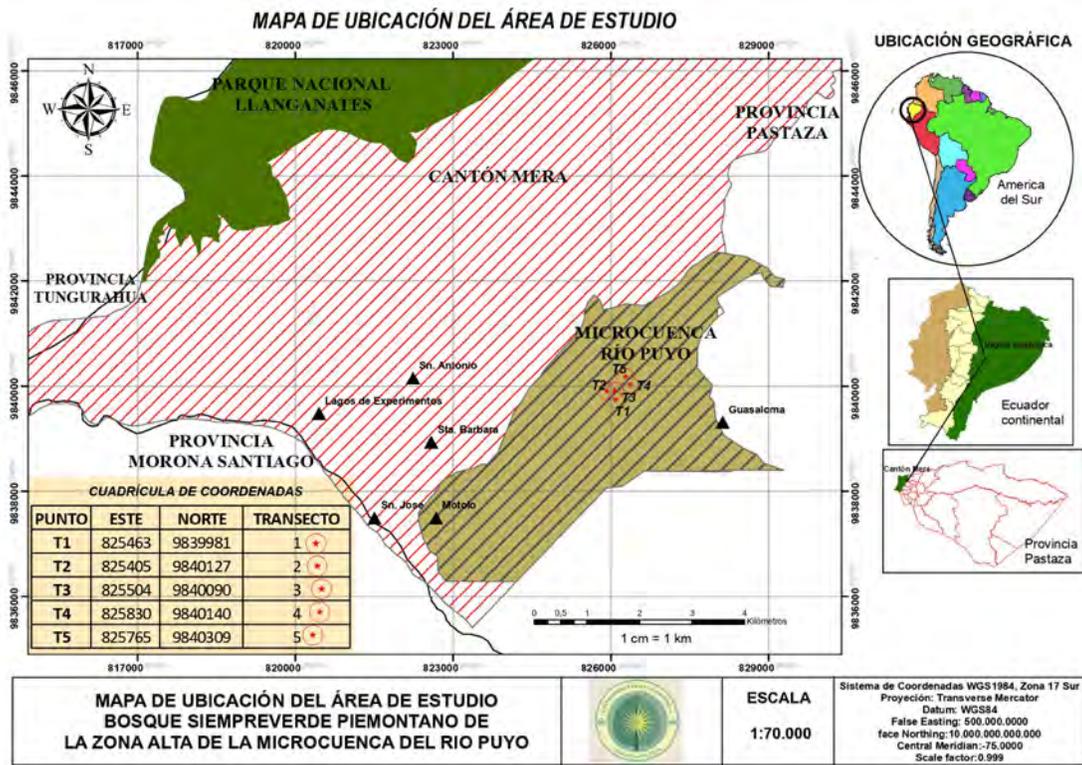


Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio.

forestales no maderables, vegetación secundaria y caída de árboles por efecto del viento o deslizamientos de suelo. Se consideró un grado de perturbación alto cuando la intervención fue severa, con predominio de más de cuatro de los disturbios analizados; medio cuando la intervención fue moderada, determinada por la presencia de tres tipos de disturbios; y bajo cuando la intervención fue escasa como resultado de la presencia de dos o menos disturbios presentes en el sitio.

### Inventario florístico

Se realizó un inventario florístico con todos los individuos con DAP  $\geq 10$  cm, los cuales fueron identificados preliminarmente en el campo con el apoyo de un experto botánico en flora amazónica. También, se comparó con el libro de los Árboles del Ecuador (Palacios, 2016) y se verificó con la colección de muestras del Herbario Ecuatoriano Amazónico (ECUAMZ) de la Universidad Estatal

Amazónica. El inventario permitió determinar las siguientes características estructurales: número de familias botánicas, área basal, diámetro promedio de los árboles y la riqueza florística, la cual fue calculada mediante el índice de Margalef modificado por Magurran (2013).

### Biomasa aérea y valor de importancia

Se estimó la biomasa aérea por familias (AGB, por sus siglas en inglés), expresada en  $Mg \cdot ha^{-1}$ , considerando la contribución individual de cada una de las especies que conforman a la familia botánica independientemente del porte de las especies, por lo que la suma de sus contribuciones comprendió la acumulación de biomasa aérea a nivel de familia. La biomasa aérea se obtuvo a partir de la ecuación alométrica propuesta por Chave et al. (2005), la cual se muestra a continuación:

$$AGB = \rho \times \exp(-1.499 + 2.148 \ln(DBH) + 0.207(\ln(DBH))^2 - 0.0281(\ln(DBH))^3)$$

**Tabla 1.** Características fisiográficas y composición florística de los transectos con distintos grados de perturbación

| Transectos   | Coordenadas geográficas |         | Altitud (msnm) | Pendiente (%) | Número individuos | Número de especies | Grado de perturbaciones |
|--------------|-------------------------|---------|----------------|---------------|-------------------|--------------------|-------------------------|
|              | X                       | Y       |                |               |                   |                    |                         |
|              | 825462                  | 9839971 | 1122.4         | 20            | 69                | 23                 | Medio                   |
|              | 825488                  | 9840077 | 1221.3         | 15            | 52                | 16                 | Alto                    |
| T3           | 825581                  | 9840022 | 1234.8         | 10            | 75                | 14                 | Bajo                    |
| T4           | 825822                  | 9830132 | 1272.6         | 45            | 60                | 22                 | Alto                    |
| T5           | 825749                  | 9840209 | 1292.5         | 30            | 66                | 27                 | Medio                   |
| <b>Total</b> |                         |         | 1228.7         |               | 322               | 65                 |                         |

Se empleó esta ecuación por ser ampliamente utilizada en ecosistemas de bosque siempreverde de la Amazonía (Cuenca *et al.*, 2017; Torres *et al.*, 2019; Vashum y Jayakumar, 2012), la cual presentó una buena aproximación a las condiciones locales para estimar de forma precisa el potencial de biomasa aérea, la cual incluye el diámetro a la altura del pecho (DBH, por sus siglas en inglés) y la densidad de la madera ( $\rho$ ). El valor de ( $\rho$ ) fue posible a partir de los datos reportados de densidad específica de la madera para 23 de las especies inventariadas, con excepción de algunos casos en los que no estuvo disponible y se empleó la ( $\rho$ ) media global para América del Sur tropical que fue de  $0.632 \text{ g.cm}^{-3}$  (Chave *et al.*, 2009).

La biomasa acumulada en  $\text{Mg.ha}^{-1}$  se calculó por clases diamétricas (CD), las cuales se agruparon en intervalos de 10 cm; siendo la clase inferior 10-20 cm y la superior con 40 cm o más. Se determinó el índice de valor de importancia de biomasa a nivel de familias botánicas (BIVF, por sus siglas en inglés) a partir de la metodología propuesta por Torres *et al.* (2019), con adecuaciones por los autores de este trabajo, la cual se relaciona con la densidad relativa (NRF), área basal relativa (BAF) y biomasa relativa por encima del suelo (AGBF) a nivel de familias botánicas. El BIVF se calculó de la siguiente manera:

$$\text{BIVF} = (\text{NRF} + \text{BAF} + \text{AGBF}) / 3$$

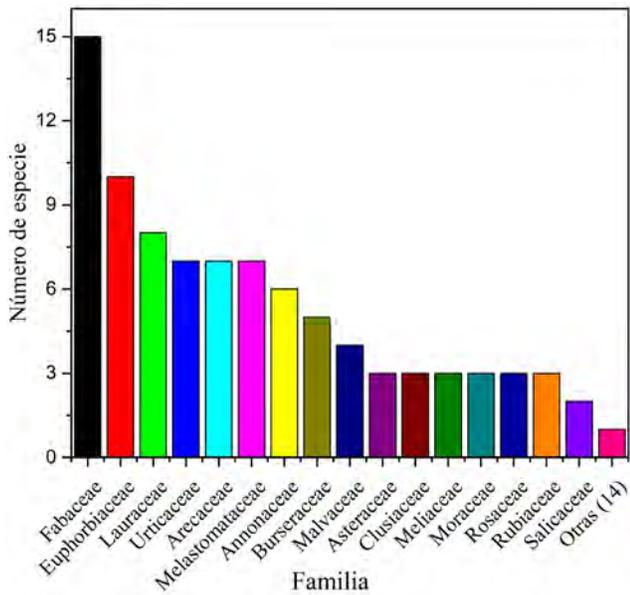
### Procesamiento de datos

Los datos fueron procesados mediante un análisis de correspondencia canónica sin tendencia (DCA) con el uso del programa ecológico Canoco ver.5.0 (Ter Braak y Smilauer, 2012). Se empleó el DCA de acuerdo con lo expuesto por Ter Braak (1986), pues el valor del gradiente resultó con 4.3 unidades, por lo que el método lineal no fue apropiado. La matriz de datos se elaboró con las unidades de muestreo (cinco sitios de estudio) y los valores de la biomasa acumulada por familias botánicas, a los cuales se le realizó una transformación logarítmica  $y' = \text{Log}(y + 1)$ . Este análisis permitió comprobar la correlación existente entre las unidades de muestreo y la biomasa acumulada por familias botánicas, además de entender la contribución de las familias botánicas para mantener las reservas de carbono en cada uno de los sitios de estudio. Este análisis aporta información valiosa que facilita la selección de familias claves para cada hábitat desde el punto de vista de su estructura ecológica y aporte de biomasa.

### RESULTADOS

El inventario florístico en 0.5 ha (cinco transectos) reportó un total de 30 familias botánicas, 65

especies y 322 individuos con DAP  $\geq 10$  cm; lo que da como resultado un ecosistema con una alta riqueza de familias, pero con baja abundancia de especies. Las familias que presentaron mayor número de especies fueron: Fabaceae, Euphorbiaceae y Lauraceae con 15, 10 y 8 taxones, respectivamente, que representaron un 50.77 % del total de especies inventariadas en la zona de estudio. Siguen, en orden de representación, tres familias (Urticaceae, Arecaceae y Melastomataceae) con siete especies; luego, tres familias (Annonaceae, Burseraceae, Malvaceae) con una composición de cuatro y seis especies; posteriormente, siete familias (Astereaceae, Clusiaceae, Meliaceae, Moraceae, Rosaceae, Rubiaceae y Salicaceae) con dos y tres especies; y, por último, 14 familias con una sola especie (figura 2).



**Figura 2.** Composición florística del bosque siempreverde piemontano de la zona alta, microcuenca río Puyo.

Las características estructurales del bosque resultaron variables para cada uno de los sitios con diferentes grados de perturbación (tabla 2). Se encontró que los sitios y T4 sometidos a alto grado de perturbación, fundamentalmente por factores antrópicos, presentaron características estructurales

determinadas por menor número de familias botánicas por hectárea, área basal por hectárea y diámetro promedio, mientras que la riqueza florística fue superior. Esto pudiera deberse a la relación proporcional que existió entre el número de especies y número de individuos, siendo los sitios que presentaron menor composición florística. Se reportó la presencia de solo cuatro familias presentes en todos los sitios del total del inventario, lo que sugiere que incluso en una pequeña área la diversidad de familias puede variar.

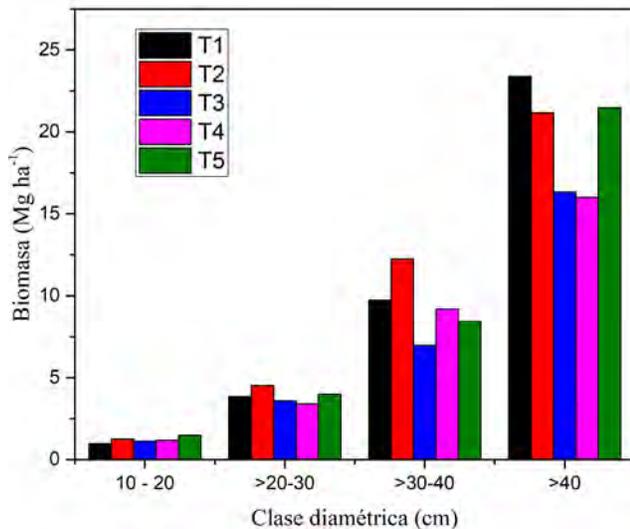
**Tabla 2.** Características estructurales del bosque siempreverde piemontano por transectos

| Variables                     | Transecto |       |       |       |       |
|-------------------------------|-----------|-------|-------|-------|-------|
|                               | T3        | T4    | T5    | T3    | T5    |
| Número de familias            | 15        | 11    | 12    | 11    | 19    |
| Riqueza florística            | 34.8      | 37.3  | 34.13 | 36    | 37.17 |
| Área basal (cm <sup>2</sup> ) | 40.77     | 29.61 | 34.88 | 30.15 | 33.36 |
| Diámetro promedio (cm)        | 25.96     | 18.86 | 22.22 | 19.21 | 21.22 |

La biomasa aérea acumulada (AGB) en cada uno de los transectos de estudio osciló en un rango de 161.84 a 339.70 Mg.ha<sup>-1</sup>. Estos resultados mostraron variaciones en la biomasa total, reportándose una mayor acumulación en los sitios y T5 con valores de 348.53 y 339.70 Mg.ha<sup>-1</sup> y menores en y T4 con 169.03 y 161.84 Mg.ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

La mayor acumulación de biomasa aérea se presentó en las clases diamétricas superiores (CD > 40 cm) y la menor en la inferior (CD 10-20 cm); siendo la contribución de la biomasa acumulada diferente en cada uno de los sitios de estudio y clases diamétricas, con menor variación entre los sitios en la clase inferior (figura 3). En la clase diamétrica inferior se concentró la mayor cantidad de individuos, mientras que hubo escasa representación de árboles con diámetros mayores a 40 cm. Esto sugiere que la distribución de las especies y

familias en cada transecto no es uniforme y pudiera estar determinada por los diferentes grados de perturbaciones predominante en la zona, debido a los fuertes vientos y deslizamientos de suelo que causan mortalidad de los árboles más grandes, lo cual se puede manifestar en la capacidad de almacenamiento de carbono.



**Figura 3.** Biomasa aérea acumulada por clases diamétricas en los transectos de estudio.

El BIVF calculado en función de la densidad, área basal y biomasa aérea relativa resultó ser un buen indicador para identificar las familias botánicas potenciales en la captura de carbono y estructura del bosque. Los resultados del BIVF (tabla 3), a partir de la contribución individual de cada una de las especies (independientemente de su hábito o porte), evidenció que las familias pueden ser de importancia relativa para estructura, pero no para almacenamiento de carbono o viceversa. Las tres familias con mayor BIVF fueron: Moraceae, Arecaceae, Euphorbiaceae y después le siguen Asteraceae, Fabaceae y Rubiaceae, lo que indica que las más abundantes no son necesariamente esenciales para biomasa o carbono. Las representadas en los cinco transectos de estudio fueron: Euphorbiaceae, Arecaceae, Fabaceae y Melastomataceae, debido a su alta abundancia. Las de mayor contribución a la biomasa fueron: Moraceae, Rubiaceae

y Rutaceae. Esto demuestra la contribución de un pequeño número de familias para mantener el nivel de reservas de carbono. Este patrón de baja representatividad de familias en cuanto a carbono podría indicar que los futuros cambios del ecosistema pueden resultar en el empobrecimiento de este importante reservorio del bosque amazónico.

El DCA describió la distribución de la biomasa acumulada en función de los sitios de estudio y tuvo como resultado una alta correlación entre los transectos y la biomasa acumulada. El primer eje fue capaz de explicar el 74 % y el segundo eje el 21 % de la varianza total explicada. Se comprobó mediante el análisis de ordenación espacial que el sitio T4 fue el más distante, determinado por el ángulo que forma aproximado de 90° en relación con los demás (figura 4), resultando el de menor aporte de biomasa. En cambio, los sitios T1 y T5 estuvieron distribuidos muy cerca, siendo los de mayor abundancia de familias y a la vez con mayor contribución de biomasa. Estos resultados sugieren que existe variación en la contribución de biomasa por familias para cada uno de los sitios.

Las familias que más contribuyeron a la biomasa en el sitio fueron seis (Malvaceae, Rubiaceae, Sapindaceae, Lamiaceae, Cyatheaceae y Moraceae); en T2 se agruparon cuatro familias (Fabaceae, Burseraceae, Melastomataceae y Lauraceae) con menor cantidad de familias contribuyentes al total de biomasa acumulada; T3 resultó con cinco familias (Annonaceae, Rosaceae, Myrtaceae, Rutaceae y Protaceae); T4 estuvo representado por cinco familias (Meliaceae, Boraginaceae, Elaeocarpaceae, Siparunaceae y Arecaceae); y T5 con ocho familias participantes (Sapotaceae, Saliaceae, Araliaceae, Urticaceae, Phyllantaceae, Lecythydaceae, Asteraceae y Celastraceae), resultando con mayor número de familias. Se evidenció que las familias Clusiaceae y Euphorbiaceae mostraron un patrón diferente a las demás; las cuales no estuvieron asociadas a ninguno de los transectos, lo que indica una menor correlación con el resto de la composición familiar. Esta característica se debió a la baja representatividad como reservas de carbono.

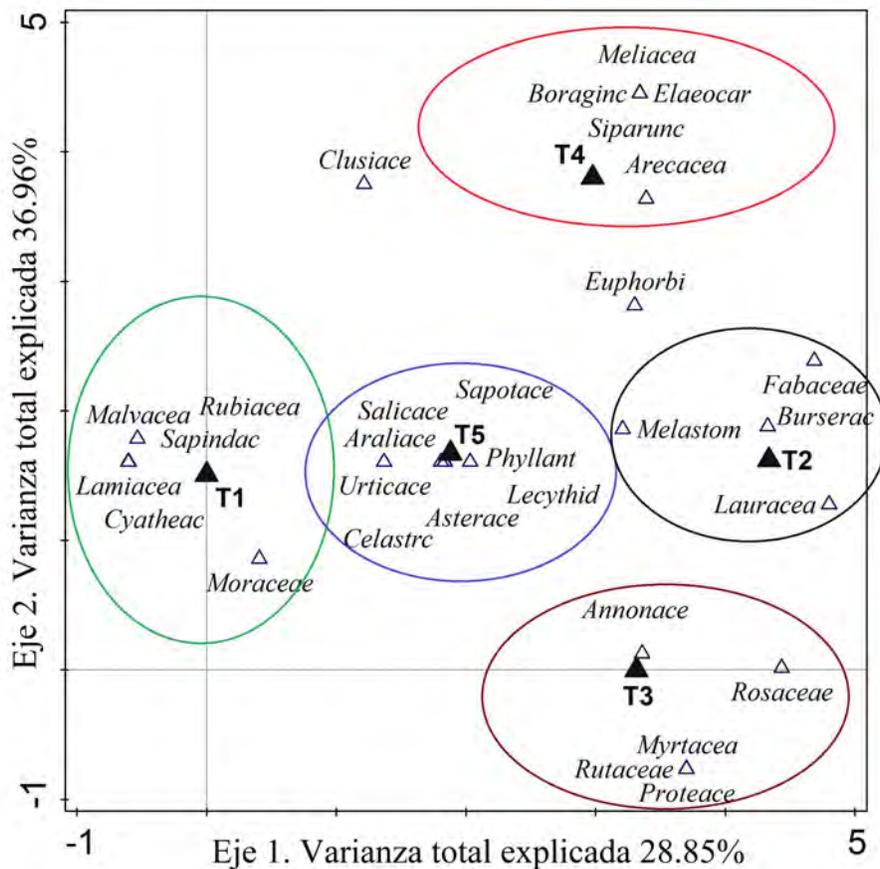
**Tabla 3.** Índice de biomasa a partir de parámetros fitosociológicos y estructurales en los transectos de estudio

| Familias botánicas   | T3          |             |              |              |              |              | T4           |              |              |              |              |              | T5           |              |             |              |              |              |              |              |  |  |
|----------------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--|--|
|                      | N (%)       | BA (%)      | AGB (%)      | BIVF (%)     | N (%)        | BA (%)       | AGB (%)      | BIVF (%)     | N (%)        | BA (%)       | AGB (%)      | BIVF (%)     | N (%)        | BA (%)       | AGB (%)     | BIVF (%)     | N (%)        | BA (%)       | AGB (%)      | BIVF (%)     |  |  |
| <b>Moraceae</b>      | 1.45        | 23.1        | 79.81        | <b>34.80</b> | 1.33         | 9.90         | 2.89         | <b>4.71</b>  |              |              |              |              |              |              |             |              |              |              |              |              |  |  |
| <b>Rubiaceae</b>     | 1.4         | 10.0        | 16.04        | <b>9.18</b>  |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |             |              |              |              |              |              |  |  |
| <b>Euphorbiaceae</b> | 15.9        | 5.2         | 0.10         | <b>7.07</b>  | 11.54        | 10.58        | 0.17         | <b>7.43</b>  | 32.00        | 12.19        | 0.59         | <b>14.93</b> | 16.67        | 11.19        | 0.26        | <b>9.37</b>  | 10.61        | 9.29         | 0.24         | <b>6.71</b>  |  |  |
| <b>Asteraceae</b>    | 11.6        | 8.9         | 0.32         | <b>6.95</b>  | 36.54        | 6.87         | 0.16         | <b>14.52</b> |              |              |              |              |              |              |             |              | 1.52         | 10.49        | 17.86        | <b>9.95</b>  |  |  |
| <b>Arecaceae</b>     | 15.9        | 3.7         | 0.04         | <b>6.57</b>  | 17.31        | 12.32        | 0.35         | <b>9.99</b>  | 41.33        | 5.83         | 0.15         | <b>15.77</b> | 38.33        | 6.48         | 0.18        | <b>15.00</b> | 25.76        | 4.27         | 0.09         | <b>10.04</b> |  |  |
| Malvaceae            | 1.4         | 7.2         | 6.78         | <b>5.14</b>  |              |              |              |              |              |              |              |              | 5.00         | 6.95         | 0.03        | <b>3.99</b>  | 3.03         | 6.63         | 0.03         | <b>3.23</b>  |  |  |
| <b>Fabaceae</b>      | 10.1        | 5.1         | 0.06         | <b>5.09</b>  | 7.69         | 12.70        | 7.72         | <b>9.37</b>  | 2.67         | 9.19         | 0.03         | <b>3.96</b>  | 8.33         | 14.37        | 0.16        | <b>7.62</b>  | 15.15        | 6.62         | 0.23         | <b>7.33</b>  |  |  |
| Urticaceae           | 10.1        | 4.4         | 0.03         | <b>4.86</b>  | 5.77         | 6.99         | 0.01         | <b>4.26</b>  |              |              |              |              |              |              |             |              | 4.55         | 6.11         | 0.06         | <b>3.57</b>  |  |  |
| Melastomataceae      | 10.1        | 2.9         | 0.01         | <b>4.34</b>  | 7.69         | 6.86         | 0.03         | <b>4.86</b>  | 10.67        | 6.74         | 0.06         | <b>5.82</b>  | 6.67         | 5.60         | 0.02        | <b>4.09</b>  | 15.15        | 4.63         | 0.08         | <b>6.62</b>  |  |  |
| Lamiaceae            | 1.4         | 6.0         | 4.22         | <b>3.88</b>  |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |             |              |              |              |              |              |  |  |
| Rosaceae             |             |             |              |              | 1.92         | 9.29         | 2.93         | <b>4.71</b>  | 1.33         | 10.68        | 5.17         | <b>5.73</b>  |              |              |             |              |              |              |              |              |  |  |
| Annonaceae           |             |             |              |              | 3.85         | 9.78         | 0.05         | <b>4.56</b>  | 1.33         | 9.12         | 3.42         | <b>4.63</b>  | 3.33         | 12.64        | 0.10        | <b>5.36</b>  |              |              |              |              |  |  |
| Burseraceae          |             |             |              |              | 1.92         | 8.16         | 2.15         | <b>4.08</b>  |              |              |              |              | 3.33         | 7.53         | 0.03        | <b>3.63</b>  | 4.55         | 9.31         | 0.15         | <b>4.67</b>  |  |  |
| Clusiaceae           |             |             |              |              | 1.92         | 5.91         | 0.91         | <b>2.92</b>  |              |              |              |              |              |              |             |              |              |              |              |              |  |  |
| Proteaceae           |             |             |              |              |              |              |              |              | 1.33         | 8.73         | 3.14         | 4.40         |              |              |             |              |              |              |              |              |  |  |
| Rutaceae             |             |             |              |              |              |              |              |              | 1.33         | 12.77        | 8.21         | <b>7.44</b>  |              |              |             |              |              |              |              |              |  |  |
| Lauraceae            |             |             |              |              |              |              |              |              | 5.33         | 8.34         | 0.05         | <b>4.58</b>  |              |              |             |              |              |              |              |              |  |  |
| Meliaceae            |             |             |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |             |              |              |              |              |              |  |  |
| Boraginaceae         |             |             |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              | 6.67         | 8.22         | 0.05        | <b>4.98</b>  |              |              |              |              |  |  |
| Meliaceae            |             |             |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              | 6.67         | 9.88         | 0.16        | <b>5.57</b>  |              |              |              |              |  |  |
| Elaeocarpaceae       |             |             |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              | 1.67         | 5.94         | 1.23        | 2.95         |              |              |              |              |  |  |
| Phyllanthaceae       |             |             |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |             |              | 1.52         | 7.10         | 6.78         | <b>5.13</b>  |  |  |
| Salicaceae           |             |             |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |             |              | 1.52         | 6.55         | 5.96         | <b>4.67</b>  |  |  |
| <b>Total</b>         | <b>79.7</b> | <b>76.5</b> | <b>107.4</b> | <b>87.87</b> | <b>96.15</b> | <b>89.45</b> | <b>14.49</b> | <b>66.70</b> | <b>98.67</b> | <b>93.49</b> | <b>23.72</b> | <b>71.96</b> | <b>96.67</b> | <b>88.81</b> | <b>2.21</b> | <b>62.56</b> | <b>83.33</b> | <b>70.99</b> | <b>31.47</b> | <b>61.93</b> |  |  |

Los resultados obtenidos posibilitaron la identificación de las familias botánicas que más contribuyeron a la reserva de carbono en cada sitio y, a su vez, las que más aportan a la estructura del ecosistema de bosque siempreverde piemontano de la zona alta de la microcuenca del río Puyo. Existe un pequeño número de familias con garantía de mantener las reservas de carbono. Esto las convierte en familias claves desde el punto de vista funcional en estos hábitats y deben ser consideradas como prioritarias para futuras acciones de restauración.

## DISCUSIÓN

La alta riqueza y composición de familias botánicas, así como la distribución desigual en cuanto al número de especies, se corresponde con los patrones florísticos descritos para la Amazonía (Cabrera-Amaya y Rivera-Díaz, 2016; Jadán et al., 2017). Se puede apreciar que se comparten familias con gran riqueza de especies como Fabaceae, Euphorbiaceae, Lauraceae, Urticaceae, Arecaceae, Melastomataceae y Annonaceae, reconocidas como algunas de las más importantes en el neotrópico (Gentry, 1982);



**Figura 4.** Ordenación espacial de los transectos y acumulación de biomasa aérea por familias botánicas.

**Leyenda:** Meliaceae (Meliaceae); Boraginaceae (Boraginac); Elaeocarpaceae (Elaeocar); Siparunaceae (Siparunc); Clusiaceae (Clusiace); Arecaceae (Arecaceae); Euphorbiaceae (Euphorbi); Malvaceae (Malvaceae); Rubiaceae (Rubiaceae); Salicaceae (Salicace); Sapotaceae (Sapotace); Fabaceae (Fabaceae); Sapindaceae (Sapindac); Araliaceae (Araliaceae); Melastomataceae (Melastom); Burseraceae (Burserac); Lamiaceae (Lamiaceae); Urticaceae (Urticaceae); Phyllanthaceae (Phyllant); Lecythydaceae (Lecythyd); Lauraceae (Lauraceae); Cyatheaceae (Cyatheac); Asteraceae (Asteraceae); Celastraceae (Celastrc); Moraceae (Moraceae); Annonaceae (Annonace); Rosaceae (Rosaceae); Myrtaceae (Myrtaceae); Rutaceae (Rutaceae); Proteaceae (Proteace).

además de constituir elementos distintivos del bosque húmedo tropical caracterizados por una flora entre la vegetación de tierras bajas y los de cordillera (Ter Steege *et al.*, 2013). Sin embargo, lo más consistente es el patrón que se repite en los bosques siempreverde piemontano de la microcuenca del río Puyo con la familia Fabaceae que resultó en el primer lugar según la riqueza de especies, catalogada como una de las más ricas en bosques de tierra baja en el neotrópico (Gentry, 1988). Por otro lado, llama la atención la ubicación de las familias Arecaceae, Rubiaceae y Moraceae que han sido reportadas con mayor riqueza para las condiciones amazónicas, no existiendo coincidencias en cuanto a su representatividad en el área de estudio (Cabrer-Amaya y Rivera-Díaz, 2016; Flores-Valencia *et al.*, 2016; Torres *et al.*, 2019).

En un bosque siempreverde piemontano primario del norte de la cordillera oriental de los Andes, entre los 600-700 m de altitud, en las proximidades del río Piatúa que tributa al río Anzu, cantón Arosemena Tola, provincia de Napo de la Amazonía ecuatoriana, Patiño *et al.* (2015) reportaron la familia Arecaceae con el mayor porcentaje de especies (22.92 %), seguido de Lauraceae con un 15.97 % y en tercer lugar la familia Vochysiaceae con 6.60 %. Esto indica que solo la familia Lauraceae ha sido altamente representada en el área de estudio. Ello sugiere que los diferentes grados de perturbación observados en los sitios pueden haber influido en la variación de la composición florística asociada al aumento de la deforestación y fragmentación que resulta en la pérdida de hábitat de especies de flora (Quintana *et al.*, 2017), así como la extracción de madera (Vasco *et al.*, 2017).

El alto nivel de heterogeneidad encontrada en los parámetros de estructura y composición florística del bosque siempreverde piemontano de la zona alta de la microcuenca del río Puyo, determinado por un menor número de familias botánicas, área basal, diámetro promedio y mayor riqueza florística en los sitios más perturbados (T2 y T4), demostró que la gravedad de las

perturbaciones que se presentan con frecuencia en esta importante zona de protección altera los patrones ecológicos de este piedemonte amazónico. En este escenario es necesario promover acciones de restauración que permitan la rehabilitación de los sitios más perturbados a partir de grupos núcleos de familias botánicas para cada condición local. Estos resultados se corresponden con lo descrito por Valdés-Sáenz *et al.* (2014), Gutiérrez y Becerra (2018) y Vega (2020), quienes refieren que las perturbaciones antrópicas alteran sensiblemente los patrones de estructura y composición en las comunidades vegetales.

Además de estos criterios, las diferencias contrastantes en riqueza, estructura y composición florística podrían explicarse por la heterogeneidad ambiental que existe, determinada fundamentalmente por las condiciones topográficas (pendiente y altitud) (Cueva *et al.*, 2019) que propician la caída de muchos árboles y, por consiguiente, favorece las trayectorias sucesionales del bosque.

Los resultados obtenidos en cuanto al contenido de biomasa aérea en la zona alta del bosque siempreverde piemontano de la microcuenca del río Puyo en la Amazonía ecuatoriana son similares a lo reportado por Torres *et al.* (2019) en un bosque siempreverde de Napo con valores de 290 a 340 Mg.ha<sup>-1</sup>. También concuerdan con lo obtenido en un bosque de tierra firme de la Amazonía colombiana en el que se estimó una biomasa para individuos con DAP  $\geq 10$  cm de 297.6 Mg.ha<sup>-1</sup> (Paky *et al.*, 2017). La biomasa reportada en el presente estudio se encuentra dentro de lo reportado para la cuenca amazónica (Paky *et al.*, 2017). En estudios de bosques de Amazonía oriental central se obtuvo un valor de  $316.8 \pm 79.7$  y en Amazonía occidental  $239.8 \pm 58$ , valores dentro de los rangos de la presente investigación (Mitchard *et al.*, 2014). Sin embargo, los valores obtenidos en los sitios T2 y T4 fueron relativamente bajos en comparación con el resto de los sitios de estudio y los datos reportados por los autores mencionados. Los valores bajos de biomasa se pueden atribuir al alto

grado de perturbación reportado en estos sitios por actividades como la extracción de madera, deslizamientos de suelo y fuertes vientos (tabla 1) que propiciaron la caída de muchos árboles y, por consiguiente, una disminución de la biomasa aérea sobre el suelo.

Los valores de biomasa aérea por clases diamétricas se encontraron en los rangos reportados por otros investigadores en bosques amazónicos (Quiceno *et al.*, 2016; Torres *et al.*, 2019; Yepes *et al.*, 2015). De acuerdo con el análisis realizado por Keeling y Phillips (2007), los bosques tropicales del mundo por lo general no tienen valores de biomasa por encima de los 350 Mg.ha<sup>-1</sup>. Ureta (2015) menciona que los bosques amazónicos son un gran almacén de biodiversidad y funcionan como sumideros de carbono debido a la biomasa aérea que acumulan en las diversas especies arbóreas. La mayor concentración de individuos en clases diamétricas pequeñas es consistente con las características de bosque secundario (Cabrerá-Amaya y Rivera-Díaz, 2016), lo que da cuenta del efecto de los disturbios en la zona de estudio.

El BIVF, relacionado con el valor de importancia tradicional calculado comúnmente con base en los parámetros fitosociológicos de abundancia, frecuencia y dominancia permitió el análisis ecológico de las comunidades vegetales orientado a interpretaciones de la importancia relativa de las familias botánicas (Torres *et al.*, 2019). Ello proporciona información cuantitativa sobre la acumulación de biomasa, producción y calidad del sitio o condición ambiental de cada hábitat en específico ocupado por grupos de familias botánicas. Lo que ayuda a fundamentar sobre bases científicas las familias de mayor valor ecológico y capacidad para mantener las reservas de carbono. Esto facilita la toma de decisiones en los programas de restauración como contribución a los servicios ecosistémicos relacionados con las funciones de regulación y protección del ecosistema de pie de monte amazónico. En un estudio sobre estructura y biomasa a lo largo de un gradiente altitudinal en

el bosque siempreverde piemontano de Napo en Ecuador, Torres *et al.* (2019) obtuvieron resultados similares en cuanto al índice de biomasa, pero a nivel de especies, identificando las que más contribuyen a la biomasa y estructura.

Las afectaciones que sufren los bosques siempreverde piemontano de la zona alta de la microcuenca del río Puyo, determinadas por sitios que poseen una baja abundancia de familias botánicas como contribuyentes a la biomasa aérea acumulada, pueden resultar en el empobrecimiento de la captura de carbono de este importante reservorio de bosque. Vargas *et al.* (2019) refieren que la capacidad de los ecosistemas para almacenar carbono en forma de biomasa varía en función de la composición florística, la edad y densidad de la población. Esto se corresponde con los resultados del presente estudio, reportando variaciones en los sitios en cuanto a la composición florística, con estadios sucesiones que propician una masa vegetal disetánea y distinta densidad arbórea. Ello es de resaltar pues, según Ureta (2015), los bosques tropicales han captado un gran interés debido a que contribuyen en la captura de CO<sub>2</sub> en función de la biomasa aérea proporcionada por innumerables especies vegetales y las alteraciones en ellos pueden influir fuertemente en las emisiones y la fijación de carbono.

El patrón encontrado de baja representatividad de familias botánicas que acumulan carbono podría indicar que los futuros cambios del ecosistema pueden resultar en el empobrecimiento de los bosques amazónicos. Estos resultados se corresponden con lo reportado por Fauset *et al.* (2015) para los bosques amazónicos donde refieren que la producción de biomasa está altamente concentrada en pocas especies y que pueden ser menos resistentes a cambios ambientales de lo que se esperaría, dado que la alta diversidad de especies por lo general confiere una alta resiliencia ecológica. Del mismo modo, esta información proporciona una mejor comprensión de cómo las existencias de carbono en ecosistemas de bosques tropicales

podrían conducir a predicciones sobre los cambios de uso de suelos y futuros escenarios de cambio climático. En la zona alta de la microcuenca del río Puyo se constató, mediante el análisis del grado de perturbaciones, que son muy frecuentes las prácticas de cambio de uso del suelo, lo cual propicia alteraciones en la biomasa acumulada del bosque siempreverde piemontano. Estos elementos facilitan información básica para entender los stocks de biomasa en cada uno de los sitios de estudio.

Los resultados obtenidos del análisis de distribución espacial permitieron determinar las tendencias de cada uno de los sitios en cuanto a la acumulación de biomasa por familias botánicas. El comportamiento espacial encontrado obedece al grado de perturbaciones predominante en cada sitio. El análisis global de la distribución de especies y la composición dentro de un mosaico de paisaje permite entender el aporte y el papel que tienen cada uno de los hábitats disponibles en la distribución de las especies y la capacidad para garantizar su conservación en paisajes intervenidos (Petit y Petit, 2003).

De lo anterior se puede concluir que conocer la variación espacial local es importante para predecir el almacenamiento de carbono en los bosques de la Amazonía ecuatoriana. Los estudios que integran etapas sucesionales, topografía y otras fuentes de heterogeneidad local influyen en la estimación de la biomasa (Chave *et al.*, 2003; de Castilho *et al.*, 2006). Los sitios de estudio están caracterizados por estos elementos, lo que permite que se presenten diferentes tendencias de distribución en función de la acumulación de biomasa.

## CONCLUSIONES

La composición florística y estructural del bosque siempreverde piemontano de la zona alta de la microcuenca del río Puyo fue variable para los sitios de estudio sometidos a distintos niveles de perturbación. Esto se reflejó en el potencial de

biomasa aérea acumulada que resultó con valores de 161.84 a 339.70 Mg.ha<sup>-1</sup>; presentándose mayor stock de carbono en los sitios T1 y T5 y en la menor clase diamétrica.

El BIVF permitió reconocer familias claves para la captura de carbono y estructura ecológica del bosque (Moraceae, Arecaceae y Euphorbiaceae), demostrándose una variación en la contribución de familias para mantener el nivel de reservas de carbono. Por lo que se apunta a que las prácticas de aprovechamiento y cambio de uso de suelo generarían un alto riesgo en los árboles de mayor potencial de almacenamiento de carbono y pueden propiciar el empobrecimiento de las reservas de carbono en el bosque siempreverde piemontano de la zona alta de la microcuenca del río Puyo.

El DCA reportó la distribución de las familias en cuanto a reservas de carbono por cada uno de los sitios de estudio, identificando de forma tendencial las que más aportan a la reserva de carbono, a nivel local, con predominio de un pequeño número. Esto brinda información importante que facilita la selección de grupos de familias para la toma de decisiones relacionadas con la restauración de los sitios más perturbados de este reservorio de bosque.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a las instituciones públicas y a las no gubernamentales que apoyaron con la logística, personal de campo y académicos que posibilitaron el realizar el trabajo de inventario en la zona alta de la microcuenca del río Puyo. Tal es el caso de la Universidad Estatal Amazónica, el Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial de Pastaza y la ONG The Nature Conservancy.

## CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

## CONTRIBUCIÓN POR AUTOR

Todos los autores contribuyeron de manera equitativa y son los únicos responsables de la obra en todos los aspectos que condujeron a la elaboración de su publicación.

## REFERENCIAS

- Bravo, F. O., del Río, M., Bravo-Oviedo, A., Montero, G., Ruiz Peinado, R. y del Peso, C.** (2017). Forest carbon sequestration: the impact of forest management. En F. Bravo, V. Lemay y R. Jandl, *Managing Forest Ecosystems: The Challenge of Climate Change* (pp. 251-275). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-28250-3\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-319-28250-3_13)
- Burbano-Orjuela, H.** (2016). El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 33(2), 117-124. <http://doi.org/10.22267/rcia.163302.58>
- Cabrera-Amaya, D. y Rivera-Díaz, O.** (2016). Floristic composition and structure of riparian forests of the lower basin of Pauto River, Casanare, Colombia. *Caldasia*, 38(1), 53-85. <http://doi.org/10.15446/caldasia.v38n1.57829>
- Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M. A., Chambers, J. Q., Eamus, D., Fölster, H., Fromard, F., Higuchi, N. y Kira, T.** (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, 145(1), 87-99. <https://doi.org/10.1007/s00442-005-0100-x>
- Chave, J., Condit, R., Lao, S., Caspersen, J. P., Foster, R. B. y Hubbell, S. P.** (2003). Spatial and temporal variation of biomass in a tropical forest: results from a large census plot in Panama. *Journal of Ecology*, 91(2), 240-252. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2745.2003.00757.x>
- Chave, J., Coomes, D., Jansen, S., Lewis, S. L., Swenson, N. G. y Zanne, A. E.** (2009). Towards a worldwide wood economics spectrum. *Ecology Letters*, 12(4), 351-366. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01285.x>
- Cuenca, M.E., Jadán, O., Cueva, K. y Aguirre, C.** (2017). Carbono y ecuaciones alométricas para grupos de especies y bosque de tierras bajas, Amazonía Ecuatoriana. *Cedamaz*, 4(1). <http://192.188.49.30/index.php/cedamaz/article/view/226>
- Cueva, E., Lozano, D. y Yaguana, C.** (2019). Efecto de la gradiente altitudinal sobre la composición florística, estructura y biomasa arbórea del bosque seco andino, Loja, Ecuador. *Bosque (Valdivia)*, 40(3), 365-378. <http://doi.org/10.4067/S0717-92002019000300365>
- de Castilho, C. V., Magnusson, W. E., de Araújo, R. N. O., Luizao, R. C., Luizao, F. J., Lima, A. P. y Higuchi, N.** (2006). Variation in aboveground tree live biomass in a central Amazonian Forest: Effects of soil and topography. *Forest Ecology and Management*, 234(1-3), 85-96. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.06.024>
- Fauset, S., Johnson, M. O., Gloor, M., Baker, T. R., Monteagudo, A., Brienen, R. J., Feldpausch, T. R., Lopez-Gonzalez, G., Malhi, Y. y Ter Steege, H.** (2015). Hyperdominance in Amazonian forest carbon cycling. *Nature Communications*, 6(1), 1-9. <https://doi.org/10.1038/ncomms7857>
- Flores-Valencia, M., Araujo-Murakami, A., Cabrera-Severich, P. G., Zuck, D. C., Molina-Olivera, A. y Lazarte-Chispa, M.** (2016). Diversidad y composición florística de los bosques amazónicos del sur de la amazonia en el sector Kenia, Guarayos, Bolivia. *Kempffiana*, 12(2), 20-46.
- Fu, Z., Li, D., Hararuk, O., Schwalm, C., Luo, Y., Yan, L. y Niu, S.** (2017). Recovery time and state change of terrestrial carbon cycle after disturbance. *Environmental Research Letters*, 12(10), 104004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa8a5c>
- Gentry, A. H.** (1982). Neotropical floristic diversity: phytogeographical connections between Central and South America, Pleistocene climatic fluctuations, or an accident of the Andean orogeny? *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 69(3), 557-593.
- Gentry, A. H.** (1988). Changes in plant community diversity and floristic composition on environmental and geographical gradients. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 75(1), 1-34.

- González, A. J., Andrade, G. A. P., Sospedra, R. S. y Rodríguez, M. P. R.** (2016). Perturbaciones humanas sobre la composición y estructura del bosque semidecídulo mesófilo, reserva de la biósfera Sierra del Rosario, Cuba. *Sathiri*, 10, 196-206.
- Gutiérrez, I. y Becerra, P.** (2018). Composición, diversidad y estructura de la vegetación de bosques ribereños en el centro sur de Chile. *Bosque (Valdivia)*, 39(2), 239-253. <http://doi.org/10.4067/S0717-92002018000200239>
- Instituto Nacional de Meteorología en Hidrología del Ecuador** (2014). *Anuario meteorológico del Ecuador*. Instituto Nacional de Meteorología en Hidrología del Ecuador.
- Jadán, O., Quizhpe, W., Pacheco, E., Aguirre, Z., González, M., Ponce, E. y Peña, D.** (2017). Riqueza florística y carbono almacenado en tres pisos altitudinales de bosques amazónicos, Zamora Chunchipe, Ecuador. *Bosques Latitud Cero*, 7(1).
- Jones, I. L., DeWalt, S. J., Lopez, O. R., Bunnefeld, L., Pattison, Z. y Dent, D. H.** (2019). Above-and belowground carbon stocks are decoupled in secondary tropical forests and are positively related to forest age and soil nutrients respectively. *Science of The Total Environment*, 697, 133987. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133987>
- Keeling, H. C. y Phillips, O. L.** (2007). The global relationship between forest productivity and biomass. *Global Ecology and Biogeography*, 16(5), 618-631. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2007.00314.x>
- Krug, J. H.** (2019). How can forest management increase biomass accumulation and CO<sub>2</sub> sequestration? A case study on beech forests in Hesse, Germany. *Carbon Balance and Management*, 14(1), 17. <https://doi.org/10.1186/s13021-019-0132-x>
- Lathuilière, M. J., Coe, M. T. y Johnson, M. S.** (2016). A review of green-and blue-water resources and their trade-offs for future agricultural production in the Amazon Basin: what could irrigated agriculture mean for Amazonia? *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(6), 2179. <https://doi.org/10.5194/hess-20-2179-2016>
- Magurran, A. E.** (2013). *Measuring biological diversity*. John Wiley & Sons.
- Messinger, M., Asner, G. P. y Silman, M.** (2016). Rapid assessments of Amazon forest structure and biomass using small unmanned aerial systems. *Remote Sensing*, 8(8), 615. <https://doi.org/10.3390/rs8080615>
- Mitchard, E. T., Feldpausch, T. R., Brienen, R. J., Lopez-Gonzalez, G., Monteagudo, A., Baker, T. R., Lewis, S. L., Lloyd, J., Quesada, C. A. y Gloor, M.** (2014). Markedly divergent estimates of Amazon forest carbon density from ground plots and satellites. *Global Ecology and Biogeography*, 23(8), 935-946. <https://doi.org/10.1111/geb.12168>
- Mori, A. S., Lertzman, K. P. y Gustafsson, L.** (2017). Biodiversity and ecosystem services in forest ecosystems: a research agenda for applied forest ecology. *Journal of Applied Ecology*, 54(1), 12-27. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12669>
- Myers, N., Mittermeier, R. A., Mittermeier, C. G., Da Fonseca, G. A. y Kent, J.** (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403(6772), 853. <https://doi.org/10.1038/35002501>
- Paky, E., Moreno, F. y Álvarez-Dávila, E.** (2017). Contenido de carbono en un bosque de tierra firme del resguardo Nonuya-Villazul, amazonia colombiana. *Colombia Forestal*, 20(2), 144-157. <http://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2017.2.a04>
- Palacios, W.** (2016). *Árboles del Ecuador: especies representativas*. Universidad Técnica del Norte.
- Patiño, J., Lozano, P., Tipán, C., Navarrete, H., López, R., Asanza, M. y Torres, B.** (2015). Composición florística y estructura de un bosque siempreverde piemontano de 600 a 700 m snm en la cuenca del río Piatúa, Napo, Ecuador. *Revista Amazónica Ciencia y Tecnología*, 4(2), 166-214.
- Petit, L. J. y Petit, D. R.** (2003). Evaluating the importance of human-modified lands for neotropical bird conservation. *Conservation Biology*, 17(3), 687-694. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.2003.00124.x>
- Quiceno, N. J., Tangarife, G. M. y Álvarez, L. R.** (2016). Estimación del contenido de biomasa, fijación de carbono y servicios ambientales, en un área de bosque primario en el resguardo indígena Piapoco Chigüiro-Chátare de Barrancominas, departamento

- del Guainía (Colombia). *Luna Azul*, 43, 171-202. <http://doi.org/10.17151/luaz.2016.43.9>
- Quintana, Y. G., Crespo, Y. A., Esponda, D. C. y Pérez, Y. L.** (2017). Contribución de herramientas ecológicas en la formación agropecuaria y forestal en las condiciones amazónicas del Ecuador. *REDVET. Revista Electrónica de Veterinaria*, 18(12), 1-11.
- Ter Braak, C. J.** (1986). Canonical correspondence analysis: a new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis. *Ecology*, 67(5), 1167-1179. <https://doi.org/10.2307/1938672>
- Ter Braak, C. J. y Smilauer, P.** (2012). Canoco reference manual and user's guide: software for ordination, version 5.0.
- Ter Steege, H., Pitman, N. C., Sabatier, D., Baraloto, C., Salomão, R. P., Guevara, J. E., Phillips, O. L., Castilho, C. V., Magnusson, W. E. y Molino, J. F.** (2013). Hyperdominance in the Amazonian tree flora. *Science*, 342(6156), 1243092.
- Tobías-Baeza, A., Salvador-Morales, P., Sánchez-Hernández, R., Ruiz-Acosta, S.d.C. y Andrade-Prado, H.** (2019). Composición florística y carbono en la vegetación arbórea de un área periurbana en Tabasco, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 6(17), 369-376. <http://doi.org/10.19136/era.a6n17.2009>
- Tong, X., Brandt, M., Yue, Y., Ciais, P., Jepsen, M. R., Penuelas, J., Wigneron, J. P., Xiao, X., Song, X. P. y Horion, S.** (2020). Forest management in southern China generates short term extensive carbon sequestration. *Nature Communications*, 11(1), 1-10. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13798-8>
- Torres, B., Vasseur, L., López, R., Lozano, P., García, Y., Arteaga, Y., Bravo, C., Barba, C. y García, A.** (2019). Structure and above ground biomass along an elevation small-scale gradient: case study in an Evergreen Andean Amazon forest, Ecuador. *Agroforestry Systems*, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-00342-8>
- Trugman, A. T., Medvigy, D., Hoffmann, W. A. y Pellegrini, A. F.** (2018). Sensitivity of woody carbon stocks to bark investment strategy in Neotropical savannas and forests. *Biogeosciences*, 15(1). <https://doi.org/10.5194/bg-15-233-2018>
- Ureta, A. M.** (2015). Aporte de biomasa aérea de las especies arbóreas de la familia Myristicaceae en los bosques amazónicos del Perú. *Revista de Biología Tropical*, 63(1), 263-273.
- Valdés-Sáenz, M. A., García-Quintana, Y., Escarré-Esteve, A., Flores, J., Geada-López, G., Arteaga-Crespo, Y. y Valdés-Sáenz, C. R.** (2014). Estructura de un bosque natural perturbado de *Pinus tropicalis* Morelet en Galalón, Cuba. *Botanical Sciences*, 92(3), 417-423.
- Vargas, E. P. R., Agudelo, E. D. S., Motta, A. Y. G., Delgado, P. A. M. y Valencia, W. H.** (2019). Carbono almacenado en estrato arbóreo de sistemas ganaderos y naturales del municipio de Albania, Caquetá, Colombia. *Revista Ciencia y Agricultura*, 16(3), 35-46.
- Vasco, C., Torres, B., Pacheco, P. y Griess, V.** (2017). The socioeconomic determinants of legal and illegal smallholder logging: Evidence from the Ecuadorian Amazon. *Forest Policy and Economics*, 78, 133-140. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2017.01.015>
- Vashum, K. T. y Jayakumar, S.** (2012). Methods to estimate above-ground biomass and carbon stock in natural forests-a review. *Journal of Ecosystem & Ecography*, 2(4), 1-7. <http://doi.org/10.4172/2157-7625.1000116>
- Vega, R. R.** (2020). Diversidad florística del bosque seco tropical en las subregiones bajo y medio Sinú, Córdoba, Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 68(1). <http://dx.doi.org/10.4172/2157-7625.1000116>
- Yepes, A., Herrera, J., Phillips, J., Cabrera, E., Galindo, G., Granados, E., Duque, Á., Barbosa, A., Olarte, C. y Cardona, M.** (2015). Contribución de los bosques tropicales de montaña en el almacenamiento de carbono en Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 63(1), 69-82. [https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0034-77442015000100007](https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-77442015000100007)





## Variación de biomasa en un periodo de 21 años en un Bosque Atlántico del Alto Paraná (Paraguay)

### Biomass variation over a 21 years period in an Upper Parana Atlantic Forest, Paraguay

Victoria Rika Kubota<sup>1\*</sup>, Rubén Darío Caballero-González<sup>1</sup>,  
Aracery Elizabeth Fernández-Lomaquíz<sup>2</sup>

Kubota, V. R., Caballero-González, R. D. y Fernández-Lomaquíz, A. E. (2021). Variación de biomasa en un periodo de 21 años en un Bosque Atlántico del Alto Paraná (Paraguay). *Colombia Forestal*, 24(1), 60-70

**Recepción:** 16 de mayo 2020

**Aprobación:** 21 de septiembre 2020

#### Resumen

Se analizó la variación temporal de biomasa en un remanente del Bosque Atlántico del Alto Paraná en Paraguay, haciendo énfasis en la dinámica forestal y las clases diamétricas. Se estimó la biomasa total de los árboles con DAP  $\geq 10$  cm, en una parcela permanente de 1 ha ubicada en la Reserva Natural Tati Yupi de Itaipu Binacional, empleando datos de mediciones de los años 1995, 2002, 2005, 2008, 2011 y 2016. En 21 años hubo un aumento de biomasa de  $0.82 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ ; sin embargo, la variación no fue uniforme entre las mediciones. En los periodos 1995-2002 y 2002-2005 se presentó reducción de biomasa de  $4.28$  y  $0.81 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ , principalmente debido a la elevada mortalidad de los árboles. Mientras que en los lapsos de 2005-2008, 2008-2011 y 2011-2016 hubo aumento de  $6.00$ ,  $2.97$  y  $4.53 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ , respectivamente. La variación fue más notable en las clases diamétricas inferiores.

**Palabras clave:** bosque subtropical, clase diamétrica, dinámica forestal, Reserva de Biosfera Itaipu, parcela permanente, Reserva Natural Tati Yupi

#### Abstract

The temporal variation of the tree biomass was analyzed in a remaining Upper Parana Atlantic Forest in Paraguay, focusing on forest dynamics and diameter classes. The total biomass of all individuals with DBH  $\geq 10$  cm was estimated in a permanent plot of 1 ha located in the Tati Yupi Nature Reserve of Itaipu Binacional, using measurement data from 1995, 2002, 2005, 2008, 2011 and 2016. In 21 years, the biomass increased by  $0.82 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$ ; however the variation was not uniform between measurements. In the period 1995 - 2002 and 2002 - 2005, there was a reduction in total biomass of  $4.28$  and  $0.81 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$ , mainly due to high tree mortality. While in the period 2005 - 2008, 2008 - 2011 and 2011 - 2016, there was an increase in biomass of  $6.00$ ,  $2.97$  and  $4.53 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$ , respectively. The variation was more visible in lower diameter classes.

**Key words:** subtropical forest, diametric class, Forest dynamics, Itaipu Biosphere Reserve, Permanent plot, Tati Yupi Natural Reserve.

<sup>1</sup> División de Áreas Protegidas, Dirección de Coordinación Ejecutiva, Itaipu Binacional, Paraguay.

<sup>2</sup> Superintendencia de Obras y Desarrollo, Dirección de Coordinación Ejecutiva, Itaipu Binacional, Paraguay.

\* [kubota@itaipu.gov.py](mailto:kubota@itaipu.gov.py). Autor de correspondencia.

## INTRODUCCIÓN

El estudio de la variación temporal de la biomasa forestal permite comprender mejor la participación de los bosques en el ciclo global de carbono, debido a que este elemento representa aproximadamente el 47 % de la biomasa arbórea (McGroddy, Daufresne y Hedin, 2004; Pan *et al.*, 2011). A medida que se evidencian los efectos del cambio climático, el interés mundial por la estimación y la conservación de la biomasa forestal incrementa (Pan *et al.*, 2011). Esto se ve reflejado en la implementación de mecanismos como la reducción de emisiones por deforestación y degradación forestal en países en desarrollo (REDD+; Food and Agriculture Organization [FAO], 2020).

La biomasa en los bosques primarios tiende a mantenerse en equilibrio en el tiempo con pequeñas variaciones debido a disturbios naturales (Yamamoto, 2000). Estas fluctuaciones temporales a causa de la mortandad y el crecimiento de los árboles podrían ser consideradas como parte del funcionamiento normal de los bosques (Chave, Riéra y Dubois, 2001). Sin embargo, varios estudios demostraron que la biomasa de bosques tropicales está sufriendo cambios mayores con el paso de los años (Hoshizaki *et al.*, 2004; Wigneron *et al.*, 2020). Los fenómenos climáticos como El Niño y las sequías son algunas de las posibles causas de las transiciones extraordinarias de la biomasa forestal (Phillips y Lewis, 2016; Wigneron *et al.*, 2020). Por otra parte, la biomasa tiende a incrementar a través del tiempo en los bosques en proceso de recuperación (Molas, 2016; Rodas, 2016). Estos estudios indican que aún existen vacíos de conocimiento sobre la dinámica de biomasa de los bosques.

En comparación con los bosques tropicales y los boreales, aún se conoce poco sobre la biomasa y la dinámica de los bosques subtropicales. Para la formulación y la puesta en funcionamiento de políticas de mitigación y adaptación al cambio climático, es necesario conocer el comportamiento de estos a través del tiempo (en lo que respecta a su biomasa) y analizarlo considerando el contexto

global. Esto se puede lograr mediante el monitoreo de los bosques a través de las mediciones de parcelas permanentes que permiten identificar los cambios poblacionales y volumétricos en un área de estudio (Chave *et al.*, 2001; Phillips *et al.*, 2009). El monitoreo a largo plazo permite observar mejor las tendencias de la dinámica forestal.

El Bosque Atlántico del Alto Paraná (BAAPA) es una de las 15 ecorregiones que forma parte del complejo ecorregional denominado Bosque Atlántico y se encuentra en parte de Brasil, Paraguay y Argentina, con una superficie de 47 120 400 ha (Di Bitetti, Placci y Dietz, 2003). Originalmente, estuvo ocupado por bosques subtropicales semicaducifolios húmedos con la estructura más compleja y con mayor contenido de biomasa de Paraguay (Tortorelli, 1967). Pero, en los últimos siglos, el BAAPA fue explotado mediante la extracción de *Ilex paraguariensis* A. St.-Hil. y de maderas de especies de alto valor comercial y de grandes dimensiones, ocasionando la reducción de cantidad de árboles grandes en los bosques remanentes (Fleytas, 2007; Spichiger, Bertoni y Loizeau, 1992; Tortorelli, 1967). Adicional a esto, en las últimas décadas, extensas superficies del BAAPA fueron deforestadas y transformadas, principalmente, a cultivos y pasturas (De Sy *et al.*, 2015). En Paraguay la cobertura forestal del BAAPA se redujo al 73 % en 1973, al 24.9 % en 2000 (Huang *et al.*, 2007) y al 9 % para el 2017 (Da Ponte, 2017). Esta fragmentación y degradación histórica influye en la cantidad y la dinámica de biomasa en los bosques remanentes (Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Asunción, 2013). Sin embargo, aún es escaso el conocimiento de estas dinámicas a largo plazo en la región; por lo que este es el primer estudio con más de 20 años de monitoreo realizado en Paraguay.

La Reserva Natural Tati Yupi, administrada por la Itaipu Binacional, protege uno de los últimos remanentes del BAAPA en Paraguay. Fue creada en el año 1984 con el nombre de Refugio Biológico Tati Yupi y fue reconocida como área silvestre protegida mediante el Decreto Presidencial 7442 en el año 2017, adoptando la denominación de Reserva

Natural Tati Yupi. Tiene 2245 ha, de las cuales 1672 ha corresponden a una formación boscosa que ha sido explotada en sus especies más valiosas antes de la creación del Refugio y que en la actualidad se encuentra en etapa de recuperación (Itaipu, 2016). De acuerdo con su composición arbórea (Caballero, 2014 y Vera, 2009), esta formación boscosa corresponde a bosques dominados por especies de la familia Lauraceae, así como especies de *Cedrela fissilis* Vell. y *Chrysophyllum gonocarpum* (Mart. & Eichler) Engl., que se desarrollan en suelos bien drenados (Spichiger *et al.*, 1992). El bosque de la Reserva Natural Tati Yupi tiene las características propias de los remanentes del BAAPA en proceso de recuperación.

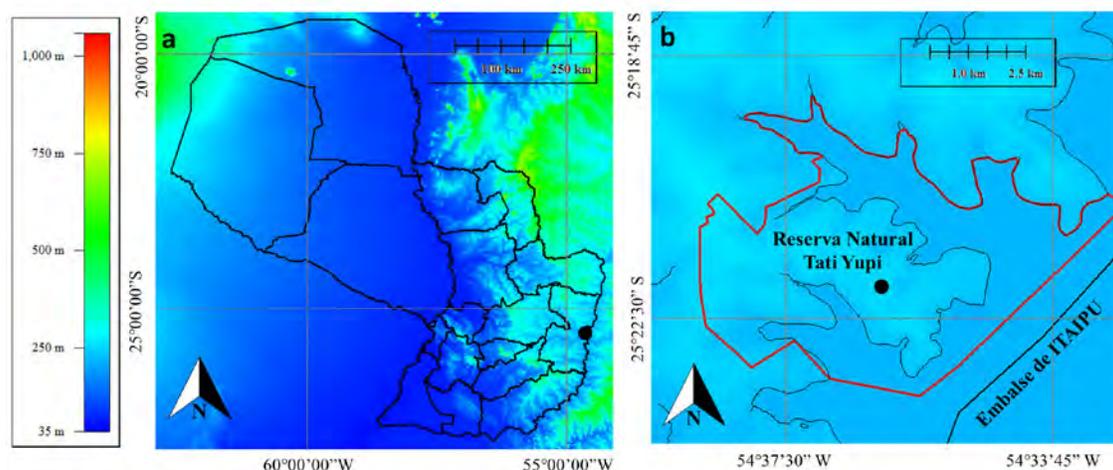
El objetivo de este estudio fue analizar la variación temporal de la biomasa total arbórea en la Reserva Natural Tati Yupi, haciendo énfasis en la dinámica del bosque (mortalidad, reducción volumétrica, crecimiento y reclutamiento de los árboles) y en las clases diamétricas de los individuos, considerando a esta reserva como una formación representativa del remanente del BAAPA en proceso de recuperación. La hipótesis planteada fue: en un periodo de 21 años hubo incremento de biomasa total arbórea debido al crecimiento y reclutamiento de los individuos, dándose la variación más notable en las clases diamétricas inferiores.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

El estudio se realizó en una parcela permanente de monitoreo instalada en la Reserva Natural Tati Yupi (25°22'1.8" latitud sur - 54°36'10.7" longitud oeste), la cual se encuentra en una zona periurbana del municipio de Hernandarias, departamento de Alto Paraná, Paraguay, y colinda con el embalse de Itaipu Binacional (figura 1). La altitud del terreno oscila entre los 220 y 260 m y presenta una temperatura media anual de 22 °C y una precipitación media anual de 1870 mm (Itaipu, 2016). El clima está clasificado, según Köppen, como templado lluvioso (Cfa) y, de acuerdo con el sistema de Thornthwaite, como Húmedo B2 (Itaipu, 2016). En la zona domina el suelo del orden Oxisol: de color pardo rojizo y textura limo arcillosa (Vera, 2009). La Reserva Natural Tati Yupi es una de las áreas núcleo de la Reserva de Biosfera de Itaipu, que fue reconocida por el programa Hombre y Biosfera de la Unesco en el año 2017.

Esta formación corresponde a un bosque subtropical semidecíduo con especies latifoliadas (Vera, 2009). Algunas de las especies arbóreas representativas son: *Diatenopteryx sorbifolia* Radlk., *Chrysophyllum gonocarpum* (Mart. & Eichler) Engl.,



**Figura 1a.** Ubicación de la Reserva Natural Tati Yupi (punto negro) dentro del territorio paraguayo; **b.** Ubicación de la parcela permanente (punto negro) dentro de la Reserva Natural Tati Yupi (polígono rojo) y los principales cauces hídricos de la zona (líneas negras).

*Nectandra lanceolata* Nees & Mart., *Cabralea canjerana* (Vell.) Mart., *Plinia rivularis* (Cambess.) Rotman, *Ocotea diospyrifolia* (Meisn.) Mez, *Cedrela fissilis* Vell., *Astronium fraxinifolium* Schott, *Holocalyx balansae* Micheli, entre otras (Caballero, 2014). La cantidad de árboles por hectárea supera los 500 individuos que corresponden a 70 especies aproximadamente y la altura máxima del estrato arbóreo alcanza los 30 m (Vera, 2009).

## Muestreo y análisis de datos

Fueron empleados datos de mediciones de una parcela permanente de 100 × 100 m (1 ha) (Caballero, 2014), correspondientes a los años 1995, 2002, 2005, 2008, 2011 y 2016, lo que abarca un periodo de 21 años. Esta parcela está ubicada en un bosque alterado en proceso de recuperación y fue instalada evitando variaciones topográficas. Todos los árboles con diámetro a la altura del pecho (DAP) ≥ 10 cm están enumerados e identificados. En la primera medición fueron registrados datos de DAP y altura total de todos los individuos vivos; mientras que, para las mediciones posteriores, se utilizaron datos de individuos vivos, incluyendo a los reclutados que alcanzaron el DAP mínimo considerado; además, fueron registrados aquellos muertos después de la medición anterior. El DAP fue medido empleando cintas diamétricas, mientras que la altura fue estimada usando como referencia una vara altimétrica. Se calculó el diámetro cuadrático medio (DCM) de los fustes de los árboles bifurcados por debajo del DAP.

El monitoreo de 21 años fue posible debido a que tanto la metodología como los datos de medición depositados en la base de datos institucional son manejados por un equipo técnico designado a la evaluación y monitoreo de la biodiversidad de las áreas protegidas de Itaipu.

Se estimó la biomasa total (sumatoria de la biomasa aérea y subterránea) de los individuos registrados en cada una de las mediciones, empleando una ecuación alométrica (Sato *et al.*, 2015).

$$BT = 0.0505 \times (D^2H)^{0.9564}$$

Donde,

BT: biomasa total (kg)

D: DAP (cm) o DCM (cm)

H: altura total (m)

No se realizó descuento de biomasa en aquellos individuos con ramas rotas o aquellos con cavidades en los fustes. La biomasa de la parcela de cada medición fue estimada mediante la sumatoria de la biomasa total de todos los individuos vivos registrados en la ocasión y fue expresada en Mg.ha<sup>-1</sup>. Las diferencias entre las mediciones fueron consideradas como variación de biomasa total. El incremento de biomasa de la parcela debido al crecimiento y el reclutamiento de individuos fue considerado como ganancia; mientras que la variación de biomasa debido a la muerte y a la disminución de DAP o altura total fue considerada como reducción (transformación a necromasa).

Se realizó la comparación de biomasa total entre las mediciones. Además, se analizó la contribución de los cuatro factores de variación de biomasa y la variación por clase diamétrica.

## RESULTADOS

### Variación de biomasa debido a la dinámica

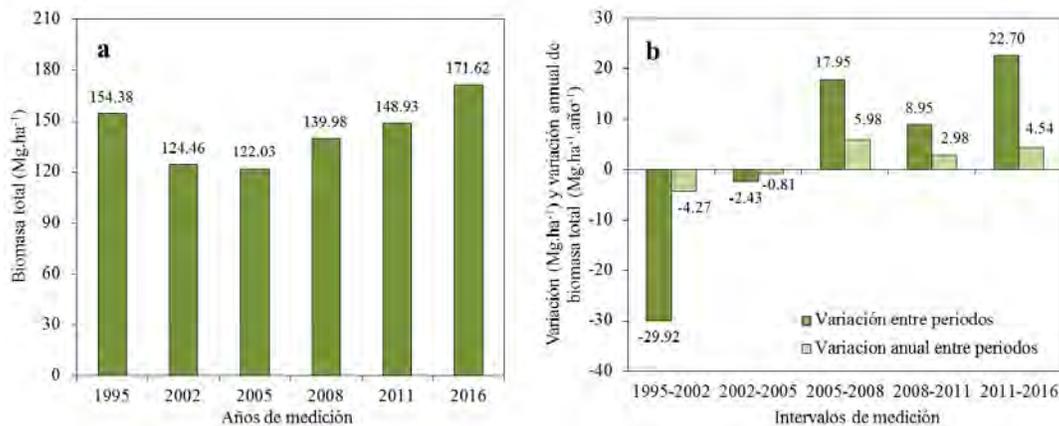
Durante 21 años la biomasa aumentó en 17.15 Mg.ha<sup>-1</sup> (0.82 Mg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup>, figura 2a). Sin embargo, la variación no fue uniforme entre las mediciones. La biomasa total del bosque estudiado tuvo un descenso entre el año 1995 y el año 2005. Posteriormente, la biomasa fue aumentando gradualmente, hasta que en la última medición superó el valor registrado en el inicio. Así como la biomasa total, también se observó la variación en la cantidad de individuos inventariados, que fueron 509, 465, 477, 536, 567 y 567 para las siete mediciones.

La mayor disminución de biomasa total se registró en el periodo 1995-2002, con una reducción de 29.96 Mg.ha<sup>-1</sup> que equivale a 4.28 Mg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> (figura 2b). A partir del 2005 hasta el 2016 se registró un aumento gradual de biomasa total. En el periodo 2005-2008 se produjo el mayor incremento anual de biomasa (6.00 Mg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup>).

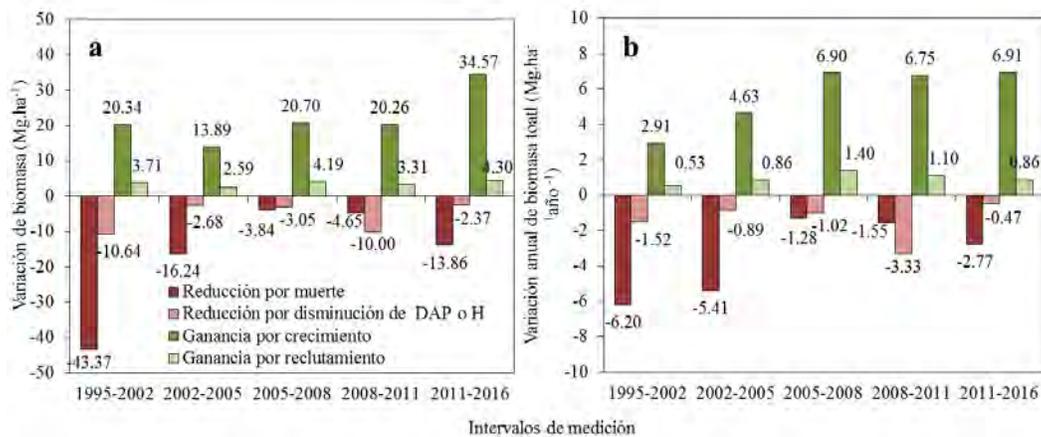
En todos los periodos, la ganancia de la biomasa total debido al crecimiento de individuos fue superior al incremento por reclutamiento. Mientras que la reducción de biomasa total por la muerte de individuos fue superior a la reducción debido

a la disminución del DAP o altura total, a excepción del periodo 2008-2011 (figuras 3a y 3b).

En el periodo 1995-2002 se registró la mayor cantidad de individuos muertos y con disminución de DAP o altura (tabla 1). Para el 2002, un total de 136 individuos, que equivale al 26.72 % de árboles registrados en la medición del 1995, murieron ocasionando una reducción de biomasa total de 6.20 Mg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup>; mientras que 98 individuos presentaron disminución de DAP o altura total causando una merma de biomasa de 1.52 Mg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> (tabla 1, figuras 3a y 3b). En este periodo también se observó la mayor cantidad de individuos reclutados (92).



**Figura 2a.** Comparación de la biomasa total entre las mediciones; **b.** Comparación de la variación de biomasa total y de la variación anual de biomasa total entre los periodos de medición.



**Figura 3a.** Comparación de la variación de biomasa total debido a la muerte, disminución de DAP o altura (H), crecimiento y reclutamiento de individuos entre periodos. **b.** Comparación de la variación anual de biomasa total debido a la muerte, disminución de DAP o altura (H), crecimiento y reclutamiento de individuos entre periodos.

**Tabla 1.** Número de árboles vivos, muertos, con disminución de DAP o altura (H), reclutados y con crecimiento registrados en cada medición (ind.ha<sup>-1</sup>)

| Condiciones                       | 1995-2002 | 2002-2005 | 2005-2008 | 2008-2011 | 2011-2016 |
|-----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Muertos</b>                    | 136       | 60        | 25        | 41        | 74        |
| <b>Con disminución de DAP o H</b> | 98        | 44        | 73        | 90        | 40        |
| <b>Reclutados</b>                 | 92        | 72        | 84        | 72        | 74        |
| <b>Con crecimiento</b>            | 260       | 320       | 371       | 403       | 434       |

En los periodos 2002-2005 y 2005-2008 se observó la reducción gradual de la variación de biomasa total causada por la muerte de individuos (5.41 y 1.28 Mg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup>) así como el número de árboles muertos (60 y 25; figura 3a, b y tabla 1). En los mismos periodos se registró el aumento gradual de la ganancia de biomasa total debido al crecimiento de los árboles (4.63 y 6.90 Mg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup>), así como el número de individuos con crecimiento volumétrico (320 y 371). La ganancia de biomasa total por el reclutamiento de individuos también indicó un aumento gradual (0.86 y 1.40 Mg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup>); no obstante, el número de individuos reclutados fue inferior a los encontrados en el periodo 1995-2002 (72 y 84).

En los periodos 2008-2011 y 2011-2016 se observó un aumento en variación de biomasa total por la muerte de individuos (1.55 y 2.77 Mg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup>) y de la cantidad de árboles muertos (41 y 74, figura 3a, b y tabla 1). La ganancia de biomasa por crecimiento de individuos presentó valores similares entre los periodos (6.75 y 6.91 Mg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup>),

así como la cantidad de árboles con crecimiento (403 y 434).

### Variación de biomasa por clase diamétrica

En todas las mediciones hubo mayor cantidad de individuos con diámetros inferiores (tabla 2). Por otra parte, el mayor valor de biomasa total fue registrado en las clases diamétricas intermedias (20-29.9, 30-39.9 y 40-49.9 cm). Se observó mayor ganancia de biomasa en las clases diamétricas inferiores, alcanzando un valor máximo de 3.95 y 1.63 Mg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> en la clase 10-19.9 y 20-29.9 cm, respectivamente (tabla 3). A pesar de que las variaciones de biomasa fueron menores en las clases diamétricas superiores, la muerte de cada individuo de mayor dimensión tuvo gran influencia en la reducción de biomasa. En el periodo 1995-2002 la muerte de un individuo con DAP de 76.50 cm, ocasionó la reducción de 0.46 Mg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> de biomasa (tabla 2 y 3).

**Tabla 2.** Distribución de biomasa total (Mg.ha<sup>-1</sup>) y cantidad de individuos (entre paréntesis) por clase diamétrica (cm)

| Clase diamétrica | 1995        | 2002        | 2005        | 2008        | 2011        | 2016        |
|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>10-19.9</b>   | 22.98 (303) | 19.87 (292) | 20.33 (311) | 24.30 (351) | 28.03 (365) | 28.26 (347) |
| <b>20-29.9</b>   | 31.28 (104) | 21.14 (80)  | 21.42 (80)  | 26.81 (98)  | 30.38 (110) | 38.73 (129) |
| <b>30-39.9</b>   | 36.84 (58)  | 33.85 (54)  | 31.85 (51)  | 31.10 (48)  | 30.95 (49)  | 34.33 (50)  |
| <b>40-49.9</b>   | 34.94 (30)  | 25.91 (26)  | 24.32 (22)  | 30.32 (26)  | 27.30 (27)  | 31.90 (24)  |
| <b>50-59.9</b>   | 19.48 (11)  | 18.55 (11)  | 18.39 (11)  | 20.80 (11)  | 23.09 (13)  | 25.46 (13)  |
| <b>60-69.9</b>   | 2.02 (1)    | 2.34 (1)    | 2.53 (1)    | 2.76 (1)    | 4.88 (2)    | 8.00 (3)    |
| <b>70-79.9</b>   | 6.87 (2)    | 2.78 (1)    | 3.18 (1)    | -           | -           | -           |
| <b>80-89.9</b>   | -           | -           | -           | 3.91 (1)    | 4.29 (1)    | 4.88 (1)    |

**Tabla 3.** Ganancia por crecimiento y por reclutamiento (Gan.), reducción por muerte y disminución de DAP o altura (Red.) y variación de biomasa total (Dif.) por clase diamétrica (cm). Todos los valores en Mg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup>

| Clase diamétrica | 1995-2002 |      |       | 2002-2005 |      |       | 2005-2008 |      |      | 2008-2011 |      |       | 2011-2016 |      |      |
|------------------|-----------|------|-------|-----------|------|-------|-----------|------|------|-----------|------|-------|-----------|------|------|
|                  | Gan.      | Red. | Dif.  | Gan.      | Red. | Dif.  | Gan.      | Red. | Dif. | Gan.      | Red. | Dif.  | Gan.      | Red. | Dif. |
| 10-19.9          | 1.45      | 0.99 | 0.46  | 2.45      | 0.85 | 1.60  | 3.67      | 0.45 | 3.21 | 3.95      | 0.87 | 3.08  | 3.12      | 0.84 | 2.28 |
| 20-29.9          | 0.73      | 1.57 | -0.84 | 1.28      | 0.79 | 0.49  | 1.26      | 0.46 | 0.81 | 1.53      | 0.87 | 0.65  | 1.63      | 0.64 | 0.99 |
| 30-39.9          | 0.68      | 1.37 | -0.70 | 0.79      | 1.84 | -1.05 | 1.34      | 1.19 | 0.16 | 1.10      | 0.90 | 0.20  | 1.33      | 0.61 | 0.72 |
| 40-49.9          | 0.44      | 1.75 | -1.31 | 0.57      | 1.75 | -1.18 | 0.89      | 0.19 | 0.69 | 0.79      | 1.70 | -0.91 | 0.82      | 0.78 | 0.04 |
| 50-59.9          | 0.10      | 1.44 | -1.34 | 0.21      | 1.08 | -0.87 | 0.81      | 0.01 | 0.81 | 0.29      | 0.53 | -0.24 | 0.69      | 0.38 | 0.31 |
| 60-69.9          | 0.05      | -    | 0.05  | 0.06      | -    | 0.06  | 0.08      | -    | 0.08 | 0.07      | -    | 0.07  | 0.07      | -    | 0.07 |
| 70-79.9          | -         | 0.58 | -0.58 | 0.13      | -    | 0.13  | 0.24      | -    | 0.24 | -         | -    | -     | -         | -    | -    |
| 80-89.9          | -         | -    | -     | -         | -    | -     | -         | -    | -    | 0.13      | -    | 0.13  | 0.12      | -    | 0.12 |

## DISCUSIÓN

### Variación de biomasa

La variación de número de individuos y de biomasa total observada en este estudio refleja la dinámica existente en el BAAPA. El comportamiento evidenciado en la parcela indica que posterior a la elevada pérdida de individuos o sus partes, como las ramas, hay una tendencia de incremento de regeneración y del crecimiento de los árboles remanentes. Este es un fenómeno explicado por Yamamoto (2000) y Lindner y Sattler (2012), quienes indican que la alteración de los bosques puede afectar la dinámica de tal forma que la perturbación podría ser apreciable en sus reservas de biomasa por largos periodos de tiempo.

El periodo de mayor reducción de biomasa total debido a la mortandad de árboles y disminución de DAP o altura total de este estudio (1995-2002) coincide con la ocurrencia del fenómeno del Niño extremadamente fuerte registrado entre el año 1997 a 1998, seguido de una prolongada La Niña que inició a mediados de 1998 y culminó al principio del 2001 (World Meteorological Organization [WMO], 2014). Wigneron *et al.* (2020) también encontraron reducción de biomasa forestal en los bosques tropicales de África, América y Asia

como consecuencia del fenómeno El Niño registrado entre el 2015 a 2016. Por otra parte, Phillips *et al.* (2009) identificaron reducción de biomasa a causa de la sequía del año 2005 usando datos de 123 parcelas ubicadas en el Amazonas. No obstante, no se cuenta con suficientes evidencias para afirmar la relación entre la variación de biomasa total del bosque estudiado con los fenómenos climatológicos.

El aporte de los árboles con DAP elevado a la biomasa total de la parcela fue relevante a pesar de su poca abundancia. La cantidad de individuos con dimensiones mayores registrada en este estudio fue inferior a la reportada por Molas (2016), quien encontró cinco árboles con DAP > 80 cm en una parcela de 1 ha, teniendo uno de ellos un DAP > 100 cm. Por otra parte, el DAP medio ( $20.60 \pm 0.30$  cm) de la parcela estudiada determinado con los datos de todas las mediciones fue inferior al valor medio de las 13 parcelas instaladas en el BAAPA por Spichiger *et al.* (1992;  $23.15 \pm 5.32$  cm).

Chave *et al.* (2003) reportaron una clara tendencia de incremento de biomasa en las clases diamétricas inferiores (1-30 cm) y una reducción en las clases superiores (40-110 cm). En este estudio la tendencia de la variación de biomasa por clase diamétrica fue similar pero no tan clara como la reportada por los citados autores.

## Comparación con las tendencias globales

Los estudios de la variación de biomasa realizados en la región indican una tendencia de incremento de la masa forestal a través del tiempo. No obstante, el incremento de biomasa encontrado en el periodo de 21 años ( $0.82 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ ) fue inferior a los valores observados en estudios realizados en otras parcelas del BAAPA. Rodas (2016) encontró una ganancia biomasa total de  $4.04 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$  en un bosque secundario de 29 años de recuperación. Mientras que Molas (2016) observó un aumento de  $2.35 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$  en un bosque alterado del BAAPA. El bajo incremento observado en el presente estudio se debió a la elevada mortalidad que tuvo lugar en las primeras mediciones; posterior al año 2005, el incremento de biomasa fue similar a los encontrados por Rodas (2016) y Molas (2016).

Tendencias similares fueron observadas en estudios a largo plazo realizados en bosques del neotrópico. Chave *et al.* (2001) monitorearon la biomasa aérea en un bosque ubicado en Guayana Francesa registrando un aumento de  $1.9 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$  y  $0.7 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$  en dos sitios estudiados durante el periodo 1981-1991. Chave *et al.* (2003) determinaron que el aumento de biomasa aérea en una parcela de 50 ha de un bosque tropical en Panamá durante el periodo 1985-2000 fue de  $0.21 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ . Phillips y Lewis (2009) estimaron un incremento de biomasa aérea de  $0.89 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$  usando datos de 123 parcelas ubicadas en el Amazonas (1991-2005). Baker *et al.* (2004) observaron un incremento medio de biomasa aérea de  $1.22 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$  en 59 parcelas instaladas en el Amazonas que fueron medidas en el periodo 1979-2001. En el continente africano también fue observado un incremento de biomasa forestal. Lewis *et al.* (2009) analizaron datos de 79 parcelas instaladas en 10 países africanos y encontraron un incremento de biomasa aérea de aproximadamente  $1.26 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$  ( $0.63 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ ) en el lapso 1968-2007.

En lo concerniente a la región paleotropical, Hoshizaki *et al.* (2004) encontraron una disminución de la biomasa aérea equivalente a  $7.10 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$  en los bosques de Malasia (1994-1998) debido, principalmente, a la muerte de árboles grandes. Este resultado contrasta con las tendencias reportadas por autores ya citados, quienes analizaron datos provenientes de otras regiones, y con las observaciones del presente estudio.

## Desafíos para futuros estudios

Es necesario generar más información sobre la variación temporal de biomasa de los remanentes del BAAPA para lograr un conocimiento integral sobre la participación de estos bosques en el ciclo global de carbono.

En este estudio no se tuvo en cuenta el efecto de los árboles con ramas rotas y con fustes ahuecados sobre la biomasa total. Monda *et al.* (2015) reportaron que la aplicación de ecuaciones alométricas específicas para árboles con cavidades tuvo una influencia importante sobre el valor final de la biomasa de un bosque del sureste asiático, debido a que las cavidades son más comunes en los árboles de mayor dimensión. Considerando que la abundancia de los árboles ahuecados podría variar entre sitios, se requiere de un análisis minucioso para determinar la necesidad de realizar los ajustes correspondientes para estudios de biomasa que sean llevados a cabo en el BAAPA.

## CONCLUSIONES

La hipótesis planteada para el estudio fue aceptada. Hubo un aumento de biomasa total en el transcurso de 21 años. No obstante, la variación no fue uniforme entre las mediciones. Los principales factores que perturbaron la biomasa total fueron la muerte y el crecimiento de los individuos. La elevada cantidad de individuos muertos causó la disminución de biomasa total entre la primera y

segunda medición. Posteriormente, se observó un aumento gradual de la biomasa total debido a la reducción de la cantidad de individuos muertos y al incremento por crecimiento de árboles. La influencia de la reducción de DAP o altura y el reclutamiento de individuos fueron menos relevantes.

En todas las mediciones se encontraron mayores variaciones de biomasa en las clases diamétricas inferiores. Por otra parte, la muerte de individuos con dimensiones superiores causó reducciones importantes de biomasa debido a su gran volumen, a pesar de que la cantidad de estos individuos fue baja.

Este es el primer estudio de dinámica de biomasa a largo plazo realizado en Paraguay y servirá de referencia para los bosques remanentes del BAAPA en proceso de recuperación. El incremento de biomasa observado sugiere que los remanentes del BAAPA podrían estar cumpliendo una función positiva en la mitigación de cambio climático. Es necesario generar más información sobre esta dinámica para lograr un conocimiento integral sobre la participación del BAAPA en el ciclo global de carbono.

## AGRADECIMIENTOS

La instalación y las mediciones de la parcela permanente fueron realizadas con recursos de la Itaipu Binacional. Se agradece a todas las personas que participaron y apoyaron las mediciones de la parcela estudiada a lo largo de 21 años. En especial a: Carlos Giménez Facetti (†), Amancio Mallorquín, Nicolás Coronel, Vicente López, Edgar Domínguez, Rubén Rodríguez, Germán Mendoza (†), Néstor Ayala (†), Guillermo Caballero, Antonio Lomaquis, Francisco Calonga y Raúl Ortega, quienes iniciaron este monitoreo al instalar la parcela y realizar la primera medición.

## CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener conflicto de intereses

## CONTRIBUCIÓN POR AUTORES

R.D.C.G. realizó el registro de datos en terreno en los años 2002, 2005, 2008 y 2016. A.E.F.L. participó en el registro de datos en terreno en el año 2016. V.R.K. participó en el registro en terreno en el año 2016 y analizó los datos. Todos los autores contribuyeron a la discusión y participaron en la redacción del manuscrito.

## REFERENCIAS

- Baker, T. R., Phillips, O. L., Malhi, Y., Almeida, S., Arroyo, L., Di Fiore, A., Erwin, T., Higuchi, N., Killen, T. J., Laurance, S. G., Laurance, W. F., Lewie, S. L., Monteagudo, A., Neil, D. A., Núñez Vargas, P., Pitman, N. C. A., Silva, J. N. M. y Vásquez Martínez, R.** (2004). Increasing biomass in Amazonian forest plots. *Philosophical Transactions of The Royal Society*, 359, 353-365. <https://doi.org/10.1098/rstb.2003.1422>
- Caballero, R.** (2014). Análisis estructural y dinámico de la parcela permanente de medición y monitoreo de la biodiversidad del Refugio Biológico Tati Yupi: fitosociología forestal, análisis de datos de campo. *Biota*, 16.
- Chave, J., Condit, R., Lao, S., Caspersen, J., Foster, R. y Hubbell, S.** (2003). Spatial and temporal variation of biomass in a tropical forest: results from a large census plot in Panama. *Journal of Ecology*, 91, 240-252. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2745.2003.00757.x>
- Chave, J., Riéra, B. y Dubois, M. A.** (2001). Estimation of biomass in a neotropical forest of French Guiana: spatial and temporal variability. *Journal of Tropical Ecology*, 17, 79-96. <https://doi.org/10.1017/S0266467401001055>
- Da Ponte, E., Mack, B., Wohlfart, C., Rodas, O., Fleckenstein, M., Oppelt, N., Dech, S. y Kuenzer C.** (2017). Assessing forest cover dynamics and forest perception in the Atlantic Forest of Paraguay, combining remote sensing and household level data. *Forests*, 8(389). <https://doi.org/10.3390/f8100389>

- De Sy, V., Herold, M., Achard, F., Beuchle, R., Clevers, J. G. P. W., Lindquist, E. y Verchot, L.** (2015). Land use patterns and related carbon losses following deforestation in South America. *Environmental Research Letters*, 10, 124004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/12/124004>
- Di Bitetti, M., Placci, G. y Dietz, L.** (2003). *A biodiversity vision for the Upper Paraná Atlantic Forest ecoregion: designing a biodiversity conservation landscape and setting priorities for conservation action*. World Wildlife Fund.
- Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Asunción** (2013). *Mapa de stock de carbono bosque atlántico del alto Paraná*. <https://globallandusechange.org/wp-content/uploads/2017/10/Reporte.-2014.-Carrera-Ingenieria-Forestal-UNA-Desarrollo-del-estudio-de-linea-de-base-para-el-sitio-piloto-Bosque-Atlantico-Alto-Parana.pdf>
- Fleytas, M. C.** (2007). Cambios en el paisaje: evolución de la cobertura vegetal en el Paraguay. En D. A. Salas-Dueñas y J. F. Facetti (eds.), *Biodiversidad del Paraguay: una aproximación a sus realidades* (pp. 77-87). Fundación Moisés Bertoni, USAID, GEF/BM
- Food and Agriculture Organization (FAO)** (2020). *REDD+: Reducción de las emisiones derivadas de la deforestación y la degradación de los bosques*. <http://www.fao.org/redd/overview/es/>
- Hoshizaki, K., Niiyama, K., Kimura, K., Yamashita, T., Bekku, Y., Okuda, T., Quah, E. y Supardi, N.** (2004). Temporal and spatial variation of forest biomass in relation to stand dynamics in a mature, lowland tropical rainforest, Malaysia. *Ecological Research*, 19, 357-363. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1703.2004.00645.x>
- Huang, C., Kim, S., Alstatt, A., Townshend, J. R. G., Davis, P., Song, K., Tucker, C. J., Rodas, O., Yanosky, A., Clay, R. y Musinsky, J.** (2007). Rapid loss of Paraguay's Atlantic forest and the status of protected area: a Landsat assessment. *Remote Sensing of Environment*, 106(4), 460-466. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.09.016>
- Itaipu Binacional** (2016). *Plan de manejo 2017-2021 de la Reserva Natural Tati Yupi*. Editorial Fotosíntesis.
- Lewis S. L., López-González G., Sonke B., Affum-Baffo K., Baker T. R., Ojo L. O., Phillips O. L., Reitsma J., White L., Comiskey J. A., Ewango C., Feldpausch T., Hamilton A. C., Gloor E., Hart T., Hladik A., Kamdem M. N. D., Lloyd J., Lovett J., Makana J. R., [...] y Woll, H.** (2009). Increasing carbon storage in intact African tropical forests. *Nature*, 477, 1003-1006. <https://doi.org/10.1038/nature07771>
- Lindner, A. y Sattler, D.** (2012). Biomass estimations in forests of different disturbance history in the Atlantic Forest of Rio de Janeiro, Brazil. *New Forests*, 43, 287-301. <https://doi.org/10.1007/s11056-011-9281-9>
- McGroddy, M. E., Daufresne, T. y Hedin, L.O.** (2004). Scaling of C: N: P stoichiometry in forests worldwide: Implications of terrestrial Redfield-type ratios. *Ecology*, 85, 2390-2401. <https://doi.org/10.1890/03-0351>
- Molas, C.** (2016). *Variación temporal de la biomasa y carbono de un bosque del BAAPA en el periodo 2010-2015, Reserva Natural del Bosque Mbaracayú, Departamento de Canindeyú* (tesis de grado, Ingeniería Ambiental). Universidad Nacional de Asunción, San Lorenzo, Paraguay.
- Monda, Y., Kiyono, Y., Melling, L., Damian, Ch. y Chaddy, A.** (2015). Allometric equations considering the influence of hollow trees: A case study for tropical peat swamp forest in Sarawak. *Tropics*, 24(1), 11-22. <https://doi.org/10.3759/tropics.24.11>
- Pan, Y., Birdsey, A. R., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P. E., Kurz, W. A., Phillips, P. L., Shvidenko, A., Lewis, S. L., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Pacala, S. W., McGuire, A. D., Piao, S., Rautiainen, A., Sitch, S. y Hayes, D.** (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 333, 988-993. <https://doi.org/10.1126/science.1201609>
- Phillips O. L., Aragao L. E. O. C., Lewis, S. L., Fisher, J. B., Lloyd, J., López-González, G., Malhi, Y., Monteagudo, A., Peacock, J., Quesada, C. A., van der Heijden, G., Almeida, S., Amaral, I., Arroyo, L., Aymard, G., Baker, T. R.,**

- Banki, O., Blanc, L., Bonal, D., Brando, P., [...] y Torres-Lezama, A.** (2009). Drought sensitivity of the Amazon rainforest. *Science*, 323, 1344-1347. <https://doi.org/10.1126/science.1164033>
- Phillips, O. y Lewis, S.** (2016). Recent changes in tropical forest biomass and dynamics. En L. Nagy, B. R. Forsberg y P. Artaxo (eds.), *Interactions between biosphere, atmosphere and human land use in the amazon basin* (pp. 191-224). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-49902-3\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-662-49902-3_10)
- Rodas Amarilla, G. D.** (2016). *Variación temporal de la biomasa y carbono de un bosque secundario del BAAPA, periodo 2009-2016, Reserva Natural del Bosque Mbaracayu, departamento de Canindeyú* (tesis de grado, Ingeniería Forestal). Universidad Nacional de Asunción, San Lorenzo, Paraguay.
- Sato, T., Saito, M., Ramírez, D., Pérez de Molas, L.F., Toriyama, J., Monda, Y., Kiyono, Y., Herebia, E., Dubie, N., Duré Vera, E., Ramírez Ortega, J. D. y Vera de Ortiz, M.** (2015). Development of allometric equations for tree biomass forest ecosystems in Paraguay. *Japan Agricultural Research Quarterly*, 49(3), 281-291.
- Spichiger, R., Bertoni, B. y Loizeau, P. A.** (1992). The forest of the paraguayan Alto Paraná. *Candollea*, 47(2), 219-250.
- Tortorelli, L. A.** (1967). Formaciones forestales y maderas del Paraguay. *Instituto Forestal Latino-Americano de Investigación y Capacitación*, 24, 3-34.
- Vera Monge, V. R.** (2009). Comparação de associações vegetais sobre diferentes tipos de solos na área de influência da Represa Itaipu, para reconhecimento de espécies apropriadas para restauração ecológica (tesis de doctorado en Recursos Forestales). Universidad de San Pablo, Brasil.
- Wigner, J. P., Fan, L., Ciais, P., Bastos, A., Brandt, M., Chave, J., Saatchi, S., Baccini, A. y Fensholt, R.** (2020). Tropical forests did not recover from the strong 2015-2016 El Niño event. *Science Advances*, 6(6), eaay4603. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aay4603>
- World Meteorological Organization (WMO)** (2014). *El Niño: Southern Oscillation*. Ginebra: WMO.
- Yamamoto, S.** (2000). Forest gap dynamics and tree regeneration. *Journal of Forestry Research*, 5, 223-229. <https://doi.org/10.1007/BF02767114>





UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS



## Modelamiento de la productividad de *Gmelina arborea* Roxb. con base en variables biofísicas y de rodal

### Modeling the productivity of *Gmelina arborea* Roxb. using biophysical and stand variables

Alonso Barrios-Trilleras<sup>1\*</sup>, Ana Milena López-Aguirre<sup>1</sup>, Camila Andrea Báez-Aparicio<sup>1</sup>

Barrios-Trilleras, A., López-Aguirre, A. M. y Báez-Aparicio, C. A. (2021). Modelamiento de la productividad de *Gmelina arborea* Roxb. con base en variables biofísicas y de rodal. *Colombia Forestal*, 24(1), 71-87.

**Recepción:** 21 de septiembre 2019

**Aprobación:** 20 de agosto 2020

#### Resumen

El estudio desarrolló un modelo empírico para predecir la altura dominante (H) y el índice de sitio (IS) de plantaciones de *Gmelina arborea* Roxb., considerando para ello variables biofísicas y de rodal. Se utilizaron datos de 160 rodales localizados en las regiones Andina, Caribe y Pacífica de Colombia. El modelo de Chapman-Richards fue seleccionado para predecir la H e IS de cada rodal. Un análisis de correlación identificó al espaciamiento relativo, la altitud y la precipitación como variables relacionadas al IS. Un modelo de regresión lineal múltiple con estas variables explicó el 70 % de la variación total observada en el IS. Estas variables incorporadas al modelo de H permitieron aumentar en 30 % y reducir en 40 y 41 % el índice de ajuste, error absoluto y error medio cuadrático, respectivamente. Los modelos desarrollados son adecuados para estimar la productividad en áreas sin historia de plantaciones forestales, adicionando flexibilidad y capacidad predictiva en un entorno cambiante.

**Palabras clave:** manejo forestal, altura dominante, productividad forestal, índice de sitio.

#### Abstract

The study developed an empirical model for predicting the dominant height (H) and site index (SI) of *Gmelina arborea* Roxb. plantations considering biophysical and stand variables. Data from 160 stands located in the Andean, Caribbean and Pacific regions of Colombia were used. The Chapman-Richards model was selected for predicting H and SI of each stand. A correlation analysis identified the relative spacing, elevation and precipitation as variables related to SI. A multiple linear regression model with these variables explained 70 % of the total variation observed in SI. These variables included in the H model allowed to increase the fit index by 30 % and reduce the absolute error and mean square error by 40 and 41 %, respectively. The developed models are suitable for estimating productivity in areas with-out a history of forest plantations, adding flexibility and predictive capacity in a changing environment.

**Keywords:** forest management, dominant height, forest productivity, site index.

<sup>1</sup> Universidad del Tolima. Ibagué, Colombia.

\* [abarriost@ut.edu.co](mailto:abarriost@ut.edu.co). Autor de correspondencia.

## INTRODUCCIÓN

*Gmelina arborea* Roxb. es una especie de rápido crecimiento originaria del sudeste asiático (Dvorak, 2004). En Colombia, las plantaciones forestales con esta especie cubren más de 20 000 hectáreas plantadas en la costa Atlántica y en los valles interandinos por debajo de 1000 m de altitud. Estas plantaciones constituyen una fuente importante de materia prima para la industria de aserrío y tableros en la región y su productividad muestra una gran variabilidad estrechamente relacionada con la altitud y variables asociadas como la temperatura, la precipitación y la radiación solar (Obregón, 2006). *G. arborea* se desarrolla mejor con una precipitación anual de entre 1750 y 2300 mm, una estación seca definida de tres a cinco meses y una temperatura media de entre 18 y 35°C (Lamprecht, 1990).

La evaluación de la productividad del sitio es esencial para identificar el potencial productivo, proporcionar un marco de referencia para el diagnóstico correcto y la prescripción silvícola durante el proceso de planificación forestal y, finalmente, para predecir el crecimiento y el rendimiento de los recursos forestales (Burkhart y Tomé, 2012). La productividad forestal es el resultado de la interacción entre la genética de la especie, el suelo y el clima (Diéguez et al., 2009). El método más utilizado para evaluar la productividad del sitio se basa en la relación entre la altura dominante (H) y la edad de los árboles (Antón-Fernández et al., 2011).

La altura de los árboles dominantes y codominantes se prefiere como medida de la productividad forestal porque es poco afectada por las densidades de los rodales o los tratamientos de raleo (Bravo-Oviedo et al., 2008). Sin embargo, para algunas especies se ha reportado un efecto significativo del espaciamiento del rodal sobre el índice del sitio (IS) (Meredieu et al., 2003; Antón-Fernández et al., 2011). Antón-Fernández et al. (2011) encontraron un efecto significativo negativo del espaciamiento en la H para *Pinus taeda* L.; las diferencias entre las densidades de los rodales fueron evidentes a partir de los seis años y se mantuvieron consistentes hasta el final del período

de estudio de 25 años. Estudios de raleo para *Pinus nigra* Arn. demostraron que la zona óptima de densidad de rodal para el aumento de la H (definida en términos de espaciamiento relativo) fue del 17 al 62 %; fuera de ese rango no se alcanza el aumento de la H relativa máxima (Meredieu et al., 2003).

Modelos de H para *G. arborea* han sido desarrollados previamente. López et al. (2011) modelaron la H para rodales de *G. arborea* en la costa Atlántica y la región Andina de Colombia, utilizaron el enfoque de diferencia algebraica (ADA) y seleccionaron los modelos de Chapman-Richards y de Korf para generar curvas polimórficas. Martínez-Zurimendi et al. (2015) seleccionaron el modelo de Hossfeld para generar curvas de índices de sitio anamórficas usando el método de la curva guía en plantaciones de *G. arborea* de Tabasco, México. Sin embargo, esos modelos se consideran débiles debido a la falta de flexibilidad para adaptarse a los cambios en la productividad causados por la estructura del rodal y la variabilidad climática (Mayorga et al., 2011). Así mismo, estos modelos no son aplicables en zonas carentes de plantaciones forestales pues se requiere conocer la H a una determinada edad del rodal.

Estudios previos han mostrado que el IS puede ser predicho a partir de variables biofísicas. Vanclay et al. (2008) modelaron el IS de *G. arborea* en Filipinas empleando un modelo de regresión lineal con la pendiente y la profundidad del suelo como predictores. Guzmán (1988) correlacionó el IS de *G. arborea* con variables fisiográficas, suelo y clima en Filipinas y encontró correlaciones significativas con los factores climáticos; sin embargo, solo la precipitación mostró correlaciones positivas, en tanto que la temperatura y la humedad relativa se correlacionaron de forma negativa. Vallejos (1996) ajustó modelos de crecimiento de H y determinó que el IS de *G. arborea* en Costa Rica se relacionaba con la posición topográfica, el viento y el contenido de calcio a una profundidad de 0-20 cm.

Los factores climáticos y la variación espacial del suelo se han incorporado en los modelos de H para especies como *Pinus patula* Schiede ex Schtdl. & Cham., *Pinus radiata* D. Don, *Eucalyptus globulus*

Labill. y *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden (Louv y Scholes, 2006; Pinjuv et al., 2006; Ferraz et al., 2011; Scolforo et al., 2013). Los modelos de crecimiento de H que incluyen variables climáticas permiten evaluar la incidencia del clima en la productividad del sitio y son una herramienta útil para estimar los efectos debido al cambio climático (Sharma et al., 2015). Incluir tales variables en los modelos de H ha permitido un aumento significativo en la precisión. Además, para sitios sin información previa sobre plantaciones este tipo de modelos permite evaluar la productividad del rodal antes de plantar para así elegir los mejores en donde se maximizarán los retornos (Kees et al., 2017). Los modelos de este tipo son de utilidad pues proporcionan información sobre las áreas potenciales para la inversión en plantaciones forestales comerciales.

El objetivo principal del estudio fue estimar la productividad de sitios forestales a través de un modelo de crecimiento empírico para predecir la H y el IS de *G. arborea* mediante la incorporación de variables biofísicas y de rodal, lo que posibilitó las estimaciones de productividad en áreas sin historia de plantaciones forestales y al tiempo que agrega flexibilidad y capacidad predictiva en un entorno climático cambiante.

Los objetivos específicos del estudio fueron: I) seleccionar un modelo de crecimiento base de H; II) obtener un modelo predictivo de IS para *G. arborea* a partir de variables biofísicas y de rodal con el potencial de representar espacialmente su variación; y III) evaluar la ganancia de precisión al incluir variables biofísicas y de rodal en el modelo de crecimiento de H.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Datos

Se utilizaron datos de parcelas de muestreo temporales y permanentes cuya área varió entre 500 a 800 m<sup>2</sup> provenientes de 160 rodales de plantaciones forestales de *G. arborea*. Los rodales se ubicaron en los departamentos de Tolima, Magdalena, Atlántico,

Cesar, Bolívar, Sucre y Chocó, en Colombia (López et al., 2011; Florez y Florez, 2013). En cada rodal se estableció un mínimo de uno y un máximo de 38 parcelas. Las edades de los rodales oscilaron entre uno y 16 años, con densidades actuales entre 125 y 1327 árboles por hectárea (tabla 1).

### Variables de rodal

La H de cada parcela se estimó como la altura media de los 100 árboles de mayor diámetro por hectárea. Los atributos de rodal evaluados fueron: I) número de árboles por hectárea (N); II) área basal (G); III) índice de espaciamiento relativo (índice de Hart-Becking, IHB) (Pardé y Bouchon, 1988); y IV) índice de densidad del rodal (IDR) (Reineke, 1933). El índice de espaciamiento relativo se calculó como se muestra en la ecuación 1:

$$IHB = 100 \cdot \frac{AS}{H} = 100 \cdot \left( \frac{\sqrt{10000/N}}{H} \right) \quad (1)$$

donde H es la altura dominante del rodal (m) y AS es el espacio promedio entre los árboles (m). El AS se calculó a partir de N, asumiendo que los árboles estaban posicionados en una cuadrícula.

El índice de densidad de rodal se calculó como se muestra en la ecuación 2:

$$IDR = N \cdot \left( \frac{D_g}{25} \right)^{1.605} \quad (2)$$

donde N es la densidad del rodal y D<sub>g</sub> es el diámetro cuadrático medio.

### Variables biofísicas

Se empleó un modelo digital de elevación (MDE) obtenido de la Nasa, denominado *shuttle radar topographic mission* (SRTM), con una resolución de 30 m. El MDE fue utilizado para determinar la altitud, la pendiente y el aspecto de cada parcela, así como para estimar el índice de posición topográfica (IPT) e índice de humedad topográfico (IHT) (Mokarram et al., 2015; Miyamoto et al., 2018) utilizando la herramienta *topographytools* del software ArcGIS 10.2 (Dilts, 2015).

**Tabla 1.** Estadísticas descriptivas de las variables utilizadas para modelar la H

| <b>Variable</b>   | <b>Media</b> | <b>Desviación estándar</b> | <b>Mínimo</b> | <b>Máximo</b> |
|---|--------------|----------------------------|---------------|---------------|
| <i>Del rodal</i>  |              |                            |               |               |
| Altura dominante (m)  | 15.16        | 4.68                       | 3.95          | 21.94         |
| Edad (años)   | 8.26         | 4.77                       | 1.13          | 16.00         |
| Densidad (árboles.ha <sup>-1</sup> )  | 594.04       | 268.29                     | 125.00        | 1327.00       |
| Área basal (m <sup>2</sup> .ha <sup>-1</sup> )                                | 13.46        | 6.75                       | 1.15          | 31.40         |
| Volumen (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> )                                   | 82.87        | 48.22                      | 8.02          | 202.10        |
| Incremento medio anual (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> .año <sup>-1</sup> ) | 12.95        | 8.78                       | 1.85          | 60.63         |
| Índice de espaciamento relativo (%)   | 33.64        | 15.07                      | 16.13         | 90.21         |
| Índice de densidad de rodal   | 308.74       | 141.98                     | 44.65         | 661.83        |
| <i>Topográficas</i>   |              |                            |               |               |
| Latitud (grados)  | 9.28         | 1.95                       | 3.79          | 10.52         |
| Longitud (grados)   | -74.76       | 0.55                       | -77.12        | -73.24        |
| Altitud (msnm)  | 98.13        | 96.24                      | 4.00          | 406.00        |
| Pendiente (%)   | 2.97         | 1.94                       | 0.00          | 10.57         |
| Aspecto (grados)  | 156.51       | 96.93                      | 0.00          | 357.51        |
| Índice de posición topográfica (m)  | 0.01         | 1.36                       | -4.59         | 6.14          |
| Índice de humedad topográfico (m <sup>2</sup> .m <sup>-1</sup> )              | 7.36         | 1.16                       | 5.60          | 11.90         |
| <i>Edáficas</i>   |              |                            |               |               |
| Contenido de arena (%)  | 37.28        | 2.34                       | 32.00         | 46.00         |
| Contenido de limo (%)   | 28.14        | 2.31                       | 21.00         | 31.00         |
| Contenido de arcilla (%)  | 34.56        | 2.25                       | 29.00         | 40.00         |
| Densidad aparente (kg.m <sup>-3</sup> )                                       | 1323.00      | 111.56                     | 753.00        | 1415.00       |
| pH  | 6.07         | 0.26                       | 4.90          | 6.70          |
| CIC (cmol.kg <sup>-1</sup> )  | 22.03        | 4.50                       | 14.00         | 40.00         |
| Carbono total (ton.ha <sup>-1</sup> )   | 74.19        | 45.35                      | 47.00         | 305.00        |
| Contenido de agua disponible (%)  | 13.70        | 1.01                       | 12.00         | 18.00         |
| <i>Climáticas</i>   |              |                            |               |               |
| Precipitación anual (mm)  | 1393.00      | 323.11                     | 869.09        | 3522.00       |
| Días de lluvia anual (días)   | 75.03        | 20.24                      | 55.47         | 164.31        |
| Temperatura media anual (°C)  | 27.84        | 0.37                       | 25.85         | 28.33         |
| Temperatura media mínima (°C)   | 22.65        | 0.45                       | 20.84         | 24.03         |
| Temperatura media máxima (°C)   | 33.65        | 0.82                       | 29.57         | 34.16         |
| Brillo solar (horas.día <sup>-1</sup> )                                       | 6.07         | 0.55                       | 3.61          | 7.04          |
| Irradiación global horizontal (kWh.m <sup>-2</sup> .día <sup>-1</sup> )       | 5.51         | 0.18                       | 4.56          | 5.92          |
| Humedad relativa (%)  | 78.94        | 2.86                       | 69.51         | 85.76         |
| Evaporación (mm)  | 1562.00      | 137.75                     | 926.11        | 1802.00       |
| Evapotranspiración potencial (mm)   | 1563.00      | 59.60                      | 1327.00       | 1751.00       |

El IPT compara la elevación de cada celda en el MDE con la elevación media de un vecino específico alrededor de esa celda (Mokarram *et al.*, 2015). Un valor positivo (negativo) de IPT significa que la celda es más alta (más baja) que las celdas circundantes; los valores cercanos a cero son áreas planas. El IPT se calculó utilizando un cuadrado de 33 × 33 celdas al aplicar la ecuación 3.

$$IPT = Z_0 - \left( \frac{\sum_{i=1}^n Z_i}{n} \right) \quad (3)$$

donde  $Z_0$  es la elevación de una celda específica,  $Z_i$  la elevación y  $n$  el número total de celdas circundantes. El IHT (ecuación 4) se calcula utilizando el área de captación específica ( $\alpha$ ) y el gradiente de pendiente ( $\beta$ ). Este caracteriza la cantidad de acumulación de agua en función de la posición de la pendiente (Miyamoto *et al.*, 2018).

$$IHT = \ln \left( \frac{\alpha}{\tan(\beta)} \right) \quad (4)$$

La información edáfica usada se obtuvo de Soil Grids v0.5.3 a una resolución espacial de 250 m (Hengl *et al.*, 2017). Los parámetros de suelo empleados fueron el contenido de arena, limo y arcilla de la capa

superior de suelo (30 cm), densidad aparente, pH, capacidad de intercambio catiónico (CIC), carbono total y contenido de agua disponible. Los datos climáticos se obtuvieron del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) de Colombia, los cuales son correspondientes a los promedios anuales del periodo 1981-2010 y se interpolaron utilizando el método de valores ponderados por el inverso de la distancia (IDW) con una resolución espacial de 250 m utilizando el software ArcGIS 10.2. Las variables climáticas fueron la temperatura mínima, máxima y media anual, la precipitación y el número de días de lluvia anual, el brillo solar anual, la humedad relativa anual, la evaporación y la evapotranspiración potencial anual. Las estadísticas descriptivas de las variables biofísicas y de rodal se muestran en la tabla 1.

### Selección de un modelo base de H

La primera etapa de este estudio consistió en la selección de un modelo base de crecimiento de H para describir la variación observada en el conjunto de datos. Se evaluaron cuatro modelos de crecimiento utilizados en biometría y modelamiento forestal considerando medidas de bondad de ajuste y predicción. Los modelos evaluados corresponden

**Tabla 2.** Modelos de crecimiento evaluados para la H e IS

| Modelo           | Ecuación base de H  | Ecuación IS   | Ecuación H  |
|------------------|---|---|---|
| Chapman-Richards | $H = \beta_0 (1 - e^{-\beta_1 A})^{\beta_2}$              | $IS = H \left( \frac{1 - e^{-\beta_1 A_0}}{1 - e^{-\beta_1 A}} \right)^{\beta_2}$           | $H = IS \left( \frac{1 - e^{-\beta_1 A}}{1 - e^{-\beta_1 A_0}} \right)^{\beta_2}$           |
| Korf             | $H = \beta_0 e^{-\beta_1 / A^{\beta_2}}$                  | $IS = H e^{\beta_1 (1/A^{\beta_2} - 1/A_0^{\beta_2})}$                                      | $H = IS e^{-\beta_1 (1/A^{\beta_2} - 1/A_0^{\beta_2})}$                                     |
| Schumacher       | $H = \beta_0 e^{-\beta_1 / A}$                            | $IS = H e^{\beta_1 (1/A - 1/A_0)}$  | $H = IS e^{-\beta_1 (1/A - 1/A_0)}$   |
| Weibull          | $H = \beta_0 \left( 1 - e^{-\beta_1 A^{\beta_2}} \right)$ | $IS = H \left( \frac{1 - e^{-\beta_1 A_0^{\beta_2}}}{1 - e^{-\beta_1 A^{\beta_2}}} \right)$ | $H = IS \left( \frac{1 - e^{-\beta_1 A^{\beta_2}}}{1 - e^{-\beta_1 A_0^{\beta_2}}} \right)$ |

a las ecuaciones de Chapman-Richards, Korf, Schumacher y Weibull (Kiviste et al., 2002; tabla 2). donde H es la altura dominante; A es la edad; IS es el índice del sitio;  $A_0$  es la edad base definida en 10 años;  $\beta_0$ ,  $\beta_1$  y  $\beta_2$  son parámetros a estimar; y e es la base de los logaritmos naturales.

Los parámetros de estos modelos se estimaron mediante el procedimiento Model de *Statistical Analysis System-SAS* (SAS Institute Inc., 2009) con el algoritmo de minimización de Marquardt y utilizando el método de máxima verosimilitud con información completa (FIML). Se usó la técnica de validación cruzada para valorar la precisión de los modelos; esta permite evaluar la generalización de los resultados empleando un conjunto independiente de datos (Refaeilzadeh et al., 2009). Para ello, los datos se dividieron aleatoriamente en 10 grupos de igual tamaño que contenían 16 rodales (10 % de los datos totales). Posteriormente, se realizaron 10 iteraciones de estimación y validación, donde se usaron nueve grupos para estimar los parámetros del modelo y el grupo restante se usó para la validación del modelo. La bondad de ajuste se evaluó considerando un índice de ajuste ( $I_A$ ); como se muestra en la ecuación 5:

$$I_A = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (5)$$

y como medidas de bondad de predicción se utilizó el error absoluto medio (EAM):

$$EAM = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|}{n} \quad (6)$$

y la raíz del error medio cuadrático (REMC)

$$REMC = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (7)$$

donde  $y_i$  es la altura dominante observada;  $\hat{y}_i$  es la altura dominante predicha,  $\bar{y}_i$  es la altura dominante media; y n es el número de observaciones.

Los residuos de cada modelo se graficaron frente a los valores predichos para evaluar su distribución y probar la normalidad y heterocedasticidad. Debido a que se usó un único valor de H por cada rodal se espera que no exista autocorrelación en los datos usados para el ajuste de los modelos. La curva promedio de H predicha de cada modelo se trazó sobre los valores observados de H para evaluar su forma y sentido biológico. Finalmente, el modelo seleccionado se usó para predecir el IS de cada rodal, considerando una edad base igual a 10 años, la cual es usualmente empleada para determinar el IS de *G. arborea* (López et al., 2011; Martínez-Zurimendi et al., 2015).

### Predicción y representación espacial del IS

Se utilizó un análisis de correlación de Pearson para evaluar y seleccionar las variables biofísicas y de rodal que se relacionan significativamente con el IS. Este análisis se efectuó mediante el procedimiento Corr (SAS Institute Inc., 2009). Posterior a esto, se desarrolló un modelo de regresión lineal múltiple con las variables que se correlacionaron significativamente con el IS utilizando el procedimiento REG (SAS Institute Inc., 2009).

El ingreso de las variables en el modelo de regresión lineal múltiple se llevó a cabo de forma secuencial con la variable que mostró la correlación más fuerte con el IS, hasta que las variables adicionales no fueron significativas al nivel de 0.05. En el análisis de correlación y regresión lineal, el IS se transformó aplicando logaritmo natural para corregir la distribución no normal de esta variable, el modelo de regresión lineal múltiple presentó la siguiente estructura (ecuación 8):

$$\ln(\text{IS}) = \alpha_0 + \sum_{i=1}^k \alpha_i \cdot \text{variable}_i \quad (8)$$

donde IS es el índice de sitio;  $\text{variable}_i$  es la i-ésima variable ingresada en el modelo;  $\alpha_0$ ,  $\alpha_i$  son los parámetros del modelo; y ln es el logaritmo natural. El grado de multicolinealidad entre las variables independientes se evaluó con el factor de inflación de

varianza (VIF), con el cual los valores menores de cinco indican que la multicolinealidad está dentro de límites aceptables (Quinn y Keough, 2002). La significancia de los parámetros del modelo se evaluó a través de una prueba F y la bondad de ajuste mediante el coeficiente de determinación. Para mostrar la aplicación práctica del modelo de IS ajustado (ecuación 8), se utilizó para representar espacialmente el IS en el departamento del Tolima, Colombia.

### Modelo de H con variables biofísicas y de rodal

Para garantizar la compatibilidad de las predicciones del modelo de H y de IS se ajustó el modelo base de H junto con el modelo de IS generado con regresión lineal múltiple de manera simultánea empleando el procedimiento Model (SAS Institute Inc. 2009). El modelo final de H con variables biofísicas y de rodal fue evaluado utilizando el mismo proceso usado para la selección del modelo base.

Este procedimiento permitió comparar el modelo base con el modelo con covariables en términos de ganancia de precisión.

## RESULTADOS

### Modelo base de H

Los parámetros estimados y los estadísticos de bondad de ajuste y validación para los modelos evaluados se presentan en la tabla 3. En general, no se encontraron diferencias notorias entre los modelos con respecto a los estadísticos evaluados. Los mejores indicadores se obtuvieron con los modelos de Chapman-Richards y Weibull, los cuales explicaron el 69 % de la varianza total de los datos observados. Las diferencias en los estadísticos de bondad de validación de los modelos fueron mínimas. De manera gráfica se observó que el modelo de Chapman-Richards presentaba

**Tabla 3.** Coeficientes estimados y bondad de ajuste para los modelos base de crecimiento evaluados para la H

| Modelo           | Parámetro | Estimado | Límites de confianza |          | $I_A$ | EAM  | REMC |
|------------------|-----------|----------|----------------------|----------|-------|------|------|
|                  |           |          | Inferior             | Superior |       |      |      |
| Chapman-Richards | $\beta_0$ | 18.18539 | 18.13288             | 18.23791 | 0.69  | 2.11 | 2.63 |
|                  | $\beta_1$ | 0.35943  | 0.34770              | 0.37116  |       |      |      |
|                  | $\beta_2$ | 1.03151  | 0.99961              | 1.06340  |       |      |      |
| Korf             | $\beta_0$ | 21.39392 | 21.03004             | 21.75780 | 0.66  | 2.25 | 2.76 |
|                  | $\beta_1$ | 1.42736  | 1.39911              | 1.45561  |       |      |      |
|                  | $\beta_2$ | 0.84260  | 0.80631              | 0.87889  |       |      |      |
| Schumacher       | $\beta_0$ | 20.18585 | 20.09356             | 20.27814 | 0.66  | 2.24 | 2.75 |
|                  | $\beta_1$ | 1.47513  | 1.44206              | 1.50820  |       |      |      |
| Weibull          | $\beta_0$ | 18.08483 | 18.03580             | 18.13386 | 0.69  | 2.10 | 2.63 |
|                  | $\beta_1$ | 0.32827  | 0.31785              | 0.33868  |       |      |      |
|                  | $\beta_2$ | 1.06994  | 1.05015              | 1.08974  |       |      |      |

un mejor comportamiento, con una asíntota levemente mayor que el modelo Weibull (figura 1). Por ello, se eligió la ecuación de Chapman-Richards como base para modelar el crecimiento en H y se empleó para predecir el IS de cada rodal.

### VARIABLES BIOFÍSICAS Y DE RODAL RELACIONADAS CON EL IS

El análisis de correlación mostró que el espaciamiento relativo y la altitud fueron las variables que mayor asociación tuvieron con el IS con una relación inversa. Por otra parte, el IS se correlacionó positiva y significativamente con la humedad relativa, el contenido de agua disponible, la CIC, el contenido de limo y la latitud; mientras que, con la evaporación, la densidad aparente, el contenido de arena y el pH se relacionó negativamente. La temperatura, el brillo solar, los índices y variables topográficas y el contenido de arcilla no se correlacionaron con el IS (figura 2).

### PREDICCIÓN DEL IS

Los coeficientes estimados y estadísticos de ajuste se presentan en la tabla 4. El espaciamiento relativo dado por el IHB fue la variable que presentó el mayor aporte al modelo con el 56 % de la variación total del IS; mientras que la altitud y la precipitación anual tan solo explican el 9 y 4 %, respectivamente. Las tres variables en conjunto explican hasta un 70 % la variación del IS. De acuerdo con los valores del factor de inflación de varianza (VIF), la multicolinealidad se encuentra dentro de límites aceptables. Así mismo, una prueba F mostró que los coeficientes del modelo fueron altamente significativos ( $p < 0.0010$ ). La estructura matemática final del modelo de IS se muestra a continuación (ecuación 9):

$$\ln(\text{IS}) = 2.99182 - 0.00836 \cdot \text{IHB} - 0.00096 \cdot \text{Alt} + 0.00017 \cdot \text{Ppt} \quad (9)$$

donde IS es el índice de sitio; IHB es el índice de espaciamiento relativo del rodal; Alt es la altitud;

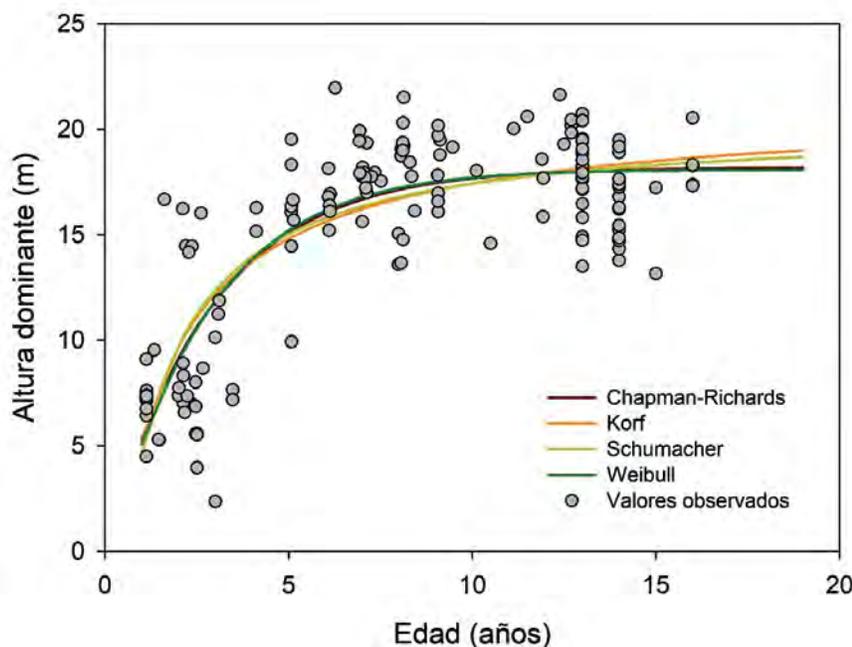
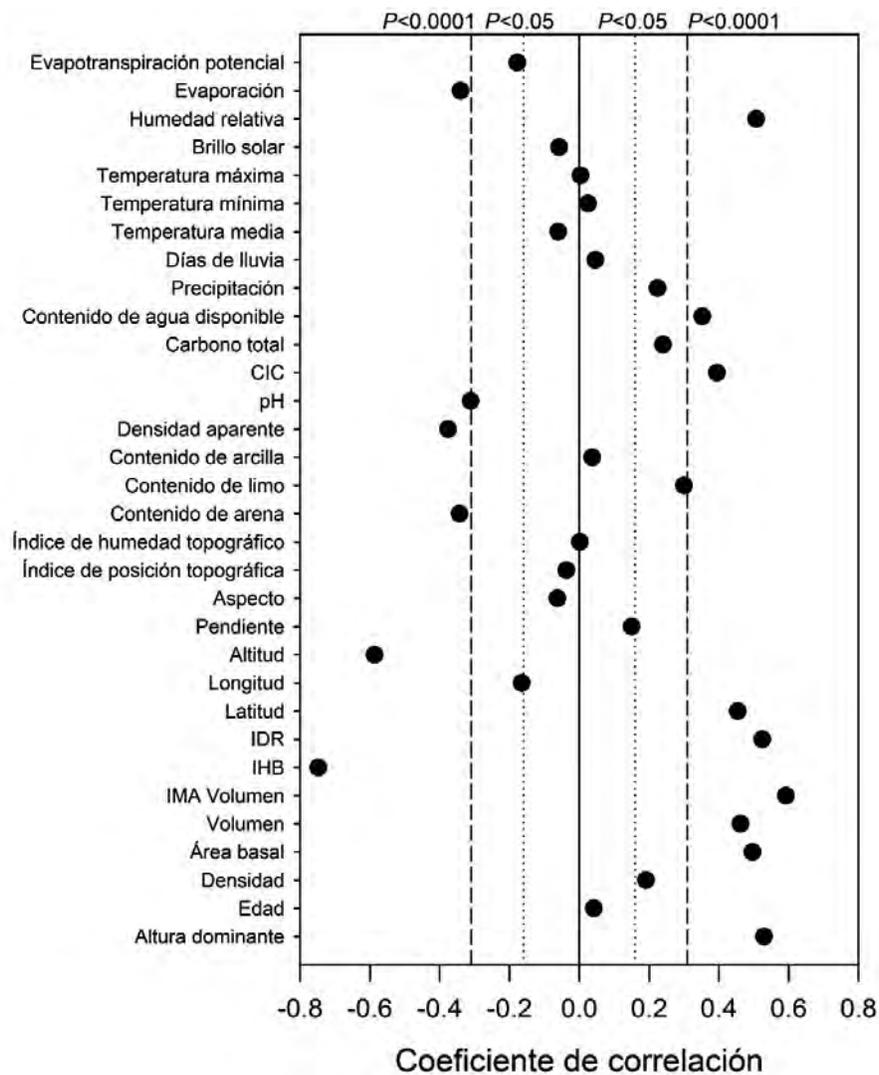


Figura 1. Tendencia de crecimiento promedio en H que describe cada modelo base de H evaluado.



**Figura 2.** Coeficientes de correlación para las variables biofísicas y de rodal empleando el logaritmo natural del IS como variable dependiente.

**Tabla 4.** Coeficientes estimados y estadísticos de bondad de ajuste para el modelo de IS

| Variable                         | Parámetro estimado | Error estándar | R <sup>2</sup> | Valor F  | VIF   |
|----------------------------------|--------------------|----------------|----------------|----------|-------|
| Intercepto                       | 2.99182            | 0.05664        |                |          | 0.000 |
| Índice de espaciamiento relativo | -0.00836           | 0.00007        | 0.56 (0.56)    | 200.4*** | 1.215 |
| Altitud                          | -0.00096           | 0.00013        | 0.65 (0.09)    | 42.7***  | 1.217 |
| Precipitación anual              | 0.00017            | 0.00004        | 0.70 (0.04)    | 22.9***  | 1.017 |

Valores entre paréntesis corresponden al R<sup>2</sup> parcial.

\*\*\* nivel de significancia con P < 0.0010.

VIF: valor de inflación de varianza.

y Ppt es la precipitación media anual para el sitio donde está localizado el rodal.

### Representación espacial del IS

La ecuación 9 fue empleada para obtener un mapa ráster de IS para el departamento del Tolima (Colombia) utilizando un valor de IHB de 20 %, así como el modelo digital de elevación y el mapa ráster de precipitación media anual. La figura 3 muestra la variabilidad espacial del IS de *G. arborea* para el departamento del Tolima. Las zonas del departamento con índices de sitio mayores se presentan en el valle del río Magdalena. Considerando un IS mayor o igual a 16 m para asegurar un adecuado desempeño de las plantaciones forestales, el área disponible en el departamento para el establecimiento de plantaciones de *G. arborea* es de 253 549.4 ha. La aplicación del modelo desarrollado permitió identificar las áreas geográficas más adecuadas para establecer plantaciones de *G. arborea*.

### Modelo de H con variables biofísicas y de rodal

La inclusión de variables biofísicas y de rodal en el modelo base de H seleccionado permitió obtener estimaciones más precisas, con un  $I_A$  de 0.90

(30 % ganancia), un EAM de 1.26 m (-40 % reducción) y un REMC de 1.56 m (-41 % de reducción) (tabla 5). A su vez, el respectivo modelo de IS presentó un  $I_A$  de 0.69, un EAM de 1.79 m y un REMC de 2.49 m. El modelo final (ecuación 10) de H incluyendo variables biofísicas y de rodal fue:

$$H = IS \cdot \left( \frac{1 - e^{-0.32393 \cdot A}}{1 - e^{-0.32393 \cdot A_0}} \right)^{0.90040} \quad \text{donde,} \quad (10)$$

$$IS = e^{(2.96516 - 0.00911 \cdot IHB - 0.00070 \cdot Alt + 0.00018 \cdot P)}$$

donde H es la altura dominante; IS es el índice de sitio; A es la edad y  $A_0$  es la edad base ( $A_0 = 10$  años); IHB es el índice de espaciamiento relativo del rodal; Alt es la altitud; y Ppt es la precipitación media anual para el sitio donde está localizado el rodal.

### DISCUSIÓN

El modelo de Chapman-Richards presentó estadísticos de ajuste y validación satisfactorios para predecir el crecimiento en H e índices de sitio para plantaciones de *G. arborea*. Esta ecuación ha sido empleada previamente en otros estudios dada su flexibilidad y alta capacidad para describir adecuadamente los procesos biológicos que subyacen al crecimiento del árbol (Elli *et al.*, 2017; Castillo *et al.*, 2018). El modelo de Chapman-Richards posee las características

**Tabla 5.** Coeficientes estimados y bondad de predicción para el modelo de altura dominante de Chapman-Richards ajustado con variables biofísicas y de rodal

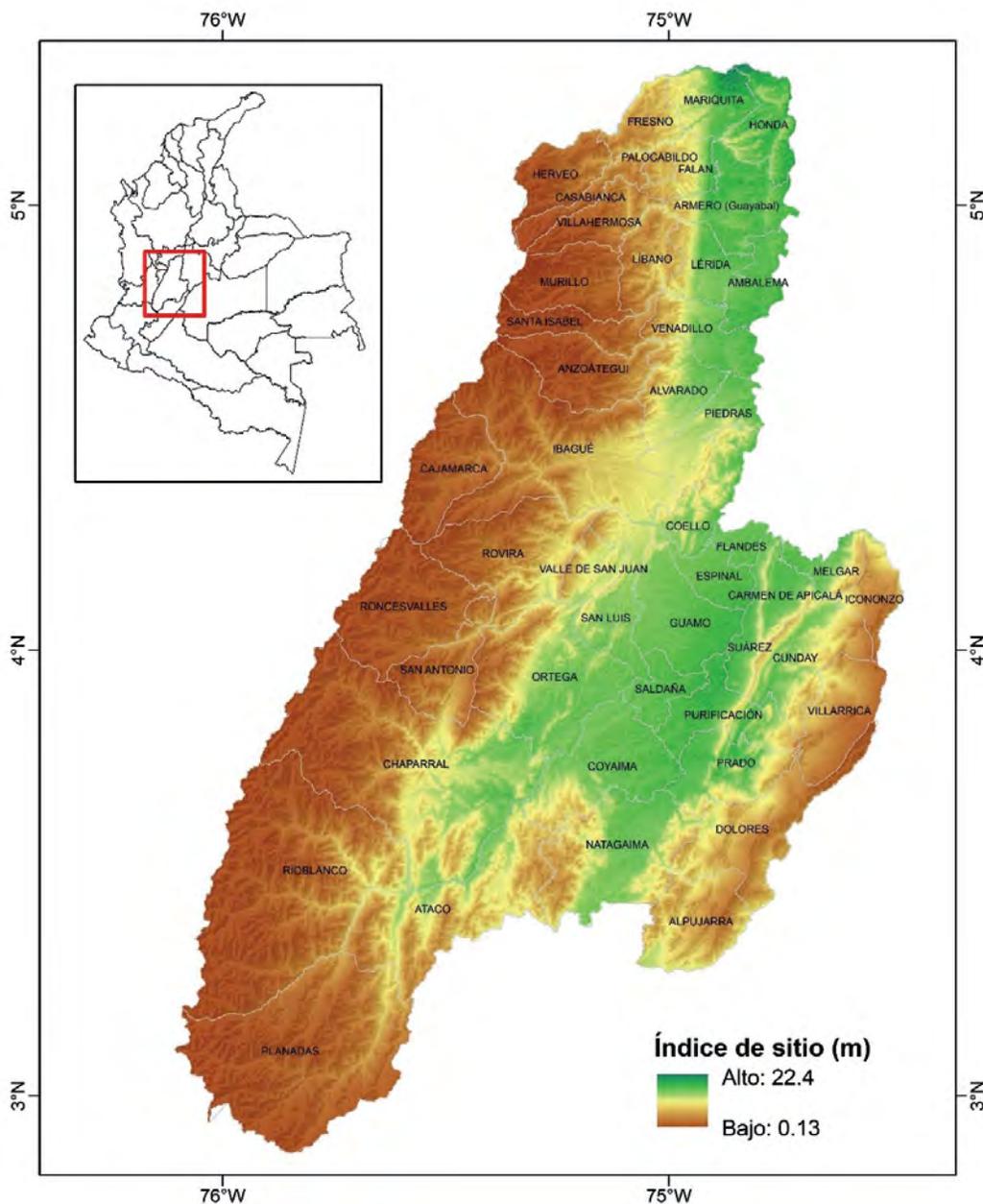
| Parámetros   | Variables           | Estimado | Límites de confianza |          | $I_A$          | EAM             | REMC            |
|--------------|---------------------|----------|----------------------|----------|----------------|-----------------|-----------------|
|              |                     |          | Inferior             | Superior |                |                 |                 |
| $\beta_{00}$ |                     | 2.96516  | 2.95015              | 2.98017  | 0.90<br>(30 %) | 1.26<br>(-40 %) | 1.56<br>(-41 %) |
| $\beta_{01}$ | IHB                 | -0.00911 | -0.00940             | -0.00883 |                |                 |                 |
| $\beta_{02}$ | Altitud             | -0.00070 | -0.00073             | -0.00068 |                |                 |                 |
| $\beta_{03}$ | Precipitación anual | 0.00018  | 0.00017              | 0.00019  |                |                 |                 |
| $\beta_1$    |                     | 0.32393  | 0.31062              | 0.33723  |                |                 |                 |
| $\beta_2$    |                     | 0.90040  | 0.86558              | 0.93523  |                |                 |                 |

El valor entre paréntesis corresponde al porcentaje de ganancia en la precisión en comparación con el modelo base sin covariables.

típicas de un modelo de crecimiento biológico ya que: comienza en el punto cero; presenta crecimiento acelerado a edades juveniles; presenta un punto de inflexión donde el crecimiento se desacelera; e incluye una asíntota que refleja el valor máximo que puede alcanzar el organismo (Scolforo et al., 2013).

La relación significativa encontrada mediante correlación entre el IS y la densidad del rodal

(representada por el índice de espaciamiento relativo), contradice el supuesto de que la H es independiente de la competencia y poco influenciada por la densidad (Bravo-Oviedo et al., 2008). Estudios previos expresan la posibilidad de obtener distintos valores de IS, al evaluarse parcelas con igual potencial productivo, utilizando una misma especie y durante el mismo período de tiempo,



**Figura 3.** Variabilidad espacial del IS predicha para *G. arborea* en el departamento del Tolima empleando la ecuación 9.

pero con diferentes densidades de plantación inicial (MacFarlane *et al.*, 2000). La influencia de la densidad en la H de los rodales aumenta en magnitud para edades jóvenes e intermedias (Meredieu *et al.*, 2003). El efecto de la densidad del rodal en el crecimiento en H durante las primeras etapas de desarrollo ha sido asociado a respuestas fisiológicas que se dan ya sea por subutilización del sitio o por intensa competencia (Newton, 2015a). Los datos utilizados en este estudio abarcan un amplio rango de espaciamientos, edades y sitios, por lo cual se considera que la relación entre el IS y la densidad se expresa de manera natural y podría ser inherente a la especie, relacionada con aspectos ecológicos ligados a la competencia intraespecífica.

Los efectos del espaciamiento también se han evidenciado en la optimización de los recursos. Erkan y Aydin (2016) encontraron una disminución del crecimiento en espaciamientos más amplios en los primeros años, la cual relacionaron con la pérdida de agua debido a la evaporación en los días en que aumentó la temperatura. El crecimiento de *G. arborea* suele ser bastante rápido en sus primeros años y, puesto que su edad de rotación es corta (12 a 14 años) (Rojas *et al.*, 2004), los efectos de la densidad en la H pueden llegar a ser más notorios. Zhao *et al.* (2016) resaltan la posibilidad de optimizar las prescripciones silvícolas para sitios específicos si se cambia la intensidad de la silvicultura en función de la calidad del sitio. Los rodales en sitios más productivos pueden alcanzar niveles asintóticos más altos de ocupación relativa del sitio que los rodales en otros menos productivos (Newton, 2015b). Para plantaciones de *P. radiata* en Galicia un IHB de 16 % resultó ser un límite superior favorable para mantener un adecuado entrecruzamiento de copas, pues evita la mortalidad dependiente de la densidad (Rodríguez *et al.*, 2002).

La altitud presentó una correlación negativa significativa con el IS. Socha (2008) obtuvo el mismo comportamiento para esta variable, siendo el factor de mayor influencia en la variación del IS

para *Picea abies* L. ( $R^2$  de 0.61). Obregón (2006) reporta que la productividad de *G. arborea* está estrechamente relacionada con la altitud, la cual afecta variables climáticas como la temperatura, precipitación, humedad relativa y radiación solar.

En el bosque seco tropical la productividad depende de la cantidad disponible de agua y de qué tan eficiente es el organismo en el uso de esta (Yepes y Buckeridge, 2011). Los resultados señalan que la precipitación anual (cantidad disponible de agua) tiene un impacto positivo en el crecimiento de *G. arborea*. En plantaciones de tres años de edad, establecidas en el norte y suroccidente de Colombia, las parcelas más productivas fueron aquellas ubicadas en sitios bien drenados que recibieron entre 1000 y 1300 mm de precipitación por año (Urrego, 2004).

Debido a que la evaporación y evapotranspiración potencial están asociadas a la pérdida de agua, es lógico esperar la relación negativa con IS determinada en el presente estudio. Para rodales de *Quercus suber* L., empleando la evaporación media mensual y variables edáficas en la predicción del IS, se evidenció que cuando la evaporación aumenta la limitación del agua disponible para los árboles causa una disminución en la productividad del sitio (Paulo *et al.*, 2015). El cambio en la disponibilidad de agua por descenso del 10 % en la precipitación o por un incremento del 6 % en la evapotranspiración potencial durante la vida útil de rodales de *Pseudotsuga menziesii* Mirb. resultó en una reducción en el volumen del rodal de hasta  $80 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ ; lo que representa del 10 al 30 % de volumen comercializable (Spittlehouse, 2003).

La alta productividad de plantaciones con árboles de rápido crecimiento acarrea elevados niveles de uso del agua, por lo que las estrategias fisiológicas de la planta deberán condicionarse a los cambios ambientales. Ello con el fin de reducir la pérdida de agua por transpiración, sobre todo en temporadas secas en las cuales la disponibilidad hídrica constituye la principal limitante para la producción, sobre todo en el bosque seco tropical (Rojas *et al.*, 2012; Battie-Laclau *et al.*, 2016). Aunque la temperatura

(media, mínima y máxima) resultó no ser significativa en el crecimiento de *G. arborea*, se reconoce que esta variable afecta la productividad pues regula e influye en varios procesos fisiológicos que se dan en la planta (Franklin y Wigge, 2013).

Estudios realizados por Vallejos (1996) reportan que *G. arborea* se desarrolla adecuadamente en sitios con pendientes menores al 20 %. De manera similar, Vanclay *et al.* (2008) ajustaron un modelo para predecir el IS de *G. arborea* en Filipinas a partir de la pendiente y la profundidad del suelo como variables predictoras de la productividad potencial del sitio. No obstante, en el presente estudio el IS no se correlacionó significativamente con la exposición ni con la pendiente. Tampoco las variables topográficas IPT y IHT se relacionaron significativamente con el IS. En este sentido, Bjelanovic *et al.* (2018) y Miyamoto *et al.* (2018) reportan que estos factores topográficos presentan una asociación significativa con el IS de *Populus tremuloides* Michx., *Pinus contorta* Douglas ex Loudon, *Picea glauca* Moench y *Castanopsis sieboldii* (Makino) Hatus. En el presente estudio se encontró una correlación positiva entre el IS y la latitud. Lo que demuestra que los sitios ubicados a mayor latitud, los cuales corresponden a la región del Caribe colombiano, presentan una mayor productividad.

La baja correlación presentada con el contenido de arcilla concuerda con lo referido por Rojas *et al.* (2004), en el sentido de que suelos con altos contenidos de arcilla resultan ser limitantes para el desarrollo de *G. arborea*. De acuerdo con Henri (2001) y Urrego (2004), esta especie se desarrolla mejor en suelos con texturas francas o franco arcillosas.

Recientemente se han desarrollado diversas ecuaciones dinámicas de IS capaces de predecir variaciones en la productividad forestal en diferentes escenarios de cambio climático. La inclusión de variables biofísicas en los modelos permite comparar las variaciones en el patrón de crecimiento entre diferentes sitios con diferentes condiciones climáticas o comparar el patrón de crecimiento del mismo en diferentes condiciones climáticas futuras (Bravo-Oviedo *et al.*, 2010; Scolforo *et al.*, 2013;

Sharma y Parton, 2018; 2019; Zhou *et al.*, 2019). En este estudio la inclusión de variables biofísicas y de rodal permitió mejorar las predicciones de la H, con aumentos de 30 % en índice de ajuste y disminuciones de 40 y 41 % en error absoluto promedio y error medio cuadrático, respectivamente. Así mismo, el ajuste de un modelo de IS a partir de variables biofísicas y de rodal permite la estimación de la productividad en áreas sin historia previa de plantaciones. El modelo desarrollado explicó hasta un 70 % la varianza total observada en el IS en 160 rodales de *G. arborea* distribuidos en el país.

El modelo de IS desarrollado es útil para modelar y describir el potencial productivo de la especie y permite la identificación de las áreas geográficas más adecuadas para establecer plantaciones de *G. arborea* (figura 3). Se identificó en una aplicación práctica del modelo zonas óptimas para el establecimiento de nuevas plantaciones en el departamento del Tolima, localizadas principalmente en los valles interandinos del río Magdalena. En la aplicación del modelo ajustado de IS el valor utilizado del IHB fue 20 %, el cual fue seleccionado por ser un valor en el que los árboles están en competencia sin que se vea comprometida la estabilidad del rodal. Los resultados obtenidos permitirán evaluar con mayor certeza proyectos de reforestación comercial, por lo que se podrá obtener mayor precisión en las estimaciones de H de los rodales. Una ventaja de los modelos desarrollados es su sencillez ya que la estimación de la productividad de un sitio requiere de información que puede conseguirse fácilmente mediante mapas topográficos o series climáticas.

## CONCLUSIONES

El modelo de Chapman-Richards, en su modalidad de curvas anamórficas, representa de forma adecuada el crecimiento en H e IS para plantaciones de *G. arborea* establecidas en las regiones Andina, Caribe y Pacífica de Colombia. El IS se pudo predecir en función del nivel de ocupación en el rodal vía el espaciamiento relativo, la altitud y la

precipitación anual. Se determinó la sensibilidad que tiene la productividad de esta especie al manejo silvicultural y las variables biofísicas particulares de cada sitio. El modelo desarrollado, el cual emplea correlación y regresión lineal múltiple, permite estimar el IS en áreas sin historia previa de plantaciones forestales. Lo anterior proporciona información útil para lograr una gestión forestal adecuada. La incorporación del índice de espaciamiento relativo, altitud y precipitación anual dentro del modelo de H permitió reducir el sesgo y error asociado a la estimación de H.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Oficina de Investigación y Desarrollo Científico de la Universidad del Tolima el apoyo financiero concedido para desarrollar la investigación a través del proyecto n.º 340130516 y la convocatoria n.º 001 del 2019 para jóvenes investigadores. Los autores también agradecen el apoyo ofrecido por el grupo de investigación Madera & Bosques de la Universidad del Tolima.

## CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

## CONTRIBUCIÓN POR AUTOR

Todos los autores participaron en planeación, desarrollo, discusión y escritura del artículo.

## REFERENCIAS

**Antón-Fernández, C., Burkhart, H., Strub, M. y Amateis, R.** (2011). Effects of initial spacing on height development of loblolly pine. *Forest Science*, 57(3), 201-211. <https://doi.org/10.1093/forestscience/57.3.201>

**Battie-Laclau, P., Delgado-Rojas, J. S., Christina, M., Nouvellon, Y., Bouillet, J. P., Piccolo, M., Moreira, M. Z., Gonçalves, J. L., Rouspard, O. y Laclau, J. P.** (2016). Potassium fertilization increases water-use efficiency for stem biomass production without affecting intrinsic water-use efficiency in *Eucalyptus grandis* plantations. *Forest Ecology and Management*, 364, 77-89. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.01.004>

**Bjelanovic, I., Comeau, P. y White, B.** (2018). High resolution site index prediction in boreal forests using topographic and wet areas mapping attributes. *Forests*, 9(3), 113. <https://doi.org/10.3390/f9030113>

**Bravo-Oviedo, A., Gallardo-Andrés, C., del Río, M. y Montero, G.** (2010). Regional changes of *Pinus pinaster* site index in Spain using a climate-based dominant height model. *Canadian Journal of Forest Research*, 40(10), 2036-2048. <https://doi.org/10.1139/x10-143>

**Bravo-Oviedo, A., Tomé, M., Bravo, F., Montero, G. y Río, M.** (2008). Dominant height growth equations including site attributes in the generalized algebraic difference approach. *Canadian Journal of Forest Research*, 38(9), 2348-2358. <https://doi.org/10.1139/x08-077>

**Burkhart, H. y Tomé, M.** (2012). *Modeling forest trees and stands*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-3170-9>

**Castillo, A., Santiago, W., Vargas, B., Quiñonez, G., Solís, R. y Corral, J.** (2018). Modelos dinámicos de índice de sitio para cuatro especies de pino en Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(49), 4-27. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i49.185>

**Diéguez, U., Rojo, A., Castedo, F., Álvarez, J., Barrio, M., Crecente, F., González, J. M., Pérez-Cruzado, C., Rodríguez, R., López-Sánchez, C. A., Balboa-Murias, M. Á., Gorgoso, J. J. y Sánchez, F.** (2009). *Herramientas selvícolas para la gestión forestal sostenible en Galicia*. Dirección Xeral de Montes, Consellería do Medio Rural, Xunta de Galicia.

**Dilts, T.** (2015). *Topography Tools for ArcGIS 10.1*. University of Nevada.

- Dvorak, W.S.** (2004). World view of *Gmelina arborea*: opportunities and challenges. *New Forest*, 28, 111-126.  
<https://doi.org/10.1023/B:NEFO.0000040940.32574.22>
- Elli, E., Caron, B., Behling, A., Eloy, E., Queiróz, V., Schwerz, F. y Stolzle, J.** (2017). Climatic factors defining the height growth curve of forest species. *iForest*, 10(3), 547-553.  
<https://doi.org/10.3832/ifer2189-010>
- Erkan, N. y Aydin, A.** (2016). Effects of spacing on early growth rate and carbon sequestration in *Pinus brutia* Ten. Plantations. *Forest Systems*, 25(2), e064.  
<https://doi.org/10.5424/fs/2016252-09290>
- Ferraz, A., Scolforo, J., Ferreira, M., Maestri, R., Assis, A., Oliveira, A. y Mello, J.** (2011). Dominant height projection model with the addition of environmental variables. *Cerne*, 17(3), 427-433.  
<https://doi.org/10.1590/s0104-77602011000300018>
- Florez, J. y Florez, O.** (2013). *Estudio del crecimiento de "Gmelina arborea" en los consejos comunitarios de Quiparadó y Domingodó (Chocó-Colombia)* (tesis de maestría). Universidad de Manizales, Manizales, Colombia.
- Franklin, K. y Wigge, P.** (2013). *Temperature and plant development*. John Wiley & Sons, Inc.  
<https://doi.org/10.1002/9781118308240>
- Guzmán, R.** (1988). *Site productivity evaluation of some yemane (Gmelina arborea Roxb.) plantations in the Philippines*. University of the Philippines.
- Hengl, T., Mendes, J., Heuvelink, G., Ruiperez, M., Kilibarda, M., Blagotić, A., Shangguan, W., Wright, M., Geng, X., Bauer-Marschallinger, B., Guevara, M., Vargas, R., MacMillan, R., Batjes, N., Leenaars, J., Ribeiro, E., Wheeler, I., Mantel, S. y Kempen, B.** (2017). SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. *PLoS ONE*, 12(2), e0169748.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169748>
- Henri, C.** (2001). Soil-site productivity of *Gmelina arborea*, *Eucalyptus urophylla* and *Eucalyptus grandis* forest plantations in western Venezuela. *Forest Ecology and Management*, 144, 255-264.  
[https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00390-X](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00390-X)
- Kees, S., López, A., Rojas, J., Roldán, M., Zurita, J. y Brest, E.** (2017). Características edáficas y su relación con la altura dominante en plantaciones de *Prosopis alba* en la provincia del Chaco. *Revista Forestal Yvyrareta*, 24, 13-19.
- Kiviste, A., Álvarez, J., Rojo, A. y Ruíz, A.** (2002). *Funciones de crecimiento de aplicación en el ámbito forestal*. Madrid: Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria.
- Lamprecht, H.** (1990). *Silvicultura en los trópicos: los ecosistemas forestales en los bosques tropicales y sus especies arbóreas-posibilidades y métodos para un aprovechamiento sostenido*. TZ-Verlag-Ges.
- López, A., Barrios, A., Trincado, G. y Nieto, V.** (2011). *Monitoreo y modelamiento del crecimiento para el manejo de plantaciones forestales comerciales*. Bogotá: Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal.
- Louw, J. y Scholes, M.** (2006). Site index functions using site descriptors for *Pinus patula* plantations in South Africa. *Forest Ecology and Management*, 225, 94-103.  
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.12.048>
- MacFarlane, D., Green, E. y Burkhart, H.** (2000). Population density influences assessment and application of site index. *Canadian Journal of Forest Research*, 30(9), 1472-1475.  
<https://doi.org/10.1139/cjfr-30-9-1472>
- Martínez-Zurimendi, P., Domínguez-Domínguez, M., Juárez-García, A., López-López, L.M., Cruz-Arias, V. y Álvarez-Martínez, J.** (2015). Índice de sitio y producción maderable en plantaciones forestales de *Gmelina arborea* en Tabasco, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 38(4), 415-425.
- Mayorga, R., Hurtado, G. y Benavides, H.** (2011). *Evidencias de cambio climático en Colombia con base en información estadística*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- Meredieu, C., Perret, S. y Dreyfus, P.** (2003). Modelling dominant height growth: effect of stand density. En A. Amaro, D. Reed y P. Soares (eds.), *Modelling forest systems* (pp. 111-121). Cabi Publishing.
- Miyamoto, A., Terazono, R., Sano, M. y Shimizu, A.** (2018). Prediction of the site index for a subtropical

- broad-leaved forest on Okinawa island using topographic factor. *Open Journal of Forestry*, 8(3), 267-282.  
<https://doi.org/10.4236/ojf.2018.83018>
- Mokarram, M., Roshan, G. y Negahban, S.** (2015). Landform classification using topography position index (case study: salt dome of Korsia-Darab plain, Iran). *Modeling Earth Systems and Environment*, 1, 40.  
<https://doi.org/10.1007/s40808-015-0055-9>
- Newton, P.** (2015a). Occurrence of density-dependent height repression within jack pine and black spruce populations. *Forests*, 6(7), 2450-2468.  
<https://doi.org/10.3390/f6072450>
- Newton, P.** (2015b). Evaluating the ecological integrity of structural stand density management models developed for Boreal conifers. *Forests*, 6(4), 992-1030.  
<https://doi.org/10.3390/f6040992>
- Obregón, C.** (2006). *Gmelina arborea*: versatilidad, renovación y productividad sostenible para el futuro. *Revista el Mueble y la Madera (M&M)*, 50, 14-20.
- Pardé, J. y Bouchon, J.** (1988). *Dendrométrie*. Engref.
- Paulo, J., Palma, J., Gomes, A., Faias, S., Tomé, J. y Tomé, M.** (2015). Predicting site index from climate and soil variables for cork oak (*Quercus suber* L.) stands in Portugal. *New Forests*, 46(2), 293-307.  
<https://doi.org/10.1007/s11056-014-9462-4>
- Pinjuv, G., Mason, E. y Watt, M.** (2006). Quantitative validation and comparison of a range of forest growth model types. *Forest Ecology and Management*, 236(1), 37-46.  
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.06.025>
- Quinn, G. y Keough, M.** (2002). *Experimental design and data analysis for biologists*. Cambridge University Press.
- Refaeilzadeh, P., Tang, L. y Liu, H.** (2009). Cross Validation. En L. Liu y M. Özsu (eds.), *Encyclopedia of database systems* (pp. 532-538). Springer.
- Reineke, L.** (1933). Perfecting a stand-density index for even-aged forests. *Journal of Agricultural Research*, 46(7), 627-638.
- Rodríguez, R., Sánchez, F., Gorgoso, J., Castedo, F., López, C. y Gadwo, K.** (2002). Evaluating standard treatment options for *Pinus radiata* plantations in Galicia (north-western Spain). *Forestry*, 75(3), 273-284.  
<https://doi.org/10.1093/forestry/75.3.273>
- Rojas, A., Moreno, L., Melgarejo, L. y Rodríguez, M.** (2012). Physiological response of *gmelina* (*Gmelina arborea* Roxb.) to hydric conditions of the Colombian Caribbean. *Agronomía Colombiana*, 30(1), 52-58.
- Rojas, F., Arias, D., Moya, R., Meza, A., Murillo, O. y Arguedas, M.** (2004). *Manual para productores de Melina Gmelina arborea en Costa Rica*. Fonafifo.
- Scolforo, J., Maestri, R., Ferraz, A., Mello, J., Oliveira, A. y Assis, A.** (2013). Dominant height model for site classification of *Eucalyptus grandis* incorporating climatic variables. *International Journal of Forestry Research*, 2013, 1-7.  
<https://doi.org/10.1155/2013/139236>
- Sharma, M., Subedi, N., Ter-Mikaelian, M. y Parton, J.** (2015). Modeling climatic effects on stand height/site index of plantation-grown jack pine and black spruce trees. *Forest Science*, 61(1), 25-34.  
<https://doi.org/10.5849/forsci.13-190>
- Sharma, M., y Parton, J.** (2018). Analyzing and modelling effects of climate on site productivity of white spruce plantations. *The Forestry Chronicle*, 94(2), 173-182.  
<https://doi.org/10.5558/tfc2018-026>
- Sharma, M. y Parton, J.** (2019). Modelling the effects of climate on site productivity of white pine plantations. *Canadian Journal of Forest Research*, 49(10), 1289-1297.  
<https://doi.org/10.1139/cjfr-2019-0165>
- Socha, J.** (2008). Effect of topography and geology on the site index of *Picea abies* in the West Carpathian, Poland. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 23(3), 203-213.  
<https://doi.org/10.1080/02827580802037901>
- Spittlehouse, D.** (2003). Water availability, climate change and the growth of Douglas-fir in the Georgia basin. *Canadian Water Resources Journal*, 28(4), 673-688.  
<https://doi.org/10.4296/cwrj2804673>
- Statistical Analysis System Institute Inc. (SAS).** (2009). *User's guide 2a ed. Version 9.2 for Windows*. Cary, NC, EUA.

- Urrego, J.** (2004). Growth potential of *Gmelina arborea* at 3 years of age in Colombia. *New Forests*, 28, 269-276.  
<https://doi.org/10.1023/B:NEFO.0000040953.91091.69>
- Vallejos, O.** (1996). *Productividad y relaciones de índice de sitio con variables fisiográficas, edafoclimáticas y foliares para Tectona grandis L., Bombacopsis quinatum* (Jacq) Dugand y *Gmelina arborea* Roxb en Costa Rica (tesis de maestría). Catie, Turrialba, Costa Rica.
- Vanclay, J., Baynes, J. y Cedamon, E.** (2008). Site index equation for smallholder plantations of *Gmelina arborea* in Leyte Province, the Philippines. *Small-scale Forestry*, 7(1), 87-93.  
<https://doi.org/10.1007/s11842-008-9042-6>
- Yepes, A. y Buckeridge, M.** (2011). Respuestas de las plantas ante los factores ambientales del cambio climático global. Revisión. *Colombia Forestal*, 14(2), 213-232.  
<https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2011.2.a06>
- Zhao, D., Kane, M., Teskey, R., Fox, T., Albaugh, T., Allen, H. y Rubilar, R.** (2016). Maximum response of loblolly pine plantations to silvicultural management in the southern United States. *Forest Ecology and Management*, 375(1), 105-111.  
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.05.035>
- Zhou, Y., Lei, Z., Zhou, F., Han, Y., Yu, D. y Zhang, Y.** (2019). Impact of climate factors on height growth of *Pinus sylvestris* var. *mongolica*. *PLoS ONE*, 14(3), e0213509.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0213509>





UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS



## Identificación de vacíos de investigación aplicada para restaurar ecosistemas terrestres en Colombia

### Identifying gaps of applied research to restore terrestrial ecosystems in Colombia

Juan Garibello<sup>1\*</sup>, Laura Riaño<sup>2</sup>, Julián Cuellar<sup>2</sup>, José Ignacio Barrera-Cataño<sup>3</sup>,  
Wilson Ramírez<sup>1</sup>

Garibello, J., Riaño, L., Cuellar, J., Barrera-Cataño, J. I. y Ramírez, W. (2021). Identificación de vacíos de investigación aplicada para restaurar ecosistemas terrestres en Colombia. *Colombia Forestal*, 24(1), 88-107

**Recepción:** 7 de diciembre 2019

**Aprobación:** 16 de septiembre 2020

#### Resumen

Importantes desafíos en la restauración de ecosistemas terrestres colombianos pueden superarse de forma parcial a través de la investigación. Por tal razón, en el presente artículo de revisión hicimos un análisis bibliométrico de varios artículos para identificar los temas abordados y los vacíos usando un marco de trabajo publicado en 2017. Este marco se presenta como una agenda de investigación en ecología cuyo desarrollo tiene una aplicación directa en la práctica de la restauración. Encontramos 167 casos provenientes de 143 artículos; la mayoría trataron temas relacionados con planificación (35 %) y monitoreo de intervenciones (25 %). Pocos abordaron temas relacionados con implementación: obtención de propágulos (12 %), establecimiento de plántulas (13 %) y desempeño del material plantado (15 %). También, identificamos un sesgo geográfico, ya que 93 % de los estudios se realizaron en las regiones Andina y Caribe; lo que equivale a menos de la mitad del territorio colombiano. Estos resultados y su análisis se presentan como una agenda preliminar de investigación en restauración que involucra intereses de diferentes actores.

**Palabras clave:** agenda de investigación para la restauración, costo-efectividad de la restauración, articulación ciencia-práctica.

#### Abstract

Important challenges faced in terrestrial ecosystems in Colombia might be partially overcome through research. For this reason, we made a bibliometric analysis with articles to identify addressed topics as well as gaps using a framework published in 2017. This framework is presented as a research agenda based in ecology whose development has a direct application on restoration practice. We found 167 cases coming from 143 articles; the majority addressed topics related to planning (35 %) and monitoring of interventions (25 %). Few were related to implementation: sourcing propagules (12 %), seedling establishment (13 %) and performance of planted seedlings (15 %). We also identified a geographic bias since 93 % of studies were made in the Andean and the Caribbean regions which are less than half of the national territory. These results and their analyses are presented as preliminary research agenda in restoration involving interests of different stakeholders.

**Key words:** cost-effectiveness of restoration, research agenda for restoration, science-practice articulation.

1 Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, Colombia.

2 Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia.

3 Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.

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

## INTRODUCCIÓN

Son aproximadamente 12 millones de personas en Colombia las que habitan en zonas expuestas a desabastecimiento hídrico como resultado de la pérdida y degradación de ecosistemas naturales (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2010). Así mismo, cerca del 21 % del territorio nacional requiere restauración ecológica de manera prioritaria debido a sus niveles de deterioro y a que se trata de las zonas con mayor densidad poblacional (Ramírez *et al.*, 2016). La tarea de revertir esta situación se ha asumido en parte a través de la restauración ecológica y enfoques afines (rehabilitación, recuperación). Estas estrategias de conservación están ampliamente respaldadas por la normatividad y políticas estatales. Por ejemplo, la restauración está incluida en el artículo 80 de la Constitución Política vigente (Aguilar-Garavito *et al.*, 2017) y algunas entidades territoriales como la Secretaría de Ambiente de Bogotá han ejecutado planes de manera continua desde el año 2000 (Murcia *et al.*, 2017).

Pese al respaldo normativo y a la ejecución continua de programas, el progreso e impacto de la restauración distan de ser óptimos en Colombia. El desarrollo de esta práctica presenta carencias importantes en aspectos como gobernanza participativa, la planificación y el monitoreo (Murcia *et al.*, 2016). Además, la percepción entre agentes del gremio es que las metas gubernamentales nunca se han cumplido y que las plantaciones vinculadas a iniciativas precedentes no persisten en la actualidad (Murcia *et al.*, 2017a). La promoción y desarrollo de investigaciones ha sido identificada como uno de los ámbitos de trabajo para mejorar esta situación tanto en el orden nacional (Murcia *et al.*, 2017b) como en el regional (Holl, 2017). Esta concepción estaría asociada, al menos, con dos circunstancias. Por un lado, la insuficiencia de la información disponible para administrar la incertidumbre inherente de un proceso de largo plazo como la restauración ecológica (Murcia *et al.*,

2017a). De otra parte, un contexto de complejidad creciente que apunta a la implementación de iniciativas a gran escala (Chazdon *et al.*, 2017) en un contexto de emergencia climática (Harris *et al.*, 2006).

La investigación asociada a la restauración contribuye al logro de estándares técnicos que soporten los proyectos (Burbidge *et al.*, 2011; Menz *et al.*, 2013); además, posibilita la elaboración de conceptos claros, modelos y metodologías (Society for Ecological Restoration, 2004); y hace un aporte sustancial a la identificación de estrategias de intervención costo-efectivas (Holl, 2017). No obstante, con alguna frecuencia uno de los campos de conocimiento asociado (la ecología de la restauración) no responde a este desafío al no abordar aspectos prácticos (Cabin *et al.*, 2010) o al no hacer explícita la utilidad práctica de los hallazgos. Esto ocurre debido a la ausencia de un marco que defina el tipo de investigación requerida, cuáles son las preguntas asociadas y cómo estos dos se relacionan con las distintas fases de la práctica de la restauración (Miller *et al.*, 2017). A nivel nacional, a la ausencia de un vínculo claro entre ciencia y práctica, se añade la falta de una agenda que optimice el uso de los recursos limitados para investigación. No existen ejercicios que evalúen el aporte de la ecología de la restauración a la restauración ecológica en el marco de la practicidad; es decir, en el que los resultados de investigación tengan una aplicación inmediata o que incidan en la efectividad de las iniciativas de restauración. Sin embargo, es de señalar que Murcia y Guariguata (2014) analizaron la evolución, retos y oportunidades de la restauración en Colombia; pero, a diferencia del presente estudio, su trabajo no se basó en producción científica publicada sino en proyectos.

Por lo ya dicho, se presenta el siguiente estudio; asumiendo que importantes desafíos de la restauración ecológica pueden afrontarse mediante investigación y que parte de esta debe tener una aplicabilidad explícita. El objetivo es, entonces, identificar vacíos de conocimiento científico cuyo

abordaje contribuya a mejorar la práctica de la restauración de ecosistemas terrestres. Para tal fin se utilizó el marco de trabajo propuesto por Miller *et al.* (2017), el cual tiene como propósito acortar la brecha entre ciencia y práctica mediante el desarrollo de una agenda de investigación. Una de las ventajas de este marco es que las preguntas que conforman la agenda se dividen en fases que son asimilables a las etapas de un proyecto de restauración. El desarrollo de dicho marco apunta a la conformación de ecosistemas autosostenibles, resilientes y biodiversos. Por ello, este estudio es una primera evaluación del estado de la ecología de la restauración en Colombia y de su aporte a aspectos fundamentales de su faceta práctica: la restauración ecológica.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizaron las bases de datos Google Académico y Scopus para buscar artículos científicos publicados en revistas que estuviesen indexadas en Scimago o en Publindex en el momento de la búsqueda. Para tal fin, se utilizaron los binomios “restauración ecológica” AND “Colombia” junto con “ecología de la restauración” AND “Colombia”. También se incluyeron binomios en los cuales se reemplazó “restauración” con los términos afines “rehabilitación” y “recuperación”. La búsqueda se hizo tanto en español como en inglés entre abril y junio de 2019. Inicialmente, aparecieron aproximadamente 17 000 resultados, de los cuales se seleccionaron solamente artículos que incluyeran “restauración” o los términos mencionados, bien fuera en el título, resumen o palabras clave. No se tuvieron en cuenta tesis de grado, guías, protocolos o documentos de trabajo. Los criterios finales de inclusión fueron que el artículo abordara una pregunta o problema de investigación claramente definido y que fuera clasificable dentro del marco de trabajo adoptado. Esto último limitó la búsqueda a investigaciones en ecosistemas terrestres o anfibios.

Las publicaciones fueron clasificadas según la propuesta de Miller *et al.* (2017). Esta propuesta surge como resultado de la poca efectividad de algunos programas de restauración, debida a su vez a la poca correspondencia entre las necesidades de la práctica de la restauración y la ecología de la restauración. Adicional a esto, seleccionamos esta propuesta o marco de trabajo pues incluye aspectos de la mayor importancia pero que probablemente están ausentes de la mayoría de proyectos en Colombia. Por ejemplo: el aprovechamiento de la regeneración natural y de la siembra como estrategias de restauración, la diversidad genética, la consideración del compartimiento suelo, el papel del área intervenida en la conectividad y la evaluación de la resiliencia del área restaurada.

La propuesta presenta 36 preguntas de investigación agrupadas en cinco fases: I) definición de objetivos y planificación para la restauración; II) obtención de propágulos; III) optimización del establecimiento de plántulas; IV) facilitación del crecimiento y sobrevivencia de plántulas en campo; y V) resiliencia y sostenibilidad del ecosistema en restauración y su integración con el resto del paisaje. A diferencia de la propuesta original, en la fase I no se incluyeron solamente ecosistemas de referencia, sino también ecosistemas degradados. Además, se transformaron las preguntas en temas para hacer menos restrictiva la clasificación de las publicaciones que encontramos.

Para identificar vacíos en términos de cobertura geográfica, las publicaciones se clasificaron de acuerdo con su región natural y ecosistema. Debido a que los autores no utilizan un único sistema para denominar el ecosistema en el cual se desarrolló la investigación (o a veces no lo mencionan), fue necesario utilizar la altitud y los datos climáticos reportados, así como referencias de apoyo (por ejemplo: Cleef *et al.*, 1984 y Pizano y García, 2014). Se utilizó un análisis  $\chi^2$  de bondad de ajuste para establecer si las fases se han abordado con la misma frecuencia y para establecer si en cuanto a número de estudios las regiones tenían similar representatividad. Con el mismo análisis se estableció si la

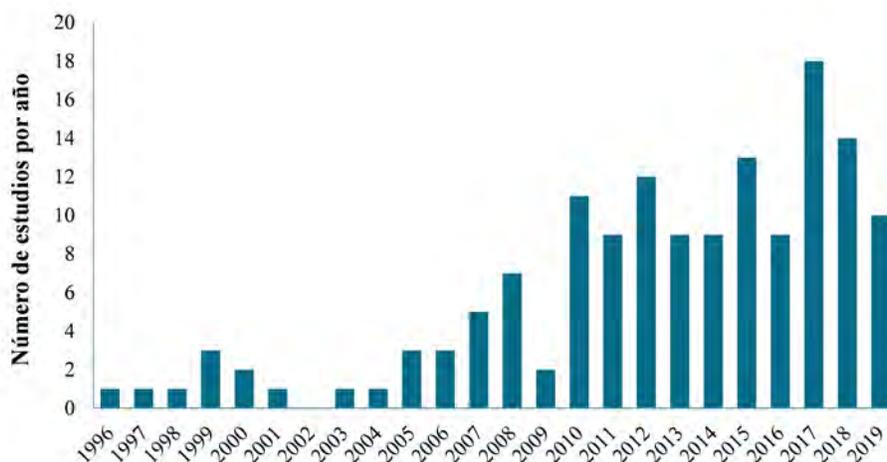
proporcionalidad entre fases era similar al clasificar las publicaciones por ecosistemas y por regiones. Dado que el análisis exige una distribución normal de las proporciones, fue necesario agrupar las categorías que tuvieron un menor número de casos. De este modo, se comparó el bosque subhúmedo y húmedo de cordillera contra un grupo conformado por todos los demás ecosistemas; igualmente, se comparó la región Andina con un grupo conformado por todas las demás regiones.

## RESULTADOS

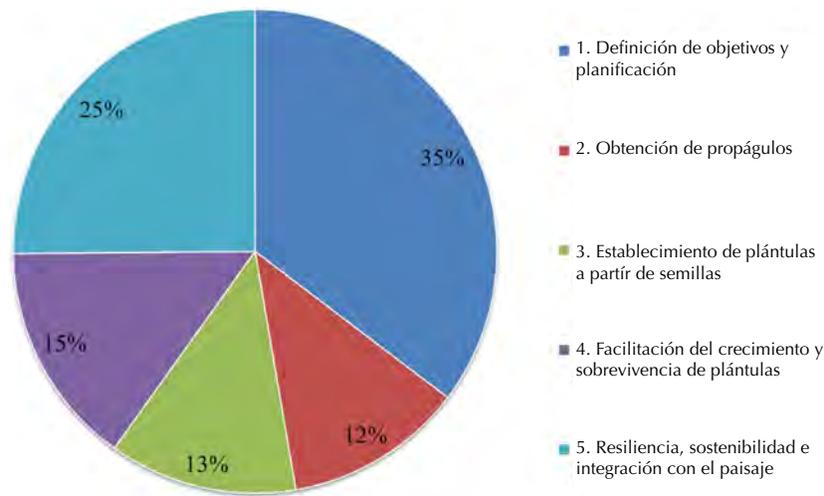
Encontramos un total de 143 estudios publicados a partir de 1996; siendo la mayoría (79 %) publicados a partir de 2010 (figura 1; anexo 1). Dado que 21 artículos abordaron dos o más temas, el análisis se hizo sobre 167 casos. Las fases tratadas con mayor frecuencia fueron la “Definición de objetivos y planificación para la restauración”, junto con “Resiliencia, sostenibilidad e integración del ecosistema en restauración”, con 59 y 42 casos, respectivamente. Las otras tres fases: “Obtención de propágulos”, “Establecimiento de plántulas a partir de semillas” y

“Crecimiento y sobrevivencia de plántulas en campo”, se abordaron con menor frecuencia, en 20, 22 y 23 casos, respectivamente (figura 2). “Establecimiento de plántulas a partir de semillas” fue la fase que se trató con mayor frecuencia en aquellos artículos que exploraron más de un tema (10 estudios). “Almacenamiento de semillas” y “Condiciones físicas, químicas e hidrológicas del sustrato y su manipulación” fueron los temas más recurrentes con los que se combinó “Establecimiento” en este tipo de estudios.

Para definir objetivos y planificar la restauración, la mayoría de casos trataron sobre la caracterización de ecosistemas tanto de referencia como degradados. En segundo lugar, se identificaron especies de plantas con potencial para la restauración mientras que unos pocos casos abordaron la dinámica sucesional e identificación de ecosistemas de referencia, respectivamente. Dentro de los casos que registraron el impacto de la restauración en la resiliencia y sostenibilidad del ecosistema, la mayoría midieron procesos ecosistémicos y reportaron la recuperación de fauna y recursos asociados,; mientras que un número considerablemente menor se centró en el potencial de regeneración (tabla 1).



**Figura 1.** Distribución del número de estudios publicados que abordan aspectos prácticos de ecología de la restauración en Colombia (total estudios n = 143).



**Figura 2.** Distribución porcentual del número de estudios en fases de investigación práctica en ecología de la restauración en Colombia publicados entre 1996 y junio de 2019 (n= 143 artículos, 21 de estos abarcan más de una fase o tema para un total de 167 casos).

**Tabla 1.** Fases y temas de importancia práctica abordados en artículos de ecología de la restauración en Colombia publicados hasta junio de 2019

| Fase   | Tema abordado   | Número de estudios |
|--|---|--------------------|
| Definición de objetivos y planificación para la restauración.                                      | Caracterización de ecosistemas de referencia o degradados.  | 33                 |
|  | Especies con uso potencial para la restauración.  | 14                 |
|  | Dinámica sucesional.  | 8                  |
|  | Identificación de ecosistemas de referencia.  | 4                  |
| Obtención de propágulos.   | Genética.   | 5                  |
|  | Bancos de semillas.   | 4                  |
|  | Contribución de la regeneración natural y a la dispersión.  | 1                  |
|  | Almacenamiento de semillas.   | 3                  |
|  | Oferta espacio-temporal de semillas.  | 3                  |
| Optimización del establecimiento de plántulas.   | Mejora del aporte de la regeneración natural y de la dispersión.  | 4                  |
|  | Manejo de condiciones ambientales para inducir germinación sin considerar condición interna de la semilla en términos fisiológicos, genéticos o anatómicos. | 12                 |
|  | Tratamiento a plántulas o estacas antes de plantar.   | 5                  |
|  | Momento de siembra y manipulación del sitio para optimizar germinación y establecimiento.   | 4                  |
| Facilitación del crecimiento y sobrevivencia de plántulas en campo.                                | Condiciones físicas, químicas e hidrológicas del sustrato y su manipulación.  | 9                  |
|  | Condiciones biofísicas por encima del suelo y su manipulación   | 6                  |
|  | Incidencia y uso de biota edáfica.  | 5                  |
|  | Amenazas a la restauración y su manejo o mitigación.  | 3                  |
|  | Patrones de plantación o siembra para optimizar desempeño de plántulas.   | 2                  |
| Resiliencia, sostenibilidad e integración del ecosistema en restauración con el resto del paisaje. | Procesos ecosistémicos.   | 20                 |
|  | Recuperación de fauna, hábitats y recursos asociados.   | 17                 |
|  | Potencial de regeneración.  | 5                  |

La proporción de publicaciones es similar para genética de poblaciones, bancos de semillas y mejoras al aporte de la regeneración y la dispersión dentro de la fase de obtención de propágulos. El almacenamiento y oferta espacio-temporal de semillas, junto con la evaluación de la regeneración y la dispersión, se abordaron en menor proporción. Germinación controlando factores ambientales es el tema predominante para la fase de optimización del establecimiento de plántulas. Dentro de esta fase también aparecen, pero en menor frecuencia, el tratamiento de las plántulas o estacas antes de plantar y manipulación del sitio de siembra para optimizar la germinación y el establecimiento. La evaluación y manipulación del sustrato es el tema más recurrente dentro de las publicaciones que exploraron la facilitación del desempeño de plántulas en campo. Otras publicaciones relacionadas con este tema se centraron en las condiciones microclimáticas (por ejemplo: competencia por luz y clima), así como incidencia y uso de biota edáfica, amenazas a la restauración y patrones de siembra y plantación (tabla 1).

Casi la mitad de temas propuestos por Miller *et al.* (2017), dentro de su marco para investigar aspectos prácticos de la restauración, no se han abordado en las publicaciones sobre restauración de ecosistemas terrestres colombianos (tabla 2). En cuanto a la obtención de propágulos, no se encontraron estudios sobre el uso de horizontes orgánicos de suelo y sus técnicas de almacenaje y transferencia. Tampoco hay publicaciones acerca de mejoramiento de producción de semillas en poblaciones naturales, producción de semillas *ex situ* ni técnicas de propagación asexual. No hay publicaciones sobre técnicas para superar dormancia orgánica (Baskin y Baskin, 2014) ni publicaciones sobre técnicas de siembra como parte de la optimización en el establecimiento de plántulas. Tampoco se han publicado trabajos que asocien la modificación de la topografía o la modificación de la superficie del suelo con el crecimiento y sobrevivencia de material plantado. Así mismo, aún no se publican estudios que evalúen la resiliencia

en ecosistemas en restauración después de disturbios (o bajo estrés ambiental) ni se han publicado trabajos sobre el papel de polinizadores en la producción y viabilidad de semillas en estos sitios. Otro aspecto sobre el que no encontramos publicaciones es el posible impacto o el impacto real de un sitio en restauración en la matriz paisajística circundante (tabla 2).

Como ocurrió con las fases y temas propuestos por Miller *et al.* (2017), la cobertura geográfica de las publicaciones sobre ecología de la restauración en Colombia revela sesgos. El 73 % de los estudios fue desarrollado en la región Andina; más de la mitad de ellos se realizó en bosques de cordillera sub-húmedos y húmedos mientras que los restantes fueron en bosque seco, páramo, bosque húmedo tropical, xerofítico andino y ronda de humedal. Los dos últimos en altitud superior a 2250. El Caribe es la segunda región con más publicaciones, pero con un porcentaje muy inferior al de la Andina; 22 estudios equivalentes al 15 % del total, la mayoría de ellos en bosque seco y en manglar. Los otros corresponden a dunas costeras y bosque húmedo tropical. El agregado para la Amazonia, la Orinoquía y la región Pacífico corresponde tan solo a 10 publicaciones (7 %): para bosque húmedo tropical, altillanura y manglar. Cuatro de los 143 estudios se hicieron tanto en la región Andina así como en la Caribe al analizar la diversidad genética de poblaciones distantes de plantas en el bosque seco (tabla 3).

El análisis  $\chi^2$  de bondad de ajuste confirmó que las fases propuestas por el marco de trabajo adoptado no se han abordado con la misma frecuencia ( $\chi^2 = 34.5$ ;  $p < 0.0001$ ; g.l.= 4) y que existe un desbalance marcado en la frecuencia con la que se han hecho estudios en las diferentes regiones ( $\chi^2 = 298.82$ ;  $p < 0.0001$ ; g.l.= 4). La proporcionalidad en que se han abordado las cinco fases en los bosques subhúmedos y húmedos de cordillera es similar a la proporcionalidad con la que se han abordado en los otros ecosistemas ( $\chi^2 = 6.44$ ;  $p = 0.1684$ ; g.l.= 4). Por el contrario, la frecuencia con la que se han abordado en la región Andina

**Tabla 2.** Temas de importancia práctica no abordados por estudios sobre ecología de la restauración en Colombia publicados hasta junio de 2019

| Fase   | Tema no abordado   |
|--|--|
| Definición de objetivos y planificación para la restauración.                                      | Ninguno.   |
| Obtención de propágulos.   | <p>Efecto del origen de los propágulos para minimizar impactos negativos a la restauración.<br/>           Mezclar genotipos de diferentes sitios (para incrementar potencial evolutivo) <i>versus</i> utilizar genotipos locales (para maximizar adaptación).<br/>           Incidencia de la endogamia o la baja diversidad genética de la población de origen en el éxito de la restauración.</p> <p>Incidencia de la mezcla de genotipos de poblaciones diferentes en el éxito de la restauración.<br/>           Optimización del uso de horizontes orgánicos de suelo considerando su cosecha, almacenaje y transferencia.<br/>           Técnicas para incrementar la producción de semillas viables en poblaciones naturales.<br/>           Productividad en cultivos para producir semillas <i>versus</i> diversidad genética y viabilidad de las semillas.<br/>           Técnicas de propagación no sexual para especies no propagables por semilla.</p> |
| Optimización del establecimiento de plántulas.   | <p>Técnicas para acortar período de dormancia orgánica evaluando condición fisiológica, bioquímica, genética y anatómica de las semillas.<br/>           Técnicas de siembra (incluyendo mecanización y recubrimientos de semillas).<br/>           Genética.</p>  |
| Facilitación del crecimiento y sobrevivencia de plántulas en campo.                                | <p>Modificaciones de la topografía.<br/>           Modificación de la superficie (a través de arado, acolchados cultivos para cubrir el suelo, etc.)<br/>           Genética.</p>  |
| Resiliencia, sostenibilidad e integración del ecosistema en restauración con el resto del paisaje. | <p>Resiliencia a disturbios y estrés ambiental en sitios en restauración.<br/>           Efecto del tamaño de las poblaciones y su diversidad genética sobre la producción y viabilidad de las semillas.<br/>           Manejo de polinizadores para mejorar la producción y viabilidad de semillas en áreas en restauración.<br/>           Localización, orientación y tamaño del sitio a restaurar para mejorar conectividad, integración con el paisaje circundante e influencia de la restauración a escala de paisaje.</p>   |

difiere ligeramente de la frecuencia con la que se han abordado en las otras regiones ( $\chi^2 = 9.58$ ;  $p = 0.0481$ ; g.l.= 4) (tabla 3). El porcentaje de estudios de establecimiento de plántulas en la región Andina es casi el doble del porcentaje para las otras regiones (15 % vs. 8 %). En las otras regiones es un poco más alto el porcentaje con el que se ha abordado la evaluación de ecosistemas en restauración comparado con la Andina (29 % *versus* 24 %).

## DISCUSIÓN

Los análisis de la literatura científica (como el que acá se presentó) son importantes para entender la amplitud o el alcance de un campo científico como la ecología de la restauración (Borgman y Furner, 2002; Song y Zhao, 2013). Los resultados obtenidos identifican los aspectos que se han abordado con mayor o menor frecuencia a nivel

**Tabla 3.** Estudios de ecología de la restauración en regiones y ecosistemas de Colombia publicados hasta junio de 2019

| Región            | Ecosistema                             | Número de estudios |
|-------------------|--|--------------------|
| Amazonas          | Bosque húmedo tropical.                | 3                  |
| Andina            | Bosque de cordillera subhúmedo-húmedo. | 71                 |
|                   | Bosque seco tropical.                  | 14                 |
|                   | Páramo.                                | 10                 |
|                   | Bosque húmedo tropical.                | 7                  |
|                   | Xerofítico andino.                     | 2                  |
|                   | Ronda humedal.                         | 1                  |
|                   | Indeterminado.                         | 2                  |
| Andina/<br>Caribe | Bosque seco tropical.                  | 4                  |
| Caribe            | Bosque seco tropical.                  | 10                 |
|                   | Manglar.                               | 9                  |
|                   | Dunas.                                 | 1                  |
|                   | Bosque húmedo tropical.                | 2                  |
| Orinoquía         | Altillanura.                           | 2                  |
| Pacífico          | Bosque húmedo tropical.                | 4                  |
|                   | Manglar.                               | 1                  |

nacional e identifican aquellos que todavía no se han explorado. También sugieren que la investigación asociada a restauración ecológica en Colombia es insuficiente si se considera la extensión de la degradación y la megadiversidad involucrada (Etter *et al.*, 2008). Existe, además, un sesgo marcado en las fases y temas abordados, así como en las regiones y ecosistemas estudiados. El 60 % de los casos revisados corresponden solamente a dos de las cinco fases del marco de trabajo adoptado. Así mismo, solo cuatro temas de un total de 39 que propone el marco adoptado (incluyendo genética), tienen presencia en el 51 % del total de casos. La región Andina concentra el 73 % de publicaciones. El número de publicaciones (143) y los sesgos temáticos y geográficos sugieren, entonces, que la información científica local con la que cuentan

las iniciativas de restauración en Colombia es aún escasa.

La producción científica nacional en restauración ecológica o en ecología de la restauración es comparable a la de otros países latinoamericanos como Argentina (105 artículos entre 1996 y 2013, según Rovere, 2013) y México (160 artículos entre 1995 y 2016, según López-Barrera *et al.*, 2017). En contraste, la producción es ostensiblemente inferior a la de los tres primeros países con mayor número de publicaciones: Estados Unidos (1248), China (819) y Australia (339) (Romanelli *et al.*, 2018). Las diferencias entre estos países y los países latinoamericanos son proporcionales al porcentaje del PIB invertido en investigación (Banco Mundial, 2019). Esta brecha ratifica que una de las alternativas de financiación que se debe fortalecer para que haya más investigación en Colombia es el establecimiento de alianzas entre autoridades ambientales, academia, ONG y empresas privadas; tal como se ha hecho en el marco de algunas compensaciones ambientales por construcción de infraestructura y explotación minera. Sin embargo, es necesario mencionar que uno de los desafíos frecuentes en este escenario de gestión es la asignación de suficientes recursos y tiempo para investigación y monitoreo. De otra parte, durante la pesquisa se constató la existencia de aproximadamente 100 tesis de pregrado y posgrado, lo cual sugiere que existe trabajo y potencial para incrementar significativamente el número de publicaciones.

El 60 % de los casos que evaluamos aborda la definición de objetivos de la restauración y la medición de su éxito. Al revisar los temas que conforman estas dos fases del marco de trabajo, es evidente que estos trabajos tienen un énfasis más descriptivo que experimental; contrario a las tres fases que han sido menos exploradas: la obtención de propágulos, el establecimiento de plántulas y la facilitación del desempeño de estas plántulas. Si bien el tratamiento de temas predominante incluye aspectos esenciales como la caracterización de ecosistemas (Perkins y Leffler, 2018) y el monitoreo

de indicadores de escala pequeña (Aguilar-Garavito y Ramírez, 2015), creemos que la investigación en restauración debe adoptar con mayor frecuencia un enfoque basado en experimentos. Esta decisión implica la comparación metódica de tratamientos y tecnologías que conduzca a la identificación de estrategias costo-efectivas cuya aplicación contribuiría a su vez a superar grandes retos; entre otros, la escasez de recursos financieros, la necesidad de ampliar significativamente la cobertura espacial de los proyectos y el ajuste de políticas gubernamentales identificados por Murcia *et al.* (2016).

Una de las fases menos estudiadas según nuestro análisis fue la obtención de propágulos. En la consecución de costo-efectividad, un tema de la mayor relevancia dentro de esta fase es la restauración pasiva (“Contribución de la regeneración natural y la dispersión” y “Mejora del aporte de la regeneración natural y de la dispersión” en el marco adoptado). No obstante, solo en 10 casos se trató dicho tema, incluyendo aquellos de la fase cinco agrupados bajo el título “Potencial de regeneración”. Es necesario que se tipifique a través de investigación dónde es viable esta estrategia, al considerar variables como historia de uso y cercanía de vegetación remanente (Chazdon, 2014), junto con abundancia de árboles dentro del sitio a restaurar (Esquivel *et al.*, 2008). Una vez se establezca que existe una oferta de propágulos tanto *in situ* (Williams-Linera *et al.*, 2016), así como vía dispersión (Robinson y Handel, 2000), es necesario investigar sobre el uso de estrategias complementarias entre sí; como, por ejemplo, la erradicación sucesiva de plantas invasoras (Gaertner *et al.*, 2012; Kettenring y Reinhardt-Adams, 2011) y el uso de perchas tanto naturales como artificiales (Reid y Holl, 2013).

En tan solo 20 casos (13 %) se exploró el establecimiento de plántulas. Si bien la siembra de semillas es menos efectiva que plantación en términos de número de plántulas sobrevivientes, sus costos más bajos y la consecución de resultados más rápidos hacen que sea una opción a tener en cuenta (Masareli *et al.*, 2019), así sea como estrategia complementaria

a la plantación (Ceccon *et al.*, 2015). Dentro de esta fase del marco de trabajo se propone como prioritario el abordaje de los temas “Momento de siembra y manipulación del sitio junto” con “Técnicas de siembra”, pues implican la superación de barreras que están presentes en la mayoría de escenarios de restauración de ecosistemas terrestres. Dichas barreras son: desecación de la semilla, pudrición, depredación y competencia con vegetación pre-existente (Reid y Holl, 2013). La adopción de siembra supone conseguir suficientes semillas que sean viables, que estén sanas, que sean diversas genéticamente y que no se vea afectada la población de origen como resultado de la colecta. Estos requisitos reiteran que se necesita más investigación en los temas de la fase obtención de propágulos.

La publicación de investigaciones sobre el crecimiento y sobrevivencia de plántulas en campo también ha sido escasa (15 %, es decir, 24 casos). Este déficit llama la atención, considerando que la principal estrategia de restauración a nivel nacional es la plantación de árboles. Los aspectos o temas que propone Miller *et al.* (2017) en esta fase incluyen entender y manejar el suelo a partir de sus características físicas, químicas y biológicas. Así como también el manejo del suelo concebido como sustrato, en el que es necesario explorar aspectos como arado, acolchados, herbáceas no agresivas que compitan con gramíneas invasoras y modificación de la topografía. La investigación que vincula el suelo y el desempeño de material plantado es aún más apremiante si se tienen en cuenta hallazgos recientes en el ámbito local, los cuales sugieren que el abordaje de suelos en proyectos de restauración en Colombia presenta falencias conceptuales y técnicas que amenazan el éxito de esta práctica (Durán-Dueñas, 2018). Otro componente importante de esta fase sobre desempeño de plántulas (que no se menciona pero que está implícito) es la interacción entre los individuos plantados, así como entre estos y la vegetación preexistente. Dicha interacción se presenta tanto a nivel subterráneo como aéreo (Cahill, 1999), en concordancia con los temas de la fase. Una manera de abordar

este componente sería la experimentación con los patrones espaciales y composicionales de las plantaciones o siembras, junto con experimentación en el manejo de la vegetación preexistente.

En las publicaciones encontradas, el componente genético no se ha tratado más allá de la necesaria caracterización de poblaciones de plantas con potencial para la restauración. De acuerdo con el marco adoptado y con autores como [Kettenring et al. \(2014\)](#), es necesario establecer el efecto de la diversidad genética en el éxito de la restauración, no solo en el largo plazo sino también en etapas intermedias del proceso (como el establecimiento de plántulas, su crecimiento y sobrevivencia). Seguir esta recomendación es muy importante pues no siempre la diversidad genética está relacionada con indicadores de corto o mediano plazo como el desempeño del material plantado o la formación de toda una cobertura vegetal. Se puede conformar un dosel con una o dos especies, cada una proveniente de una fuente semillera única; pero esto afectaría la sostenibilidad de la restauración en el largo plazo ([Thomas et al., 2014](#)), en relación con temas como cambio climático o viabilidad poblacional.

Aunque la fase cinco del marco de trabajo fue la segunda con más casos (41, de un total de 167), presenta vacíos que requieren investigación. Según el análisis realizado no se han hecho estudios para establecer si los ecosistemas en restauración son resilientes a disturbios o a estrés ambiental. La manipulación de disturbios sería poco probable en sitios en restauración, ya sea por restricciones legales o porque no se pueden controlar los agentes de disturbio. En este contexto, documentar científicamente los disturbios, sus efectos y la respuesta ecológica dependería tanto de la selección y medición oportuna de los indicadores así como de la aplicación de varios tratamientos que puedan tener una respuesta disímil frente a situaciones no siempre controlables como presencia de ganado, incendios, especies invasoras, entre otras. El mismo razonamiento valdría para reportar los efectos de episodios asociados con cambio climático.

Otro apartado de esta fase sobre el cual tampoco se ha publicado investigación es el efecto de la restauración a escala de paisaje o los efectos del paisaje sobre la restauración. Para tal fin es necesario considerar variables como el tamaño, la ubicación y el aporte a la conectividad del sitio en restauración; entendiendo que dichas variables a su vez inciden en procesos bióticos y abióticos que determinan la sostenibilidad ecosistémica de la intervención ([Menz et al., 2013](#)). Estos factores inciden, además, en una escala mayor a la del sitio en restauración en cuanto a funciones como flujos hidrológicos, dinámicas metapoblacionales, rango de acción de especies animales ([Shoo y Caterall, 2013](#)) y, en general, en los servicios ecosistémicos.

El análisis no solo muestra tendencias en los temas abordados, sino que también revela profundos sesgos en la distribución geográfica de las investigaciones. El 94 % fueron realizadas en las regiones Andina y Caribe, lo cual coincide parcialmente con la ejecución de proyectos ([Murcia y Guari-guata, 2014](#)). Si bien estas dos regiones presentan las mayores necesidades de restauración en términos de superficie degradada ([Ramírez et al., 2016](#)), también es cierto que la tasa y la severidad de la degradación durante los últimos años en las regiones restantes requiere mayor atención por parte de los investigadores. El avance de la minería y explotación maderera en el Pacífico ([Valois-Cuesta, 2016](#); [Meyer et al., 2019](#)), de la deforestación en la Amazonía ([Murad y Pearse, 2018](#)) y el avance de la agroindustria en la Orinoquía ([Cárdenas-Aguilera, 2018](#)) hacen imperativa la aplicación inmediata de un marco investigativo como el que presentamos en este artículo.

Junto con los vacíos de investigación detectados mediante este análisis bibliométrico, se destacan otros aspectos relativos al progreso de la ciencia y la práctica de la restauración de acuerdo con la literatura ([Holl, 2010](#) y [Holl, 2017](#)). El avance de la restauración no depende exclusivamente del abordaje de temas prioritarios como los considerados en este trabajo, sino que, además, obedece a la forma como se aborden dichos temas.

Idealmente, los proyectos tanto de investigación como de intervención deberían tener una cobertura espacial mayor que incluya suficiente heterogeneidad ambiental para llegar a conclusiones más contundentes. Así mismo, deben generar resultados que tengan importancia para diferentes audiencias: comunidades y autoridades locales, academia local y externa y quienes formulan las políticas. También es indispensable involucrar los diferentes actores en todas las etapas del proceso. Las recomendaciones desde la literatura también incluyen un período de seguimiento prolongado tanto para proyectos como para investigaciones. En tal sentido, se destaca que el rango de tiempo abarcado por los estudios que analizamos es lo suficientemente amplio como para asegurar que dicho requerimiento ha sido tenido en cuenta por quienes han publicado. El rango es de 0.75 a 80 años ( $\bar{x} = 19.3$ ;  $\sigma = 17.6$ ).

Aunque el alcance del análisis realizado cubre solamente aspectos ecológicos, resulta fundamental armar e implementar una agenda de investigación que cubra aspectos económicos y sociales. No se trata solamente de reportar con mucha mayor frecuencia los costos y los beneficios económicos asociados a la restauración, tal como se ha hecho con sistemas silvopastoriles (Murgueitio *et al.*, 2011 y Calle *et al.*, 2013) y con plantaciones forestales no nativas (Brancalion *et al.*, 2019), sino también de establecer la contribución de la restauración a la generación de empleo, el PIB, la seguridad alimentaria, almacenamiento de carbono y la mitigación de la pobreza (Ding *et al.*, 2017). Así mismo, resulta prioritario evaluar la incidencia de la participación comunitaria en las diferentes etapas de los procesos; incluyendo monitoreo y creación de línea base a partir de ciencia ciudadana.

Finalmente, es necesario buscar estrategias de divulgación complementarias a la publicación de investigaciones en revistas científicas indexadas, dado que no todos los actores tienen acceso a este tipo de información. Por tal motivo, es necesario divulgar y discutir los resultados a través de medios como talleres, programas de extensión y

redes sociales (Matzek *et al.*, 2014). Posiblemente, la interacción frecuente y dialogante entre los diferentes actores sea preferible a la generación de manuales y guías debido a que lo primero puede ser más efectivo al enfrentar los desafíos únicos de cada proyecto en lo social, lo político y lo ecológico. Por esta misma razón, se enfatiza en que el conocimiento a compartir debe ser de origen predominantemente local, emulando iniciativas que han integrado exitosamente ciencia, práctica y diversidad de actores como el Pacto de la Mata Atlántica en Brasil (Melo *et al.*, 2013) y el Programa Gondwana Link en el suroeste de Australia (Bradby *et al.*, 2016).

## CONCLUSIÓN

Las investigaciones que versan sobre la ecología de la restauración, analizadas desde un marco de practicidad, han contribuido al desarrollo de la restauración ecológica en Colombia. No obstante, esta contribución resulta insuficiente al tener en cuenta la magnitud de la degradación, la cantidad de publicaciones y los sesgos temáticos y geográficos. En cuanto a los temas, las publicaciones han abordado principalmente la caracterización de ecosistemas, así como el registro y análisis de algunos indicadores de éxito a pequeña escala.

Si bien se trata de aspectos esenciales en la práctica de la restauración, también es necesario explorar temáticas de investigación en las cuales se optimice la obtención de propágulos y el uso de estrategias como la siembra de semillas y la plantación. Esto requiere que se adopte de manera más frecuente (pero no exclusiva) un enfoque experimental, el cual se diferencie del enfoque más descriptivo que ha predominado a la fecha. En este contexto, el abordar temas como diversidad genética, técnicas de siembra, relación suelo-planta, interacción planta-planta y función de la restauración a escala de paisaje aportaría una contribución significativa al diseño de estrategias más costo-efectivas, tanto en el corto como en el

largo plazo. La implementación y monitoreo de esas estrategias aportaría, a su vez, a la superación de grandes desafíos; entre los que están la poca disponibilidad de recursos económicos, la necesidad de mayor cobertura espacial de los proyectos y el ajuste de políticas.

Por otro lado, se ha investigado con mucha mayor frecuencia en las regiones Andinas y Caribe, por lo que se identifica que ello va en consecuencia con el grado de transformación de dichas regiones. Sin embargo, la tasa de deterioro actual y la severidad de las alteraciones hacen necesario que se haga más investigación en las regiones de la Amazonia, Orinoquia y Pacífico, teniendo como base el marco a partir del cual se desarrolló el presente trabajo.

Los resultados obtenidos y la consideración del marco de trabajo utilizado como soporte son un paso importante para definir una agenda de investigación aplicada cuyo desarrollo informe sobre cómo restaurar ecosistemas más diversos, sostenibles y resilientes. Del mismo modo, también apuntan a ser un punto de encuentro entre la academia y otros actores, en el que unos y otros puedan identificar cuáles son los insumos que se necesitan desde la ciencia para la correcta ejecución de cada una de las etapas de un proceso de restauración.

## AGRADECIMIENTOS

A Tatiana Sanjuan por sus comentarios sobre la estructura del manuscrito.

## CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener conflicto de intereses

## CONTRIBUCIÓN POR AUTOR

J.G. concibió la investigación, hizo los análisis definitivos y redactó el manuscrito. L.R. y J.C.

colectaron la información e hicieron los análisis preliminares. J.I.B.C. y W.R. revisaron y retroalimentaron versiones previas de este texto.

## REFERENCIAS

- Aguilar-Garavito, M. y Ramírez, W.** (eds.) (2015). *Monitoreo a procesos de restauración ecológica aplicado a ecosistemas terrestres*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Aguilar-Garavito, M., Schlesinger, S., Ramírez, W., Hernández, A. y Franco, A.** (2017). La restauración ecológica. Una mirada política y normativa. En L. A. Moreno, G. I. Andrade y L. F. Ruíz-Contreras (eds.), *Biodiversidad 2016. Estado y tendencias de la biodiversidad continental de Colombia* (pp. 68-69.). Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Banco Mundial** (2019). *Research and Development Expenditure (percentage of gross domestic product)*. [https://data.worldbank.org/indicador/gb.xpd.rsdv.gd.zs?name\\_desc=false](https://data.worldbank.org/indicador/gb.xpd.rsdv.gd.zs?name_desc=false)
- Baskin, C. C. y Baskin, J. M.** (2014). *Seeds: ecology, biogeography, and, evolution of dormancy and germination*. Elsevier.
- Borgman, C. L. y Furner, J.** (2002). Scholarly communication and bibliometrics. *Annual Review of Information Science and Technology*, 36(1), 2-72.
- Bradby, K., Keesing, A. y Wardell-Johnson, G.** (2016). Gondwana Link: connecting people, landscapes, and livelihoods across southwestern Australia. *Restoration Ecology*, 24(6), 827-835. <https://doi.org/10.1111/rec.12407>
- Brancalion, P. H., Amazonas, N. T., Chazdon, R. L., van Melis, J., Rodrigues, R. R., Silva, C. C., Sorcini, T.B. y Holl, K. D.** (2019). Exotic eucalypts: from demonized trees to allies of tropical forest restoration? *Journal of Applied Ecology*. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13513>
- Burbidge, A. H., Maron, M., Clarke, M. F., Baker, J., Oliver, D. L. y Ford, G.** (2011). Linking science and practice in ecological research and

- management: how can we do it better? *Ecological Management & Restoration*, 12(1), 54-60. <https://doi.org/10.1111/j.1442-8903.2011.00569.x>
- Cabin, R. J., Clewell, A., Ingram, M., McDonald, T. y Temperton, V.** (2010). Bridging restoration science and practice: results and analysis of a survey from the 2009 society for ecological restoration international meeting. *Restoration Ecology*, 18(6), 783-788. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2010.00743.x>
- Cahill Jr., J. F.** (1999). Fertilization effects on interactions between above-and belowground competition in an old field. *Ecology*, 80(2), 466-480. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(1999\)080\[0466:FEOIBA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(1999)080[0466:FEOIBA]2.0.CO;2)
- Calle, Z., Murgueitio, E., Chará, J., Molina, C. H., Zuluaga, A. F. y Calle, A.** (2013). A strategy for scaling-up intensive silvopastoral systems in Colombia. *Journal of Sustainable Forestry*, 32(7), 677-693. <https://doi.org/10.1080/10549811.2013.817338>
- Cárdenas-Aguilera, J. F.** (2018). *Aproximación a la producción agroindustrial en la Orinoquía: el caso de la soya (Glycine max) en el municipio de Puerto López-Meta* (tesis maestría). Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. <http://hdl.handle.net/10554/34348>
- Ceccon, E., González, E. J. y Martorell, C.** (2016). Is direct seeding a biologically viable strategy for restoring forest ecosystems? Evidences from a Meta-analysis. *Land Degradation & Development*, 27(3), 511-520. <https://doi.org/10.1002/ldr.2421>
- Chazdon, R. L.** (2014). *Second growth: the promise of tropical forest regeneration in an age of deforestation*. University of Chicago Press.
- Chazdon, R. L., Brancalion, P. H., Lamb, D., Laestadius, L., Calmon, M. y Kumar, C.** (2017). A policy-driven knowledge agenda for global forest and landscape restoration. *Conservation Letters*, 10(1), 125-132. <https://doi.org/10.1111/conl.12220>
- Cleef, A. M., Rangel, O., van der Hammen, T. y Jaramillo, R.** (1984). La vegetación de las selvas del transecto Buritaca. *Studies on tropical Andean ecosystems*, 2, 267-407.
- Ding, H., Faruqi, S., Wu, A., Altamirano, J., Anchondo, O., Verdone, M., Zamora, R., Chazdon, R. y Vergara, W.** (2017). *Roots of prosperity. The economics and finance of restoring land*. World Resources Institute.
- Durán-Dueñas, J. C.** (2018) *Análisis Ambiental del Suelo en Proyectos de Restauración Ecológica de Ecosistemas Terrestres en Colombia (2003-2016)* (tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/68827>
- Esquivel, M. J., Harvey, C. A., Finegan, B., Casanoves, F. y Skarpe, C.** (2008). Effects of pasture management on the natural regeneration of neotropical trees. *Journal of Applied Ecology*, 45(1), 371-380. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2007.01411.x>
- Etter, A., McAlpine, C. y Possingham, H.** (2008). Historical patterns and drivers of landscape change in Colombia since 1500: a regionalized spatial approach. *Annals of the Association of American Geographers*, 98(1), 2-23.
- Gaertner, M., Fisher, J., Sharma, G. y Esler, K.** (2012). Insights into invasion and restoration ecology: time to collaborate towards a holistic approach to tackle biological invasions. *NeoBiota*, 12, 57.
- Giardina, C. P., Litton, C. M., Thaxton, J. M., Cordell, S., Hadway, L. J. y Sandquist, D. R.** (2007). Science driven restoration: a candle in a demon haunted world-response to Cabin (2007). *Restoration Ecology*, 15(2), 171-176. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2007.00227.x>
- Harris, J. A., Hobbs, R. J., Higgs, E. y Aronson, J.** (2006). Ecological restoration and global climate change. *Restoration Ecology*, 14(2), 170-176. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2006.00136.x>
- Holl, K. D.** (2010). Writing for an international audience. *Restoration Ecology*, 18(2), 135-137. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2009.00646.x>
- Holl, K. D.** (2017). Research Directions in Tropical Forest Restoration. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 102(2), 237-251. <https://doi.org/10.3417/2016036>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales** (2010). *Estudio nacional del agua 2010*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

- Kettenring, K. M. y Reinhardt-Adams, C.** (2011). Lessons learned from invasive plant control experiments: a systematic review and meta-analysis. *Journal of Applied Ecology*, 48(4), 970-979. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2011.01979.x>
- Kettenring, K. M., Mercer, K. L., Reinhardt-Adams, C. y Hines, J.** (2014). Application of genetic diversity-ecosystem function research to ecological restoration. *Journal of Applied Ecology*, 51(2), 339-348. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12202>
- López-Barrera, F., Martínez-Garza, C. y Ceccon, E.** (2017). Ecología de la restauración en México: estado actual y perspectivas. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88, 97-112. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2017.10.001>
- Masarei, M., Guzzoni, A. L., Merritt, D. J. y Erickson, T. E.** (2019). Factoring Restoration Practitioner Perceptions into Future Design of Mechanical Direct Seeders for Native Seeds. *Restoration Ecology*. <https://doi.org/10.1111/rec.13001>
- Matzek, V., Covino, J., Funk, J. L. y Saunders, M.** (2014). Closing the knowing-doing gap in invasive plant management: accessibility and interdisciplinarity of scientific research. *Conservation Letters*, 7(3), 208-215. <https://doi.org/10.1111/conl.12042>
- Melo, F. P., Pinto, S. R., Brancalion, P. H., Castro, P. S., Rodrigues, R. R., Aronson, J. y Tabarelli, M.** (2013). Priority setting for scaling-up tropical forest restoration projects: Early lessons from the Atlantic Forest Restoration Pact. *Environmental Science & Policy*, 33, 395-404. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2013.07.013>
- Menz, M. H., Dixon, K. W. y Hobbs, R. J.** (2013). Hurdles and opportunities for landscape-scale restoration. *Science*, 339(6119), 526-527. <https://doi.org/10.1126/science.1228334>
- Meyer, V., Saatchi, S., Ferraz, A., Xu, L., Duque, A., García, M. y Chave, J.** (2019). Forest degradation and biomass loss along the Chocó region of Colombia. *Carbon Balance and Management*, 14(1), 2.
- Miller, B. P., Sinclair, E. A., Menz, M. H., Elliott, C. P., Bunn, E., Commander, L. E., Dalziel, E., David, E., Davis, B., Erickson, T. D., Golos, P. J., Krauss, S. L., Lewandrowski, W., Ellery-Mayence, C., Merino-Martín, L., Merritt, D. J., Nevill, P.G., Phillips, R. D., Ritchie, A. L., Ruoss, S. y Stevens, J. C.** (2017). A framework for the practical science necessary to restore sustainable, resilient, and biodiverse ecosystems. *Restoration Ecology*, 25(4), 605-617. <https://doi.org/10.1111/rec.12475>
- Murad, C. A. y Pearse, J.** (2018). Landsat study of deforestation in the Amazon region of Colombia: Departments of Caquetá and Putumayo. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 11, 161-171. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2018.07.003>
- Murcia, C. y Guariguata, M. R.** (2014). La restauración ecológica en Colombia: tendencias, necesidades y oportunidades. *Documentos ocasionales 107*. Centro para la Investigación Forestal Internacional.
- Murcia, C., Guariguata, M. R., Andrade, Á., Andrade, G. I., Aronson, J., Escobar, E. M., Etter, A., Moreno, F. H., Ramírez, W. y Montes, E.** (2016). Challenges and prospects for scaling-up ecological restoration to meet international commitments: Colombia as a case study. *Conservation Letters*, 9(3), 213-220. <https://doi.org/10.1111/conl.12199>
- Murcia, C., Guariguata, M. R., Peralvo, M. y Gálmez, V.** (2017a). La restauración de bosques andinos tropicales: avances, desafíos y perspectivas del futuro. *Documentos Ocasiones 170*. <https://doi.org/10.17528/cifor/006524>
- Murcia, C., Guariguata, M. R., Quintero-Vallejo, E. y Ramírez, W.** (2017b). La restauración ecológica en el marco de las compensaciones por pérdida de biodiversidad en Colombia: Un análisis crítico. Vol. 176. Centro para la Investigación Forestal Internacional.
- Murgueitio, E., Calle, Z., Uribe, F., Calle, A. y Solorio, B.** (2011). Native trees and shrubs for the productive rehabilitation of tropical cattle ranching lands. *Forest Ecology and Management*, 261(10), 1654-1663. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.09.027>
- Perkins, L. B. y Leffler, A. J.** (2018). Conceptualizing ecological restoration: a concise and adaptable framework for researchers and practitioners. *Restoration Ecology*, 26(6), 1024-1028. <https://doi.org/10.1111/rec.12881>

- Pizano, C. y García, H.** (eds.) (2014). *El bosque seco tropical en Colombia*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Ramírez, W., Murcia, C., Guariguata, M., Thomas, E., Aguilar, M. y Isaacs, P.** (2016). Restauración ecológica. Los retos para Colombia. En M. F Gómez, L. A. Moreno, G. I. Andrade y C. Rueda (eds.), *Biodiversidad 2015. Estado y tendencias de la biodiversidad continental de Colombia* (pp. 72-73). Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Reid, J. L. y Holl, K. D.** (2013). Arrival  $\neq$  survival. *Restoration Ecology*, 21(2), 153-155. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2012.00922.x>
- Robinson, G.R. y Handel, S.N.** (2000). Directing spatial patterns of recruitment during an experimental urban woodland reclamation. *Ecological Applications*, 10, 174-188. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2000\)010\[0174:DSPORD\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2000)010[0174:DSPORD]2.0.CO;2)
- Romanelli, J. P., Fujimoto, J. T., Ferreira, M. D. y Milanez, D. H.** (2018). Assessing ecological restoration as a research topic using bibliometric indicators. *Ecological Engineering*, 120, 311-320. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.06.015>
- Rovere, A. E.** (2015). Review of the science and practice of restoration in Argentina: increasing awareness of the discipline. *Restoration Ecology*, 23(5), 508-512. <https://doi.org/10.1111/rec.12240>
- Shoo, L. P. y Catterall, C. P.** (2013). Stimulating natural regeneration of tropical forest on degraded land: approaches, outcomes, and information gaps. *Restoration Ecology*, 21(6), 670-677. <https://doi.org/10.1111/rec.12048>
- Society for Ecological Restoration** (2004). *The SER international primer on ecological restoration*. Society for Ecological Restoration.
- Song, Y. y Zhao, T.** (2013). A bibliometric analysis of global forest ecology research during 2002-2011. *SpringerPlus*, 2(1), 204.
- Thomas, E., Jalonen, R., Loo, J., Boshier, D., Gallo, L., Cavers, S., Bordács, S., Smith, P. y Bozzano, M.** (2014). Genetic considerations in ecosystem restoration using native tree species. *Forest Ecology and Management*, 333, 66-75. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.07.015>
- Valois-Cuesta, H.** (2016). *Sucesión primaria y ecología de la revegetación de selvas degradadas por minería en el Chocó, Colombia: bases para su restauración ecológica* (tesis de doctorado). Instituto Universitario de Investigación en Gestión Forestal Sostenible, Universidad de Valladolid, España. <https://doi.org/10.35376/10324/19089>
- Williams-Linera, G., Bonilla-Moheno, M. y López-Barrera, F.** (2016). Tropical cloud forest recovery: the role of seed banks in pastures dominated by an exotic grass. *New Forests*, 47(3), 481-496. <https://doi.org/10.1007/s11056-016-9526-8>

**Anexo 1.** Base de datos de casos evaluados

| <b>Año</b> | <b>Primer autor</b> | <b>Revista</b>                                 | <b>Sección según Miller et al. (2017)</b>                 |
|------------|---------------------|--|---|
| 1996       | Argüello            | <i>Agronomía Colombiana</i>                    | Resiliencia, sostenibilidad e integración con el paisaje  |
| 1997       | Murcia              | <i>Forest Ecology and Management</i>           | Resiliencia, sostenibilidad e integración con el paisaje  |
| 1998       | Arens               | <i>American Fern Society</i>                   | Definición de objetivos y planificación                   |
| 1999       | Elster              | <i>Hydrobiologia</i>                           | Establecimiento de plántulas a partir de semillas         |
| 1999       | Elster              | <i>Hydrobiologia</i>                           | Facilitación del crecimiento y sobrevivencia de plántulas |
| 1999       | Aide                | <i>Restoration Ecology</i>                     | Establecimiento de plántulas a partir de semillas         |
| 1999       | Aide                | <i>Restoration Ecology</i>                     | Facilitación del crecimiento y sobrevivencia de plántulas |
| 1999       | Perdomo             | <i>Marine Pollution Bulletin</i>               | Obtención de propágulos                                   |
| 2000       | Posada              | <i>Restoration Ecology</i>                     | Definición de objetivos y planificación                   |
| 2000       | Posada              | <i>Restoration Ecology</i>                     | Establecimiento de plántulas a partir de semillas         |
| 2000       | Elster              | <i>Forest Ecology and Management</i>           | Facilitación del crecimiento y sobrevivencia de plántulas |
| 2001       | Díaz                | <i>Colombia Forestal</i>                       | Definición de objetivos y planificación                   |
| 2003       | Cortés              | <i>Caldasía</i>                                | Definición de objetivos y planificación                   |
| 2004       | Cardona             | <i>Colombia Forestal</i>                       | Obtención de propágulos                                   |
| 2005       | Romero              | <i>Colombia Forestal</i>                       | Definición de objetivos y planificación                   |
| 2005       | Lentijo             | <i>Ornitología Colombiana</i>                  | Resiliencia, sostenibilidad e integración con el paisaje  |
| 2005       | Groenendijk         | <i>Plant Ecology</i>                           | Definición de objetivos y planificación                   |
| 2006       | Kattan              | <i>Restoration Ecology</i>                     | Resiliencia, sostenibilidad e integración con el paisaje  |
| 2006       | Benavides           | <i>Journal of Tropical Ecology</i>             | Definición de objetivos y planificación                   |
| 2006       | Galindo             | <i>Acta Biológica Colombiana</i>               | Facilitación del crecimiento y sobrevivencia de plántulas |
| 2007       | Castañeda           | <i>Colombia Forestal</i>                       | Establecimiento de plántulas a partir de semillas         |
| 2007       | Castañeda           | <i>Colombia Forestal</i>                       | Establecimiento de plántulas a partir de semillas         |
| 2007       | Guacaneme           | <i>Universitas Scientiarum</i>                 | Resiliencia, sostenibilidad e integración con el paisaje  |
| 2007       | Ochoa               | <i>Universitas Scientiarum</i>                 | Facilitación del crecimiento y sobrevivencia de plántulas |
| 2007       | Roncancio           | <i>Boletín Científico del Centro de Museos</i> | Resiliencia, sostenibilidad e integración con el paisaje  |
| 2007       | Arbeláez            | <i>Hydrobiologia</i>                           | Obtención de propágulos                                   |
| 2008       | Montenegro          | <i>Revista de Biología Tropical</i>            | Definición de objetivos y planificación                   |
| 2008       | Cantillo            | <i>Colombia Forestal</i>                       | Definición de objetivos y planificación                   |
| 2008       | Cantillo            | <i>Colombia Forestal</i>                       | Obtención de propágulos                                   |
| 2008       | Cantillo            | <i>Colombia Forestal</i>                       | Obtención de propágulos                                   |
| 2008       | Castaño             | <i>Revista Facultad Nacional de Agronomía</i>  | Resiliencia, sostenibilidad e integración con el paisaje  |
| 2008       | Gruezmacher         | <i>Colombia Forestal</i>                       | Facilitación del crecimiento y sobrevivencia de plántulas |
| 2008       | Montenegro          | <i>Revista de Biología Tropical</i>            | Definición de objetivos y planificación                   |
| 2008       | Pedraza             | <i>Zootecnia Tropical</i>                      | Resiliencia, sostenibilidad e integración con el paisaje  |
| 2008       | Arellano            | <i>Caldasía</i>                                | Definición de objetivos y planificación                   |
| 2009       | Cantillo            | <i>Colombia Forestal</i>                       | Definición de objetivos y planificación                   |
| 2009       | Montero             | <i>Boletín Científico del Centro de Museos</i> | Definición de objetivos y planificación                   |
| 2010       | Yepes               | <i>Revista Lasallista de Investigación</i>     | Resiliencia, sostenibilidad e integración con el paisaje  |

|      |             |   |   |
|------|-------------|---|---|
| 2010 | Yepes       | <i>Revista de Biología Tropical</i>                 | Definición de objetivos y planificación                   |
| 2010 | Castellanos | <i>Acta Biológica Colombiana</i>                    | Resiliencia, sostenibilidad e integración con el paisaje  |
| 2010 | González    | <i>Colombia Forestal</i>                            | Obtención de propágulos                                   |
| 2010 | Giraldo     | <i>Boletín Científico del Centro de Museos</i>      | Obtención de propágulos                                   |
| 2010 | Rivera      | <i>Avances Investigación en Ingeniería</i>          | Facilitación del crecimiento y sobrevivencia de plántulas |
| 2010 | Medina      | <i>Colombia Forestal</i>                            | Definición de objetivos y planificación                   |
| 2010 | Kattan      | <i>Tropical Conservation Science</i>                | Resiliencia, sostenibilidad e integración con el paisaje  |
| 2010 | Ascuntar    | <i>Boletín Científico del Centro de Museos</i>      | Resiliencia, sostenibilidad e integración con el paisaje  |
| 2010 | García      | <i>Restoration Ecology</i>                          | Resiliencia, sostenibilidad e integración con el paisaje  |
| 2010 | Barliza     | <i>Acta Biológica Colombiana</i>                    | Resiliencia, sostenibilidad e integración con el paisaje  |
| 2011 | Castro      | <i>Acta Biológica Colombiana</i>                    | Definición de objetivos y planificación                   |
| 2011 | Fernández   | <i>Boletín Científico del Centro de Museos</i>      | Resiliencia, sostenibilidad e integración con el paisaje  |
| 2011 | Bohórquez   | <i>Boletín Científico del Centro de Museos</i>      | Definición de objetivos y planificación                   |
| 2011 | Pérez       | <i>Colombia Forestal</i>                            | Establecimiento de plántulas a partir de semillas         |
| 2011 | Duarte      | <i>Tecciencia</i>                                   | Definición de objetivos y planificación                   |
| 2011 | Giraldo     | <i>Insect Conservation and Diversity</i>            | Resiliencia, sostenibilidad e integración con el paisaje  |
| 2011 | Cortés      | <i>Biodiversity and Conservation</i>                | Definición de objetivos y planificación                   |
| 2011 | Domínguez   | <i>Restoration Ecology</i>                          | Resiliencia, sostenibilidad e integración con el paisaje  |
| 2011 | Domínguez   | <i>Restoration Ecology</i>                          | Resiliencia, sostenibilidad e integración con el paisaje  |
| 2011 | Del Valle   | <i>Revista de Biología Tropical</i>                 | Definición de objetivos y planificación                   |
| 2012 | Camargo     | <i>Acta Agronómica</i>                              | Definición de objetivos y planificación                   |
| 2012 | Solorza     | <i>Luna Azul</i>                                    | Facilitación del crecimiento y sobrevivencia de plántulas |
| 2012 | Chaves      | <i>Revista de Investigación Agraria y Ambiental</i> | Definición de objetivos y planificación                   |
| 2012 | Arcila      | <i>Biota Colombiana</i>                             | Definición de objetivos y planificación                   |
| 2012 | Hurtado     | <i>Caldasía</i>                                     | Establecimiento de plántulas a partir de semillas         |
| 2012 | Méndez      | <i>Revista Colombiana de Entomología</i>            | Resiliencia, sostenibilidad e integración con el paisaje  |
| 2012 | Henao       | <i>Restoration Ecology</i>                          | Obtención de propágulos                                   |
| 2012 | Restrepo    | <i>Revista de Biología Tropical</i>                 | Definición de objetivos y planificación                   |
| 2012 | Mosquera    | <i>Geoderma</i>                                     | Resiliencia, sostenibilidad e integración con el paisaje  |
| 2012 | Blanco      | <i>Revista de Biología Tropical</i>                 | Definición de objetivos y planificación                   |
| 2012 | Ruiz        | <i>Revista Gestión y Ambiente</i>                   | Definición de objetivos y planificación                   |
| 2012 | Melo        | <i>Colombia Forestal</i>                            | Facilitación del crecimiento y sobrevivencia de plántulas |
| 2013 | Bohórquez   | <i>Colombia Forestal</i>                            | Definición de objetivos y planificación                   |
| 2013 | Rojas       | <i>Revista de Biología Tropical</i>                 | Establecimiento de plántulas a partir de semillas         |
| 2013 | Gómez       | <i>Ecological Engineering</i>                       | Facilitación del crecimiento y sobrevivencia de plántulas |
| 2013 | Flórez      | <i>Revista de Biología Tropical</i>                 | Resiliencia, sostenibilidad e integración con el paisaje  |
| 2013 | Betancourt  | <i>Boletín de Investigación Marina Costera</i>      | Definición de objetivos y planificación                   |
| 2013 | Rubiano     | <i>Boletín Científico del Centro de Museos</i>      | Resiliencia, sostenibilidad e integración con el paisaje  |
| 2013 | Peña        | <i>Forest Ecology and Management</i>                | Resiliencia, sostenibilidad e integración con el paisaje  |
| 2013 | Calle       | <i>Restoration Ecology</i>                          | Resiliencia, sostenibilidad e integración con el paisaje  |

|      |           |  |   |
|------|-----------|--|---|
| 2013 | Calle     | <i>Restoration Ecology</i>                           | Resiliencia, sostenibilidad e integración con el paisaje  |
| 2013 | Muñoz     | <i>Agriculture Ecosystems and Environment</i>        | Definición de objetivos y planificación                   |
| 2014 | Beltrán   | <i>Biota Colombiana</i>                              | Facilitación del crecimiento y sobrevivencia de plántulas |
| 2014 | Hernández | <i>Biota Colombiana</i>                              | Facilitación del crecimiento y sobrevivencia de plántulas |
| 2014 | Acero     | <i>Revista de la Academia Colombiana de Ciencias</i> | Definición de objetivos y planificación                   |
| 2014 | Acero     | <i>Revista de la Academia Colombiana de Ciencias</i> | Establecimiento de plántulas a partir de semillas         |
| 2014 | Avella    | <i>Biota Colombiana</i>                              | Definición de objetivos y planificación                   |
| 2014 | García    | <i>Revista de Investigación Agraria y Ambiental</i>  | Definición de objetivos y planificación                   |
| 2014 | Ramírez   | <i>Plant and Soil</i>                                | Resiliencia, sostenibilidad e integración con el paisaje  |
| 2014 | Castro    | <i>Caldasia</i>                                      | Definición de objetivos y planificación                   |
| 2014 | Konnerup  | <i>Estuarine, Coastal and Shelf Science</i>          | Resiliencia, sostenibilidad e integración con el paisaje  |
| 2014 | Sepúlveda | <i>Acta Biológica Colombiana</i>                     | Establecimiento de plántulas a partir de semillas         |
| 2015 | Vargas    | <i>Revista de Biología Tropical</i>                  | Establecimiento de plántulas a partir de semillas         |
| 2015 | Vargas    | <i>Revista de Biología Tropical</i>                  | Obtención de propágulos                                   |
| 2015 | Posada    | <i>Revista EIA</i>                                   | Definición de objetivos y planificación                   |
| 2015 | Collantes | <i>Revista de Investigación Agraria y Ambiental</i>  | Definición de objetivos y planificación                   |
| 2015 | Collantes | <i>Revista de Investigación Agraria y Ambiental</i>  | Definición de objetivos y planificación                   |
| 2015 | Moreno    | <i>Acta Biológica Colombiana</i>                     | Establecimiento de plántulas a partir de semillas         |
| 2015 | Moreno    | <i>Acta Biológica Colombiana</i>                     | Facilitación del crecimiento y sobrevivencia de plántulas |
| 2015 | Moreno    | <i>Acta Biológica Colombiana</i>                     | Facilitación del crecimiento y sobrevivencia de plántulas |
| 2015 | Moreno    | <i>Acta Biológica Colombiana</i>                     | Facilitación del crecimiento y sobrevivencia de plántulas |
| 2015 | Bocanegra | <i>Boletín Científico del Centro de Museos</i>       | Definición de objetivos y planificación                   |
| 2015 | Bocanegra | <i>Boletín Científico del Centro de Museos</i>       | Definición de objetivos y planificación                   |
| 2015 | López     | <i>Luna Azul</i>                                     | Definición de objetivos y planificación                   |
| 2015 | Gutierrez | <i>Colombia Forestal</i>                             | Establecimiento de plántulas a partir de semillas         |
| 2015 | Ávila     | <i>Acta Biológica Colombiana</i>                     | Establecimiento de plántulas a partir de semillas         |
| 2015 | Ávila     | <i>Acta Biológica Colombiana</i>                     | Facilitación del crecimiento y sobrevivencia de plántulas |
| 2015 | Alvarado  | <i>Acta Biológica Colombiana</i>                     | Definición de objetivos y planificación                   |
| 2015 | Lizarazo  | <i>Acta Biológica Colombiana</i>                     | Facilitación del crecimiento y sobrevivencia de plántulas |
| 2015 | Basto     | <i>Universitas Scientiarum</i>                       | Establecimiento de plántulas a partir de semillas         |
| 2015 | Herrera   | <i>Environmental Entomology</i>                      | Resiliencia, sostenibilidad e integración con el paisaje  |
| 2015 | Sierra    | <i>Revista Facultad Nacional de Agronomía</i>        | Facilitación del crecimiento y sobrevivencia de plántulas |
| 2016 | Fernández | <i>Colombia Forestal</i>                             | Definición de objetivos y planificación                   |
| 2016 | Manrique  | <i>Bistua Revista de la Facultad de Ciencias</i>     | Definición de objetivos y planificación                   |
| 2016 | Gallego   | <i>Acta Biológica Colombiana</i>                     | Establecimiento de plántulas a partir de semillas         |

|      |                     |  |   |
|------|---------------------|--|---|
| 2016 | Bare                | <i>New Forest</i>  | Facilitación del crecimiento y sobrevivencia de plántulas |
| 2016 | Hernández           | <i>Tecnura</i>   | Resiliencia, sostenibilidad e integración con el paisaje  |
| 2016 | Posada              | <i>Boletín Científico del Centro de Museos</i>           | Definición de objetivos y planificación                   |
| 2016 | Basham              | <i>Animal Conservation</i>                               | Resiliencia, sostenibilidad e integración con el paisaje  |
| 2016 | Gonzalez del Pliego | <i>Biological Conservation</i>                           | Resiliencia, sostenibilidad e integración con el paisaje  |
| 2016 | Valero              | <i>Chemical and Biological Techniques in Agriculture</i> | Facilitación del crecimiento y sobrevivencia de plántulas |
| 2017 | Rojas               | <i>Caldasia</i>  | Resiliencia, sostenibilidad e integración con el paisaje  |
| 2017 | Solorza             | <i>Colombia Forestal</i>                                 | Facilitación del crecimiento y sobrevivencia de plántulas |
| 2017 | Casallas            | <i>Acta Biológica Colombiana</i>                         | Obtención de propágulos                                   |
| 2017 | Valois              | <i>Revista de Biología Tropical</i>                      | Obtención de propágulos                                   |
| 2017 | Gutierrez           | <i>Revista de Biología Tropical</i>                      | Establecimiento de plántulas a partir de semillas         |
| 2017 | Gutierrez           | <i>Revista de Biología Tropical</i>                      | Obtención de propágulos                                   |
| 2017 | Rosselli            | <i>Acta Biológica Colombiana</i>                         | Resiliencia, sostenibilidad e integración con el paisaje  |
| 2017 | Ocampo              | <i>Biota Colombiana</i>                                  | Definición de objetivos y planificación                   |
| 2017 | Beltrán             | <i>Colombia Forestal</i>                                 | Facilitación del crecimiento y sobrevivencia de plántulas |
| 2017 | López               | <i>Colombia Forestal</i>                                 | Establecimiento de plántulas a partir de semillas         |
| 2017 | Muñoz               | <i>Colombia Forestal</i>                                 | Obtención de propágulos                                   |
| 2017 | Clavijo             | <i>Producción Más Limpia</i>                             | Definición de objetivos y planificación                   |
| 2017 | Díaz                | <i>Biota Colombiana</i>                                  | Definición de objetivos y planificación                   |
| 2017 | Díez                | <i>Colombia Forestal</i>                                 | Establecimiento de plántulas a partir de semillas         |
| 2017 | Thomas              | <i>Biodiversity and Conservation</i>                     | Obtención de propágulos                                   |
| 2017 | González            | <i>Luna Azul</i>   | Definición de objetivos y planificación                   |
| 2017 | Montealegre         | <i>Ornitología Colombiana</i>                            | Resiliencia, sostenibilidad e integración con el paisaje  |
| 2017 | Galindo             | <i>Restoration Ecology</i>                               | Obtención de propágulos                                   |
| 2017 | Galindo             | <i>Restoration Ecology</i>                               | Facilitación del crecimiento y sobrevivencia de plántulas |
| 2017 | Cubillos            | <i>Revista Facultad Nacional de Agronomía</i>            | Resiliencia, sostenibilidad e integración con el paisaje  |
| 2017 | Díez                | <i>Colombia Forestal</i>                                 | Facilitación del crecimiento y sobrevivencia de plántulas |
| 2018 | Vásquez             | <i>Colombia Forestal</i>                                 | Definición de objetivos y planificación                   |
| 2018 | Fuentes             | <i>Acta Biológica Colombiana</i>                         | Definición de objetivos y planificación                   |
| 2018 | Fuentes             | <i>Acta Biológica Colombiana</i>                         | Definición de objetivos y planificación                   |
| 2018 | Calderón            | <i>Caldasia</i>  | Establecimiento de plántulas a partir de semillas         |
| 2018 | Bocanegra           | <i>Tree Genetics &amp; Genomes</i>                       | Obtención de propágulos                                   |
| 2018 | Tulande             | <i>Universitas Scientiarum</i>                           | Resiliencia, sostenibilidad e integración con el paisaje  |
| 2018 | Castellanos         | <i>Land Degradation &amp; Development</i>                | Resiliencia, sostenibilidad e integración con el paisaje  |
| 2018 | Bocanegra           | <i>Biological Conservation</i>                           | Obtención de propágulos                                   |
| 2018 | Jaramillo           | <i>Wetlands</i>  | Resiliencia, sostenibilidad e integración con el paisaje  |
| 2018 | Benavides           | <i>Journal of Soil and Water Conservation</i>            | Definición de objetivos y planificación                   |
| 2018 | Vargas              | <i>Revista de Biología Tropical</i>                      | Establecimiento de plántulas a partir de semillas         |
| 2018 | Vargas              | <i>Revista de Biología Tropical</i>                      | Obtención de propágulos                                   |
| 2018 | Calderón            | <i>Caldasia</i>  | Obtención de propágulos                                   |
| 2018 | Peláez              | <i>Restoration Ecology</i>                               | Resiliencia, sostenibilidad e integración con el paisaje  |
| 2018 | Domínguez           | <i>Sociobiology</i>                                      | Resiliencia, sostenibilidad e integración con el paisaje  |

|      |           |   |   |
|------|-----------|---|---|
| 2018 | Domínguez | <i>Geoderma</i>                                     | Resiliencia, sostenibilidad e integración con el paisaje  |
| 2019 | Avella    | <i>Caldasia</i>                                     | Definición de objetivos y planificación                   |
| 2019 | Suárez    | <i>Caldasia</i>                                     | Definición de objetivos y planificación                   |
| 2019 | Suárez    | <i>Caldasia</i>                                     | Definición de objetivos y planificación                   |
| 2019 | Bravo     | <i>Revista de Investigación Agraria y Ambiental</i> | Definición de objetivos y planificación                   |
| 2019 | Quiroga   | <i>Boletín Científico del Centro de Museos</i>      | Definición de objetivos y planificación                   |
| 2019 | Torres    | <i>Caldasia</i>                                     | Definición de objetivos y planificación                   |
| 2019 | Bocanegra | <i>Caldasia</i>                                     | Obtención de propágulos                                   |
| 2019 | Díaz      | <i>Caldasia</i>                                     | Facilitación del crecimiento y sobrevivencia de plántulas |
| 2019 | Gracia    | <i>Marine Pollution Bulletin</i>                    | Definición de objetivos y planificación                   |
| 2019 | Meyer     | <i>Carbon Balance and Management</i>                | Definición de objetivos y planificación                   |
| 2019 | Domínguez | <i>Ecological Indicators</i>                        | Resiliencia, sostenibilidad e integración con el paisaje  |





UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS



## Evaluación de la trayectoria de la restauración en un bosque andino a través de redes mutualistas de dispersión de semillas

### Evaluation of the restoration trajectory of an Andean forest through seed dispersal mutualistic networks

Astrid Ramírez<sup>1\*</sup> y Ángela Parrado-Rosselli<sup>1</sup>

Ramírez, A. y Parrado-Rosselli, A. (2021). Evaluación de la trayectoria de la restauración en un bosque andino a través de redes mutualistas de dispersión de semillas. *Colombia Forestal*, 24(1), 108-122

**Recepción:** 28 de noviembre 2019

**Aprobación:** 21 de septiembre 2020

#### Resumen

Con el fin de evaluar la restauración desde un enfoque funcional se compararon las interacciones de dispersión de semillas por aves entre un bosque restaurado y el de referencia. Se registró la abundancia y riqueza de aves frugívoras y plantas ornitócoras; del mismo modo, se generaron matrices de interacción con base en el consumo de frutos y el solapamiento morfológico entre el tamaño del fruto y la comisura de las aves. Los resultados mostraron que el número de enlaces por especie y anidamiento fueron mayores en el bosque de referencia; mientras que en el restaurado se presentó mayor variación mensual del número de interacciones. Además, la especie más conectada en los dos bosques fue *Diglossa cyanea*. Se discute que, aunque se restablecieron algunas interacciones, aún hay diferencias entre bosques y por ello se debe hacer gestión forestal como enriquecimiento con plantas ornitócoras que permita aumentar las interacciones y el banco de semillas.

**Palabras clave:** bosques andinos, bosque de referencia, métricas de red, parque ecológico La Poma.

#### Abstract

In order to evaluate the restoration from a functional approach, we compared avian seed dispersal interactions between a restored forest and a reference site. For this purpose, abundance and species richness of frugivorous birds and ornithochorous plants were recorded. Then, interaction matrices were generated based on fruit consumption and the morphological overlap between fruit and bill size. Our results show that the number of links per species and nestedness, were higher in the reference forest, while the number of interactions varied greatly in the restored forest. Furthermore, the most connected species in the two forests was the Masked Flowerpiercer (*Diglossa cyanea*). We discussed that although some interactions were reestablished, there are still some differences between sites and hence, management actions such as enrichment with ornithochorous plants, in order to enhance interactions and to improve the seed bank should be promoted.

**Keywords:** andean forest, reference forest, seed dispersal, network metrics, La Poma ecological park.

<sup>1</sup> Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia.

\* [avramirez@correo.udistrital.edu.co](mailto:avramirez@correo.udistrital.edu.co). Autora para correspondencia

## INTRODUCCIÓN

Uno de los objetivos de la restauración ecológica es recuperar la composición, estructura y función de los ecosistemas. Por tal, el seguimiento continuo es fundamental para lograr tal propósito y evaluar si los objetivos de la restauración se han alcanzado. Por lo general, el monitoreo de la restauración se ha centrado en evaluar y comparar (entre el sitio restaurado con el ecosistema de referencia) aspectos composicionales como la riqueza y la abundancia de especies vegetales (Alaín-Rodríguez *et al.*, 2008; Durigan *et al.*, 2015; Murcia y Guariguata, 2014). Sin embargo, son pocas las aproximaciones que intentan evaluar cómo se han recuperado los aspectos funcionales de los sitios restaurados y solo recientemente se ha hecho énfasis en la necesidad de monitorear dichas características (Chazdon *et al.*, 2016; Durigan *et al.*, 2015).

Las interacciones ecológicas son uno de los aspectos funcionales que se ha sugerido monitorear (Kaiser-Bunbury *et al.*, 2010; Ribeiro da Silva *et al.*, 2015). Por ejemplo, la dispersión de semillas por aves es una interacción mutualista clave en el mantenimiento de los ecosistemas la cual, en el mediano plazo, incide en la composición y estructura de los bosques. Además, la dispersión tiene gran importancia en la aceleración de los procesos de restauración, pues contribuye a enriquecer el banco de semillas en el suelo, a la colonización de nuevos sitios y a la distribución y abundancia de las especies de plantas (Howe y Smallwood, 1982; Wunderle, 1997). En los bosques tropicales, donde más del 70 % de las especies de plantas están adaptadas para la dispersión de sus semillas por animales (Arbeláez y Parrado-Rosselli, 2005; Link y Stevenson, 2004; Yockteng y Cavellier, 1998), el restablecimiento temprano de las relaciones de dispersión entre plantas y animales favorecería la restauración pasiva y, por ende, tendría incidencia en la disminución de costos en los proyectos de restauración.

En los últimos años las interacciones entre plantas y animales, principalmente de dispersión y

polinización, se han analizado mediante redes mutualistas. Estas redes permiten entender los efectos de la aparición o desaparición de una determinada especie en el funcionamiento de la red y, por ende, pueden proporcionar indicadores útiles para guiar y evaluar los objetivos de la restauración (Fontaine *et al.*, 2005; García, 2016). Además, las redes mutualistas proveen información acerca de la estabilidad y resiliencia de los ecosistemas (Bascompte, 2009; Tylianakys *et al.*, 2010).

Para la construcción de las redes de mutualistas, además de las observaciones directas sobre las visitas por parte de la fauna a las especies en flor o en fruto, algunos autores han propuesto modelaciones que permitan predecir o prever interacciones entre especies. Por ejemplo, Donoso *et al.* (2017) y Bender *et al.* (2018) propusieron la utilización de variables como el tamaño de los elementos que interactúan tales como fruto y el pico de las aves, con lo que se asumiría, por ejemplo, que aves pequeñas no pueden alimentarse ni dispersar frutos/semillas de gran tamaño. Esto implica que habría interacciones prohibidas basadas en los tamaños y las morfologías (Bender *et al.*, 2018; Dehling *et al.*, 2016; Kelly *et al.*, 2010).

De esta forma, cuando los rasgos coinciden se promoverían o darían interacciones potenciales en la red; mientras que cuando los rasgos no coinciden se generarían los llamados enlaces prohibidos. Estos últimos corresponden a restricciones en la interacción debido a la falta de complementariedad de rasgos. Otros aspectos que también provocarían restricciones (aceptación o prohibición) de interacción son la abundancia, la fenología, la distribución espacial de las especies y las relaciones filogenéticas (Santamaría y Rodríguez-Gironés, 2007; Stang *et al.*, 2007; Vázquez *et al.*, 2007).

Una de las más recientes aplicaciones de redes mutualistas en la evaluación de proyectos de restauración fue el trabajo realizado por Ribeiro da Silva *et al.* (2015). En dicho trabajo, desarrollado en tres bosques restaurados de la Mata Atlántica con diferentes años de antigüedad, se comparó la estructura de las redes de dispersión de semillas

por aves y se encontró que a medida que avanzaba el tiempo desde la restauración aumentaban las interacciones entre especies y la modularidad; lo que significa que las especies tendían a formar grupos de interacción (módulos) que se relacionaban entre sí. De igual manera, [Forup et al. \(2008\)](#) y [Williams et al. \(2011\)](#) encontraron que las redes de interacción de plantas y polinizadores en bosques restaurados fueron significativamente menos complejas y con una menor conectividad en comparación con el bosque de referencia.

A pesar de lo anterior, la mayoría de estos estudios han sido desarrollados en el mediterráneo y en Norte América (p. ej. [Kaiser-Bunbury et al., 2010](#); [Nogales et al., 2015](#); [Williams, 2011](#)). En contraste, en ecosistemas tropicales y particularmente en la región Andina, es escasa la información sobre redes mutualistas ([Bender et al., 2018](#); [Burgos et al., 2003](#); [Palacio et al., 2016](#)) y menor aún su utilización como herramienta para el monitoreo de la trayectoria de la restauración. En el caso particular de los bosques andinos colombianos los pocos estudios existentes han encontrado que, en situaciones no perturbadas, las redes de dispersión planta-ave son anidadas, asimétricas y heterogéneas ([Burgos et al., 2003](#); [Palacio et al., 2016](#)), lo que coincide con diferentes estudios realizados en otras partes del mundo (p. ej. [Bascompte, 2009](#); [García, 2016](#); [Kaiser-Bunbury et al., 2010](#); [Nogales et al., 2015](#); [Ribeiro da Silva et al., 2015](#); [Vázquez et al., 2009](#)). Por ende, sería de esperarse que, en bosques restaurados, debido a la ausencia de ciertas especies de plantas y animales que aún no se han logrado establecer o a las diferencias en la dominancia de las especies en relación a su sistema de referencia, las redes de dispersión de semillas sean menos anidadas, simétricas y con un bajo número de interacciones.

En los bosques andinos secos de los alrededores de Bogotá, Colombia, la Corporación Ambiental Empresarial (adscrita a la Cámara de Comercio de Bogotá) ha desarrollado desde 1996 un proceso de restauración en el parque ecológico la Poma. Allí se encontró que, producto de este proceso,

se ha recuperado parcialmente la comunidad de aves; pero, de igual modo, que ciertos grupos tróficos, particularmente aves que consumen néctar y frutos, aún son escasos en términos de abundancia y riqueza ([Ramírez, 2019](#)). Esto podría repercutir en procesos ecológicos como la polinización y dispersión de semillas y, por ende, interacciones ecológicas clave podrían no haberse recuperado.

Por lo tanto, con el fin de evaluar la trayectoria de la restauración desde una aproximación funcional el objetivo de esta investigación fue comparar la estructura de la red mutualista entre plantas ornitócoras y aves frugívoras en un bosque andino restaurado hace 22 años y el bosque de referencia, esto a partir observaciones, reportes de literatura y rasgos de tamaño. Para tal, se caracterizó la variación mensual de la abundancia y riqueza de la comunidad de aves frugívoras y plantas ornitócoras en fruto. En segundo lugar, se caracterizó el consumo de frutos a partir de observaciones, reportes de literatura y se realizó un modelo de interacción entre tamaño de la comisura, longitud del culmen, altura del pico de las aves y el tamaño del fruto (longitud ecuatorial y longitudinal). En tercer lugar, se construyeron redes cualitativas y cuantitativas por bosque sobre las relaciones potenciales de dispersión de semillas. Teniendo en cuenta la lentitud de la recuperación de los bosques andinos en términos de biodiversidad y funciones ecológicas ([Groenendijk, 2005](#)), se esperaba que la red del bosque de referencia sea más anidada, asimétrica y heterogénea, en relación con la encontrada en el bosque restaurado.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

El estudio se realizó en el parque ecológico La Poma, ubicado entre los 2600 y 2800 m de altitud en el municipio de Soacha, departamento de Cundinamarca, Colombia (4°31'38.0"-74°16'55.2"). El parque cuenta con un área de 140.81 ha en la

zona de vida de bosque seco montano según [Holdridge \(1966\)](#) y [Riveros \(2005\)](#). El parque presenta tres tipos de coberturas: la primera corresponde a un bosque andino secundario (42.51 ha); la segunda a los bosques de eucalipto (16.4 ha); y la tercera cobertura corresponde a zonas disturbadas (81.9 ha) ([Salazar, 2003](#)). En esta última en 40.39 ha se ha realizado el proceso de restauración ecológica desde 1996.

Durante la implementación del proyecto de restauración, en 1996, el bosque secundario nativo fue considerado como el sitio de referencia. Las principales familias de plantas son Sapindaceae, Boraginaceae y Primulaceae ([Salazar, 2003](#)), mientras que las especies de plantas más importantes son *Miconia squamulosa* (Melastomataceae), *Cavendishia bracteata* (Ericaceae) y *Myrcianthes leucoxylla* (Myrtaceae) ([Salazar, 2003](#)).

## Toma de datos

### *Muestreo de plantas en fruto*

En cada uno de los bosques se instalaron, de forma sistemática y aleatoria, cinco parcelas de 50x20 m, separadas por una distancia mínima de 200 m ([Vázquez et al., 2009](#)), para totalizar 1 ha por bosque. Durante 10 meses consecutivos en cada parcela se registraron y marcaron de forma mensual todas las plantas leñosas (arbustos y árboles) en fruto. Para cada individuo se calculó el tamaño de la cosecha a través de la metodología semicuantitativa de [Fournier \(1974\)](#). Así, el tamaño de la cosecha de cada individuo se valoró en una escala de 0 a 4 basado en el porcentaje de frutos en la copa del árbol; en donde 0 fue la ausencia de frutos, 1 correspondió a 1-25 % de la copa con fruto; 2: de 26-50 %; 3: de 51-75 %; y 4: de 76-100 %.

Las plantas en fruto registradas se consideraron ornitócoras si: I) por observación directa sus frutos fueron consumidos por algún ave; II) si por registros de literatura fueron reportadas en la dieta/consumo de aves; o III) si los frutos presentaron características típicas para atraer dispersores tales

como los frutos pequeños, esféricos, pulpa carnosa y colores como el negro, morado, naranja o rojo ([Clout y Hay, 1989](#); [Levey et al., 2005](#)). Se colectaron especímenes de las plantas registradas en los censos y la identificación se realizó en el herbario forestal Gilberto Emilio Mahecha Vega UDBC, de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

### *Muestreo de aves frugívoras*

En las parcelas mencionadas se instalaron, al azar, cinco puntos de radio fijo de 25 m ([Ralph, 1997](#)). En estos puntos se realizaron mensualmente censos de aves entre las 6 y las 11 a. m., durante 20 minutos por punto de observación, para un total de 23 horas y 33 minutos por sitio ([Ralph, 1997](#)). Durante cada muestreo se anotaron todas las aves que pasaron dentro del radio de observación. La identificación de las aves se realizó a través de la guía de aves de Colombia ([Hilty et al., 1986](#)) y la guía de campo de las aves de la sabana de Bogotá ([ABO et al., 2000](#)). Las observaciones se realizaron durante 10 meses y no se hicieron registros durante horas de lluvia. Las aves se clasificaron como frugívoras si, por observación directa, consumieron frutos durante los censos y observaciones *ad libitum*, así como por información primaria, secundaria y literatura gris.

### *Caracterización morfológica de frutos y aves*

Se tomó una muestra de mínimo 50 frutos para cada planta en fruto registrada en el área de estudio. Por cada fruto se midió el tamaño longitudinal y ecuatorial con un calibrador digital con exactitud 0.01 mm. También se anotó el color y el tipo de fruto carnoso como baya, drupa, pepo y poma ([Glimn-Lacy y Kaufman, 2006](#)). Para el caso de las aves, basados en especímenes de museos, se realizaron mediciones a 10 pieles de ejemplares de machos y hembras por especie ([Vazquéz, 2009](#)). A cada ejemplar se le midió la comisura, el ancho del pico, la altura y la longitud del culmen total con un calibrador digital con exactitud 0.01 mm y se obtuvo un promedio para cada rasgo del pico por especie. Se consultaron ejemplares del Museo

de Historia Natural de Instituto de Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia y la colección de aves del Departamento de Biología de la Universidad Francisco José de Caldas.

## Análisis de datos

Para los dos bosques se calculó la riqueza, la diversidad y el recambio de especies tanto de aves frugívoras como de plantas ornitócoras. Estas medidas se calcularon mediante el número de especies, el índice de diversidad de Shannon y de Jaccard, respectivamente. Además, con el fin de determinar si hubo diferencias significativas en la abundancia y riqueza de especies entre meses, se realizó un análisis de varianza simple para las aves y un análisis de varianza de medidas repetidas para las plantas (Durigan *et al.*, 2015).

### Construcción de las redes

Para cada bosque se realizó una red cuantitativa simulada para determinar la estructura de las interacciones. Para la construcción de las redes en cada bosque (referencia y restaurado) se tuvo en cuenta la coincidencia de rasgos y la abundancia relativa tanto de plantas como de aves. En primer lugar, para evaluar la coincidencia de rasgos se consideró lo propuesto por Gonzalez y Loiselle (2016), para quienes los desajustes morfológicos en la longitud de la comisura del pico del ave y el tamaño del fruto son los que limitan la ingestión de los frutos por parte de las aves. Así, si el límite inferior del tamaño de la comisura del pico es mayor que el límite inferior del tamaño del fruto la interacción es 100 % posible con un valor de celda 1. Por el contrario, si el límite superior del rango del tamaño de la comisura es menor que el límite inferior del tamaño del fruto, la interacción es imposible y su valor de celda es 0. En segundo lugar, con respecto a la abundancia relativa, para el caso de las aves se calculó la media por mes y por punto de muestreo (Ralph, 1996), mientras que para las especies en fruto esta se calculó usando

el índice de Fournier (1974) por mes y por punto de muestreo.

En el caso de la red cuantitativa se simuló la frecuencia de interacción esperada de plantas y aves. Para el caso de las plantas se asumió que a mayor tamaño del fruto menor es la frecuencia de interacción (ecuación 1; González-Castro *et al.*, 2015; Donoso *et al.*, 2017).

$$F_i = \frac{1}{x_i} \quad (1)$$

donde,  $F_i$  representa la frecuencia de interacción de la planta esperada y  $x_i$  representa el tamaño de la semilla (en mm) para la planta  $i$ .

Para el caso de las aves se asumió que, a pesar de que a mayor tamaño del pico la frecuencia de interacción disminuye, esta relación es menor debido a que las especies más grandes tienden a consumir más diversidad de frutos por individuo (ecuación 2, Donoso *et al.*, 2017).

$$g_i = \left(\frac{1}{y_i}\right) + \beta \quad (2)$$

donde,  $g_i$  representa la frecuencia de interacción del ave esperada,  $y_i$  representa el valor del tamaño del pico y  $\beta$  es un parámetro de subcompensación, en el cual la frecuencia de interacción disminuye menos rápidamente cuando más grande es el tamaño del ave establecido en el 10 % del valor máximo de  $1/y$  (Donoso *et al.*, 2017).

Posteriormente, se utilizó un modelo de nicho cuantitativo de Fründ *et al.* (2016) y Donoso *et al.* (2017) para calcular matrices de preferencias de las especies (ecuación 3).

$$P_{i,j} = \frac{e^{-(\log(s(y_j - x_i)))^2/2}}{\sqrt{2\pi}(s(y_i - x_i) + e^{-1})} \quad (3)$$

donde,  $P_{i,j}$  es la preferencia de las especies de aves  $j$  para ciertas especies de plantas  $i$ ;  $y_j$  y  $x_i$  son el tamaño de las aves y el tamaño de los frutos, respectivamente. El parámetro  $s$  controla el grado de especialización de la interacción. Así, cuanto mayor sea la diferencia entre el tamaño del fruto y

el tamaño del pico del ave, menor será la especialización. Por el contrario, cuanto menor sea esta diferencia, mayor será la especialización. Cuando no existe diferencia, es decir, cuando  $y_j = x_i$ , la coincidencia de los rasgos es perfecta y, por consiguiente, se considera la interacción como altamente especializada (Fründ *et al.*, 2016).

### Análisis de las redes

Se comparó la estructura de la red cuantitativa obtenida para el bosque restaurado y el de referencia. Esto se hizo utilizando métricas como el número medio de enlaces, la conectividad, el anidamiento, la diversidad de interacción, especialización y la asimetría de la red.

Primero, el número medio de enlaces representa el número medio de interacciones que establece una especie con otras y, en este sentido, permite reconocer las especies más conectadas o con mayor número de interacciones que se podrían considerar como especies claves en procesos de dispersión de semillas (Heleno *et al.*, 2012).

Segundo, la conectividad se refiere a la proporción de interacciones realizadas del total de posibles entre las especies de una red. En ese sentido, una mayor conectividad indicaría una mayor complejidad en las interacciones que, según algunos autores, sería una ventaja adaptativa que protege a las comunidades de las extinciones secundarias (Heleno *et al.*, 2012).

Tercero, el anidamiento es la tendencia de las especies especialistas de interactuar con especies generalistas (aquellas con mayor número de interacciones). Este se mide en una escala de 1 a 100 y brinda información acerca de la estabilidad y persistencia de la red (Nogales *et al.*, 2015).

Cuarto, la diversidad de interacción es análoga a la diversidad de especies. Esta indica que a mayor diversidad de interacción hay mayor diversidad de respuesta físicas, fisiológicas o comportamentales frente a cambios ambientales (Snyder *et al.*, 2006; Tylianakis *et al.*, 2010).

Quinto, la especialización es la tendencia de una especie a preferir ciertas especies. Esto permite

identificar especies que pueden llegar a ser más vulnerables frente a algún cambio en la red y se mide en un rango de 0 (sin especialización) a 1 (alta especialización) (Tylianakis *et al.*, 2010). La asimetría de interacción muestra la igualdad o no de interacción y la dependencia de unas especies frente a otras (Tylianakis *et al.*, 2010). Esta se midió en una escala de 0 (red simétrica) a 1 (red asimétrica).

Finalmente, para el análisis de las redes cualitativas se comparó el número medio de enlaces, el número medio de especies de la red y las variaciones mensuales para estos valores. Todos los análisis se hicieron con Past 3.21 y R 6.3.0 con los paquetes Bipartite y Network y la función Aov para el análisis de varianza simple (Dormann *et al.*, 2008; R Studio Team, 2015).

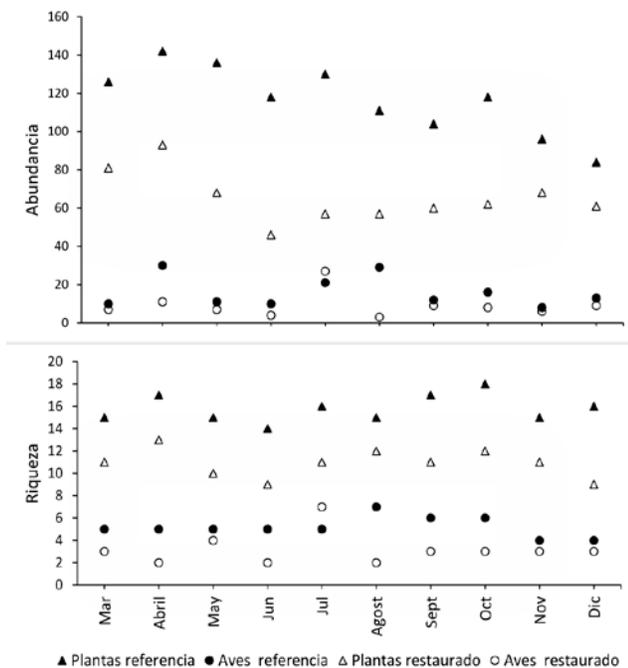
## RESULTADOS

Se registraron 14 especies de aves frugívoras y 22 de plantas ornitócoras en fruto durante en un periodo de 10 meses consecutivos. Se encontró que la abundancia, riqueza y diversidad tanto de plantas ornitócoras como de aves frugívoras fueron mayores en el bosque de referencia que en el bosque restaurado (tabla 1). La abundancia de plantas ornitócoras fue significativamente mayor en el bosque de referencia (Anova de medidas repetidas  $F=3.255$  y  $P=0.0032$ ), mientras que las diferencias en la riqueza no fueron significativas ( $F= 2.7$  y  $P= 0.13$ ). Para el caso de las aves la abundancia y la riqueza entre los dos bosques no presentaron diferencias significativas ( $F=1.503$  y  $P= 0.255$ ;  $F=2.7$  y  $P= 0.139$ , respectivamente) (tabla 1).

Se encontró una menor abundancia y riqueza en la oferta mensual de frutos en el bosque restaurado que en el bosque de referencia (figura 1). En los dos sitios el pico de fructificación se presentó en los meses de abril y octubre (Anova de medidas repetidas  $F= 9$  y  $P=3.22 \times 10^{-11}$ ). Por otro lado, la abundancia mensual de aves frugívoras no presentó diferencias (Anova  $F= 15.0$  y  $F= 0.255$ ). La menor abundancia de aves coincidió con la menor oferta de frutos en los dos bosques (figura 1).

**Tabla 1.** Abundancia, riqueza y diversidad de plantas ornitócoras en fruto y aves frugívoras entre marzo y diciembre de 2018

| Indicador          | Aves frugívoras   |                   | Plantas ornitócoras |                   |
|--------------------|-------------------|-------------------|---------------------|-------------------|
|                    | Bosque referencia | Bosque restaurado | Bosque referencia   | Bosque restaurado |
| Abundancia         | 152               | 93                | 162                 | 93                |
| Riqueza            | 13                | 10                | 18                  | 16                |
| Índice Shannon_H   | 2.03              | 1.75              | 2.50                | 2.22              |
| Índice Simpson_1-D | 0.83              | 0.78              | 0.89                | 0.84              |
| Equitatividad      | 0.79              | 0.76              | 0.86                | 0.80              |
| Índice de Jaccard  | 0.64              | 0.64              | 0.61                | 0.61              |

**Figura 1.** Abundancia y riqueza de aves frugívoras y plantas ornitócoras en fruto entre marzo y diciembre de 2018 en un bosque un bosque andino restaurado y el de referencia del parque ecológico La Poma, Cundinamarca.

## Redes mutualistas

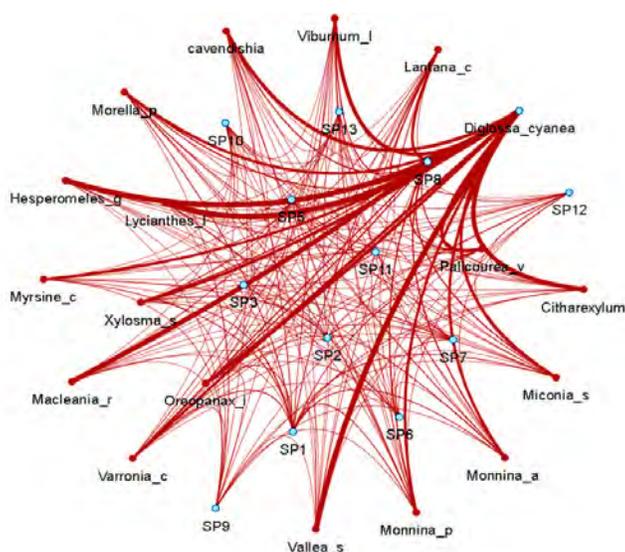
Al analizar las potenciales interacciones de dispersión en los bosques se encontró que la red cuantitativa del bosque de referencia presentó un mayor número de enlaces, un mayor anidamiento y asimetría; pero una conectividad similar al bosque restaurado (tabla 2). Tanto en el bosque restaurado como en

el de referencia la especie más conectada y con un mayor número de interacciones fue el ave *Diglossa cyanea* (figuras 2 y 3). En el bosque restaurado *Pipraeidea melanota* presentó un gran número de interacciones mientras que *D. cyanea* presentó mayor número de enlaces en el bosque de referencia (figuras 2 y 3).

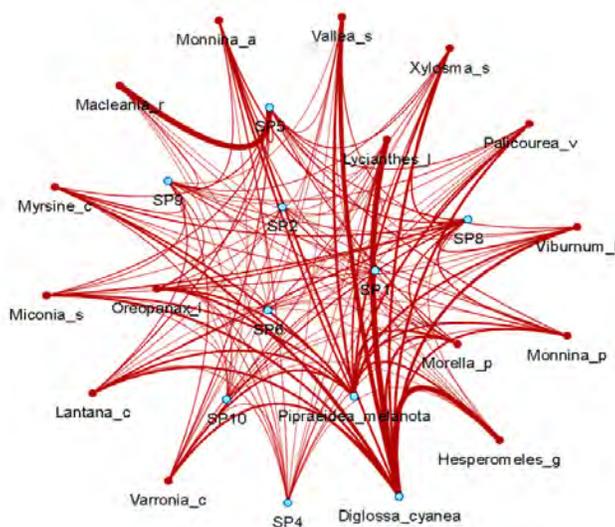
**Tabla 2.** Tipología de la red simulada de dispersión de semillas del bosque andino restaurado y el bosque de referencia

| Tipología de la red                 | Bosque de referencia | Bosque restaurado |
|-------------------------------------|----------------------|-------------------|
| Número de enlaces por especie       | 7.33                 | 5.88              |
| Conectividad                        | 0.99                 | 0.98              |
| Anidamiento                         | 13.0                 | 23.3              |
| Diversidad de interacción (Shannon) | 3.96                 | 4.18              |
| Especialización                     | 0.17                 | 0.14              |
| Asimetría                           | 0.13                 | 0.20              |

Adicionalmente, se encontró que en los dos bosques hay una baja tendencia de las especies especialistas a interactuar con especies generalistas (bajo anidamiento; tabla 2). No obstante, esta interacción es mayor en el bosque restaurado. De igual forma, la especialización fue muy baja en los dos sitios. Finalmente, las dos redes fueron simétricas, lo que implica que en los dos bosques la proporción de interacciones es similar entre las especies.



**Figura 2.** Frecuencia de interacción entre las plantas ornitócoras (círculo rojo) y las aves frugívoras (círculo azul claro) en la red del bosque de referencia, a partir de la abundancia (plantas y aves) y la coincidencia de rasgos (tamaño del fruto y la comisura de las aves); donde, a mayor grosor de la línea mayor frecuencia de interacción. Se muestra la especie *Diglossa cyanea* como la especie con mayor frecuencia de interacción con las plantas ornitócoras. Las demás especies de aves se representan con las abreviaturas: SP1 (*Anisognathus igniventris*), SP2 (*Atlapetes pallidinucha*), SP4 (*Chlorornis riefferii*), SP5 (*Icterus chrysater*), SP6 (*Mimus gilvus*), SP7 (*Pheucticus aureoventris*), SP8 (*Patagioenas fasciata*), SP9 (*Tyrannus tyrannus*), SP10 (*Penelope montagnii*), SP11 (*Thraupis cyanocephala*), SP12 (*Turdus fuscater*) y SP13 (*Thraupis palmarum*).



**Figura 3.** Frecuencia de interacción entre plantas ornitócoras (círculo rojo) y aves frugívoras (círculo azul claro) en la red del bosque restaurado a partir de la abundancia (plantas y aves) y la coincidencia de rasgos (tamaño del fruto y la comisura de las aves); donde, a mayor grosor de la línea mayor frecuencia de interacción. Se muestra la especie *Diglossa cyanea* (Sp3) y sp 7 (*Pipraeidea melanota*). Las demás especies de aves se representan con las abreviaturas: SP1 (*Anisognathus igniventris*), SP2 (*Atlapetes pallidinucha*), SP4 (*Icterus chrysater*), SP5 (*Patagioenas fasciata*), SP6 (*Pheucticus aureoventris*), SP8 (*Thraupis cyanocephala*), SP9 (*Thraupis palmarum*) y SP10 (*Turdus fuscater*).

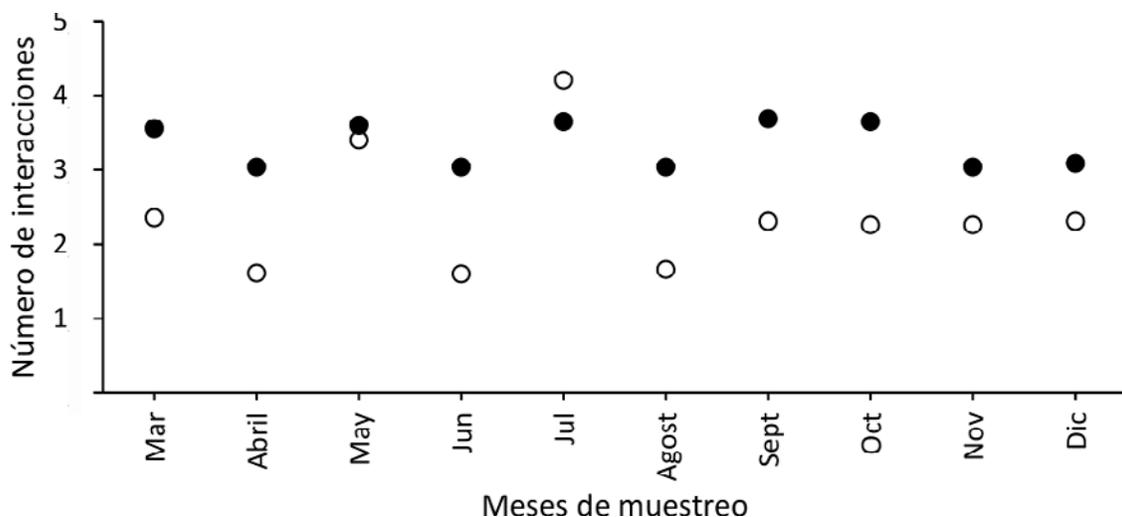
Con respecto al número de interacciones por especie, entre un mes y otro variaron de forma; siendo mucho más marcada en el bosque restaurado que en el bosque de referencia (figura 4). Así, se registraron cambios de 1.6 enlaces por especie a 4.21 enlaces de un mes a otro en el bosque restaurado; mientras que en el bosque de referencia la diferencia entre un mes y otro no fue superior a 0.5 enlaces por especie. Esto indica una mayor estabilidad temporal de las interacciones en el bosque de referencia.

## DISCUSIÓN

Las redes de interacción mutualista proveen información valiosa sobre los procesos ecológicos y las posibles funciones de las especies en los bosques (Bender *et al.*, 2018). En este caso particular, el análisis de la red permitió evaluar el nivel de avance de la restauración en términos del restablecimiento de las potenciales relaciones de dispersión de semillas, lo cual no hubiera sido posible de evaluar únicamente la composición y la riqueza de algún grupo indicador (Ramírez, 2019). Así, los

resultados presentados muestran que después de 22 años de un proceso de restauración de un potrero a un bosque andino seco, a diferencia de los datos de diversidad en donde hay diferencias significativas entre sitios, la red mutualista potencial de dispersión de semillas sí es diferente en ciertos aspectos entre el bosque restaurado y el bosque de referencia.

En primer lugar, el menor número de enlaces por especie en el bosque restaurado en relación al bosque de referencia refleja que, en 22 años, la recuperación de los procesos e interacciones a partir de actividades de restauración es lenta (Alarcón *et al.*, 2008), a pesar de que la conectividad en los dos bosques presentó valores similares (tabla 2). Esto coincide con los resultados encontrados en un bosque de la Mata Atlántica brasilera restaurado hace 15 años, en el cual las interacciones de dispersión de semillas por aves fueron menores en comparación con bosques cuyo tiempo desde la restauración es mayor (Ribeiro da Silva *et al.*, 2015). Posiblemente, el menor número de enlaces por especie en el bosque restaurado se debe a que la abundancia tanto de plantas como de aves fue menor que la encontrada en el bosque de referencia;



**Figura 4.** Número de interacciones mensuales de la red del bosque andino restaurado (círculo blanco) y de referencia (círculo negro), en el parque ecológico La Poma, Cundinamarca, donde se muestra en número de interacciones entre plantas ornitócoras y aves frugívoras en cada lugar.

lo que implica que los procesos de dispersión son igualmente menores. Tal parece que una mayor cantidad de especies e individuos generan una mayor oportunidad de encontrar parejas de interacción (Alarcón *et al.*, 2008; Olesen *et al.*, 2008; Stang *et al.*, 2007; Vázquez y Aizen, 2004). Estudios realizados con polinizadores e insectos en los que se ha encontrado una mayor cantidad de interacciones en hábitats con mayor riqueza de especies y abundancia de individuos soportan dicha situación (Alarcón *et al.*, 2008; Banašek-Richter *et al.*, 2004; Tylianakis *et al.*, 2007). Así pues, la mayor abundancia y riqueza de plantas ornitócoras encontradas el bosque de referencia sugiere que hay una mayor oferta de frutos para las aves frugívoras y, por ende, un mayor número de enlaces en la red.

Lo anterior también coincide con las variaciones en el número de enlaces a lo largo del tiempo en el bosque restaurado, las cuales parecen indicar que la red es más inestable. Posiblemente, esto se debe a la estacionalidad en la oferta de frutos, pues en julio, por ejemplo, la principal fuente de frutos en el bosque restaurado es la uva camaronera (*Macleania rupestris*) y del sauco de monte (*Viburnum lasiophyllum*); mientras que, en el bosque de referencia, hay una mayor diversidad en la oferta en los mismos meses como la uva de anís (*Cavendishia bracteata*), el raque (*Vallea stipularis*), palicourea (*Palicourea vaginata*), el sauco de monte (*Viburnum lasiophyllum*) y el cucharo (*Myrsine coriacea*). Así, ante la menor oferta de frutos en el bosque restaurado las aves tienden a optar por recursos alternativos o cambiar entre hábitats (Carnicer *et al.*, 2009), lo que podría incidir en un menor número de interacciones en el bosque restaurado.

En segundo lugar, la red del bosque restaurado presenta un menor anidamiento y asimetría de las interacciones en comparación con el bosque de referencia (tabla 2), lo que indica que las interacciones entre plantas ornitócoras y aves frugívoras tienden a ser homogéneas. Esto se debe, posiblemente, a la menor riqueza de plantas ornitócoras,

así como a una menor abundancia en este bosque (tabla 1). Por ende, las interacciones tienden a ser las mismas entre las especies, ya que la diversidad de plantas no es alta. Estudios como los de Bascompte *et al.* (2003; 2009) resaltan la importancia de una alta asimetría de la red, pues estas ayudan al mantenimiento de la biodiversidad y a que haya una baja dependencia de las interacciones entre las especies. En este sentido, una baja riqueza y abundancia de plantas y aves en este estudio coincide con una baja asimetría de las interacciones en el bosque restaurado.

Además, varios estudios de redes mutualistas muestran que un bajo anidamiento y asimetría de la red son indicadores de que estas interacciones tienden a ser más susceptibles frente a perturbaciones y cambios ambientales (Bascompte *et al.*, 2009; Vazquez *et al.*, 2009; Tylianakis 2010). Por lo tanto, las interacciones de la red del bosque restaurado pueden ser más inestable que las del bosque de referencia, ya que, frente a la pérdida de una especie de planta o ave, podrían afectar a las demás especies que interactúan en la red.

Al contrastar nuestros resultados con otras redes en zonas andinas se encuentra que tanto el bosque restaurado como el bosque de referencia aquí estudiado tienen un bajo anidamiento (pocas interacciones de especies especialistas con las especies más conectadas), una alta simetría (interacciones similares entre especies) y una baja especialización en relación a dichos estudios. Por ejemplo, Palacio *et al.* (2016) encontraron que en un bosque andino conservado del Valle del Cauca la red de dispersión fue muy anidada, asimétrica y modular. De igual forma, en bosques conservados en diferentes partes del mundo se han encontrado patrones similares (Bascompte, 2009; Bascompte *et al.*, 2003; González-Castro *et al.*, 2015; Nogales *et al.*, 2015). En este sentido, los valores bajos de anidamiento y especialización tanto en el bosque restaurado como el de referencia, así como una alta simetría de las redes, podrían indicar que estos bosques se encuentran en un estado temprano/

intermedio de sucesión. En este sentido, tal parece que el bosque de referencia a pesar de llevar más de 70 años sin intervención (Salazar, 2003) no es un bosque bien conservado, sino que aún necesita muchos años para su recuperación. Esto coincide con Groenendijk (2005), quien sostiene que la recuperación de los bosques andinos secos es muy difícil, incluso bajo procesos de restauración asistida. Adicionalmente, este bajo anidamiento y baja asimetría pueden ser producto de la ausencia de ciertas especies clave tanto de plantas como de animales que estimularían la ocurrencia de ciertas interacciones.

A pesar de esta posible ausencia de especies claves tanto de plantas como de aves, se encontraron algunas especies altamente conectadas que desempeñarían un papel importante en procesos de dispersión. Tal es el caso del ave *Diglossa cyanea*, la cual presentó una alta frecuencia de interacción con varias especies de plantas ornitócoras (figuras 3 y 4) debido a una mayor coincidencia de rasgos morfológicos del tamaño del fruto y el pico. En el caso de las plantas, la uva camarona (*Macleania ruperstris*), el raque (*Vallea stipularis*) y la uva de anís (*Cavendishia bracteata*) también se podrían considerar especies clave, ya que estuvieron altamente conectadas y fueron parte importante de la oferta de frutos durante los meses de muestreo. Estas plantas presentan bayas rojas y carnosas, lo que las haría altamente atractivas para aves dispersoras. Por otro lado, es de resaltar que las aves generalistas *Patagioenas fasciata* y *Turdus fuscater* fueron más importantes en el bosque de referencia que en el restaurado. Estudios como los de Cusser y Goode-ll (2013) y González et al. (2010) sugieren que las especies generalistas son valiosas ya que mantienen la conectividad y estabilidad de la red, pues en últimas terminan transportando semillas de una gran cantidad de especies ornitócoras.

Por último, a pesar de que probablemente evaluación de la trayectoria de la restauración a través de redes subestima algunas interacciones reales (debido a que no se registró la frecuencia

del consumo de los frutos por parte de las aves), creemos que es una importante aproximación al monitoreo de la recuperación (o no) de las interacciones después de un proceso de restauración. Esto se debe a que al evaluar la diversidad tanto de plantas como de aves en los dos bosques no se encontraron diferencias significativas (tabla 1), lo que indicaría que la trayectoria de la restauración es positiva. Sin embargo, al evaluar mediante la red mutualista sí se encontraron diferencias importantes entre bosques y, además, da luces sobre cuáles especies pueden ser consideradas como claves y ser manejadas para acelerar, aún más, los procesos de restauración.

En ese sentido, procesos de enriquecimiento del bosque restaurado con especies vegetales como *Cavendishia bracteata*, *Miconia squamulosa* y *Palicourea vaginata*, así como el incremento de las abundancias de *Vallea stipularis*, *Myrsine coriacea* y *Hesperomeles goudotiana*, podrían mejorar las interacciones no solo con las aves, sino también con mamíferos. Ello repercutiría en una mayor dispersión y lluvia de semillas y, por ende, en la aceleración de la restauración. También se podría considerar enriquecer el bosque con plantas con variados tipos y tamaños de frutos, cuyas fenologías sean diferentes para así lograr, por un lado, atraer una mayor diversidad y variedad de dispersores y, por el otro, lograr una mayor variabilidad de oferta de frutos durante el año y así, enriquecer de esta manera el banco de semillas en el suelo.

## CONCLUSIONES

El análisis de redes presentado en este artículo muestra información adicional que no hubiera sido posible obtener al evaluar la composición de especies indicadoras como las aves. Las interacciones entre plantas ornitócoras y aves frugívoras potenciales nos permitieron valorar que, aunque la trayectoria de la restauración tiende a semejarse al bosque de referencia, aún le falta camino por

recorrer en el restablecimiento de las interacciones. En el mismo sentido, fue posible identificar especies claves tanto de plantas como de aves que desempeñan funciones importantes en los procesos de dispersión de semillas y aquellas que pueden ser utilizadas en la aceleración de la restauración. Por ejemplo, se identificaron especies como el ave *Diglossa cyanea*, la cual presentó una gran conectividad con otras especies de plantas, lo que sugiere un papel importante en la dispersión de semillas de los bosques andinos.

Finalmente, teniendo en cuenta que el bosque de referencia presentó un bajo anidamiento a pesar de llevar más de 70 años bajo protección, se sugiere trabajar en el enriquecimiento de este bosque y la recuperación de su integridad. Para este fin, futuros estudios deberían comparar el estado de las redes de interacción de este bosque en relación con un bosque más conservado para guiar dichos procesos de enriquecimiento. De igual forma, sería interesante contrastar la red simulada a partir de rasgos morfológicos con una red que incluya la frecuencia del consumo real de las aves frugívoras para conocer el nivel de error y subestimación que conlleva la construcción de redes a partir de rasgos. Por último, se recomienda realizar monitoreo y seguimiento a otros aspectos funcionales asociados a redes mutualistas como la polinización y la herbivoría entre los dos lugares evaluados.

## AGRADECIMIENTOS

Las autoras agradecen a la Corporación Ambiental Empresarial, administradores del parque ecológico La Poma por el apoyo al trabajo de campo. De igual forma, agradecemos a Rocío Cortés, Oscar Laverde y a Marcia Muñoz por sus valiosos comentarios a versiones previas a este manuscrito.

## CONFLICTO DE INTERESES

Las autoras declaran no tener conflicto de intereses.

## CONTRIBUCIÓN POR AUTOR

Ambas autoras idearon la investigación. A.R. realizó la toma de datos y el análisis de las redes. A.R. y A.P.R. redactaron el manuscrito. A.R. y A.P.R. contribuyeron a la discusión y comentaron los borradores previos.

## REFERENCIAS

- ABO, A. B., Stiles, F. G., Bohórquez, C. I. y Cadena, C. D.** (2000). *Aves de la sabana de Bogotá: Guía de campo*. Bogotá: ABO, CAR.
- Alanís-Rodríguez, E., Jiménez-Pérez, J., Espinoza-Vizcarra, D., Jurado-Ybarra, E., Aguirre-Calderón, O. A. y González-Tagle, M. A.** (2008). Evaluación del estrato arbóreo en un área restaurada post-incendio en el parque ecológico Chipinque, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 14(2), 113-118. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.05.032>
- Alarcón, R., Waser, N. M. y Ollerton, J.** (2008). Year-to-year variation in the topology of a plant-pollinator interaction network. *Oikos*, 117(12), 1796-1807. <https://doi.org/10.1111/j.0030-1299.2008.16987.x>
- Arbeláez, M. V. y Parrado-Rosselli, A.** (2005). Seed dispersal modes of the sandstone plateau vegetation of the middle Caquetá river region, Colombian Amazonia. *Biotropica*, 37(1), 64-72. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2005.03077.x>
- Banašek-Richter, C., Cattin, M. F. y Bersier, L. F.** (2004). Sampling effects and the robustness of quantitative and qualitative food-web descriptors. *Journal of Theoretical Biology*, 226(1), 23-32. [https://doi.org/10.1016/s0022-5193\(03\)00305-9](https://doi.org/10.1016/s0022-5193(03)00305-9)
- Bascompte, J.** (2009). Mutualistic networks. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 7(8), 429-436. <https://doi.org/10.1890/080026>
- Bascompte, J., Jordano, P., Melián, C. J. y Olesen, J. M.** (2003). The nested assembly of plant-animal mutualistic networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100(16), 9383-9387. <https://doi.org/10.1073/pnas.1633576100>

- Bender, I. M., Kissling, W. D., Blendinger, P. G., Böhning-Gaese, K., Hensen, I., Kühn, I., Qui-tián, M.** (2018). Morphological trait matching shapes plant–frugivore networks across the Andes. *Ecography*, 41(11), 1910-1919. <https://doi.org/10.1111/ecog.03396>
- Burgos, J., Villota, A. y Fernández, S. J. T.** (2003). Aplicación de la metodología de complejos simpliciales en las interacciones biológicas de Frugivoría y dispersión de semillas en grupo de aves de la Reserva Biológica de Carpanta. *Colombia Forestal*, 8(16), 32-47. <https://doi.org/10.24201/eg.v5i0.358>
- Carnicer, J., Jordano, P. y Melián, C. J.** (2009). The temporal dynamics of resource use by frugivorous birds: A network approach. *Ecology*, 90(7), 1958-1970. <https://doi.org/10.1890/07-1939.1>
- Chazdon, R. L., Broadbent, E. N., Rozendaal, D. M., Bongers, F., Zambrano, A. M. A., Aide, T. M., Balvanera, P., Becknell, J. M., Boukili, V., Brancalion, P., Craven, D., Almeida-Cortez, J., Cabral, G., de Jong, B., Denslow, J., Dent, D., DeWalt, S., Dupuy, J., Durán, S., Espirito-Santo, M., Fandino, M., César, R., Hall J., Hernández-Stefanoni, J., Jakovac, C. [...] y Poorter, L.** (2016). Carbon sequestration potential of second-growth forest regeneration in the Latin American tropics. *Science Advances*, 2(5), e1501639. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501639>
- Clout, M. N. y Hay, J. R.** (1989). The importance of birds as browsers, pollinators and seed dispersers in New Zealand forests. *New Zealand Journal of Ecology*, 12(supplement), 27-33. <https://www.jstor.org/stable/24053245>
- Cusser, S. y Goodell, K.** (2013). Diversity and distribution of floral resources influence the restoration of plant-pollinator networks on a reclaimed strip mine. *Restoration Ecology*, 21(6), 713-721. <https://doi.org/10.1111/rec.12003>
- Dehling, D. M., Jordano, P., Schaefer, H. M., Böhning-Gaese, K. y Schleuning, M.** (2016). Morphology predicts species' functional roles and their degree of specialization in plant–frugivore interactions. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 283, 20152444. <https://doi.org/10.1098/rspb.2015.2444>
- Donoso, I., Schleuning, M., García, D. y Fründ, J.** (2017). Defaunation effects on plant recruitment depend on size matching and size trade-offs in seed-dispersal networks. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 284(1855), 20162664. <https://doi.org/10.1098/rspb.2016.2664>
- Dormann, C. F., Gruber, B. y Freund, J.** (2008). Introducing the bipartite Package: Analysing Ecological Networks. *R News*, 8(2), 8-11.
- Durigan, G., Domínguez-Haydar, Y., Brancalion, P., Aronson, J., Pizano, C. y Aguilar-Garavito, M.** (2015). *Monitoreo a procesos de restauración ecológica aplicado a ecosistemas terrestres*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Fontaine, C., Dajoz, I., Meriguet, J. y Loreau, M.** (2005). Functional diversity of plant–pollinator interaction webs enhances the persistence of plant communities. *PLoS Biol*, 4(1), e1. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0040001>
- Forup, M. L., Henson, K. S., Craze, P. G. y Memmott, J.** (2008). The restoration of ecological interactions: Plant–pollinator networks on ancient and restored heathlands. *Journal of Applied Ecology*, 45(3), 742-752. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2007.01390.x>
- Fournier, L.** (1974). Un método cuantitativo para la medición de características fenológicas en árboles. *Turrialba*, 24(4), 422-423.
- Fründ, J., McCann, K. S. y Williams, N. M.** (2016). Sampling bias is a challenge for quantifying specialization and network structure: Lessons from a quantitative niche model. *Oikos*, 125(4), 502-513. <https://doi.org/10.1111/oik.02256>
- García, D.** (2016). Birds in ecological networks: Insights from bird-plant mutualistic interactions. *Ardeola*, 63(1), 151-180. <https://doi.org/10.13157/arla.63.1.2016.rp7>
- Glimn-Lacy, J. y Kaufman, P. B.** (2006). Botany illustrated: Introduction to plants, major groups, flowering plant families. *Springer Science & Business Media*. <https://doi.org/10.2307/4448160>

- González, A. M. M., Dalsgaard, B. y Olesen, J. M.** (2010). Centrality measures and the importance of generalist species in pollination networks. *Ecological Complexity*, 7(1), 36-43. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2009.03.008>
- González-Castro, A., Yang, S., Nogales, M. y Carlo, T. A.** (2015). Relative importance of phenotypic trait matching and species' abundances in determining plant–avian seed dispersal interactions in a small insular community. *AoB Plants*, 7, plv017. <https://doi.org/10.1093/aobpla/plv017>
- Gonzalez, O. y Loiselle, B. A.** (2016). Species interactions in an Andean bird–flowering plant network: phenology is more important than abundance or morphology. *PeerJ*, 4:e2789 <https://doi.org/10.7717/peerj.2789>
- Groenendijk, J. P.** (2005). *Towards recovery of native dry forest in the Colombian Andes: A plantation experiment for ecological restoration*. Universiteit van Amsterdam, IBED. <https://hdl.handle.net/11245/1.241741>
- Heleno, R., Devoto, M. y Pocock, M.** (2012). Connectance of species interaction networks and conservation value: Is it any good to be well connected? *Ecological Indicators*, 14(1), 7-10. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.06.032>
- Hilty, S. L., Brown, W. L. y Brown, B.** (1986). *A guide to the birds of Colombia*. University Press.
- Holdridge, L.** (1987). *Ecología basada en las zonas de vida*. Colección libros y materiales educativos; n.º 83.21 6 P. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.
- Howe, H. F. y Smallwood, J.** (1982). Ecology of seed dispersal. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 13(1), 201-228. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.13.110182.001221>
- Kaiser-Bunbury, C. N., Traveset, A. y Hansen, D. M.** (2010). Conservation and restoration of plant–animal mutualisms on oceanic islands. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 12(2), 131-143. <https://doi.org/10.1016/j.ppees.2009.10.002>
- Kelly, D., Ladley, J. J., Robertson, A. W., Anderson, S. H., Wotton, D. M. y Wiser, S. K.** (2010). Mutualisms with the wreckage of an avifauna: The status of bird pollination and fruit-dispersal in New Zealand. *New Zealand Journal of Ecology*, 34(1), 66. <https://newzealandecology.org/nzje/2918>
- Levey, D. J., Bolker, B. M., Tewksbury, J. J., Sargent, S. y Haddad, N. M.** (2005). Effects of landscape corridors on seed dispersal by birds. *Science*, 309(5731), 146-148. <https://doi.org/10.1126/science.1111479>
- Link, A. y Stevenson, P.R.** (2004). Fruit dispersal syndromes in animal disseminated plants at Tinigua National Park, Colombia. *Revista Chilena de Historia Natural*, 77(2), 319-334. <https://doi.org/10.4067/s0716-078x2004000200010>
- Murcia, C. y Guariguata, M. R.** (2014). *La restauración ecológica en Colombia: tendencias, necesidades y oportunidades*. Center for International Forestry Research.
- Nogales, M., Heleno, R., Rumeu, B., González-Castro, A., Traveset, A., Vargas, P. y Olesen, J. M.** (2015). Seed-dispersal networks on the Canaries and the Galápagos archipelagos: interaction modules as biogeographical entities. *Global Ecology and Biogeography*. <https://doi.org/10.1111/geb.12315>
- Olesen, J. M., Bascompte, J., Elberling, H. y Jordano, P.** (2008). Temporal dynamics in a pollination network. *Ecology*, 89(6), 1573-1582. <https://doi.org/10.1890/07-0451.1>
- Palacio, R. D., Valderrama-Ardila, C. y Kattan, G. H.** (2016). Generalist species have a central role in a highly diverse plant–frugivore network. *Biotropica*, 48(3), 349-355. <https://doi.org/10.1111/btp.12290>
- Ralph, C. J., Geupel, G. R., Pyle, P., Martin, T. E., DeSante, D. F. y Milá, B.** (1996). *Manual de métodos de campo para el monitoreo de aves terrestres*. <https://doi.org/10.2737/psw-gtr-159>
- Ramírez, A.** (2019). *Evaluación de la trayectoria de la restauración a través de las aves: Análisis de la recuperación de la composición y las interacciones en un bosque andino* (tesis de maestría). Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Ribeiro da Silva, F., Montoya, D., Furtado, R., Memmott, J., Pizo, M. A. y Rodrigues, R. R.** (2015).

- The restoration of tropical seed dispersal networks. *Restoration Ecology*, 23(6), 852-860. <https://doi.org/10.1111/rec.12244>
- Riveros, D.** (2005). *Aporte al conocimiento de la biodiversidad florística y faunística, manejo tecnológico de germoplasma y regeneración natural de especies nativas en el parque ecológico La Poma* (trabajo de grado, Ingeniería Forestal). Universidad del Tolima, Bogotá, Colombia.
- R Studio Team** (2015) RStudio: Integrated Development for R. RStudio, Inc. (Computer Software v0.98.1074). <http://www.rstudio.com/>
- Salazar, L.** (2003). *Aproximación a la diversidad florística y análisis sucesional de las coberturas vegetales para el periodo de 1943 a 2002 en el parque ecológico La poma*. (trabajo de grado, Ingeniería Forestal). Universidad del Tolima, Bogotá, Colombia.
- Santamaría, L. y Rodríguez-Gironés, M. A.** (2007). Linkage rules for plant-pollinator networks: Trait complementarity or exploitation barriers? *PLoS Biology*, 5(2), e31. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0050031>
- Snyder, W. E., Snyder, G. B., Finke, D. L. y Straub, C. S.** (2006). Predator biodiversity strengthens herbivore suppression. *Ecology Letters*, 9(7), 789-796. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2006.00922.x>
- Stang, M., Klinkhamer, P. G. y Van der Meijden, E.** (2007). Asymmetric specialization and extinction risk in plant-flower visitor webs: A matter of morphology or abundance? *Oecologia*, 151(3), 442-453. <https://doi.org/10.1007/s00442-006-0585-y>
- Tylianakis, J. M., Laliberté, E., Nielsen, A. y Bascompte, J.** (2010). Conservation of species interaction networks. *Biological Conservation*, 143(10), 2270-2279. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2009.12.004>
- Tylianakis, J. M., Tschardtke, T. y Lewis, O. T.** (2007). Habitat modification alters the structure of tropical host-parasitoid food webs. *Nature*, 445(7124), 202. <https://doi.org/10.1038/nature05429>
- Vázquez, D. P. y Aizen, M. A.** (2004). Asymmetric specialization: A pervasive feature of plant-pollinator interactions. *Ecology*, 85(5), 1251-1257. <https://doi.org/10.1890/08-1837.1>
- Vázquez, D. P., Chacoff, N. P. y Cagnolo, L.** (2009). Evaluating multiple determinants of the structure of plant-animal mutualistic networks. *Ecology*, 90(8), 2039-2046. <https://doi.org/10.1111/j.2007.0030-1299.15828.x>
- Vázquez, D. P., Melián, C. J., Williams, N. M., Blüthgen, N., Krasnov, B. R. y Poulin, R.** (2007). Species abundance and asymmetric interaction strength in ecological networks. *Oikos*, 116(7), 1120-1127. <https://doi.org/10.1111/j.2007.0030-1299.15828.x>
- Williams, N. M.** (2011). Restoration of nontarget species: Bee communities and pollination function in riparian forests. *Restoration Ecology*, 19(4), 450-459. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100x.2010.00707.x>
- Wunderle, J. M.** (1997). The role of animal seed dispersal in accelerating native forest regeneration on degraded tropical lands. *Forest Ecology and Management*, 99(1), 223-235. [https://doi.org/10.1016/s0378-1127\(97\)00208-9](https://doi.org/10.1016/s0378-1127(97)00208-9)
- Yockteng, R. y Cavalier, J.** (1998). Diversidad y mecanismos de dispersión de árboles de la Isla Gorgona y de los bosques húmedos tropicales del Pacífico colombiano-ecuadoriano. *Revista de Biología Tropical*, 45-53. <https://doi.org/10.15517/rbt.v67i6.37517>





UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS



## Análisis participativo de servicios ecosistémicos en un área protegida del bosque seco tropical (bs-T), Colombia

Participatory analysis of ecosystem services in a protected area of the tropical dry forest (TDF), Colombia

Luis Mario Cárdenas-Camacho<sup>1\*</sup>, Sebastián Díaz<sup>1</sup>, Wilson Gómez-Anaya<sup>1</sup>, John Eduard Rojas-Rojas<sup>2</sup>, René López-Camacho<sup>1</sup>

Cárdenas-Camacho, L. M., Díaz, S., Gómez-Anaya, W., Rojas-Rojas J. E. y López-Camacho, R. (2021). Análisis participativo de servicios ecosistémicos en un área protegida del bosque seco tropical (bs-T), Colombia. *Colombia Forestal*, 24(1), 123-156.

**Recepción:** 18 de junio 2020

**Aprobación:** 21 de septiembre 2020

### Resumen

El estado de degradación que enfrentan los ecosistemas de bosque seco tropical (bs-T) en diferentes escalas geográficas es razón para priorizar su conservación. En este estudio se hizo un análisis participativo y multicriterio de servicios ecosistémicos (SE) asociados a coberturas presentes en la zona de vida de bs-T en un área protegida. Los SE fueron espacializados a una escala local para proyectar pautas de manejo, los cuales se priorizaron y caracterizaron mediante entrevistas a actores clave. Para la aproximación al funcionamiento del ecosistema se establecieron indicadores de procesos y estructura ecosistémica basados en información de suelos, vegetación, fauna e impulsores de cambio. Se encontró que los SE de mayor importancia son la producción agropecuaria y el suministro de agua potable. El funcionamiento del ecosistema resultó bajo y muy bajo en sistemas agrícolas; bajo y medio en sistemas pecuarios; y alto y muy alto en sistemas naturales. Se

recomienda poner en funcionamiento estrategias de conservación sostenibles y participativas.

**Palabras clave:** análisis participativo, multi-criterio, planeación del paisaje, manejo forestal sostenible.

### Abstract

The state of degradation faced by tropical dry forest ecosystems, in different geographical scales, prioritizes their conservation. In this study, a participatory and multicriteria analysis of ecosystem services -ES- associated with current coverages in the tropical dry forest life zone in a protected area, was realized. The ES were spatialized on a local scale, to project management guidelines, and were prioritized and characterized through interviews with key stakeholders. For the approach to the ecosystem functioning, indicators of processes and ecosystem structure were established based on information of soils, flora, fauna and drivers of change. It was found that the most important ES are agricultural production and

1 Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Bogotá, Colombia.

2 Corporación Autónoma regional de Cundinamarca, Dirección de Recursos Naturales. Bogotá, Colombia.

\* [lmariocc@gmail.com](mailto:lmariocc@gmail.com). Autor de correspondencia.

drinking water supply. The ecosystem functioning was low and very low in agricultural systems, low and medium in livestock systems, and high and very high in natural systems. It is recommended to

implement sustainable and participatory conservation strategies.

**Keywords:** participatory analysis, multi-criteria, landscape planning, sustainable forest management.

## INTRODUCCIÓN

El bosque seco tropical (bs-T) es uno de los ecosistemas más amenazados en el mundo. Cerca del 48.5 % de su área ha sido transformada (Hoekstra *et al.*, 2004) y se considera como prioridad para la conservación, restauración y manejo (Trejo y Dirzo, 2000). Así mismo, estos bosques proveen una variedad de servicios ecosistémicos (SE), principalmente de suministro de alimento y productos forestales no maderables (Balvanera *et al.*, 2011); e importantes servicios de regulación asociados al secuestro de carbono, control de erosión, mantenimiento de la fertilidad del suelo, calidad de agua y bellezas escénicas (Maass *et al.*, 2005). A pesar de esto, se estima que entre el 10 % y el 20 % del bs-T está en proceso de degradación y cerca del 30 % enfrenta amenazas ante escenarios de cambio climático, cambio de uso de suelo y crecimiento poblacional que afectan su funcionamiento, reducen la resiliencia del ecosistema y vulneran a las comunidades humanas que allí habitan, al comprometer su seguridad alimenticia (Yirdaw *et al.*, 2017).

En Colombia se identifican seis regiones de bs-T (8 % del ecosistema original), siendo el valle del Magdalena una de las que presenta mayores amenazas (González-M. *et al.* 2018). Específicamente, para el bs-T del departamento de Cundinamarca, García-Márquez *et al.* (2016) indican la urgencia por concretar esfuerzos de conservación en este ecosistema. En suma, es evidente la presencia de vacíos de conocimiento sobre la cuantificación y tendencias de SE, en particular para los asociados con el agua y el suelo (Calvo-Rodríguez *et al.*, 2016).

En este contexto, la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) definió el Distrito regional de manejo integrado (DMI) Bosque Seco de la Vertiente Oriental del Río Magdalena, mediante el Acuerdo 20 del 17 de julio de 2018 (CAR, 2018). Esto con el fin de crear una figura de área protegida que contribuya a la conservación de la biodiversidad y los SE, así como mantener la capacidad productiva del ecosistema y las condiciones ecológicas (art. 3). Del mismo modo, se resalta la construcción participativa con los actores del área para el mantenimiento de los objetos de conservación (art. 4).

A apoyado en la iniciativa mencionada, el presente estudio tuvo como objeto hacer una aproximación local al análisis participativo de los SE asociados a las diferentes coberturas presentes en el área del DRMI, cuya clasificación climática corresponde a la zona de vida bs-T, acorde a la clasificación de Holdridge (1967). Esto con el fin de brindar a las autoridades ambientales y territoriales una descripción práctica del actual funcionamiento de este ecosistema estratégico para así generar pautas para la toma de decisiones sobre el manejo de esta área.

## MATERIALES Y MÉTODOS

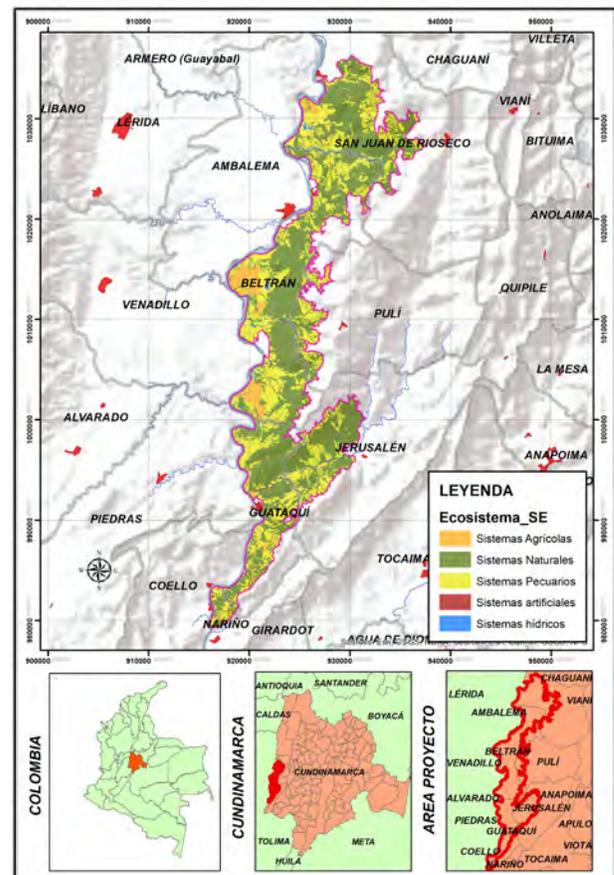
### Área de estudio

El área de estudio corresponde el DRMI bosque seco de la vertiente oriental del río Magdalena, definido por la CAR (2018) en las provincias centro y alto Magdalena; teniendo en cuenta que estas presentan el menor estado de fragmentación y la

mayor extensión de cobertura boscosa. Este espacio comprende la franja de bs-T de la vertiente media oriental del río Magdalena en el departamento de Cundinamarca, incluyendo los municipios de Nariño, Guataquí, Jerusalén, Beltrán, Pulí y San Juan de Rioseco (figura 1). Así mismo, posee una extensión de 36 126.93 ha y su objetivo de manejo es garantizar la oferta de bienes y servicios ambientales esenciales para el bienestar humano correspondientes a fauna, flora, paisajes y recurso hídrico que ofrece este ecosistema.

La actividad socioeconómica del área se encuentra ampliamente relacionada con los SE de aprovisionamiento. Esto se debe a que el principal sector económico de la provincia del Magdalena centro, que coincide geográficamente con parte de los municipios asociados al DRMI (San Juan de Río seco, Beltrán y Pulí), es el de agricultura, ganadería, caza, silvicultura y pesca, con un aporte del 34.4 % al PIB provincial (Gobernación de Cundinamarca, 2020). Además, la mayoría de la población rural de las subcuencas de la vertiente oriental del río Magdalena (Nariño, San Juan de Río seco y Beltrán) es de origen campesino y se dedica a la producción agrícola en minifundios o en alquiler (CAR, 2006).

Teniendo en cuenta la variedad de los sistemas naturales y agropecuarios, el área de estudio se dividió en tres grandes tipos de ecosistemas, de acuerdo con lo establecido en el mapa de ecosistemas de Colombia (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales y Ministerio a Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017) y se definieron las siguientes unidades de análisis: I) ecosistemas naturales, ocupan un 59 % del área total y agrupa las coberturas boscosas (10.23 %) y arbustivas densas y abiertas (48.92 %); II) agroecosistemas agrícolas, ocupan el 5 % del área total y agrupa las coberturas de cultivos permanentes, anuales, transitorios, arbóreos, arbustivos y herbáceos y los mosaicos de cultivos; y III) agroecosistemas pecuarios, con una extensión del 33 % del área total, que agrupa los pastos limpios, enmalezados y arbolados.



**Figura 1.** Área de estudio de bs-T del departamento de Cundinamarca.

## METODOLOGÍA

Se siguió la metodología expuesta por [Bubb et al. \(2017\)](#) para la evaluación de los SE, que presenta un marco para el fortalecimiento de la planificación a diferentes escalas de gestión; a través de la inclusión de los SE y su relación con el funcionamiento del ecosistema. Este esquema prevé seis pasos, descritos a continuación:

### Paso 1: definición del contexto del área de estudio y el grupo de beneficiarios de los SE asociados al bs-T

A partir de recorridos de campo se verificó y validó la información cartográfica a escala 1:25 000.

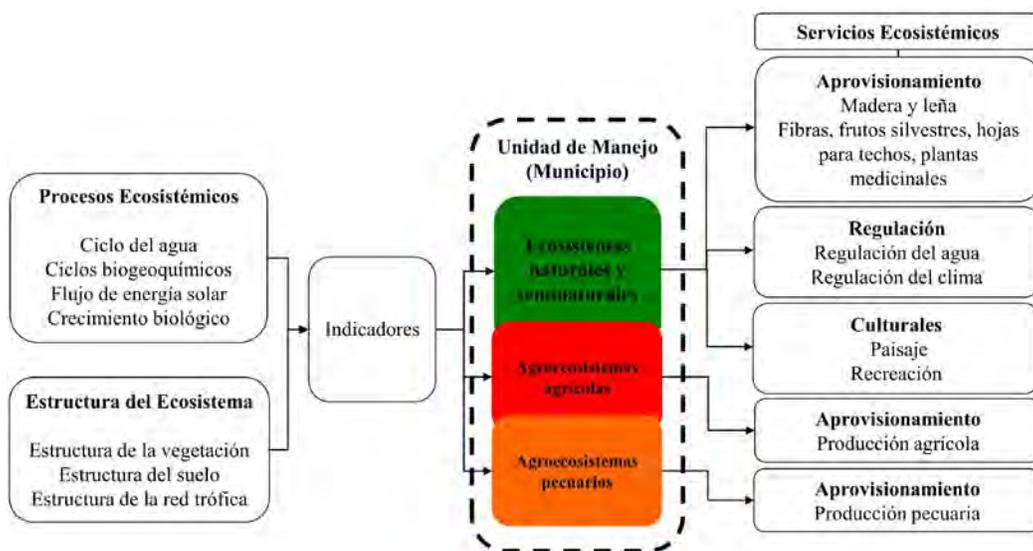
Con lo anterior, se identificaron y confirmaron los principales usos actuales del suelo. Cabe destacar que dentro del área protegida se reconocen 1047 predios, de los cuales el 50.4 % son inferiores a 5 ha y el 27.0 % se encuentra entre 10 y 50 ha; y cuya principal actividad productiva es agropecuaria (CAR, 2017).

### Pasos 2 y 3: identificación de la demanda y suministro actual de SE

Se realizaron 11 entrevistas semiestructuradas a actores claves como líderes campesinos, presidentes de juntas de acción comunal y funcionarios públicos (véase el anexo suplementario). En general, se buscaba conocer la percepción de los actores frente a tres SE, con 24 preguntas asociadas a la importancia y uso (Fagerholm *et al.*, 2012). Además, se consultó información oficial reportada por los municipios en lo referente al tema de abastecimiento de agua y producción agrícola y pecuaria (Gobernación de Cundinamarca, 2016; Contraloría de Cundinamarca, 2016). Los SE identificados se clasificaron en las categorías propuestas por Bubb *et al.* (2017).

### Paso 4: evaluación del funcionamiento actual de algunos procesos ecosistémicos

Se identificó la cartografía base e imágenes satelitales rapideye, usando datos suministrados por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (Igac) (2017). Con base en esta información se elaboró la cartografía temática a escala 1:25 000 para geomorfología, suelos, coberturas, ecosistemas, unidades vegetales y unidades tróficas; estas dos últimas soportadas en los levantamientos de vegetación y fauna silvestre. De acuerdo con lo anterior, se definieron indicadores para evaluar los procesos ecosistémicos y la estructura del ecosistema en cada unidad de análisis (figura 2); la valoración para cada indicador se presenta en la tabla 1. Específicamente, los suelos se caracterizaron a partir de 28 perfiles modales representativos de las unidades de paisaje del área de estudio y 65 muestras de horizontes de suelo, de acuerdo con la metodología del Igac (2010). La vegetación se caracterizó a partir de 18 parcelas de 0.1 ha (50 m x 20 m), según lo establecido por la red DryFlor (Moonlight *et al.*, 2020), y 84 puntos de recolección libre de material botánico.



**Figura 2.** Esquema metodológico usado en la planificación de la gestión de los SE en el área de bs-T del departamento de Cundinamarca con base en Bubb *et al.* (2017).

En paralelo, se evaluó la abundancia de los siguientes grupos: insectos (Coleóptera y Lepidóptera), siguiendo lo establecido por Villareal *et al.* (2004); anfibios y reptiles, acorde a Crump y Scott (2001); aves, en función de la propuesta de Ralph *et al.* (1996); y mamíferos, según Tirira (2007) y Reid (2009).

Posteriormente, se realizó un análisis multicriterio mediante un método cuantitativo basado en un modelo de ponderación lineal denominado *Scoring* (Mendoza y Macoun, 1999), el cual se desarrolló en un ambiente SIG en la plataforma ArcGIS (Environmental Systems Research Institute, 2012) mediante el uso de las herramientas Model Builder y Weighted Overlay; lo que permitió ponderar los criterios e indicadores de acuerdo con la valoración asignada (tabla 1). Una vez obtenidos los resultados, se determinó la condición o estado de los SE a nivel espacial para el área de estudio. Adicionalmente, se realizó un análisis de componentes principales (ACP) (Wold *et al.*, 1987) con el fin de identificar tendencias de aporte de las unidades administrativas (municipios) y de las unidades de análisis en el funcionamiento de los procesos ecológicos y la estructura de los ecosistemas. También se empleó un análisis de clúster jerárquico mediante el método de Ward (1963) para la delimitación de grupos utilizando las librerías FactoMineR (Le *et al.*, 2008) y Factoextra (Kassambara y Mundt, 2018) del software R (R Development Core Team, 2017).

### **Paso 5: identificación de los impulsores directos de cambio generalmente asociados a actividades humanas en lo local y regional**

Se realizó mediante la observación de 84 puntos en campo, entrevistas a actores clave de las comunidades locales y funcionarios municipales. Los impulsores se categorizaron según su nivel de impacto a partir de la clasificación de González *et al.* (2018) para ecosistemas naturales y para ecosistemas agrícolas y pecuarios. Adicionalmente, se asociaron estos impulsores de cambio con causas subyacentes o

indirectas, acorde a lo propuesto por el Millennium Ecosystem Assessment Panel (2005).

### **Paso 6: establecimiento de recomendaciones de manejo para la conservación y uso sostenible del bs-T asociada al marco normativo e institucional vigente**

Teniendo en cuenta que el artículo 14 del Decreto 2372 de 2010 (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010) define los DMI como espacios geográficos que mantienen la composición y función ecosistémica, a pesar de la modificación estructural, se procedió a construir las recomendaciones de manejo. Así mismo, se consideraron los usos permitidos dentro del área protegida (uso sostenible, preservación, restauración, conocimiento y disfrute) (CAR, 2018).

## **RESULTADOS**

Los resultados de las entrevistas realizadas a los actores indican que los SE que presentan mayor importancia son los de aprovisionamiento, los cuales son tangibles y están asociados a la generación de ingresos (como la producción agrícola y ganadera) y aquellos que soportan la supervivencia y productividad, como es el caso del suministro de agua. A los servicios de aprovisionamiento como la carne silvestre, la pesca, la leña y las plantas medicinales se les concedió una importancia media; en tanto que los SE que no son vitales para la supervivencia, como los materiales para artesanías, los colorantes y los elementos decorativos obtuvieron una importancia baja. Con respecto a la relevancia de la recuperación de sitios en los que ocurren procesos de remoción en masa, se mencionan principalmente las zonas con mayor pendiente. Como parte de los SE de tipo cultural, se observó que los pobladores identifican un gran potencial en la zona de estudio para actividades de recreación y descanso, relacionados con la belleza paisajística y los atractivos naturales de la biodiversidad (tabla 2).

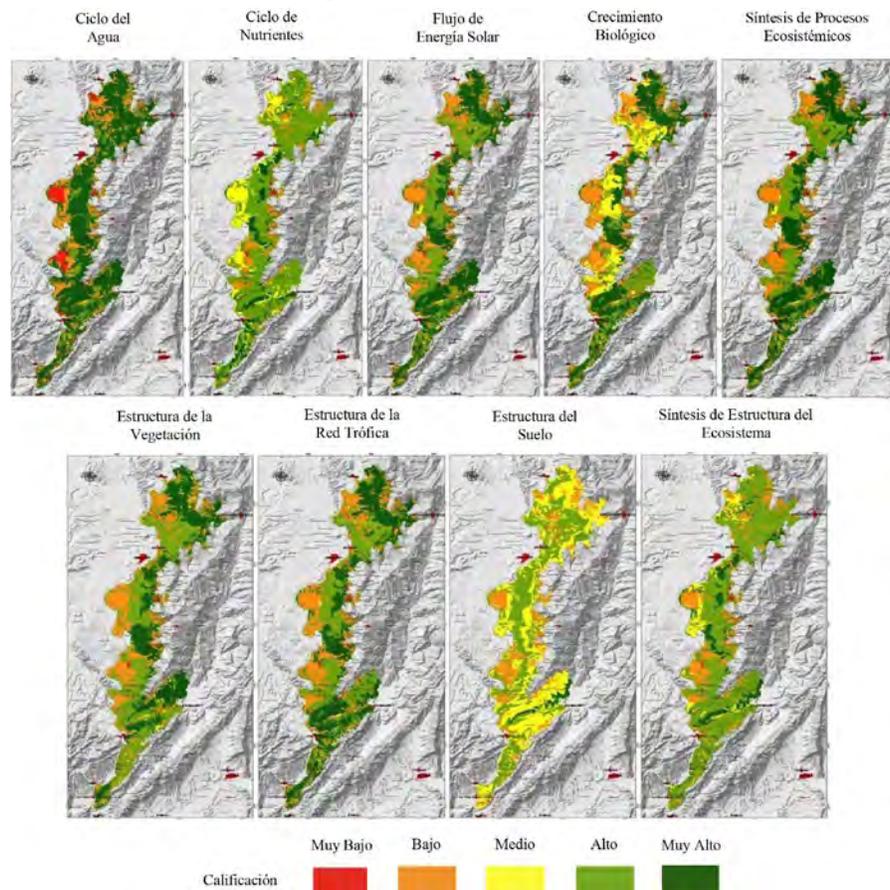
**Tabla 1.** Variables e indicadores usados para la evaluación de los procesos ecosistémicos y la estructura del ecosistema y descripción de su valoración en DRMI bosque seco de la vertiente oriental del río Magdalena

| Proceso ecosistémico (PE)/ Estructura del ecosistema (EE) | Variables evaluadas para cada proceso o estructura              | Indicadores evaluados dentro de cada variable   | Descripción de la valoración de cada indicador (Bubb et al., 2017)   |
|---|---|---|--|
| PE del ciclo del agua.                                    | Condición de la superficie del suelo                            | Tipo de cobertura (TC).   | TC. Se valoró el estado de la cobertura vegetal a partir del mapa de coberturas de la tierra en cada una de las unidades de análisis (natural, agrícola y pecuario) correspondiendo el valor de 5 a bosques densos y 1 a herbazales abiertos.    |
| PE del ciclo de nutrientes.                               | Pérdida de nutrientes (ciclo abierto/cerrado y vías de pérdida) | TC y susceptibilidad a procesos de erosión (SPE).   | COS. Se valoró de acuerdo con el valor promedio en cm del primer horizonte de cada una de las calicatas de los perfiles modales.   |
|   | Vías para el incremento y disponibilidad de nutrientes.         | TC y abundancia de plantas fijadoras de nitrógeno (AbPfn).  | PES. Se valoró de acuerdo con el valor promedio en cm de los primeros horizontes del suelo en cada calicata de los perfiles modales.   |
| PE del flujo de energía solar.                            | Cantidad de nutrientes disponibles.                             | Profundidad de la capa orgánica del suelo (COS), capacidad de uso por fertilidad (CUF) y abundancia a nivel del suelo de descomponedores (AbD). | CUF. Se valoró teniendo en cuenta la unidad cartográfica de suelos y su relación con el ambiente morfogenético de origen.  |
|   | Tasa de ciclaje de nutrientes.                                  | AbD y abundancia de mamíferos herbívoros y polinizadores (AbM).   | SPE. Se valoró teniendo en cuenta la unidad cartográfica de suelos y su relación con la pendiente.   |
| PE del crecimiento biológico.                             | Volumen de ciclaje de nutrientes.                               | COS, profundidad efectiva del suelo (PES), biomasa total por unidad de área (BT).   | AbPfn, BT y IFA. Para el sistema natural se valoraron de acuerdo con los resultados de los muestreos de vegetación en 18 parcelas. Para el sistema agrícola y pecuario se establecieron similitudes con los valores reportados en la literatura. |
|   | Fotosíntesis (captura de energía solar)                         | TC y BT.  | AbD, AbAR, AAI y AbM. Se valoraron de acuerdo con la abundancia absoluta de cada grupo encontrada en los correspondientes muestreos y se establecieron similitudes para las coberturas de los sistemas agrícolas y pecuarios.                    |
| EE-Vegetación.  | Flujo hacia otros niveles de la red trófica.                    | AbD.  |  |
|   | Crecimiento de las plantas.                                     | BT.   |  |
| EE-Red trófica.   | Crecimiento de los animales.                                    | AbD.  |  |
|   | Abundancia de plantas dominantes claves.                        | Abundancia de aves insectívoras (AAI).  |  |
| EE-Suelo.   | Condición de la superficie del suelo                            | TC.   |  |
|   | Profundidad de la capa orgánica del suelo                       | PES.  |  |
|   | Balance ecológico y procesos evolutivos.                        | Número de individuos de flora en categoría de amenaza (IFA).  |  |
|   | Abundancia de los descomponedores claves.                       | COS, AbD, abundancia de anfibios y reptiles (AbAR, AAI y AbM).  |  |
|   | Abundancia de plantas dominantes claves.                        | TC y BT.  |  |
|   | Condición de la superficie del suelo                            | TC  |  |
|   | Profundidad de la capa orgánica del suelo                       | COS   |  |

En cuanto a los resultados asociados al funcionamiento de los ecosistemas, a partir de los indicadores de procesos ecosistémicos y la estructura del ecosistema, es evidente la relación espacial de valores altos y muy altos con los ecosistemas naturales. Ello en tanto que los valores bajos y muy bajos se encuentran asociados a los sistemas agrícolas, en especial a los cultivos tecnificados de arroz, y en algunas zonas a los sistemas pecuarios (figura 3). Para los procesos ecosistémicos se encontró que las coberturas naturales y seminaturales presentan los mayores porcentajes de área en las categorías de alto y muy alto, los sistemas agrícolas presentan los mayores porcentajes de área en las categorías de bajo y muy bajo y los sistemas pecuarios se distribuyen en las categorías de bajo, medio y alto. Respecto a la estructura de los ecosistemas se halló la misma tendencia, con excepción de los sistemas agrícolas,

que presentan los mayores porcentajes de área en la categoría de bajo (figura 4).

De manera complementaria, los análisis estadísticos reafirman los resultados encontrados en los análisis cartográficos. En los ACP se identificaron dos grupos diferenciados por su aporte en el funcionamiento de los procesos ecológicos y estructura de los ecosistemas, reuniendo el 61.4 % y el 89.2 % de la varianza de los datos, respectivamente (figura 5). El primero se caracterizó por presentar valores altos y muy altos en la calificación de su funcionamiento y en él se encontraron, en mayor proporción, las unidades correspondientes a los ecosistemas naturales de Beltrán, Guataquí, Jerusalén y San Juan de Rioseco. El segundo se caracterizó por estar asociado con valores bajos y muy bajos a los sistemas agrícolas y pecuarios presentes en todos los municipios.



**Figura 3.** Mapas síntesis de los cuatro procesos ecosistémicos y los tres tipos de estructura del ecosistema evaluada para el área de bs-T del departamento de Cundinamarca.

**Tabla 2.** SE identificados en la zona de estudio. Nivel de importancia dado por la comunidad: alta\*\*\*, media\*\*, baja\*

| Unidad de análisis/Tipo de SE/SE.  | Descripción del SE.  |
|--|--|
| AAg/A/Producción agrícola***<br>Fuente: <a href="#">Gobernación de Cundinamarca (2016)</a> .             | Para los seis municipios del área de estudio, el área total sembrada es 54 588 ha y cuenta con una producción total de 13 275 Ton. El área en producción agrícola dentro de la unidad de estudio es de 1957 ha, de las cuales, 1297 ha se encuentran en el municipio de Beltrán, 307 ha en Guataquí, 80 ha en Jersusalén, 72 ha en Nariño, 30 ha en Pulí y 171 ha en San Juan de Río seco.   |
| APc/A/Producción ganadera***<br>Fuente: <a href="#">Gobernación de Cundinamarca (2016)</a> .             | Para los seis municipios que se encuentran dentro del área de estudio, el área total en pastos es 40016 ha y cuenta con una producción total de carne de 868 Ton y de 722 Ton de leche. El área en producción agrícola dentro de la unidad de estudio es de 11948 ha, de las cuales, 4679 ha se encuentran en el municipio de Beltrán, 1997 ha en Guataquí, 1296 ha en Jersusalén, 271 ha en Nariño, 992 ha en Pulí y 2714 ha en San Juan de Río seco.   |
| EcNySn/A/Provisión de madera***.   | Las principales especies reportadas por la comunidad son: <i>Anacardium excelsum</i> (Bertero & Balb. ex Kunth) Skeels, <i>Aspidosperma polyneuron</i> Müll. Arg., <i>Bulnesia arborea</i> (Jacq.) Engl., <i>Bursera simaruba</i> (L.) Sarg., <i>Cedrela odorata</i> L., <i>Cordia alliodora</i> (Ruiz & Pav.) Oken, <i>Ficus insipida</i> Willd., <i>Maclura tinctoria</i> (L.) D. Don ex Steud., <i>Tabebuia rosea</i> (Bertol.) DC., <i>Trichanthera gigantea</i> (Bonpl.) Nees, <i>Zanthoxylum</i> sp.; <i>Acacia farnesiana</i> (L.) Willd., <i>Albizia guachapele</i> (Kunth) Dugand, <i>Astronium graveolens</i> Jacq., <i>Myrcia guianensis</i> (Aubl.) DC., <i>Myrsine guianensis</i> (Aubl.) Kuntze. |
| EcNySn/A/Protección de las bocatomas de acueductos veredales***.   | Municipio de Guataquí. Acueductos del Porvenir con 32 usuarios, Campo Alegre con 40 y Los Eñaños con 470. Municipio de Jersusalén. Acueductos de La Victoria y La Hoya con 175 usuarios, El Tabaco con 200, Andorra con 125, Los Anones con 64, La Libertad con 100, La Buitrera con 125 y La Parada con 150.  |
| Número de usuarios de acueductos veredales. Fuente: <a href="#">Contraloría de Cundinamarca (2016)</a> . | Municipio de Beltrán. Acueductos veredas Gramalotal, Paquilo y La Popa con 454 usuarios. San Juan de Río seco. Acueductos veredas El Hato con dos usuarios, Acueducto Vereda El Limón con 43, Junta de Acueducto San Nicolás Asoaguas con 12 y Acueducto Santa Teresa con 34. Juntas de Acueductos Veredales: La Mesita con 16 usuarios, El Caucho con 10, El Hato con siete, El Limón con ocho y Varsovia con 23.   |
| EcNySn/A/Provisión de frutos silvestres***.  | Las principales especies reportadas por la comunidad son: <i>Attalea butyracea</i> (Mutis ex L. f.) Wess. Boer, <i>Melicoccus bijugatus</i> Jacq., <i>Persea americana</i> Mill., <i>Spondias mombin</i> L., <i>Inga</i> sp.   |
| EcNySn/A/Provisión de carne silvestre de la cacería**.   | Las principales especies reportadas por la comunidad son: <i>Agouti paca</i> (Linnaeus, 1766), <i>Cabassous centralis</i> (Miller, 1899), <i>Dasyprocta fuliginosa</i> (Wagler, 1832), <i>Dasyprocta punctata</i> (Gray, 1842), <i>Didelphis marsupialis</i> (Linnaeus, 1758), <i>Mazama americana</i> (Erxleben, 1777), <i>Ortalis</i> sp., <i>Tayassu pecari</i> (Link, 1795), <i>Sylvilagus floridanus</i> (J.A. Allen, 1890).  |
| EcNySn/A/Pesca**.  | Las principales especies reportadas son: <i>Pimelodus blochii</i> (Valenciennes, 1840), <i>Prochilodus magdalenae</i> (Steindachner, 1878), <i>Hypostomus plecostomus</i> (Linnaeus, 1758) y <i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i> (Buitrago-Suárez y Burr, 2007).   |
| EcNySn/A/Uso de leña**.  | Las principales especies reportadas por la comunidad son: <i>Capparis odoratissima</i> Jacq., <i>Gliricidia sepium</i> (Jacq.) Kunth ex Walp., <i>Inga</i> sp., <i>A. farnesiana</i> , <i>A. guachapele</i> , <i>A. graveolens</i> , <i>M. guianensis</i> , <i>Pithecellobium dulce</i> (Roxb.) Benth.   |
| EcNySn/A/Uso de plantas medicinales**.   | Las principales especies reportadas por la comunidad son: <i>Trixis inula</i> Crantz, <i>Commelina erecta</i> L., <i>Otholobium mexicanum</i> (L. f.) J. W. Grimes, <i>A. farnesiana</i> , <i>G. sepium</i> , <i>Ochroma pyramidale</i> (Cav. Ex Lam.) Urb., <i>Triumfetta bogotensis</i> DC., <i>Guazuma ulmifolia</i> Lam., <i>F. insipida</i> , <i>Sejania mexicana</i> (L.) Willd., <i>Aloe vera</i> (L.) Burm. f.   |
| EcNySn/A/Elaboración de artesanías**.  | Las principales especies reportadas por la comunidad son: <i>Crescentia cujete</i> L., <i>Eugenia uniflora</i> L., <i>Guadua angustifolia</i> Kunth, <i>Gynerium sagittatum</i> (Aubl.) P. Beauv., <i>Sabal mauritiformis</i> (H. Karst.) Griseb. & H. Wendl.  |

| Unidad de análisis/Tipo de SE/SE.   | Descripción del SE.  |
|---|--|
| EcNySn/A/Insumos para producción de panela.   | Las principales especies reportadas por la comunidad son: <i>C. ulmifolia</i> , <i>O. pyramidale</i> , <i>T. bogotensis</i> .  |
| EcNySn/A/Useo de flores o materiales decorativos**.   | Se hace referencia principalmente a <i>T. rosea</i> por su floración llamativa.  |
| EcNySn/A/Useo de colorantes, resinas, aceites**.  | Se hace referencia principalmente a <i>Bixa orellana</i> L.  |
| EcNySn/A/Producción de miel a través de apicultura*.  | Los actores entrevistados de la comunidad hacen referencia a la producción de miel solo en casos aislados.   |
| EcNySn/A/Useo de plantas para la obtención de especias*.  | Las principales especies reportadas por la comunidad son: <i>Eryngium foetidum</i> L.; <i>Ocimum campechianum</i> Mill.  |
| EcNySn/R/Conservación de sitios clave para la regulación del agua***.   | Guataquí: quebradas Yomocú, Pony y Boluca.   |
| Sitios de importancia para la comunidad (Fuente: entrevistas a actores clave).  | Jerusalén: quebrada El Tabaco, sobre la cual se encuentra la bocanada del acueducto que surte al casco urbano del municipio.   |
| EcNySn/R/Protección de sitios con procesos de erosión*.   | Beltrán: quebrada Puliceña en la cual se hace la captación para el acueducto de la vereda El Tabor. Quebrada Ocuchuta en la cual se hacen captaciones para la vereda El Tabor. Quebradas La Calaculta y La Calacala de donde se capta para 15 familias de la vereda y para el 50 % de la población del casco urbano y del 80 % de la población de Gramalote.   |
| EcNySn/C/Sitios atractivos por el paisaje***.   | San Juan de Rioseco El sitio llamado Boca e' monte y el nacimiento de la Quebrada Seca, de la cual se hace la captación para el acueducto de la vereda Santa Rosa y que provee de agua a 43 familias.  |
| Atributos naturales valorados por la comunidad (Fuente: entrevistas a actores clave).   | Los actores entrevistados de la comunidad hacen referencia a diversos sitios con topografía abrupta, que han sufrido deslizamientos.   |
| EcNySn/C/Conservación de lugares sagrados**.  | Jerusalén: El Neme o Lajas, valorado por su biodiversidad debido a que se encuentran especies de flora como <i>Albizia saman</i> (Jacq.) Merr. y <i>P. dulce</i> y de fauna como <i>Leopardus pardalis</i> (Linnaeus, 1758), <i>Kinosternon leucostomum</i> (Duméril, Bibron & Duméril, 1851), <i>Podocnemis lewyana</i> (Duméril, 1852), <i>Iguana iguana</i> (Linnaeus, 1758). Sitio Pozo Azul, ubicado sobre la quebrada El Tabaco, valorado como sitio de encuentro y recreación para tomar baños a la orilla del río y por la presencia de árboles de <i>A. excelsum</i> . Sitio Alto de Lagunas, ubicado a 1880 m.s.n.m., su atractivo son las lagunas y como mirador. |
|   | Beltrán: cerro El Tabor y cerro Tres Cruces para observación del paisaje y la finca Santa Isabel para práctica de Parapente.   |
|   | Guataquí: quebrada El Pony de la cual se abasteció el primer acueducto veredal y las aguas azufradas en el sector de Macanada.   |
|   | En el municipio de Beltrán se hace referencia al cementerio indígena ubicado sobre la vía que conduce hacia la vereda La Chácara. También aquí se realiza la fiesta del Mohan, la celebración de la virgen de la Canoa y la válida de canotaje en la cual participan deportistas de los municipios de Ricaurte, Nariño y Guataquí.   |
| <b>Unidades de análisis:</b> agroecosistemas agrícolas (AAg), agroecosistemas pecuarios (APc), ecosistemas naturales y seminaturales (EcNySn). Tipos de SE: aprovisionamiento (A), regulación (R), culturales (C). Nivel de importancia dado por la comunidad: alta***, media**, baja*. |  |

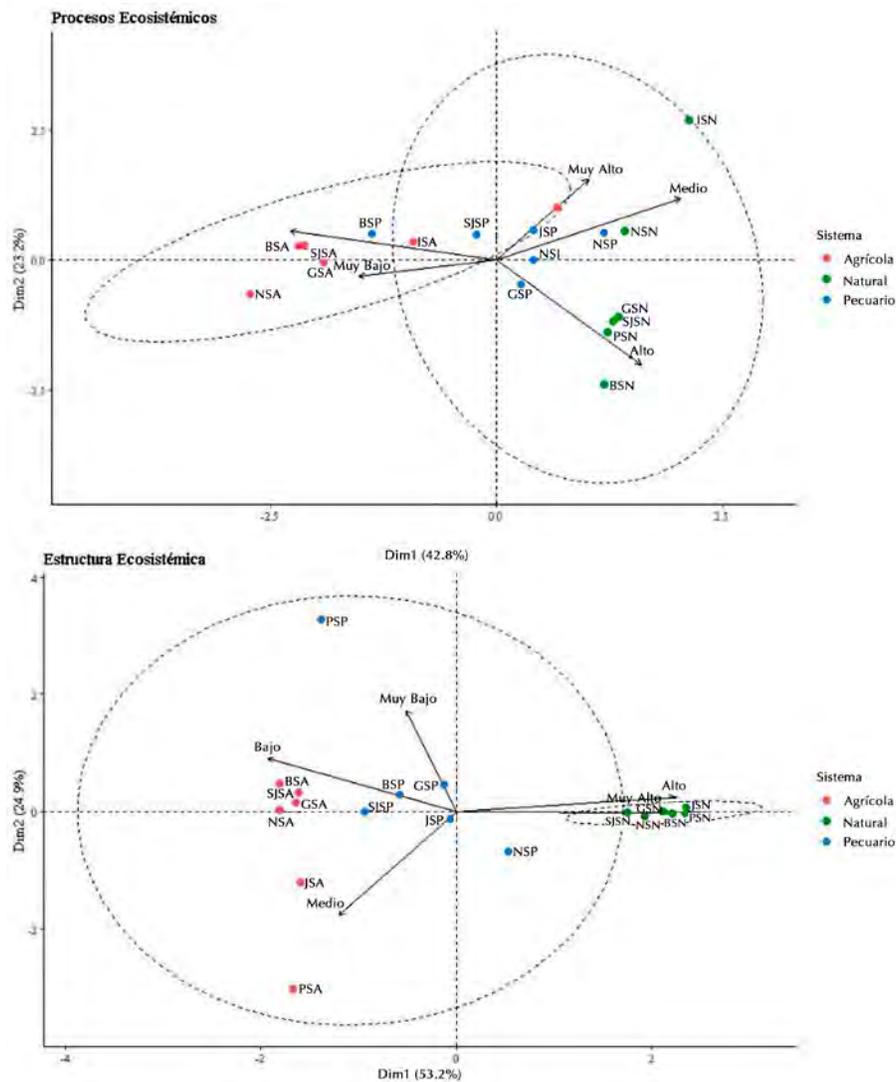
|                                    |          | Ciclo del agua              | Ciclo de nutrientes    | Flujo de energía     | Crecimiento biológico     | Procesos Ecosistémicos |
|------------------------------------|----------|-----------------------------|------------------------|----------------------|---------------------------|------------------------|
| Sistemas Agrícolas                 | Muy bajo | 85,4                        | 0,0                    | 0,1                  | 0,1                       | 6,7                    |
|                                    | Bajo     | 5,5                         | 10,7                   | 86,3                 | 91,5                      | 80,9                   |
|                                    | Medio    | 6,5                         | 87,4                   | 11,8                 | 6,6                       | 10,6                   |
|                                    | Alto     | 0,7                         | 0,8                    | 0,2                  | 0,1                       | 1,7                    |
|                                    | Muy alto | 1,8                         | 1,0                    | 1,7                  | 1,7                       | 0,0                    |
| Sistemas Naturales y Seminaturales | Muy bajo | 0,3                         | 0,1                    | 0,2                  | 0,3                       | 0,1                    |
|                                    | Bajo     | 0,2                         | 0,3                    | 0,3                  | 0,3                       | 0,3                    |
|                                    | Medio    | 0,0                         | 0,2                    | 0,0                  | 28,9                      | 38,7                   |
|                                    | Alto     | 0,4                         | 77,2                   | 30,6                 | 12,4                      | 57,5                   |
|                                    | Muy alto | 99,1                        | 22,3                   | 68,8                 | 58,1                      | 3,3                    |
| Sistemas Pecuarios                 | Muy bajo | 2,1                         | 1,7                    | 2,1                  | 2,1                       | 0,2                    |
|                                    | Bajo     | 55,3                        | 28,0                   | 55,4                 | 55,3                      | 32,4                   |
|                                    | Medio    | 0,7                         | 28,4                   | 0,7                  | 0,9                       | 50,5                   |
|                                    | Alto     | 38,8                        | 41,6                   | 39,0                 | 41,2                      | 16,8                   |
|                                    | Muy alto | 3,0                         | 0,2                    | 2,8                  | 0,4                       | 0,0                    |
|                                    |          | Estructura de la vegetación | Estructura red trófica | Estructura del suelo | Estructura del ecosistema |                        |
| Sistemas Agrícolas                 | Muy bajo | 0,1                         | 0,1                    | 6,7                  | 0,1                       | 0,1                    |
|                                    | Bajo     | 90,7                        | 90,9                   | 80,9                 | 86,3                      | 86,3                   |
|                                    | Medio    | 6,7                         | 6,6                    | 10,6                 | 11,1                      | 11,1                   |
|                                    | Alto     | 1,6                         | 0,8                    | 1,7                  | 1,8                       | 1,8                    |
|                                    | Muy alto | 0,9                         | 1,7                    | 0,0                  | 0,8                       | 0,8                    |
| Sistemas Naturales y Seminaturales | Muy bajo | 0,3                         | 0,2                    | 0,1                  | 0,2                       | 0,2                    |
|                                    | Bajo     | 0,2                         | 0,3                    | 0,3                  | 0,2                       | 0,2                    |
|                                    | Medio    | 0,0                         | 0,1                    | 38,7                 | 0,2                       | 0,2                    |
|                                    | Alto     | 46,1                        | 37,7                   | 57,5                 | 79,0                      | 79,0                   |
|                                    | Muy alto | 53,4                        | 61,7                   | 3,3                  | 20,3                      | 20,3                   |
| Sistemas Pecuarios                 | Muy bajo | 2,1                         | 2,1                    | 0,2                  | 2,1                       | 2,1                    |
|                                    | Bajo     | 52,6                        | 55,3                   | 32,4                 | 37,2                      | 37,2                   |
|                                    | Medio    | 3,5                         | 0,7                    | 50,5                 | 18,8                      | 18,8                   |
|                                    | Alto     | 40,6                        | 39,1                   | 16,8                 | 41,1                      | 41,1                   |
|                                    | Muy alto | 1,2                         | 2,7                    | 0,0                  | 0,7                       | 0,7                    |

**Figura 4.** Porcentaje de área acorde con la calificación asignada en el modelo en cada sistema evaluado para los principales procesos ecosistémicos (superior) y para los tipos de estructura del ecosistema (inferior).

En cuanto a los impulsores de cambio, se observó que las presiones actuales son el resultado de diferentes combinaciones entre impulsores directos y subyacentes de cambio. Los ecosistemas naturales rodeados generalmente de una matriz agrícola y ganadera tienen como mayor presión la presencia de ganado (44 % de los puntos observados), la cercanía a infraestructura humana como carreteras, vivienda y zonas de extracción minera (23 %) y la tala selectiva (13 %); también, se menciona el impacto alto de quemas (6 %). Por otra parte, las actividades consideradas como de bajo impacto (como el ecoturismo y la extracción de productos forestales) son menos comunes en el área de estudio. En muchos casos, se evidencia una combinación de dos o tres causas próximas;

frecuentemente, por ganadería (ramoneo) e infraestructura humana (bebederos, tuberías para extracción de agua, caminos). La [tabla 3](#) sintetiza estos resultados y su nivel de impacto sobre el funcionamiento de los ecosistemas.

Por otro lado, el cambio climático, entendido como la alteración del régimen de lluvias y prolongación de la temporada seca, se identifica como el impulsor más importante para los sistemas agrícolas y pecuarios, seguido de los procesos de degradación y erosión del suelo que implican a pérdida de su capacidad productiva. También, la presencia de especies invasoras o con potencial invasor como *Acacia farnesiana* (L.) Willd ([López-Camacho et al., 2012](#)) se asocian generalmente a pastizales enmalezados y áreas degradadas;



**Figura 5.** Tendencia del aporte de los diferentes municipios y ecosistemas a los procesos ecosistémicos (superior) y a la estructura del ecosistema (inferior) según el ACP. Las primeras iniciales de las unidades de aporte corresponden al municipio (B: Beltrán, G: Guataquí, J: Jerusalén; N: Nariño, P: Pulí, SJ: San Juan de Río seco) seguidas de los ecosistemas (SA: Agrícola, SP: Pecuario, SN: Natural).

y, según los habitantes de la zona, su erradicación genera costos elevados y la pérdida de terrenos para las actividades productivas. En suma, las fuerzas impulsoras subyacentes más importantes en los ecosistemas naturales son factores de tipo cultural y social, seguidas por factores económicos a pequeña escala asociados a cultivos transitorios y aprovechamiento de productos del bosque; mientras que, para los sistemas agrícolas y pecuarios, el

crecimiento económico y los factores institucionales son las causas más importantes.

### Recomendaciones de manejo

La implementación de acciones que incentiven la recuperación de los bosques secundarios mediante la sucesión permitirá mejorar la oferta de servicios cerca de las áreas agrícolas y pecuarias.

**Tabla 3.** Impulsores de cambio directos asociados a los ecosistemas del área de estudio y sus implicaciones sobre el funcionamiento de los ecosistemas (impacto de la actividad: 1 muy bajo, 5 muy alto)

| Impulsores directos   | Impacto probable sobre el funcionamiento del ecosistema  | Impulsores indirectos   |
|---|--|---|
| Naturales.  |  |   |
| Ecoturismo, caza y extracción de productos no madereros (1).            | Estructura de la vegetación y red trófica. Pérdida de biodiversidad y de procesos ecológicos dependientes de especies claves.  | Factores culturales religiosos y económicos. Las actividades directas sobre los ecosistemas naturales generalmente son prácticas de la población rural para acceder a materiales para construcción, leña, proteína u otros para su uso directo o indirecto. |
| Extracción selectiva (2).   | Ibídem. Disminución de biomasa.  |   |
| Pastoreo de ganado dentro del bosque y tala intensiva (3).              | Estructura de la vegetación, ciclos biogeoquímicos, crecimiento biológico y red trófica. Alteración en la biota e interrupción de procesos ecológicos dependientes de especies clave.                |   |
| Agricultura y ganadería (4).  | Ibídem. Pérdida de biodiversidad, procesos ecológicos y SE asociados a la regulación y soporte de hábitat principalmente.  |   |
| Infraestructura humana, actividades mineras, hidrocarburos y fuego (5). | Estructura de la vegetación y ciclos biogeoquímicos. Cambios en estructura y funcionamiento de ecosistemas. Afectación de ciclos biogeoquímicos y pérdida de comunidad de descomponedores del suelo. |   |
| Agrícolas.  |  |   |
| Infraestructura, actividades mineras y fuego (1).                       | Ciclos biogeoquímicos y cadenas tróficas. Altera la composición del sistema.   | Factores institucionales, tecnológicos y culturales. Diferencias entre pequeños agricultores que dependen de un medio de vida rural y grandes empresarios con acceso a mercados y tecnología. Falta de opciones para reducir su dependencia.                |
| Contaminación por fertilizantes (2).                                    | Ibídem, ciclo del agua. Cambio en la composición del suelo.  |   |
| Especies invasoras (3).   | Estructura de la red trófica. Estructura y funcionamiento del sistema. Agro-diversidad.  |   |
| Cambio climático (4).   | Ciclo del agua y redes tróficas. Reducción y/o alteración de la productividad y temporalidad de las cosechas. Mayor ocurrencia de enfermedades y plagas.   |   |
| Degradación y erosión del suelo (5).                                    | Ciclos biogeoquímicos, ciclo del agua y cadenas tróficas. Disminución de la fertilidad del suelo y evidencia de procesos de erosión. Afectación de producción agrícola.                              |   |
| Pecuarios.  |  |   |
| Contaminación de fuentes hídricas (1).                                  | Ciclos biogeoquímicos y alteración de red trófica. Generación de enfermedades epidémicas y endémicas del ganado. Disminución de la calidad del agua.   | Factores económicos. La ganadería contribuye a los medios de vida de la población generando ingresos bien sea como actividad principal o como alternativa para un ingreso adicional y esporádico.   |
| Degradación y erosión del suelo (2).                                    | Ciclos biogeoquímicos y estructura del suelo. Agotamiento de fertilidad del suelo y procesos de erosión en ladera. Afectación de capacidad del suelo para retener y regular el agua.                 |   |
| Cambio climático (3).   | Ciclo del agua y redes tróficas. Aumento de la escasez de agua. Reducción de la productividad. Mayor ocurrencia de enfermedades y plagas.  |   |
| Especies invasoras (4).   | Estructura de la vegetación y la red trófica. Afecta la composición y estructura del sistema y la competencia entre especies. Origina procesos de degradación de suelos.                             |   |
| Sobreutilización del suelo (5).   | Ciclos biogeoquímicos, red trófica. Agotamiento de la productividad del sistema pecuario. Disminución de plantas forrajeras.   |   |

En este sentido, es urgente emprender acciones de regulación que eviten que en estas coberturas se presente conversión de uso del suelo para el establecimiento de pastos. Por lo que la implementación de mecanismos financieros como REDD+, los cuales buscan la captura de carbono, podrían establecerse para aumentar los beneficios de la biodiversidad derivados de la deforestación evitada (Phelps *et al.*, 2012), contribuyendo al manejo de la vegetación y proporcionando un ingreso familiar alternativo.

Igualmente, los procesos ecosistémicos evaluados y los tipos de estructura del ecosistema para las zonas agrícolas y pecuarias muestran alteraciones en los procesos de ciclo del agua, flujo de energía, crecimiento biológico, estructura de la vegetación y estructura del suelo. Este resultado concuerda con lo reportado en el bosque seco del departamento del Tolima, en el cual algunos de los productores expresaron que los cambios a los que el ecosistema se ha visto sometido han tenido consecuencias negativas como el incremento de la temperatura media, el aumento de plagas, la desertificación y degradación del suelo, la disminución de la oferta de agua y la baja producción de arroz (Andrade *et al.*, 2017). Adicionalmente, se potencian otros efectos de actividades productivas, como la ganadería, que contribuyen al establecimiento de especies invasoras y a los procesos de degradación del ecosistema al favorecer el establecimiento de arbustales mono específicos que a largo plazo modifican las propiedades del suelo (Vásquez-Valderrama *et al.*, 2017, 2020).

El anterior panorama es evidencia de las decisiones de los pobladores locales sobre el uso del suelo, las cuales están relacionadas con su supervivencia personal y afectan directamente la provisión de SE a nivel individual y comunitario. Por lo cual, es necesario reconocer la relevancia de estas acciones locales tanto en las prioridades de investigación como en las políticas regionales y nacionales para evitar así una de las principales causas de la reducción en el suministro de SE (Paudyal *et al.*, 2015).

De esta manera, se configura un escenario de alerta en el que se deben promover cambios inmediatos en los procesos de producción agrícola y pecuaria ya que, como lo afirman García *et al.* (2014), la probabilidad de mantener sistemas productivos bajo coberturas de áreas en desertificación y sobreexplotación es muy baja y acarrea diversos problemas sociales y económicos. A pesar de que Colombia cuenta con una Política Nacional de Gestión de la Biodiversidad y los Servicios Ecosistémicos y que las iniciativas de conocimiento y conservación del bs-T se han incrementado en los últimos años (Pizano y García, 2014), son aisladas las acciones que se realizan a nivel regional y local. Por lo tanto, deben proponerse estrategias de manejo que especifiquen una ruta metodológica sistemática en torno a un objetivo de conservación y uso e incorporen aspectos apropiados como la adopción de un enfoque de planificación participativa que considere las dinámicas ecológicas y la evaluación de los SE.

En síntesis, para avanzar hacia la conservación del bs-T es necesario fortalecer el interés común sobre la importancia de la provisión de SE, de tal manera que la formulación de políticas públicas y la investigación consideren de manera adecuada las acciones de los actores locales (Paudyal *et al.*, 2015), quienes son finalmente los mayores involucrados en el territorio. A partir de lo planteado por Thompson *et al.* (2011), en cuanto a la comprensión y comunicación de los beneficios de los SE, se debe considerar como parte de los desarrollos metodológicos de nuevas investigaciones: las relaciones sociales, ambientales y económicas que las comunidades construyen con los SE. Esto con el fin de lograr que la toma de decisiones esté cobijada bajo una mirada integral que contribuya a la gestión sostenible de los bosques.

## DISCUSIÓN

Investigaciones recientes han demostrado la reducción en la provisión de SE por cambio de uso del suelo (Hasan *et al.*, 2020; Hanna *et al.*, 2019).

Así mismo, se ha hecho énfasis en los costos económicos por pérdida directa y por afectación indirecta de servicios de aprovisionamiento y regulación (Sharma *et al.*, 2019). Igualmente, en el contexto del cambio climático, se ha resaltado la importancia de las coberturas naturales en la regulación que mantiene las funciones de agroecosistemas (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2013). Considerando todo lo anterior, las recomendaciones de manejo planteadas en cuanto a evitar la transformación de las coberturas naturales remanentes son pertinentes.

La inclusión de la percepción de actores locales, con respecto a la importancia de los SE, es una característica relevante de este estudio. Este enfoque participativo se ha manifestado como un proceso necesario para orientar las acciones de manejo en cuencas hidrográficas (Zafra-Calvo *et al.*, 2020); en el caso de los bs-T puede llegar a contribuir en el diseño de intervenciones institucionales apropiadas en el territorio (Castillo *et al.*, 2005). Así mismo, las estrategias de construcción transdisciplinar descentralizadas han sido recomendadas para su incorporación en investigaciones futuras (Jacobs *et al.*, 2020).

En términos generales, los análisis de SE en Colombia se han enfocado en la valoración integral (Rincón-Ruiz *et al.*, 2019a), en la identificación de *trade-offs* respecto a actividades económicas (Rincón-Ruiz *et al.*, 2019b) y en la modelación en escenarios de cambio climático (Clerici *et al.*, 2019). A pesar de la alta contribución que han proporcionado dichas investigaciones, todavía es necesario profundizar en aspectos como la zonificación, la cual es fundamental en la identificación de relaciones entre los SE y la estrategia espacial de manejo del paisaje (Liu *et al.*, 2019; de Groot *et al.*, 2010). Adicional a lo anterior, la inclusión de un riguroso ejercicio de zonificación puede llegar a ser una herramienta importante en la construcción de procesos de gobernanza, al incluir una visión compartida del territorio con participación local (van Assche *et al.*, 2020).

Esta investigación aporta al conocimiento actual al integrar el enfoque multi-criterio (en lo cartográfico) y multivariado (en lo estadístico), dentro de un análisis de SE. A diferencia de estudios anteriores que solamente han desarrollado su propuesta en bs-T tomando criterios político-administrativos (Andrade *et al.*, 2017) o priorizando un SE (Rincón-Ruiz *et al.*, 2019b). La aproximación aquí realizada permite concentrar las acciones de manejo al zonificar el estado de los SE en el territorio, a una escala semidetallada (1:25 000) (Portillo-Quintero *et al.*, 2015) y relacionar diferentes variables biofísicas de uso del suelo e indicadores del estado de dichos servicios.

Se recalca que la recomendación de manejo, asociada a la integración de los sistemas naturales del área a proyectos de la estrategia REDD+, se sustenta en experiencias previas latinoamericanas en las cuales se haya logrado generar un nicho de desarrollo sostenible en la planeación del paisaje, mediante la conservación de los bosques y la ejecución de actividades agrícolas (Bastos-Lima *et al.*, 2017). Por lo que podría ser una opción interesante para la zona de estudio, siempre y cuando se desarrolle en el marco del respeto por la tenencia de la tierra y por el uso actual del suelo con el fin de evitar la generación de conflictos sociales (Milne *et al.*, 2019). Así mismo, debe considerarse la dificultad del cambio de áreas de cultivo para incrementar los stocks de carbono, teniendo en cuenta que un alto porcentaje de los predios corresponde a pequeños propietarios (Skutsch *et al.*, 2015).

## CONCLUSIONES

El análisis participativo fue esencial para la identificación del alto valor de los SE de regulación hídrica que prestan los ecosistemas naturales y que son clave para la continuidad de las actividades socioeconómicas. En suma, la espacialización de variables biofísicas confirma la importancia de estas áreas en la provisión de SE.

La declaratoria de los DRMI por parte de las autoridades ambientales es, sin duda, una estrategia que contribuye a la conservación de ecosistemas estratégicos (como el caso del bs-T) y puede ser fortalecida con la incorporación de los elementos aportados en el presente estudio.

La conservación de los ecosistemas naturales debe ser prioritaria. Para darle continuidad a la provisión de los SE de producción agropecuaria y de suministro de agua para acueductos veredales, es necesario cumplir con el planteamiento en mención. Esto teniendo en cuenta que los SE son afectados, de acuerdo con los resultados de la evaluación de los procesos ecosistémicos y la estructura del ecosistema.

## AGRADECIMIENTOS

El presente artículo es producto del Convenio Interadministrativo de Asociación n.º 1594 de 2016 suscrito por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca con la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Deseamos agradecer a las alcaldías de los municipios de Nariño, Guataquí, Beltrán, Jerusalén, Pulí y San Juan de Rioseco; a los representantes de las comunidades, líderes y presidentes de las juntas de acción comunal; y a la docente Nelly Rodríguez Eraso de la Universidad Nacional de Colombia por su acompañamiento y asesoría en este trabajo.

## CONFLICTOS DE INTERESES

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

## CONTRIBUCIÓN POR AUTOR

L.M.C.C. y R.L.C. lideraron la investigación. L.M.C.C., R.L.C. y S.D. realizaron muestreos en campo. L.M.C.C., S.D. y R.L.C. hicieron los

análisis estadísticos y escribieron el manuscrito. W.G.A. efectuó todos los análisis cartográficos. Todos los autores contribuyeron a la lectura de los borradores.

## REFERENCIAS

- Andrade, H. J., Segura, M. A. y Sierra, E.** (2017). Percepción local de los servicios ecosistémicos ofertados en fincas agropecuarias de la zona seca del norte del Tolima, Colombia. *Revista Luna Azul*, 45, 42-58. <https://doi.org/10.17151/luaz.2017.45.4>
- Balvanera, P., Castillo, A. y Martínez-Harms, M.J.** (2011). Ecosystem Services in Seasonally Dry Tropical Forests. En R. Dirzo, H. Young, H. Mooney y G. Ceballos (eds.), *Seasonally Dry Tropical Forests: Ecology and Conservation* (pp. 259-277). Island Press.
- Bastos-Lima, M. G., Visseren-Hamakers, I. J., Braña-Varela, J. y Gupta, A.** (2017). A reality check on the landscape approach to REDD+: Lessons from Latin America. *Forest Policy and Economics*, 78, 10-20. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2016.12.013>
- Bubb, P., Soesbergen, A. V., Bisht, N., Singh, G., Joshi, S., Aryal, K., Danks, F. S., Rawat, G. S., Bhuchar, S., Wu, N., Kotru, R. y Yi, S.** (2017). *Planning Management for Ecosystem Services—An Operations Manual*. International Centre for Integrated Mountain Development.
- Calvo-Rodríguez, S., Sánchez-Azofeifa, A. G., Durán, S. M. y Espirito-Santo, M. M.** (2016). Assessing ecosystem services in Neotropical dry forests: a systematic review. *Environmental Conservation*, 44, 1, 34-43. <https://doi.org/10.1017/S0376892916000400>
- Castillo, A., Magaña, A., Pujadas, A., Martínez, L. y Godínez, C.** (2005). Understanding the Interaction of Rural People with Ecosystems: A Case Study in a Tropical Dry Forest of Mexico. *Ecosystems*, 8, 630-643. <https://doi.org/10.1007/s10021-005-0127-1>
- Clerici, N., Cote-Navarro, F., Escobedo, F. J., Rubiano, K. y Villegas, J. C.** (2019). Spatio-temporal and cumulative effects of land use-land cover and climate change on two ecosystem services in the Colombian Andes.

- Science of the Total Environment*, 685, 1181-1192. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.275>
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR)** (2006). Caracterización Socioeconómica. En *Plan de ordenación y manejo de la cuenca del río Magdalena-vertiente oriental departamento de Cundinamarca* (pp. 247-350). CAR.
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR)** (2017). *Propuesta de declaratoria de un área protegida en la categoría de distrito de manejo integrado- "Bosque Seco de la Vertiente Oriental, del Río Magdalena en las provincias Centro y Alto Magdalena"- municipios de Nariño, Guataquí, Beltrán, Jerusalén, Pulí, y San Juan de Río Seco; departamento de Cundinamarca*. CAR.
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR)** (17 de julio de 2018). *Acuerdo 20 del 17 de julio de 2018. Por medio del cual se declara, delimita y alindera el Distrito Regional de Manejo Integrado "Bosque Seco de la Vertiente Oriental del Río Magdalena"*. CAR.
- Contraloría de Cundinamarca** (2016). *Informe anual del estado de los recursos naturales y del ambiente del departamento de Cundinamarca, año 2016-vigencia 2015*. Contraloría de Cundinamarca. [http://www.contraloriadecundinamarca.gov.co/attachment/002%20informes/008%20informe\\_anual\\_del\\_estado\\_de\\_los\\_recursos\\_naturales\\_y\\_del\\_ambiente\\_del\\_departamento\\_de\\_cundinamarca/2016/consolidado-provincias.html](http://www.contraloriadecundinamarca.gov.co/attachment/002%20informes/008%20informe_anual_del_estado_de_los_recursos_naturales_y_del_ambiente_del_departamento_de_cundinamarca/2016/consolidado-provincias.html)
- Crump, M. L. y Scott, N. J.** (2001). Relevamientos por encuentros visuales. En R. Heyer, M. D. Donnelly, L. A. McDiarmid, A. Hayek y M. S. Foster (eds.), *Medición y monitoreo de la diversidad biológica: métodos estandarizados para anfibios* (pp. 80-87). Editorial Universitaria de la Patagonia.
- de Groot, R. S., Alkemade, R., Braat, L., Hein, L. y Willemen, L.** (2010). Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. *Ecological Complexity*, 7, 260-272. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2009.10.006>
- Environmental Systems Research Institute** (2012). ArcGIS. Version 10.2. Environmental Systems Research Institute. <https://www.arcgis.com>
- Fagerholm, N., Käyhkö, N., Ndumbaro, F. y Khamis, M.** (2012). Community stakeholders' knowledge in landscape assessments—Mapping indicators for landscape services. *Ecological Indicators*, 18, 421-433. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.12.004>
- García, H., Corzo, G., Isaacs, P. y Etter, A.** (2014). Capítulo 8: Distribución y estado actual de los remanentes del bioma de bosque seco tropical en Colombia: Insumos para su gestión. En C. Pizano y H. García (eds.), *El bosque seco tropical en Colombia* (pp. 229-251). Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- García-Márquez, J. R., Tobias, K., Páez, C. A., Ruiz-Agudelo, C. A., Bejarano, P., Muto, T., y Arjona, F.** (2016). Effectiveness of Conservation Areas for Protecting Biodiversity and Ecosystem Services: A Multi-Criteria Approach. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, 13, 1, 1-13. <https://doi.org/10.1080/21513732.2016.1200672>
- Gobernación de Cundinamarca** (2016). *Base Agrícola 2016*. Secretaría de Agricultura, Gobernación de Cundinamarca. [http://www.cundinamarca.gov.co/Home/SecretariasEntidades.gc/Secretariadeagricultura/Secagriculturadespliegue/asdocumentacion\\_contenidos/csecreagri\\_centrodoc\\_documentos\\_oficina\\_asesora\\_de\\_planeacion](http://www.cundinamarca.gov.co/Home/SecretariasEntidades.gc/Secretariadeagricultura/Secagriculturadespliegue/asdocumentacion_contenidos/csecreagri_centrodoc_documentos_oficina_asesora_de_planeacion)
- Gobernación de Cundinamarca** (2020). *Plan Departamental de Desarrollo 2020-2024, "Cundinamarca, ¡Región que progresa!"*: Anexo 1 - Diagnóstico por provincias. Gobernación de Cundinamarca.
- González-M. R., García, H., Isaacs, P., Cuadros, H., López-Camacho, R., Rodríguez, N., Pérez, K., Mijares, F., Castaño-Naranjo, A., Jurado, R., Idárraga-Piedrahíta, A., Rojas, A., Vergara H. y Pizano, C.** (2018). Disentangling the environmental heterogeneity, floristic distinctiveness and current threats of tropical dry forests in Colombia. *Environmental Research Letters*, 13, 045007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaad74>
- Hanna, D. E. L., Raudsepp-Hearne, C. y Bennett, E. M.** (2019). Effects of land use, cover, and protection

- on stream and riparian ecosystem services and biodiversity. *Conservation Biology*, 34, 244-255. <https://doi.org/10.1111/cobi.13348>
- Hasan, S., Shi, W. y Zhu, X.** (2020). Impact of land use land cover changes on ecosystem service value – A case study of Guangdong, Hong Kong, and Macao in South China. *Plos One*, 15, e0231259. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0231259>
- Hoekstra, J. M., Boucher, T. M., Ricketts, T. H. y Cartes, R.** (2005). Confronting a biome crisis: global disparities of habitat loss and protection. *Ecology Letters*, 8, 23-29. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2004.00686.x>
- Holdridge, L. R.** (1967). *Life zone ecology*. Tropical Science Center.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (Igac)** (2010). *Metodología para los levantamientos de suelos*. Igac.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (Igac)** (2017). Datos abiertos Igac. <https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-cartografia-y-geografia>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam), Instituto Geográfico Agustín Codazzi (Igac) y Corporación Autónoma Regional del río Grande de La Magdalena (Cormagdalena)** (2008). *Mapa de cobertura de la tierra cuenca Magdalena-Cauca: metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia a escala 1:100.000*. Ideam, Igac y Cormagdalena.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) y Ministerio a Ambiente y Desarrollo Sostenible (Mads)** (2017). *Mapa de ecosistemas continentales, costeros y marinos de Colombia-Escala 1:100000, actualización 2017*. Mads, Ideam, IAvH, Sinchi, Invemar, IIAP, PNN e Igac.
- Jacobs, S., Zafra-Calvo, N., Gonzalez-Jimenez, D., Guibrunet, L., Benessaiah, K., Berghöfer, A., Chaves-Chaparro, J., Díaz, S., Gomez-Baggethun, E., Lele, S., Martín-López, B., Masterson, V.A., Merçon, J., Moersberger, H., Muraca, B., Nørström, A., O'Farrell, P., Ordonez, J. C., Prieur-Richard, A. H. [...] y Balvanera, P.** (2020). Use your power for good: plural valuation of nature—the Oaxaca statement. *Global Sustainability*, 3, e8. <https://doi.org/10.1017/sus.2020.2>
- Kassambara, A. y Mundt, F.** (2018). Package factoextra: Extract and visualize the Results of Multivariate Data Analyses. R Package Version 1.0.7. <https://cran.rstudio.com/web/packages/factoextra/factoextra.pdf>
- Le, S., Josse, J. y Husson, F.** (2008). FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. *Journal of Statistical Software*, 25, 1, 1-18. <https://doi.org/10.18637/jss.v025.i01>
- Liu, Y., Li, T., Zhao, W., Wang, S. y Fu, B.** (2019). Landscape functional zoning at a county level based on ecosystem services bundle: Methods comparison and management indication. *Journal of Environmental Management*, 249, 109315. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109315>
- López-Camacho, R., González-M., R. y Cano, M.** (2012). *Acacia farnesiana* (L.) Willd. (Fabaceae: Leguminosae), una especie exótica con potencial invasivo en los bosques secos de la isla de Providencia (Colombia). *Biota Colombiana*, 13, 2, 232-246. <https://doi.org/10.21068/bc.v13i2.269>
- López-Camacho, R. y Rojas, J.** (eds.) (2019). *El bosque seco en el territorio*. CAR y Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Maass, J. M., Balvanera, P., Castillo, A., Daily, G. C., Mooney, H. A., Ehrlich, P., Quesada, M., Miranda, A., Jaramillo, V. J., García Oliva, F., Martínez-Yrizar, A., Cotler, H., López-Blanco, J., Pérez-Jiménez, A., Búrqueza, A., Tinoco, C., Ceballos, G., Barraza, L., Ayala, R. y Sarukhán, J.** (2005). Ecosystem Services of Tropical Dry Forests: Insights from Long-term Ecological and Social Research on the Pacific Coast of Mexico. *Ecology and Society*, 10, 1, 17. <https://doi.org/10.5751/ES-01219-100117>
- Mendoza, G. A. y Macoun, P.** (1999). *Guidelines for Applying Multi-Criteria Analysis to the Assessment of Criteria and Indicators*. Center for International Forestry Research. <https://doi.org/10.17528/cifor/000769>
- Millennium Ecosystem Assessment Panel** (2005). *Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis*. Island Press.

- Milne, S., Mahanty, S., To, P., Dressler, W., Kanowski, P. y Thavat, M.** (2019). Learning from “Actually Existing” REDD+: A Synthesis of Ethnographic Findings. *Conservation and Society*, 17, 84-95. [https://doi.org/10.4103/cs.cs\\_18\\_13](https://doi.org/10.4103/cs.cs_18_13)
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT)** (1 de julio de 2010). *Decreto 2372 de 2010: Por el cual se reglamenta el Decreto Ley 2811 de 1974, la Ley 99 de 1993, la Ley 165 de 1994 y el Decreto Ley 216 de 2003, en relación con el Sistema Nacional de Áreas Protegidas, las categorías de manejo que lo conforman y se dictan otras disposiciones*. Diario Oficial N.º 47757.
- Moonlight, P. W., Banda, R. K., Phillips, O. L., Dexter, K. G., Pennington, R. T., Baker, T. R., C. de Lima, H., Fajardo, L., González-M., R., Linares-Palmino, R., Lloyd, J., Nascimento, M., Prado, D., Quintana, C., Riina, R., Rodríguez, G. M., Maria Villela, D., Aquino, A. C. M. M., Arroyo, L., Bezerra, C., Tadeu Brunello, A., [...] y Veenendaal, E.** (2020). Expanding tropical forest monitoring into Dry Forests: The DRYFLOR protocol for permanent plots. *Plants People Planet*, 00, 1-6. <https://doi.org/10.1002/ppp3.10112>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO)** (2013). *Climate-Smart: Crop Production System*. En *Climate-smart agriculture sourcebook* (pp. 195-205). FAO.
- Paudyal, K., Baral, H. y Keenan, R. J.** (2015). Local actions for the common good: Can the application of the ecosystem services concept generate improved societal outcomes from natural resource management? *Land Use Policy*, 56, 327-332. <https://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.11.010>
- Phelps J., Friess, D. A. y Webb, E. L.** (2012). Win-win REDD+ approaches belie carbon-biodiversity trade-offs. *Biological Conservation*, 154, 53-60. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2011.12.031>
- Pizano C. y García, H.** (eds.) (2014). *El bosque seco tropical en Colombia*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Portillo-Quintero, C., Sánchez-Azofeifa, A., Calvo-Alvarado, J., Quesada, M. y do Espírito Santo, M. M.** (2015). The role of tropical dry forests for biodiversity, carbon and water conservation in the neotropics: lessons learned and opportunities for its sustainable management. *Regional Environmental Change*, 15, 1039-1049. <https://doi.org/10.1007/s10113-014-0689-6>
- R Development Core Team** (2017). *R: A language and environment for statistical Computing*. The R Foundation for Statistical Computing. <http://www.R-project.org>
- Ralph, C. J., Geupel, G. R., Pyle, P., Martín, T. E., DeSante, D. F. y Milá, B.** (1996). *Manual de métodos de campo para el monitoreo de aves terrestres*. US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Research Station.
- Reid, F. A.** (2009). *A Field Guide to the Mammals of Central America and Southeast Mexico*. Oxford University Press.
- Rincón-Ruiz, A., Arias-Arévalo, P., Núñez Hernández, J. M., Cotler, H., Aguado Caso, M., Meli, P., Tauro, A., Ávila Akerberg, V. D., Avila-Foucat, V. S., Cárdenas, J. P., Castillo Hernández, L. A., Castro, L.G., Cerón Hernández, V. A., Contreras Araque, A., Deschamps-Lomeli, J., Galeana-Pizaña, J. M., Guillén Oñate, K., Hernández Aguilar, J. A., Jimenez, A. D. [...] y Waldron, T.** (2019a). Applying integrated valuation of ecosystem services in Latin America: Insights from 21 case studies. *Ecosystem Services*, 36, 100901. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2019.100901>
- Rincón-Ruiz, A., Rojas-Padilla, J., Agudelo-Rico, C., Perez-Rincon, M., Vieira-Samper, S. y Rubiano-Páez, J.** (2019b). Ecosystem services as an inclusive social metaphor for the analysis and management of environmental conflicts in Colombia. *Ecosystem Services*, 37, 100924. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2019.100924>
- Sharma, R., Rimal, B., Baral, H., Nehren, U., Paudyal, K., Sharma, S., Rijal, S., Ranpal, S., Acharya, R., Alenazy, A. y Kandel, P.** (2019). Impact of Land Cover Change on Ecosystem Services in a Tropical Forested Landscape. *Resources*, 8, 18, 1-13. <https://doi.org/10.3390/resources8010018>
- Skutsch, M., Borrego, A., Morales-Barquero, L., Páez-Gálvez, J., Salinas-Melgoza, M., Ramírez,**

- M. I., Perez-Salicrup, D., Benet, D., Monroy, S. y Gao, Y.** (2015). Opportunities, constraints and perceptions of rural communities regarding their potential to contribute to forest landscape transitions under REDD+: case studies from Mexico. *International Forestry Review*, 17, 65-84. <https://doi.org/10.1505/146554815814669025>
- Thompson, I. D., Okabe, K., Tylanakis, J. M., Kumar, P., Brockerhoff, E. G., Schellhorn, N. A., Parrotta, J. A. y Nasi, R.** (2011). Forest Biodiversity and the Delivery of Ecosystem Goods and Services: Translating Science into Policy. *BioScience*, 61, 12, 972-981. <https://doi.org/10.1525/bio.2011.61.12.7>
- Tirira, D.** (2007). *Mamíferos del Ecuador: guía de campo*. Ediciones Murciélago Blanco.
- Trejo I. y Dirzo, R.** (2000). Deforestation of seasonally dry tropical forest: a national and local analysis in Mexico. *Biological Conservation*, 94, 2, 133-142. [https://doi.org/10.1016/S0006-3207\(99\)00188-3](https://doi.org/10.1016/S0006-3207(99)00188-3)
- van Assche, K., Beunen, R. y Oliveria, E.** (2020). Spatial planning and place branding: rethinking relations and synergies. *European Planning Studies*, 28, 7, 1274-1290. <https://doi.org/10.1080/09654313.2019.1701289>
- Vásquez-Valderrama, M. Y., López-Camacho, R., y Baptiste, M. P.** (2017). La transformación histórica de las coberturas naturales impulsa el potencial de invasión de plantas en los bosques secos del río Magdalena, Colombia. *Biota Colombiana*, 18, 2, 132-144. <https://doi.org/10.21068/c2017.v18n02a08>
- Vásquez-Valderrama, M., González-M., R., López-Camacho, R., Baptiste, M. P. y Salgado-Negret, B.** (2020). Impact of invasive species on soil hydraulic properties: importance of functional traits. *Biological Invasions*, 22, 1849-1863. <https://doi.org/10.1007/s10530-020-02222-8>
- Villareal, H., Álvarez, M., Córdoba, S. Escobar, F., Fagua, G., Gast, F., Mendoza, H., Ospina, M. y Umaña, A. M.** (2004). Manual de métodos para el desarrollo de inventarios de biodiversidad. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Ward, J.** (1963). Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function. *Journal of the American Statistical Association*, 58, 301, 236-244. <https://doi.org/10.2307/2282967>
- Wold, S., Esbensen, K. y Geladi, P.** (1987). Principal Component Analysis. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2, 37-52. [https://doi.org/10.1016/0169-7439\(87\)80084-9](https://doi.org/10.1016/0169-7439(87)80084-9)
- Yirdaw E., Tigabu M. y Monge, A.** (2017). Rehabilitation of degraded dryland ecosystems - review. *Silva Fennica*, 51, 1B, 1673. <https://doi.org/10.14214/sf.1673>
- Zafra-Calvo, N., Balvanera, P., Pascual, U., Merçon, J., Martín-López, B., van Noordwijk, M., Mwampamba, T.H., Lele, S., Ifejika Speranza, C., Arias-Arévalo, P., Cabrol, D., Cáceres, D. M., O'Farrell, P., Subramanian, S. M., Devy, S., Krishnan, S., Carmenta, R., Guibrunet, L., Kraus-Elsin, Y., Moersberger, H., Cariño, J. y Díaz, S.** (2020). Plural valuation of nature for equity and sustainability: Insights from the Global South. *Global Environmental Change*, 63, 102115. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2020.102115>

## ANEXO SUPLEMENTARIO

## Anexo 1. Valoración de los indicadores asociados al componente fauna. Cobertura según Corine Land Cover

| Unidad de análisis        | Cobertura | Valoración                      |           |   |                                   |
|---------------------------|-----------|---------------------------------|-----------|---|-----------------------------------|
|                           |           | Abundancia de aves insectívoras | Mamíferos | Abundancia a nivel del suelo de descomponedores como escarabajos estercoleros | Abundancia de anfibios y reptiles |
| Ecosistemas naturales     | 3142      | Muy alto                        | Alto      | Muy alto  | Muy alto                          |
|                           | 31111     | Muy alto                        | Alto      | Muy alto  | Muy alto                          |
|                           | 3143      | Muy alto                        | Alto      | Muy alto  | Muy alto                          |
|                           | 3144      | Muy alto                        | Alto      | Muy alto  | Muy alto                          |
|                           | 32221     | Medio                           | Medio     | Medio   | Medio                             |
|                           | 32222     | Medio                           | Medio     | Medio   | Medio                             |
|                           | 3221      | Alto                            | Muy alto  | Alto  | Alto                              |
|                           | 32122     | Bajo                            | Bajo      | Bajo  | Bajo                              |
|                           | 3231      | Medio                           | Medio     | Medio   | Medio                             |
|                           | 3232      | Bajo                            | Bajo      | Bajo  | Bajo                              |
| Agroecosistemas agrícolas | 211       | Bajo                            | Bajo      | Bajo  | Bajo                              |
|                           | 2121      | Bajo                            | Bajo      | Medio   | Medio                             |
|                           | 2122      | Bajo                            | Bajo      | Medio   | Medio                             |
|                           | 2131      | Bajo                            | Bajo      | Medio   | Medio                             |
|                           | 2123      | Bajo                            | Bajo      | Medio   | Medio                             |
|                           | 2132      | Bajo                            | Bajo      | Medio   | Medio                             |
|                           | 2241      | Alto                            | Alto      | Alto  | Alto                              |
|                           | 2231      | Muy alto                        | Muy alto  | Muy alto  | Muy alto                          |
|                           | 2221      | Muy alto                        | Muy alto  | Muy alto  | Muy alto                          |
|                           | 2215      | Muy alto                        | Muy alto  | Muy alto  | Muy alto                          |
|                           | 2233      | Medio                           | Medio     | Medio   | Medio                             |
|                           | 2234      | Medio                           | Medio     | Medio   | Medio                             |
|                           | 22122     | Medio                           | Medio     | Medio   | Medio                             |
|                           | 22131     | Medio                           | Medio     | Medio   | Medio                             |
|                           | 241       | Medio                           | Medio     | Medio   | Medio                             |
| 245                       | Medio     | Medio                           | Medio     | Medio   |                                   |
| 243                       | Medio     | Medio                           | Medio     | Medio   |                                   |
| Agroecosistemas ganaderos | 232       | Muy alto                        | Muy alto  | Muy alto  | Muy alto                          |
|                           | 233       | Muy alto                        | Muy alto  | Muy alto  | Muy alto                          |
|                           | 231       | Bajo                            | Bajo      | Bajo  | Bajo                              |
|                           | 244       | Medio                           | Medio     | Medio   | Medio                             |
|                           | 242       | Medio                           | Medio     | Medio   | Medio                             |

Fuente: Ideam, (2008).

**Anexo 2.** Valoración de los indicadores asociados al componente suelo

| <b>Perfil modal</b> | <b>Profundidad efectiva del suelo</b> | <b>Profundidad de la capa orgánica del suelo</b> | <b>Unidad de suelos</b> | <b>Capacidad de uso por fertilidad</b> | <b>Susceptibilidad a procesos de erosión</b> |
|---------------------|---------------------------------------|--|-------------------------|--|--|
| 1                   | Bajo                                  | Alto   | MWSg                    | Baja                                   | Alta   |
| 2                   | Alto                                  | Muy alto   | MWff                    | Media                                  | Alta   |
| 3                   | Muy bajo                              | Muy bajo   | MWVf                    | Media                                  | Alta   |
| 4                   | Medio                                 | Alto   | VWQa                    | Alta                                   | Baja   |
| 5                   | Medio                                 | Medio  | MWff                    | Media                                  | Alta   |
| 6                   | Bajo                                  | Medio  | MWCd                    | Media                                  | Media  |
| 7                   | Bajo                                  | Muy bajo   | MWff                    | Media                                  | Alta   |
| 8                   | Medio                                 | Bajo   | MWff                    | Media                                  | Alta   |
| 9                   | Bajo                                  | Muy bajo   | MWff                    | Media                                  | Alta   |
| 10                  | Muy alto                              | Muy alto   | MWSg                    | Baja                                   | Alta   |
| 11                  | Bajo                                  | Bajo   | MWCd                    | Media                                  | Media  |
| 12                  | Medio                                 | Alto   | MWff                    | Media                                  | Alta   |
| 13                  | Muy bajo                              | Medio  | VWQa                    | Alta                                   | Baja   |
| 14                  | Medio                                 | Medio  | MWVf                    | Media                                  | Alta   |
| 15                  | Medio                                 | Medio  | MWJa - MWJc             | Alta                                   | Baja   |
| 16                  | Muy alto                              | Medio  | VWQa                    | Alta                                   | Baja   |
| 17                  | Bajo                                  | Muy bajo   | MWSg                    | Baja                                   | Alta   |
| 18                  | Bajo                                  | Muy bajo   | MWVf                    | Media                                  | Alta   |
| 19                  | Bajo                                  | Bajo   | MWJa - MWJc             | Alta                                   | Baja   |
| 20                  | Muy bajo                              | Bajo   | VWQa                    | Alta                                   | Baja   |
| 21                  | Muy bajo                              | Muy bajo   | MWSg                    | Baja                                   | Alta   |
| 22                  | Medio                                 | Bajo   | MWVf                    | Media                                  | Alta   |
| 23                  | Bajo                                  | Bajo   | MWCd                    | Media                                  | Media  |
| 24                  | Medio                                 | Bajo   | MWJa - MWJc             | Alta                                   | Baja   |
| 25                  | Alto                                  | Alto   | MWSg                    | Baja                                   | Alta   |
| 26                  | Medio                                 | Medio  | MWVf                    | Media                                  | Alta   |
| 27                  | Muy alto                              | Alto   | MWCd                    | Media                                  | Media  |
| 28                  | Alto                                  | Bajo   | VWOa                    | Alta                                   | Baja   |

Fuente: López-Camacho y Rojas (2019).

**Anexo 3.** Valoración de los indicadores asociados al componente flora

| Parcela | Abundancia de plantas fijadoras de nitrógeno (n.º Ind 0.1 ha <sup>-1</sup> ) | Biomasa total por unidad de área (kg 0.1 ha <sup>-1</sup> ) | Número de individuos de especies de flora en categoría de amenaza (n.º Ind 0.1 ha <sup>-1</sup> ) |
|---------|--|---|---|
| 1       | Alto   | Medio   | Bajo  |
| 2       | Muy alto   | Muy alto  | Muy bajo  |
| 3       | Muy bajo   | Alto  | Muy bajo  |
| 4       | Alto   | Muy bajo  | Medio   |
| 5       | Muy bajo   | Alto  | Muy bajo  |
| 6       | Muy bajo   | Muy alto  | Muy bajo  |
| 7       | Muy bajo   | Bajo  | Muy alto  |
| 8       | Bajo   | Bajo  | Muy bajo  |
| 9       | Muy bajo   | Medio   | Bajo  |
| 10      | Muy alto   | Bajo  | Muy bajo  |
| 11      | Muy bajo   | Muy bajo  | Bajo  |
| 12      | Bajo   | Alto  | Bajo  |
| 13      | Muy bajo   | Bajo  | Muy bajo  |
| 14      | Medio  | Muy bajo  | Muy bajo  |
| 15      | Medio  | Muy bajo  | Muy bajo  |
| 16      | Medio  | Bajo  | Muy bajo  |
| 17      | Muy bajo   | Alto  | Muy bajo  |
| 18      | Muy bajo   | Alto  | Muy bajo  |

Fuente: López-Camacho y Rojas (eds.) (2019).

**Anexo 4.** Valoración de los indicadores asociados al componente paisaje. Cobertura según Corine Land Cover

| Unidad de análisis        | Cobertura | Valoración tipo de cobertura |
|---------------------------|-----------|------------------------------|
| Ecosistemas naturales     | 3142      | Muy alto                     |
|                           | 31111     | Muy alto                     |
|                           | 3143      | Muy alto                     |
|                           | 3144      | Muy alto                     |
|                           | 32221     | Alto                         |
|                           | 32222     | Alto                         |
|                           | 3221      | Muy alto                     |
|                           | 32122     | Muy bajo                     |
|                           | 3231      | Medio                        |
| 3232                      | Bajo      |                              |
| Agroecosistemas agrícolas | 211       | Bajo                         |
|                           | 2121      | Muy bajo                     |
|                           | 2122      | Muy bajo                     |
|                           | 2131      | Bajo                         |
|                           | 2123      | Bajo                         |
|                           | 2132      | Bajo                         |
|                           | 2241      | Alto                         |
|                           | 2231      | Muy alto                     |
|                           | 2221      | Muy alto                     |
|                           | 2215      | Muy alto                     |
|                           | 2233      | Medio                        |
|                           | 2234      | Medio                        |
|                           | 22122     | Medio                        |
| 22131                     | Medio     |                              |
| Agroecosistemas ganaderos | 241       | Medio                        |
|                           | 245       | Medio                        |
|                           | 243       | Medio                        |
|                           | 232       | Muy alto                     |
|                           | 233       | Alto                         |
|                           | 231       | Bajo                         |
|                           | 244       | Medio                        |
| 242                       | Medio     |                              |

Fuente: Ideam (2008).

**Anexo 5.** Características ecológicas de los principales tipos de vegetación en la zona de estudio

| Tipo Vegetación   | Estructura y diversidad  |
|---|--|
| Vegetación tipo I (Parcela 3)<br>Dominancia de <i>Bursera simaruba</i> (9.0 %), <i>Trichilia pallida</i> (6.8 %), <i>Vasconcellea goudotiana</i> (6.3 %), <i>Triplaris americana</i> (5.4 %), <i>Trichilia</i> sp. (5.2 %), <i>Swartzia trianae</i> (4.8 %), <i>Bulnesia carrapo</i> (3.6 %), <i>Simira cordifolia</i> (3.4 %) y <i>Morisonia americana</i> (3.4 %).                    | Área basal = 2.468 m <sup>2</sup> 0.1 ha <sup>-1</sup> . Biomasa = 12.510 Mg 0.1 ha <sup>-1</sup> . Sector con el mayor índice de diversidad (H'=3.401 y Alpha's Fisher=19.387. Simpson=0.949). Representatividad con respecto al índice de Chao I= 68.241. Especies amenazadas: en CR ( <i>Oxandra espintana</i> , <i>Gustavia latifolia</i> ), EN ( <i>Mayna suaveolens</i> , <i>Aspidosperma polyneuron</i> ). Especie más abundante: <i>Vasconcellea goudotiana</i> . Otras especies: <i>Trema micrantha</i> , <i>Neea divaricata</i> , <i>Brosimum alicastrum</i> , <i>Amyris pinnata</i> . Otras leguminosas abundantes: <i>Senegalia</i> sp., <i>Inga</i> sp., <i>Platymiscium hebestachyum</i> , <i>Pterocarpus officinalis</i> y <i>Machaerium capote</i> .   |
| Vegetación tipo II (Parcelas 9, 10, 15 y 17)<br>Dominancia de <i>Machaerium capote</i> (43.2 %), <i>Platymiscium hebestachyum</i> (17.5 %), <i>Aspidosperma polyneuron</i> (15.0 %), <i>Astronium graveolens</i> (14.5 %), <i>Trichilia pallida</i> (12.3 %), <i>Cordia alliodora</i> (13.0 %) y <i>Handroanthus ochraceus</i> (12.8 %).  | Área basal en rangos de 0.962–1.941 m <sup>2</sup> 0.1 ha <sup>-1</sup> . Biomasa en rangos de 3.797–11.080 Mg 0.1 ha <sup>-1</sup> . Índices de diversidad: H'=1.555–3.058 y Alpha's Fisher=2.872–14.574, Simpson=0.557-0.913. Bosques dominados por Leguminosas. Representatividad con respecto al índice de Chao I entre 54.376–96.552. Especies amenazadas: en CR ( <i>Oxandra espintana</i> ), EN ( <i>Mayna suaveolens</i> , <i>Aspidosperma polyneuron</i> ). Especie más abundante: <i>Aspidosperma polyneuron</i> , <i>Machaerium capote</i> , <i>Eugenia procera</i> y <i>Platymiscium hebestachyum</i> . Otras especies: <i>Trichilia oligofoliolata</i> (Especie endémica), <i>Trichilia carinata</i> (Especie endémica), <i>Casearia corymbosa</i> , <i>Guazuma ulmifolia</i> .   |
| Vegetación tipo III (Parcela 5 y 16)<br>Dominancia de <i>Melicoccus bijugatus</i> (43.0 %), <i>Machaerium goudotii</i> (23.1 %), <i>Aspidosperma polyneuron</i> (14.0 %), <i>Swartzia trianae</i> (12.3 %), <i>Handroanthus ochraceus</i> (8.2 %), <i>Platymiscium hebestachyum</i> (7.5 %) y <i>Pithecellobium dulce</i> (6.4 %).  | Área basal de 1.275-1.801 m <sup>2</sup> 0.1 ha <sup>-1</sup> . Biomasa en rangos de 6.286-10.952 Mg 0.1 ha <sup>-1</sup> . Índices de diversidad: H'=1.856-2.429 y Alpha's Fisher=8.114, Simpson=0.647-0.858. Bosques de llanura de inundación dominados por <i>Melicoccus bijugatus</i> y bosques de terraza aluvial dominados por <i>Machaerium goudotii</i> . Representatividad con respecto al índice de Chao I entre 54.376–96.552. Especies amenazadas: en CR ( <i>Oxandra espintana</i> ), EN ( <i>Aspidosperma polyneuron</i> ). Especies endémicas: <i>Pristimera verrucosa</i> . Especie más abundante: <i>Melicoccus bijugatus</i> , <i>Machaerium goudotii</i> . Otras especies: <i>Bursera simaruba</i> y <i>Forsteronia spicata</i> .   |
| Vegetación tipo IV (Parcelas 2, 4, 7, 13, 14 y 18)<br>Dominancia de <i>Zygia</i> cf. <i>longifolia</i> (49.1 %), <i>Trichilia oligofoliolata</i> (46.4 %), <i>Aspidosperma polyneuron</i> (35.9 %), <i>Astronium graveolens</i> (30.1 %), <i>Machaerium goudotii</i> (29.7 %), <i>Machaerium capote</i> (21.7 %), <i>Cordia alliodora</i> (19.3 %) y <i>Trichilia pallida</i> (12.3 %). | Área basal de 1.195-2.283 m <sup>2</sup> 0.1 ha <sup>-1</sup> . Biomasa de 4.454-12.507 Mg 0.1 ha <sup>-1</sup> . Índice de diversidad: H'=1.298-2.909 y Alpha's Fisher=3.153-11.423, Simpson=0.533-0.923. Bosques que presentan dominancia de especies de la familia Meliaceae ( <i>Trichilia pallida</i> , <i>Trichilia oligofoliolata</i> ) y de Leguminosas ( <i>Zygia</i> cf. <i>longifolia</i> , <i>Machaerium capote</i> y <i>Machaerium goudotii</i> ). Representatividad con respecto al índice de Chao I entre 63.415- 87.552. Especies amenazadas: en CR ( <i>Oxandra espintana</i> ), EN ( <i>Aspidosperma polyneuron</i> , <i>Mayna suaveolens</i> ). Especies endémicas: <i>Rinorea marginata</i> , <i>Trichilia oligofoliolata</i> y <i>Trichilia carinata</i> . Especie más abundante: <i>Melicoccus bijugatus</i> , <i>Machaerium goudotii</i> . Otras especies: <i>Rinorea marginata</i> , <i>Bauhinia petiolata</i> , <i>Cynometra</i> sp. <i>Platymiscium hebestachyum</i> , <i>Eugenia procera</i> , <i>Pithecellobium dulce</i> , <i>Triplaris americana</i> , <i>Aspidosperma cuspa</i> , <i>Quadrella odoratissima</i> , <i>Eugenia</i> sp3 y <i>Gustavia verticillata</i> . |

Fuente: López-Camacho y Rojas (eds.) (2019).

**Anexo 6.** Características ecológicas de los principales grupos de fauna evaluados en la zona de estudio

| Grupo                | Diversidad  |
|----------------------|---|
| Insectos Coleoptera  | Se colectaron 163 individuos que corresponden a 17 morfoespecies de la familia Scarabaeidae en cuatro localidades de la zona de estudio. Se registraron seis géneros ( <i>Canthon</i> , <i>Dichotomius</i> , <i>Uroxys</i> , <i>Eurystermus</i> , <i>Onthophagus</i> y <i>Phaeneus</i> ) de los 18 registrados en los bosques secos de Colombia. El género con mayor número de especies registradas fue <i>Canthon</i> , representado por el 52.9 % de las especies y 67.5 % del total de individuos colectados.  |
| Insectos Lepidoptera | Se registraron 52 especies y 2234 individuos de seis familias (Nymphalidae, Pieridae, Papilionidae, Lycaenidae, Hesperidae y Riodinidae) en cuatro localidades de la zona de estudio. La familia más diversa fue Nymphalidae, con 27 especies (52 %), seguida de la familia Hesperidae con 10 especies.   |
| Anfibios y Reptiles  | Se registraron 14 especies que pertenecen a los órdenes Anura y Gymnophiona. Se registraron 20 especies de reptiles de los órdenes Crocodylia, Testudines y Squamata (nueve especies).  |
| Aves                 | Se registraron 190 especies de aves distribuidas en 21 órdenes y 48 familias. El orden más representativo fue el de los Passeriformes con 107 especies y 19 familias; la familia Tyrannidae fue la más diversa con 32 especies, seguida de la familia Thraupidae con 19 especies e Icteridae con ocho especies. El segundo orden en representatividad fue el de los Apodiformes con 13 especies, 11 de colibríes y dos especies de vencejos. Se reportaron 32 especies que se encuentran en la categoría II de Cites (2017), especies cuyo comercio debe controlarse a fin de evitar una utilización incompatible con su supervivencia. |
| Mamíferos            | Se registraron un total de 28 especies de mamíferos. Las especies reportadas están distribuidas en ocho órdenes y 16 familias. Se encontró una alta diversidad en el grupo del orden Chiroptera con 14 especies, entre las que se encuentran especies frugívoras, insectívoras, hematófagas y nectarívoras.   |

Fuente: [López-Camacho y Rojas \(eds.\) \(2019\)](#).

**Anexo 7.** Guía de entrevista semiestructurada.**Guía de preguntas**

|    |                                      |   |
|----|--------------------------------------|---|
| 1  | Cultivos                             | ¿Usted o su familia cultivan algún producto? ¿Cuáles productos? ¿En qué áreas? ¿Aproximación a la rentabilidad?   |
| 2  | Ganado                               | ¿Usted o su familia tienen ganado? ¿Cuántas cabezas? ¿De qué tipo? ¿Qué áreas usan para pastoreo? ¿Aproximación a la rentabilidad?  |
| 3  | Frutos silvestres                    | ¿Usted o su familia colecta frutos o vegetales silvestres? ¿Cuáles? ¿En qué cantidad? ¿Con qué frecuencia? ¿En qué áreas?   |
| 4  | Cacería                              | ¿Usted o su familia cazan? ¿Qué especies? ¿Qué cantidad? ¿Con qué frecuencia? ¿En qué áreas? ¿Aproximación a la rentabilidad?   |
| 5  | Pesca                                | ¿Usted o su familia pescan? ¿Qué especies? ¿Qué cantidad? ¿Con qué frecuencia? ¿En qué áreas? ¿Aproximación a la rentabilidad?  |
| 6  | Apicultura                           | ¿Usted o su familia practican la apicultura? ¿Apiarios o miel silvestre? ¿En qué cantidad (número de colmenas)? ¿En qué áreas? ¿Aproximación a la rentabilidad?             |
| 7  | Leña                                 | ¿Usa leña en la casa? ¿Qué cantidad? ¿Con qué frecuencia corta la misma cantidad? ¿En qué áreas corta la leña? ¿Usa o fabrica carbón vegetal?                               |
| 8  | Flores o materiales decorativos      | ¿Usted usa flores u otros materiales de la naturaleza para propósitos decorativos? ¿En qué cantidad? ¿Con qué frecuencia?   |
| 9  | Plantas medicinales                  | ¿Colecta plantas medicinales? ¿Cuáles especies? ¿Para qué enfermedad? ¿En cuales áreas las colecta?   |
| 10 | Espicias                             | ¿Colecta plantas especias (condimentos)? ¿Cuáles especies? ¿En qué cantidad? ¿En cuales áreas las colecta?  |
| 11 | Plantación de árboles                | ¿Está involucrado en la plantación de árboles? ¿En qué áreas? ¿En qué cantidades?   |
| 12 | Madera                               | ¿Colecta o corta materiales para construcción, canoas, postes o muebles del bosque natural? ¿Cuáles especies? ¿Qué cantidades? ¿Con qué frecuencia? ¿En cuáles áreas?       |
| 13 | Artesanías                           | ¿Colecta o corta materiales para artesanías del bosque natural? ¿Cuáles especies? ¿Qué cantidades? ¿Con qué frecuencia? ¿En cuales áreas?                                   |
| 14 | Colorantes, resinas, aceites         | ¿Colecta o corta otros productos del bosque natural (tintes o colorantes, resinas, aceites)? ¿Cuáles especies? ¿Qué cantidades? ¿Con qué frecuencia? ¿En cuales áreas?      |
| 15 | Origen del agua                      | ¿De dónde obtiene el agua para la casa y para la finca?   |
| 16 | Lugares sagrados                     | ¿Hay lugares religiosos o sagrados para usted en la naturaleza? ¿Cuáles y dónde? ¿Le da algún sentimiento religioso o espiritual o valor específico a ese sitio específico? |
| 17 | Sitios atractivos                    | ¿Cuáles sitios son los más hermosos y atractivos aquí?  |
| 18 | Valores culturales                   | ¿Hay áreas específicas de culturas, tradiciones o sabidurías locales que usted aprecie y piense que son importantes?  |
| 19 | Sitios para la conservación del agua | ¿Cuáles son las áreas de mayor importancia para la conservación del agua?   |
| 20 | Sitios con procesos de erosión       | ¿Cuáles áreas presentan procesos de erosión o han presentado eventos de deslizamientos o remoción en masa?  |

|    |                                       |  |
|----|---------------------------------------|--|
| 21 | Sitios productivos                    | ¿Cuáles áreas eran productivas para algún tipo de cultivo y actualmente no lo son?   |
| 22 | Sitios bocatomas acueductos veredales | ¿Dónde están las bocatomas de los acueductos veredales y en qué estado de conservación se encuentra el área de abastecimiento y recarga de dicha fuente hídrica? |
| 23 | Sitios para avistamiento de aves      | ¿Cuáles son las zonas de avistamiento de especies como aves o alguna especie de interés científico?  |
| 24 | Forrajeras                            | ¿Conoce o usa especies forrajeras?   |

*Actores clave entrevistados*

**San Juan de Río Seco:**

Vereda Capote:  
Integrante de la JAC (7)

Vereda Santa Rosa  
Presidente de la JAC (6)

**Beltrán:**

Finca La Morada:  
Campesino (8)

Presidente de la JAC vereda El Tabor (4)

Presidente de la JAC vereda Chacara (5)

Funcionaria de Alcaldía Municipal (11)

**Jerusalén:**

Vereda El Hatillo,  
Comerciante (1)

Vereda El Hatillo,  
Campesino (2)

Vereda El Bebedero,  
Presidente de la JAC (3)

**Guataquí:**

Cabecera municipal:  
Artesano (9)

Cabecera municipal:  
Campesino (10)

**Anexo 8.** Resultados de las entrevistas semiestructuradas

| SE                | Pregunta | Entrevista                            | 1  | 2  | 3 | 4  | 5 | 6  | 7 | 8 | 9  | 10 | 11 | Total general | %   |
|-------------------|----------|---------------------------------------|----|----|---|----|---|----|---|---|----|----|----|---------------|-----|
|                   |          | Tema                                  |    |    |   |    |   |    |   |   |    |    |    |               |     |
| Aprovisionamiento | 1        | Cultivos                              | 1  | 1  | 1 | 1  | 1 | 1  | 1 | 1 | 1  | 1  | 1  | 11            | 100 |
| Aprovisionamiento | 2        | Ganado                                | 1  | 1  | 1 | 1  | 1 | 1  | 1 | 1 | 1  | 1  |    | 10            | 91  |
| Aprovisionamiento | 12       | Madera                                | 1  | 1  | 1 | 1  | 1 | 1  | 1 | 1 | 1  | 1  |    | 10            | 91  |
| Regulación        | 21       | Sitios para la conservación del agua  | 1  | 1  | 1 | 1  | 1 | 1  | 1 | 1 | 1  |    | 1  | 10            | 91  |
| Culturales        | 17       | Sitios atractivos                     | 1  | 1  | 1 | 1  | 1 | 1  |   |   | 1  | 1  | 1  | 9             | 82  |
| Aprovisionamiento | 3        | Frutos silvestres                     | 1  | 1  |   | 1  | 1 | 1  |   | 1 | 1  | 1  |    | 8             | 73  |
| Aprovisionamiento | 4        | Cacería                               | 1  | 1  |   | 1  | 1 | 1  |   |   | 1  | 1  |    | 7             | 64  |
| Aprovisionamiento | 5        | Pesca                                 | 1  | 1  |   | 1  | 1 | 1  |   |   | 1  |    | 1  | 7             | 64  |
| Aprovisionamiento | 7        | Leña                                  | 1  | 1  | 1 | 1  |   | 1  |   | 1 | 1  |    |    | 7             | 64  |
| Aprovisionamiento | 9        | Plantas medicinales                   | 1  | 1  |   | 1  |   | 1  |   |   | 1  | 1  |    | 6             | 55  |
| Aprovisionamiento | 13       | Artesanías                            | 1  | 1  |   | 1  |   | 1  |   |   | 1  | 1  |    | 6             | 55  |
| Aprovisionamiento | 8        | Flores o materiales decorativos       | 1  | 1  |   | 1  |   | 1  |   |   | 1  |    |    | 5             | 45  |
| Aprovisionamiento | 14       | Colorantes, resinas, aceites          | 1  | 1  |   | 1  | 1 | 1  |   |   |    |    |    | 5             | 45  |
| Culturales        | 16       | Lugares sagrados                      | 1  | 1  |   | 1  |   | 1  |   |   |    |    | 1  | 5             | 45  |
| Aprovisionamiento | 6        | Apicultura                            | 1  | 1  |   | 1  |   | 1  |   |   |    |    |    | 4             | 36  |
| Aprovisionamiento | 10       | Espicias                              | 1  | 1  |   | 1  |   | 1  |   |   |    |    |    | 4             | 36  |
| Aprovisionamiento | 11       | Plantación de árboles                 | 1  | 1  |   | 1  |   | 1  |   |   |    |    |    | 4             | 36  |
| Aprovisionamiento | 15       | Origen del agua                       | 1  | 1  |   | 1  |   | 1  |   |   |    |    |    | 4             | 36  |
| Regulación        | 20       | Sitios con procesos de erosión        |    |    |   | 1  |   | 1  |   |   |    |    |    | 2             | 18  |
| Culturales        | 18       | Valores culturales                    |    |    |   |    |   |    |   |   |    |    | 1  | 1             | 9   |
| Regulación        | 21       | Sitios productivos                    |    |    |   |    |   | 1  |   |   |    |    |    | 1             | 9   |
| Aprovisionamiento | 22       | Sitios bocatomas acueductos veredales |    |    |   |    |   | 1  |   |   |    |    |    | 1             | 9   |
| Culturales        | 23       | Sitios para avistamiento de aves      |    |    |   | 1  |   |    |   |   |    |    |    | 1             | 9   |
| Aprovisionamiento | 24       | Forrajeras                            |    |    |   |    |   |    |   |   |    | 1  |    | 1             | 9   |
| Total general     |          |                                       | 18 | 18 | 6 | 20 | 9 | 21 | 4 | 6 | 12 | 9  | 6  | 129           |     |

**Anexo 9.** 84 puntos de observación de impulsores de cambio.

| Código de punto | Latitud    | Longitud    | Cobertura de bosque maduro | Cobertura de bosque secundario | Cobertura de rastrojos | Presiones dentro del fragmento  | Presiones en la matriz del fragmento  |
|-----------------|------------|-------------|----------------------------|--------------------------------|------------------------|---|---|
| 1               | 4°17'25.5" | 74°50'22.9" | 0                          | 80                             | 20                     | Ganadería, quemas.  | Cultivos agropecuarios (algodón y sorgo).   |
| 2               | 4°17'32.7" | 74°50'38.6" | 0                          | 0                              | 100                    |   | Cultivos (maíz), ganadería.   |
| 3               | 4°17'26.7" | 74°50'35"   | 0                          | 100                            | 0                      |   | Tala selectiva (caracolí), cultivos agropecuarios (sorgo), ganadería.                           |
| 4               | 4°19'35"   | 74°51'39.7" | 0                          | 20                             | 80                     | Erosión.  | Actividades mineras o canteras, cultivos agropecuarios (sorgo), ganadería.                      |
| 5               | 4°25'38.2" | 74°49'50.1" | 0                          | 0                              | 100                    | Infraestructura humana (basurero, urbanización).                        | Infraestructura humana (urbanización).  |
| 6               | 4°32'0.14" | 74°46'40.2" | 0                          | 0                              | 100                    | Tala selectiva (carbón), ganadería.                                     | Actividades mineras o canteras (extracción de arena), cultivos agropecuarios (maíz), ganadería. |
| 7               | 5°10'6.49" | 74°47'8.04" | 65                         | 35                             | 0                      | Infraestructura humana (bebederos, tubería de agua).                    | Ganadería, infraestructura humana (bebederos).  |
| 8               | 5°09'9.83" | 74°48'6.20" | 100                        | 0                              | 0                      |   | Ganadería.  |
| 9               | 4°47'53.6" | 74°46'18.1" | 0                          | 40                             | 60                     | Ganadería.  | Actividades mineras o canteras, cultivos agropecuarios (arroz).                                 |
| 10              | 4°45'54"   | 74°47'49.1" | 0                          | 100                            | 0                      | Claros (caída de árboles), caminos veredales.                           | Cultivos agropecuarios (arroz).   |
| 11              | 4°43'48.5" | 74°49'14.4" | 0                          | 0                              | 100                    |   |   |
| 12              | 4°44'48.8" | 74°49'25.2" | 0                          | 0                              | 100                    | Infraestructura humana (canales para arroz), tala selectiva, ganadería. | Cultivos agropecuarios (arroz), Infraestructura humana (carretera).                             |
| 13              | 4°40'16.3" | 74°57'12.4" | 0                          | 15                             | 0                      | Ganadería (ramoneo).  | Ganadería.  |
| 14              | 4°33'29.8" | 74°55'48"   | 0                          | 90                             | 10                     | Ganadería (ramoneo).  | Ganadería, infraestructura humana (carretera a piedras).  |
| 15              | 4°31'34.5" | 74°53'45.7" | 0                          | 100                            | 0                      | Ganadería (ramoneo).  | Cultivos agropecuarios (plátano y yuca), ecoturismo.  |
| 16              | 4°53'57.5" | 74°46'20.3" | 0                          | 100                            | 0                      | Ganadería y tala selectiva.   | Ganadería, agricultura, quemas, infraestructura humana (vías).                                  |

|    |            |             |    |     |     |   |  |
|----|------------|-------------|----|-----|-----|---|--|
| 17 | 4°53'23.9" | 74°42'41.0" | 20 | 60  | 20  | Infraestructura humana (senderos, basura).                                      | Infraestructura humana (vías), tala selectiva.                                   |
| 18 | 4°52'39.1" | 74°44'00.9" | 0  | 0   | 100 | Ganadería e infraestructura humana.   | Agricultura (arroz y algodón), infraestructura humana.                           |
| 19 | 4°39'38.6" | 74°46'42.8" | 0  | 100 | 0   | Infraestructura humana (vías) y ganadería.                                      | Infraestructura humana (vías) y ganadería.                                       |
| 20 | 4°41'37.4" | 74°42'15.5" | 0  | 10  | 0   | Agricultura e Infraestructura humana.   | Agricultura (maíz, plátano) ganadería e Infraestructura humana (vías).           |
| 21 | 4°40'10.2" | 74°43'20.7" | 0  | 10  | 0   | Ganadería y agricultura.  | Infraestructura humana (vías) y agricultura (plátano, maíz).                     |
| 22 | 4°37'38.0" | 74°44'13.6" | 0  | 0   | 100 | Ganadería, explotación de hidrocarburos y quemas.                               | Infraestructura humana (vías), ganadería, explotación de hidrocarburos y quemas. |
| 23 | 4°37'57.3" | 74°45'30.6" | 0  | 10  | 90  | Tala intensiva e infraestructura humana (basura).                               | Infraestructura humana (vías), explotación de hidrocarburos y quemas.            |
| 24 | 4°33'25.0" | 74°48'04.7" | 0  | 100 | 0   | Tala intensiva (quemas), Infraestructura humana (basura) y ganadería.           | Infraestructura humana (vías), ganadería y extracción de canteras.               |
| 25 | 4°10'16.1" | 74°41'40.4" | 0  | 0   | 100 | Infraestructura humana (conjuntos recreacionales), bañadero municipal.          | Infraestructura humana (fincas recreacionales), ganadería.                       |
| 26 | 4°09'36.8" | 74°42'17.5" | 0  | 0   | 100 | Ganadería (ramoneo).  | Ganadería e infraestructura humana (conjuntos recreacionales).                   |
| 27 | 4°08'12.8" | 74°41'23.1" | 0  | 0   | 100 | Quemas.   | Ganadería y canteras.  |
| 28 | 4°08'01.8" | 74°41'03.7" | 0  | 80  | 20  | Infraestructura humana (tubos de acueducto, basura).                            | Ganadería.   |
| 29 | 4°02'51.3" | 74°41'58.4" | 0  | 0   | 100 | Sin uso. Descanso.  | Ganadería y cultivos de maíz.  |
| 30 | 4°03'44.9" | 74°41'20.9" | 0  | 0   | 100 | Agricultura (plátano y cacao).  | Infraestructura humana (zonas suburbanas).                                       |
| 31 | 4°31'34.5" | 74°53'45.7" | 0  | 0   | 100 | Ganadería (ramoneo) e infraestructura humana (tubería para extracción de agua). | Ganadería e infraestructura humana (carretera).                                  |

|    |            |             |    |     |     |  |   |
|----|------------|-------------|----|-----|-----|--|---|
| 32 | 4°14'57.9" | 74°46'00.3" | 0  | 0   | 100 | Ganadería (bebederos) y presencia de basura por arrastre agua.                             | Ganadería e infraestructura humana (carretera).                               |
| 33 | 2°44'19.9" | 75°18'47.4" | 0  | 0   | 100 | Infraestructura humana (extracción de arena, hornos para secado de tabaco).                | Ganadería, pequeños cultivos.   |
| 34 | 2°39'39.1" | 75°18'31.7" | 0  | 0   | 100 | Ganadería (bebederos) y agricultura (pequeñas parcelas de plátano).                        | Ganadería e infraestructura humana (invasiones).                              |
| 35 | 2°35'15.2" | 75°21'41.9" | 0  | 0   | 100 | Ganadería.   | Ganadería.  |
| 36 | 2°35'01.1" | 75°26'53.5" | 0  | 20  | 0   | Infraestructura humana (extracción de material de río y presencia de barrios periféricos). | Infraestructura humana (carteras y cabecera municipal).                       |
| 37 | 2°41'45.8" | 75°17'32.6" | 0  | 0   | 100 | Ganadería.   | Ganadería y agricultura (huertos caseros).                                    |
| 38 | 2°44'30.6" | 75°15'27.4" | 0  | 0   | 100 | Ganadería y áreas en descanso.   | Ganadería y quemas.   |
| 39 | 2°47'47.2" | 75°14'30.5" | 0  | 100 | 0   | Infraestructura humana (tubería para extracción de agua y presencia de basura).            | Infraestructura humana (fincas recreacionales), ganadería.                    |
| 40 | 2°45'42.0" | 75°14'08.3" | 0  | 0   | 100 | Ganadería e Infraestructura humana (tubos para extracción de agua).                        | Ganadería.  |
| 41 | 2°52'04.4" | 75°13'15.6" | 0  | 100 | 0   | Ganadería y caminos indígenas.   | Ganadería e infraestructura humana (barrios suburbanos, basura).              |
| 42 | 2°53'11.9" | 75°23'05.8" | 60 | 40  | 0   | Infraestructura humana (mangueras para extracción de agua).                                | Ganadería, quemas e infraestructura (molino de caliza) y áreas enrastrajadas. |
| 43 | 2°53'12.7" | 75°23'02.5" | 0  | 0   | 100 | Quemas.  | Ganadería.  |
| 44 | 2°52'57.1" | 75°25'35.6" | 0  | 80  | 20  | Agricultura (huertas caseras con café y maíz).   | Infraestructura humana (zona suburbana).                                      |

|    |            |             |    |     |     |  |   |
|----|------------|-------------|----|-----|-----|--|---|
| 45 | 3°19'06.2" | 75°19'48.1" | 0  | 70  | 30  | Ganadería.   | Ganadería y quemas.   |
| 46 | 3°18'47.6" | 75°18'31.7" | 0  | 0   | 100 | Reforestación fosfatos del Huila. Carretera veredal.                           | Ganadería e infraestructura humana (extracción minerales)                             |
| 47 | 3°35'33.9" | 75°06'54.5" | 0  | 0   | 100 | Ganadería (bebederos), infraestructura humana (tubería de agua).               | Ganadería, infraestructura humana (carretera Natagai-ma-Aipe).                        |
| 48 | 3°34'22.1" | 75°07'34.6" | 0  | 0   | 100 | Ganadería.   | Ganadería y agricultura (arroz), Infraestructura humana (carretera divide la unidad). |
| 49 | 3°32'52.2" | 75°07'36.4" | 0  | 0   | 100 | Ganadería (bebederos).   | Ganadería y agricultura (huertas caseras de plátano y yuca).                          |
| 50 | 3°33'33.1" | 75°06'10.5" | 0  | 20  | 80  | Agricultura (cultivos de pancoger, plátano, mango, naranja, limón), ganadería. | Agricultura (arroz tecnificado).  |
| 51 | 3°39'10.7" | 75°05'19.0" | 0  | 0   | 100 | Ganadería (bebedero).  | Ganadería.  |
| 52 | 3°47'29.1" | 75°15'26.0" | 0  | 0   | 100 | Ganadería, agricultura (plátano).  | Ganadería, agricultura (plátano).   |
| 53 | 3°47'20.1" | 75°15'18.2" | 0  | 0   | 100 | Reserva protectora.  | Ganadería y agricultura (huertas caseros: plátano y yuca).                            |
| 54 | 3°44'27.6" | 75°14'57.8" | 0  | 0   | 100 | Ganadería, infraestructura humana (viviendas y bañadero regional).             | Ganadería y agricultura (huertas caseras: plátano, mango, mamoncillo).                |
| 55 | 3°44'27.6" | 75°14'57.8" | 0  | 70  | 30  | Ganadería y presencia de basura.   | Ganadería e infraestructura humana (carretera).                                       |
| 56 | 3°44'27.6" | 75°14'57.8" | 0  | 70  | 0   | Ganadería.   | Ganadería.  |
| 57 | 3°44'27.6" | 75°14'57.8" |    | 100 |     | Ganadería.   | Minifundios, ganadería.   |
| 58 | 3°44'27.6" | 75°14'57.8" |    | 15  |     |  | Conjuntos vacacionales y parcelaciones.   |
| 59 | 3°44'27.6" | 75°14'57.8" | 80 | 20  |     |  | Ganadería y agricultura en pequeña escala.  |
| 60 | 3°44'27.6" | 75°14'57.8" | 5  | 15  |     | Ganadería.   | Minifundios con potreros y cultivos de maíz.  |
| 61 | 3°44'27.6" | 75°14'57.8" |    | 10  |     | Cultivos de plátano y cítricos.  | Ganadería y agricultura.  |
| 62 | 3°44'05.0" | 74°56'00.5" | 0  | 100 | 0   | Bebedero, extracción de agua.  | Ganadería.  |
| 63 | 3°42'01.0" | 74°57'18.5" | 0  | 30  | 0   | Balneario, basura.   | Ganadería y carretera destapada.  |

|    |            |             |    |     |     |   |  |
|----|------------|-------------|----|-----|-----|---|--|
| 64 | 3°41'38.1" | 74°57'50.6" | 0  | 80  | 20  | Bebedero localizado.  | Ganadería.   |
| 65 | 3°40'19.8" | 74°59'15.0" | 0  | 0   | 100 | Bebederos.  | Huertos caseros. En algunos sectores plátanos y ganadería                        |
| 66 | 3°39'37.9" | 75°00'10.6" | 0  | 40  | 60  | Balneario, extracción de materiales (piedra), extracción de agua.                     | Ganadería.   |
| 67 | 3°39'11.9" | 75°01'30.2" | 0  | 40  | 60  | Bebedero.   | Ganadería.   |
| 68 | 3°33'40.3" | 75°03'53.4" | 0  | 40  | 60  | Bebedero de ganado.   | Ganadería.   |
| 69 | 3°45'16.4" | 74°53'11.5" | 0  | 70  | 30  | No se evidencia.  | Embalse de prado y zona turística.   |
| 70 | 3°49'04.4" | 74°54'57.3" | 0  | 100 | 0   | Basurero y vertedero aguas negras.  | Viviendas y huertas caseras.   |
| 71 | 3°51'23.1" | 74°54'10.7" | 0  | 0   | 100 | Ganadería.  | Ganadería, extracción petrolera, vías.   |
| 72 | 4°50'21.8" | 74°44'23.0" | 0  | 40  | 60  | Tala selectiva, cantera.  | Infraestructura vial, ganadería, extracción material.                            |
| 73 | 4°50'01.8" | 74°38'14.4" | 50 | 40  | 10  | Tala selectiva, caminos.  | Ganadería doméstica, infraestructura vial y doméstica, sísmica, vientos fuertes. |
| 74 | 4°50'01.8" | 74°38'14.4" | 60 | 40  | 0   | Extracción agua (albercas y mangueras).   | Infraestructura vial, agricultura familiar, ganadería familiar.                  |
| 75 | 4°53'22.4" | 74°40'33.1" | 0  | 50  | 50  | Tala carbón vegetal, ganadería, tala selectiva, sísmica.                              | Ganadería, infraestructura vial (trituradora), sísmica y quemas.                 |
| 76 | 4°48'48,7" | 74°43'54.2" | 10 | 90  | 0   | Erosión fuerte ribera del río. Cárcava, caminos, claros por caída natural de árboles. | Ganadería, infraestructura vial, quemas, spp invasoras (doncillo, cuji).         |
| 77 | 4°45'35,7" | 74°44'41.0" | 2  | 18  | 80  | Tala selectiva, pastoreo, cantera.  | Ganadería, infraestructura vial, fumigación agricultura, petrolera (ruido).      |
| 78 | 4°46'18,5" | 74°45'45.5" | 0  | 20  | 80  | Tala selectiva.   | Infraestructura vial, cantera, cacería.  |
| 79 | 4°46'45,0" | 74°45'13.6" | 0  | 20  | 80  | Caminos internos, tala selectiva, ramoneo.  | Infraestructura vial (avenida principal).  |
| 80 | 4°32'07,1" | 74°46'28.1" | 20 | 60  | 20  | Caminos, tala selectiva, ganadería, pequeños cultivos domésticos de maíz.             | Extracción cantera, infraestructura vial, ganadería.                             |

|    |            |             |    |     |    |  |  |
|----|------------|-------------|----|-----|----|--|--|
| 81 | 4°32'57,5" | 74°44'12.8" | 0  | 70  | 30 | Ganadería, extracción de agua, caminos, sismica hace ocho años causó derrumbe en nacedero. | Cultivos domésticos, ganadería, infraestructura vial, extracción material. |
| 82 | 4°32'27,4" | 74°44'04.6" | 10 | 50  | 40 | Caminos y ramoneo.   | Infraestructura vial y vivienda. Agricultura doméstica.                    |
| 83 | 4°36'00,0" | 74°43'20.7" | 0  | 100 | 0  | Ramoneo, cacería, tala selectiva, leña (panela).   | Ganadería, sismica, agricultura familiar (maíz).                           |
| 84 | 4°27'48,5" | 74°47'50.6" | 0  | 20  | 80 | Caminos, cercas, vivienda familia, ramoneo doméstico, erosión media, claros, sp invasoras. | Infraestructura vial, pastos abandonados, vivienda familiar.               |





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

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

### Responsabilidades de los editores

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

### Responsabilidades de los revisores

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

### Responsabilidades de los autores

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

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

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

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

## **Responsabilidad de la Universidad Distrital**

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

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

### *Identificación de los comportamientos no éticos*

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

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

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

### *Investigación*

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

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

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



## INSTRUCCIONES PARA LOS AUTORES

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

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

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

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

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

### Tipos de artículo

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

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

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

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

## Instrucciones para preparación de manuscritos

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

#### Ejemplos:

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

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

#### Ejemplos:

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

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

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

#### Ejemplos:

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

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

#### Ejemplos:

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

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

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

#### Ejemplos:

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

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

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

#### Ejemplo:

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

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

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

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

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

#### Figuras y tablas

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

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

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

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

## Nomenclatura, abreviaturas, siglas y unidades

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

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

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

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

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

## Envío

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

## Información adicional

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

---

## GUIDELINES FOR AUTHORS

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

### Selection and evaluation of manuscripts

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

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

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

### Types of article

Colombia Forestal accepts the following types of article:

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

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

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

### Preparation instructions

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Examples:**

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

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

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

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

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

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

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

*Examples:*

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

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

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

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

*Examples:*

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

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

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

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

*Examples:*

**Suárez, R.L.** (1985). La familia Melastomataceae. En M.R. Téllez and L.J. Torres (eds.). *Los 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. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell and C.A. Johnson (eds.). *Climate Change 2001: The Scientific Basis* (pp. 135-237). United Kingdom-New York: Cambridge University Press.

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

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

*Examples:*

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

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

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

**Example:**

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

**Figures and tables**

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

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

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

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

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

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

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

**Instructions for submitting the document**

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

**Additional information**

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



UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

### Gestión



### Indexación

# Scopus



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

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

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

Colombia Forestal está bajo una licencia CreativeCommons–4.0 Colombia License.



Atribución-Compartir Igual