

BIOTA COLOMBIANA

ISSN impreso 0124-5376
ISSN digital 2539-200X
DOI 10.21068/c001

Volumen 22 · Número 1 · enero - junio de 2021

Paisaje sonoro **neotropical**



Estado de los estudios
en acústica de la fauna
en **Colombia**

Bibliotecas de referencia de murciélagos en Colombia

Soundscape characterization of Braulio Carrillo National Park, Costa Rica

Biophony in a noisy tropical urban forest fragment

Bioacoustic characterization of mating calls of a freshwater fish

Descripción del repertorio vocal del tití cabeciblanco

Monitoreo acústico pasivo en la Reserva Natural Los Yátaros



Biota Colombiana es una revista científica, periódica-semestral, que publica artículos originales y ensayos sobre la biodiversidad de la región neotropical, con énfasis en Colombia y países vecinos, arbitrados mínimo por dos evaluadores externos. Incluye temas relativos a botánica, zoología, ecología, biología, limnología, conservación, manejo de recursos y uso de la biodiversidad. El envío de un manuscrito implica la declaración explícita por parte del (los) autor (es) de que este no ha sido previamente publicado, ni aceptado para su publicación en otra revista u otro órgano de difusión científica. El proceso de arbitraje tiene una duración mínima de tres a cuatro meses a partir de la recepción del artículo por parte de *Biota Colombiana*. Todas las contribuciones son de la entera responsabilidad de sus autores y no del Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, ni de la revista o sus editores.

Biota Colombiana incluye, además, las secciones de Artículos de datos (*Data papers*), Notas y Comentarios, Reseñas y Novedades bibliográficas, donde se pueden hacer actualizaciones o comentarios sobre artículos ya publicados, o bien divulgar información de interés general como la aparición de publicaciones, catálogos o monografías que incluyan algún tema sobre la biodiversidad neotropical.

Biota Colombiana is a biannual, peer-reviewed, scientific journal. The journal publishes original articles and essays about biodiversity in the Neotropics, with emphasis on Colombia and neighboring countries. It includes topics related to botany, zoology, ecology, biology, limnology, conservation, natural resources management and use of biological diversity. The submission of a manuscript implies the authors' explicit statement that the paper has not been published before nor accepted for publication in another journal or other means of scientific diffusion. Contributions are entire responsibility of the authors and not the Research Institute of Biological Resources Alexander von Humboldt, or the journal and their editors.

Biota Colombiana also includes Data Papers, Notes and Comments, Reviews and Bibliographic News, where already published content may be commented or updated and information of general interest such as recent publications, catalogues or monographs that involve topics related with Neotropical biodiversity may be presented.

Biota Colombiana actualmente se encuentra indexada en Scopus, Redalyc, Latindex, Biosis: Zoological Record, Ulrich's, Ebsco, DOAJ y SciELO.

Biota Colombiana is currently indexed in Scopus, Redalyc, Latindex, Biosis: Zoological Record, Ulrich's, Ebsco, DOAJ and SciELO.

Contáctenos para mayor información. / For further information please contact us.

revistas.humboldt.org.co
biotacol@humboldt.org.co
www.sibcolombia.net

Comité Directivo / Steering Committee

Hernando García	Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt
M. Gonzalo Andrade	Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia
Francisco A. Arias Isaza	Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras "José Benito Vives De Andrés" - Invemar
Charlotte Taylor	Missouri Botanical Garden

Editor / Editor

Rodrigo Bernal	Independiente
----------------	---------------

Editor de artículos de datos / Data papers Editor

Dairo Escobar	Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt
---------------	--

Gestor editorial / Editorial manager

Camilo Angulo	Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt
---------------	--

Comité Científico - Editorial / Editorial Board

Adriana Prieto C.	Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia
Ángela Cano	Cambridge University Botanical Garden, Inglaterra
Arturo Acero	Universidad Nacional de Colombia, sede Caribe, Colombia
Blanca Huertas	Natural History Museum, Inglaterra
Carlos Lasso	Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Colombia
Carmen Ulloa	Missouri Botanical Garden, Estados Unidos
Dimitri Forero	Pontificia Universidad Javeriana, Colombia
Donald Taphorn	Universidad Nacional Experimental de los Llanos, Venezuela
Fernando Vargas	Universidad del Quindío, Colombia
Francisco de Paula Gutiérrez	Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Colombia
Francisco Pando	Real Jardín Botánico, Madrid, España
Gabriel Roldán	Universidad Católica de Oriente, Colombia
Germán I. Andrade	Universidad de los Andes, Colombia
Germán Forero-Medina	WCS Colombia
Giuseppe Colonnello	Fundación La Salle de Ciencias Naturales, Venezuela
Hugo Mantilla Meluk	Universidad del Quindío, Colombia
José Murillo	Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia
Juan Armando Sánchez	Universidad de los Andes, Colombia
Juan José Neiff	Centro de Ecología Aplicada del Litoral, Argentina
Néstor García	Pontificia Universidad Javeriana, Colombia
Óscar Laverde	Pontificia Universidad Javeriana, Colombia
Pablo Tedesco	Muséum National d'Histoire Naturelle, Francia
Sergio Solari	Universidad de Antioquia, Colombia
Víctor Hugo García-Merchán	Universidad del Quindío, Colombia

Comité editorial edición Paisaje sonoro neotropical

Claudia Isaza	Universidad de Antioquia, Colombia
Daniela Martínez Medina	Fundación Reserva Natural La Palmita, Centro de Investigación, Colombia
Juan Sebastián Ulloa	Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Colombia
Miguel E. Rodríguez Posada	Fundación Reserva Natural La Palmita, Centro de Investigación, Colombia
Susana Rodríguez Buriticá	Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Colombia

Foto de portada *Pteronotus rubiginosus* cazando en el interior de la selva amazónica. Oriol Massana & Adrià López-Baucells (Brasil 2013).

Diseño y diagramación Impactos Comunicaciones

Editorial

Hace casi 60 años, la bióloga estadounidense Rachel Carson hizo notar, en su histórico libro *Primavera Silenciosa*, que en muchas áreas de Estados Unidos la primavera no llegaba ya acompañada por el canto de los pájaros, erradicados ahora de muchas zonas por el uso intensivo de los pesticidas. El libro de Carson tuvo un tremendo impacto, especialmente en su país, y se lo ha considerado uno de los detonantes de gran parte del movimiento ambientalista mundial. Fue la primera vez que los sonidos de la naturaleza fueron asociados al estado de salud de los ecosistemas.

Las dos décadas pasadas han visto un incremento acelerado en el estudio de los sonidos de la naturaleza, gracias a la disponibilidad, cada vez mayor, de equipos de grabación, herramientas de almacenamiento y análisis de datos, y al desarrollo de un sólido marco teórico que crece día a día. Desde la bioacústica, enfocada en el estudio de los sonidos producidos por las especies, hasta la ecología del paisaje sonoro, como una rama de la ecología del paisaje, los estudios de los sonidos de la naturaleza son cada día una herramienta más útil para entender los ecosistemas y las especies que los conforman.

Por más de veinte años, el Instituto Alexander von Humboldt ha mantenido y enriquecido la Colección de Sonidos Ambientales, que alberga ahora más de 22 000 grabaciones de audio, registradas en todos los rincones de Colombia, y las cuales son una parte fundamental del patrimonio nacional. Alrededor de esta colección y del creciente interés mundial en estudiar los sonidos de la naturaleza, surgió recientemente la Red Ecoacústica de Colombia, que reúne a investigadores de numerosas instituciones.

La Red y el Instituto han querido poner esta disciplina en primer orden en la agenda biológica colombiana, dedicando un número especial de *Biota Colombiana* a la ecoacústica. Incluimos en este número 13 artículos, que van desde una visión global de las investigaciones en acústica de la fauna y estudios específicos de los llamados sonoros de varias especies, hasta análisis del paisaje sonoro en diversos ambientes, tanto naturales como urbanos.

Agradecemos a los miembros del Comité Editorial especial que se conformó para la producción de este número, Claudia Victoria Isaza Narváez, Daniela Martínez Medina, Miguel E. Rodríguez-Posada, Susana Rodríguez Buriticá y Juan Sebastián Ulloa, por su apoyo en el procesamiento de los manuscritos recibidos. Igualmente, agradecemos a los numerosos evaluadores de 11 países que ayudaron a seleccionar y mejorar los artículos que conforman este número.

Rodrigo Bernal
Editor

Tooting the Latin American horn: advances in the scholarship of ecoacoustics and soundscape ecology is occurring with vigor

Bryan C. Pijanowski  , Susana Rodríguez-Buriticá  , Juan Sebastian Ulloa  

Keywords

Soundscape ecology, bioacoustics, ecoacoustics, conservation biology, animal communication

Background

Soundscape ecology (Pijanowski *et al.*, 2011a, b; Pijanowski & Farina, 2011), ecoacoustics (Sueur & Farina, 2015) and bioacoustics (Laiolo, 2010; Aide *et al.*, 2013) have witnessed an explosion of work over the last decade due to the advances in passive acoustic recorders, new conceptual frameworks that integrate the study of sound into environmental change research, abilities to store and analyze massive data, and the growing need to understand how the rapid declines in species richness and abundances can be addressed with intervention policies at the landscape level. Also of note are the tremendous contributions to these acoustic-based fields of research that are occurring from all across the global academy, with advances being made by researchers working in just about every continent and country. The contributions from Latin America are impressive and play an important and unique role in our understanding of how a variety of sound sources – from biological organisms (i.e., the biophonies), to the geophysical world (i.e., geophonies) and those from humans (i.e., anthrophonies or technophonies) – are used to assess how important Latin American ecosystems are being altered. The purpose of this paper is to provide a summary of the multi-faceted work being conducted in Latin America as represented in the exceptional papers of this special issue on ecoacoustics and soundscape ecology, placing these in the context of the growing scholarship in these acoustics-based areas of study.

Summary and synthesis of the special issue

There are 13 papers in this special issue on a variety of topics related to the use of sound to study the

environment in Latin America. Over fifty co-authorship contributions speak to the nature of the highly collaborative work being conducted here. Few papers are from single institutions which also underscores the commitment that researchers in Latin America are making to work across traditional institutional barriers. Several co-authors are also from outside Latin America and many of the papers involve collaborations across academia and the not-for-profit community. Although mostly representing scholars from Colombia, those from Venezuela, Costa Rica and Brazil have made contributions as well. Within this special issue are articles that focus on methodological approaches (3), life history and bioacoustics (4), soundscape ecology (5) as well as one review paper that assesses the current status of work across Latin America using a literature review as its basis of assessment.

As is the case with any new field of discovery, methodological advances are needed to address important problems. Hoyos-Cardona *et al.* (2021) explored the use of some automated call detection techniques that identify the Choco's owl from over 6800 recordings by modifying several *autodetect* parameters in the popular *warlbeR* package (Araya-Salas & Smith-Vidaurre, 2017). They found that overall performance of the tools to identify owl calls was poor, which highlights the challenges the field of bioacoustics and soundscape ecology experience with recognizing species-specific animal signals in audio recordings. Cifuentes *et al.* (2021) tested how the length of a recording might influence the values of a variety of acoustic indices. They varied the length of audio recordings from short to long and found that short recordings provide adequate information to calculate an index, thus providing researchers with the ability to leave recorders for long periods of time in the field

without having to retrieve data and refresh batteries. The paper by [Martinez-Medina *et al.* \(2021a\)](#) focuses on describing the key features of bat echolocation recordings that would support a standardized library that could be used all across Colombia. This paper represents a first step toward creating a standardized library of bat echolocation signals to be shared throughout Colombia and, potentially, all of Latin America.

Four papers in this special issue focused on the use of sound to understand the life histories of animals. The work of [Guaitarilla *et al.* \(2021\)](#) focuses on the variety of calls (vigilance, alertness, territorial defense and courtship) and their acoustic structure as it is related to important behaviors. They were able to show that for sympatric species from the genus *Cacicus*, the call structures were similar. This research confirms that animal communication forms important social interactions which can be used as part of any acoustic monitoring program or study of their behavioral systems as it relates to their reproductive success. Amphibians are some of the planet's most threatened group of animals with declines being assessed across all major groups as climate change and disease are reducing abundances in tropical and temperate ecosystems ([Stuart *et al.*, 2004](#)). The work of [Rojas-Morales *et al.* \(2021\)](#) focuses on an interesting species complex of nurse frog and mechanisms that prevent hybridization through acoustic partitioning. As many studies on the topic on acoustic partitioning have occurred in frogs over the years, this study dives both into the life history, genetics, physiology as well as mate attraction calls. Call confusion could result in creating sterile hybrids; thus, natural selection should favor greater call discrimination between closely related species. This work underscores not only the importance of understanding the mechanisms underlying reproduction in amphibians but also the need to integrate the study of animal communication with other dimensions of the life history of a species, including those involving phylogenetics, behavior, and morphophysiology. With fisheries around the world being pushed to critical tipping points, the work of [Muñoz-Duque *et al.* \(2021\)](#) makes important advances in our understanding of the role that acoustic communication plays in the breeding success of a freshwater fish that has economic importance to Colombia but is also considered a threatened species. The fourth methodological paper by [Paulo-Morelo & Sánchez-Palomino \(2021\)](#) dives into the complex vocal repertoire of the endangered Cotton-top tamarin monkeys, *Saguinus oedipus*. This monkey has been a common target species for understanding the role of human speech perception development and how

learning of language at a young age is generalizable across the primate auditory system ([Ramus *et al.*, 2000](#), [Cleveland & Snowdon 1982, 1984](#)). Regrettably, much is not known of their wild calls and how these are related to behavioral traits. Using several phonetic acoustic metrics, they were able to identify 11 phonetic groups that were then associated with a variety of behaviors. New phonetic signals increased the known language phonetic library by 25%; thus underscoring the need to understand animal communication in the wild.

Papers that focus on soundscape ecology and ecoacoustics form the majority of the papers in this special issue. The work of [Gonçalves-Santos *et al.* \(2021\)](#) examines the role that road noise, a form of anthropophony/technophony, plays in masking animal communication in forested ecosystems. As noise continues to permeate every place on the planet – terrestrial and aquatic systems – a better understanding of how animals adjust to this new “acoustic pollution” is needed. The research presented in the [Gonçalves-Santos *et al.* \(2021\)](#) paper adds to our understanding of noise propagation into forests as these researchers were able to demonstrate that power spectral density levels and measures of acoustic complexity using the Acoustic Complexity Index (ACI) were greatest at the edge of a forest compared to its interior, results that could be linked to behavioral responses of species that communicate in noisy areas. In the only study from Costa Rica in this special issue, the work by [Retamosa Izaguirre *et al.* \(2021\)](#) extends their strong existing work in soundscape ecology in Costa Rica ([Retamosa Izaguirre & Ramírez-Alán, 2018](#)) by studying the impacts of vegetation structural complexity, species richness, road noise and acoustic complexity and composition. Examining two different tropical landscapes in a National Park in Costa Rica, the researchers were able to provide an excellent example of how noise is affecting animal communication in a negative way but they also found that understanding the interactions of multiple geographic and environmental factors (e.g., location, noise, diversity of vegetation) on species richness requires a species by species understanding of stressor-response relationships. Soundscape ecological research requires a rigorous experimental design that addresses critical research questions with analytical approaches yielding clear conclusions. The paper by [Tovar-García & Acevedo-Charry \(2021\)](#) exemplifies the need of such network design, addressing questions related to the use of acoustics to understand the spatial-temporal patterns of biodiversity in a private natural reserve in the Colombian Andes. The paper also emphasizes the need to have proper data curation and

the publication of raw, original data for use by other scientists in the field. The paper by [Morales-Rozo *et al.* \(2021\)](#) examines important landscapes of Colombia that contribute to food production. Silvopastoral and traditional pastoral landscapes of the Eastern Cordillera foothills provide critical ecosystem services to locals. The silvopastoralist and traditional pastoralist landscapes support cattle ranches. By using a geographic information system where they calculated distance to roads and rivers, they were able to show how the soundscape is influenced by a variety of landscape features that are both anthropogenic and natural. They argue that their study provides a baseline from which to study the relationships between agricultural landscapes and the ecosystem services that are tied to soundscapes. The study by [Hernández-Leal *et al.* \(2021\)](#) addresses the space use by insectivorous bats in three types of ranching landscapes. They found no difference in species composition between the silvopastoralist system and the conventional livestock management landscapes. However, the conventional livestock system had a slightly greater species richness. This study does highlight the important role that acoustics can play in assessing the interaction of landscapes, patterns of species presence and overall biodiversity.

One of the highlights of this special issue was the extensive review by a large cadre of researchers who assessed the status, development and trends in wildlife acoustics studies in Colombia. [Martínez-Medina *et al.* \(2021b\)](#) conducted a literature review of the peer-reviewed papers, theses and conference presentations, involving research conducted in Colombia on the topic of bioacoustics, ecoacoustics and soundscape ecology over a thirty-year period (1990 to 2020). They found that 321 papers were published of which 36.6% were on birds, 35% on amphibians and the rest were on other sound producing animals (insects, fish, reptiles, and mammals). They also classified each of the papers into categories of research and determined that the most common type of paper was descriptive. Much of the work that they found was conducted by undergraduate students at Colombian universities and there has been a noticeable uptick in research productivity in this area in Colombia over the last 10 years. Several gaps that they identified included the low numbers of papers on insects, and few studies in the Amazonian region of Colombia. They concluded that much of the work that is being conducted has significant application for conservation as the information from these studies helps to understand population and community dynamics at landscape scales.

Concluding remarks

With only 13 papers in this special issue, it is clear that the current status of work in acoustics-based fields of ecology is vigorous and the future is bright. There are efforts in all dimensions to these fields, from methods, data science, applications and networking. Latin America contains some of the most important biodiversity hotspots, has tremendous cultural diversity and the ability to conduct highly technical work is very evident from these papers. Collaboration is extensive and the numerous institutions involved in this work is impressive. Latin America, and especially the work in Colombia, represents one of the “hotspots” of scholarship.

Acknowledgements

This work was partially supported by the USDA NIFA program, Accession Number 233843 and Purdue University. Comments on drafts of this paper were made by K. Bellisario, F. Rivas and D. Savage.

References

- Aide, T. M., Corrada-Bravo, C., Campos-Cerqueira, M., Milan, C., Vega, G. & Alvarez, R. (2013). Real-time bioacoustics monitoring and automated species identification. *PeerJ*, 1, e103.
<https://doi.org/10.7717/peerj.103>
- Araya-Salas, M. & Smith-Vidaurre, G. (2017). warbleR: an R package to streamline analysis of animal acoustic signals. *Methods in Ecology and Evolution*, 8(2), 184-191.
<https://doi.org/10.1111/2041-210X.12624>
- Cifuentes, E. Vélez-Gómez, J. & Butler, S.J. (2021). Relationship between acoustic indices, length of recordings and processing time: a methodological test. *Biota Colombiana*, 22(1), 26-35.
<https://doi.org/10.21068/c2021.v22n01a02>
- Cleveland, J. & Snowdon, C. T. (1982). The Complex Vocal Repertoire of the Adult Cotton-top Tamarin (*Saguinus oedipus oedipus*) 1. *Zeitschrift für Tierpsychologie*, 58(3), 231-270.
<https://doi.org/10.1111/j.1439-0310.1982.tb00320.x>
- Cleveland, J. & Snowdon, C. T. (1984). Social development during the first twenty weeks in the cotton-top tamarin (*Saguinus o. oedipus*). *Animal Behaviour*, 32(2), 432-444.
- Gonçalves-Santos, S. Pieretti, N., Young, R.J. & Duarte, M. (2021). Biophony in a noisy tropical urban forest fragment. *Biota Colombiana*, 22(1), 15-26.
<https://doi.org/10.21068/c2021.v22n01a06>
- Guaitarilla, D.A., Ortiz-Pérez, J.P., Calderón-Leytón, J.J., Gómez-Martínez, M.A., Trujillo-Torres, C.M. &

- Fernández, R.A. (2021). Vocalizaciones asociadas al comportamiento colonial de *Cacicus chrysonotus leucoramphus* (Icteridae) en Colombia. *Biota Colombiana*, 22(1), 134-149.
<https://doi.org/10.21068/c2021.v22n01a09>
- Hernández-Leal, O.F., Sánchez, F. & Lizcano, D. (2021). Murciélagos insectívoros aéreos en un paisaje ganadero del piedemonte llanero colombiano. *Biota Colombiana*, 22(1), 164-183.
<https://doi.org/10.21068/c2021.v22n01a11>
- Hoyos-Cardona, L.A., Ulloa, J.S. & Parra-Vergara, J.L. (2021). Detección automatizada de cantos de aves continúa siendo un desafío: el caso de warbleR y *Megascops centralis* (búho del Chocó). *Biota Colombiana*, 22(1), 150-164.
<https://doi.org/10.21068/c2021.v22n01a10>
- Laiolo, P. (2010). The emerging significance of bioacoustics in animal species conservation. *Biological conservation*, 143(7), 1635-1645.
<https://doi.org/10.1016/j.biocon.2010.03.025>
- Martínez-Medina, D., Sánchez, J., Zurc, D., Sánchez, F., Otálora-Ardila, A., Restrepo-Giraldo, C., Acevedo-Charry, O., Hernández-Leal, F. & Lizcano, D. (2021a). Estándares para registrar señales de ecolocalización y construir bibliotecas de referencia de murciélagos en Colombia. *Biota Colombiana*, 22(1), 36-56.
<https://doi.org/10.21068/c2021.v22n01a03>
- Martínez-Medina, D., Acevedo-Charry, O., Medellín-Becerra, S., Rodríguez-Fuentes, J., López-Casas, S., Muñoz-Duque, S., Rivera-Correa, M., López-Aguirre, Y., Vargas-Salinas, F., Laverde-R, O. & Rodríguez-Posada, M. (2021b). Estado, desarrollo y tendencias de los estudios en acústica de la fauna en Colombia. *Biota Colombiana*, 22(1), 7-25.
<https://doi.org/10.21068/c2021.v22n01a01>
- Morales-Rozo, A., Lizcano, D., Montoya-Arango, S., Velásquez-Suarez, A., Álvarez-Daza, E. & Acevedo-Charry, O. (2021). Diferencias en paisajes sonoros de sistemas silvopastoriles y potreros tradicionales del piedemonte llanero, Meta, Colombia. *Biota Colombiana*, 22(1), 74-95.
<https://doi.org/10.21068/c2021.v22n01a05>
- Muñoz-Duque, S.E., López-Casas, S. Rivera-Gutiérrez, H. & Jiménez-Segura, L.F. (2021). Bioacoustic characterization of mating calls of a freshwater fish (*Prochilodus magdalenae*) for passive acoustic monitoring. *Biota Colombiana*, 22(1), 108-122.
<https://doi.org/10.21068/c2021.v22n01a07>
- Paulo-Morelo, M. & Sánchez-Palomino, P. (2021). Descripción de las unidades fonéticas y sintaxis fonológica del repertorio vocal del tití cabeciblancito (*Saguinus oedipus*) silvestre. *Biota Colombiana*, 22(1), 184-199.
<https://doi.org/10.21068/c2021.v22n01a12>
- Pijanowski, B. C. & Farina, A. (2011). Introduction to the special issue on soundscape ecology. *Landscape Ecology*, 26(9), 1209-1212.
<https://doi.org/10.1007/s10980-011-9655-6>
- Pijanowski, B. C., Farina, A., Gage, S. H., Dumyahn, S. L. & Krause, B. L. (2011). What is soundscape ecology? An introduction and overview of an emerging new science. *Landscape ecology*, 26(9), 1213-1232.
<https://doi.org/10.1007/s10980-011-9600-8>
- Pijanowski, B. C., Villanueva-Rivera, L. J., Dumyahn, S. L., Farina, A., Krause, B. L., Napoletano, B. M. & Pieretti, N. (2011). Soundscape ecology: the science of sound in the landscape. *BioScience*, 61(3), 203-216.
<https://doi.org/10.1525/bio.2011.61.3.6>
- Ramus, F., Hauser, M. D., Miller, C., Morris, D. & Mehler, J. (2000). Language discrimination by human newborns and by cotton-top tamarin monkeys. *Science*, 288(5464), 349-351.
<https://doi.org/10.1126/science.288.5464.349>
- Retamosa Izaguirre, M. I. & Ramírez-Alán, O. (2018). Acoustic indices applied to biodiversity monitoring in a Costa Rica dry tropical forest. *JEA*, 2(1), 1-1.
<https://doi.org/10.22261/jea.tnw2np>
- Retamosa-Izaguirre, M.I., Segura-Sequeira-D., Barrantes-Madrigal, J. Spínola-Parallada, M. & Ramírez-Alán, O. (2021). Vegetation, bird and soundscape characterization: a case study in Braulio Carrillo National Park, Costa Rica. *Biota Colombiana*, 22(1), 57-73.
<https://doi.org/10.21068/c2021.v22n01a04>
- Rojas-Morales, J.A., La Marca, E. & Ramírez-Chaves, H.E. (2021). Advertisement call of a population of the nurse frog *Leucostethus fraterdanieli* (Anura: Dendrobatidae), with notes on its natural history. *Biota Colombiana*, 22(1), 132-133.
<https://doi.org/10.21068/c2021.v22n01a08>
- Stuart, S. N., Chanson, J. S., Cox, N. A., Young, B. E., Rodrigues, A. S., Fischman, D. L. & Waller, R. W. (2004). Status and trends of amphibian declines and extinctions worldwide. *Science*, 306(5702), 1783-1786.
<https://doi.org/10.1126/science.1103538>
- Sueur, J. & Farina, A. (2015). Ecoacoustics: The Ecological Investigation and Interpretation of Environmental Sound. *Biosemiotics*, 8(3), 493-502.
<https://doi.org/10.1007/s12304-015-9248-x>
- Tovar-García, J.D. & Acevedo-Charry, O. (2021). Conjunto de datos de monitoreo acústico pasivo en la Reserva Natural Los Yátaros, Gachantivá, Boyacá, Colombia. *Biota Colombiana*, 22(1), 200-208.
<https://doi.org/10.21068/c2021.v22n01a13>

Bryan C. Pijanowski

Center for Global Soundscapes and Department of Forestry
and Natural Resources, Purdue University, West Lafayette,
Indiana, USA

bpijanow@purdue.edu

<https://orcid.org/0000-0002-7089-1959>

Susana Rodríguez-Buriticá

Instituto de Investigación de Recursos Biológicos
Alexander von Humboldt, Avenida Paseo Bolívar 16-20,
Bogotá, Colombia

drodriguez@humboldt.org.co

<https://orcid.org/0000-0001-8175-1057>

Juan Sebastian Ulloa























Instituto de Investigación de Recursos Biológicos
Alexander von Humboldt, Avenida Paseo Bolívar 16-20,
Bogotá, Colombia

julloa@humboldt.org.co

<https://orcid.org/0000-0001-5666-6942>

Estado, desarrollo y tendencias de los estudios en acústica de la fauna en Colombia

Status, development and trends of studies in fauna acoustics in Colombia

Daniela Martínez-Medina  , Orlando Acevedo-Charry  , Sofía Medellín-Becerra  ,
Juliana Rodríguez-Fuentes  , Silvia López-Casas  , Sebastián Muñoz-Duque  , Mauricio
Rivera-Correa  , Yelenny López-Aguirre  , Fernando Vargas-Salinas  ,
Oscar Laverde-R.  , Miguel E. Rodríguez-Posada  

Resumen

Las señales acústicas son una de las formas de comunicación más importante en la fauna, incluso en la ubicación espacial de los individuos y sus presas. El estudio de las señales acústicas fortalece los campos de investigación en ecología, comportamiento, identificación taxonómica, uso de hábitat e incluso el efecto de las actividades humanas sobre diferentes especies animales. Además, es una herramienta para la cuantificación y monitoreo de la biodiversidad. En este trabajo presentamos un análisis de los estudios basados en bioacústica que se han desarrollado en Colombia, con el fin de establecer una línea base e identificar vacíos en el conocimiento, sus fortalezas y debilidades, para discutir los retos futuros para el desarrollo de la investigación sobre bioacústica en el país. Nuestra búsqueda de información se concentró en publicaciones de tipo científico, trabajos de grado y presentaciones en conferencias, a partir de plataformas de datos electrónicos, usando diferentes palabras claves. En total obtuvimos 321 trabajos, en los que los grupos taxonómicos más estudiados fueron las aves (36.4%) y los anfibios (35%). La mayoría de los trabajos se concentran en la región Andina (63%). La bioacústica es un campo con un creciente interés y, por ende, resulta necesario el trabajo colaborativo y multidisciplinario, la consolidación en las metodologías y el fortalecimiento y enriquecimiento de las colecciones de sonidos del país.

Palabras clave. Bioacústica. Comunicación. Ecoacústica. Sonido. Vocalización.

Abstract

Acoustic signals are one of the most important ways of communication for fauna. The study of acoustic signals constitutes a valuable tool to obtain information on ecology, behavior, taxonomic identification, and the effect of human activities in natural environments and different animal species. Furthermore, it offers the possibility of quantifying and monitoring biodiversity in different Colombian ecosystems. In this work, we present an analysis of the research on bioacoustics that have been developed in Colombia, to establish a baseline, identify gaps in knowledge, strengths, weaknesses and discuss future challenges for bioacoustics research in Colombia. We searched information on scientific publications, degree papers, and electronic database conference presentations, using different keywords. We obtained 321 results; studies using acoustic tools are much more common in birds (36.4%) and amphibians (35%) than in any other taxonomic group, and there is a bias towards studying bioacoustics in the Andean region. However, this is a field with growing interest, and, therefore, there is a need for collaborative and multidisciplinary work, a consensus on methodologies, along with the strengthening and enrichment of the country's sound collections.

Key words. Bioacoustics. Communication. Ecoacoustics. Sound. Vocalization.

Introducción

Las señales acústicas han evolucionado en diversos grupos de animales, en los que cumplen diferentes funciones, como defender el territorio, alertar sobre la presencia de depredadores, mantener la cohesión de los grupos mixtos, atraer la atención de una posible pareja, e incluso localizar a los individuos y detectar a las presas (Bradbury & Veherencamp, 2011). La bioacústica es una disciplina que estudia la emisión de sonido por parte de los organismos, su difusión a través de un medio elástico y, finalmente, su recepción y los eventuales cambios en el comportamiento del receptor, dada la información contenida. En general, las señales acústicas emitidas por animales dan información sobre su presencia en un lugar y tiempo determinado (Sousa-Lima *et al.*, 2013), lo que permite que los monitoreos acústicos puedan ser una herramienta útil para estudiar la biodiversidad en diferentes escalas y a través del tiempo (Pijanowski *et al.*, 2011; Aide *et al.*, 2013; Deichmann *et al.*, 2018).

Los monitoreos acústicos permiten responder a una gran variedad de preguntas ecológicas, ya que se puede tomar una gran cantidad de datos. Esto permite entender las respuestas de las especies ante la degradación de los hábitats, y de esta manera se pueden implementar medidas de manejo o conservación (Sethi *et al.*, 2020). Recientemente, este campo ha tenido un crecimiento constante, debido al avance en las tecnologías de grabación de audio y la capacidad de análisis de las señales acústicas. En Colombia hay un creciente interés por el uso de la acústica para responder preguntas relacionadas con la taxonomía, sistemática, ecología, evolución y conservación. No obstante, el conocimiento sobre las interacciones acústicas de las especies en los ecosistemas colombianos está en una etapa temprana de desarrollo. En este trabajo, presentamos un diagnóstico general sobre el estado de la investigación de estudios en acústica en Colombia, con el fin de analizar sus aplicaciones actuales y potenciales en el conocimiento y monitoreo de la biodiversidad.

Materiales y métodos.

Revisamos información publicada sobre estudios de bioacústica para seis grupos taxonómicos: insectos, peces, anfibios, reptiles, aves y mamíferos. Esta recopilación estuvo centrada en investigaciones que respondan preguntas relacionadas con el estudio de acústica y publicaciones que usan herramientas acústicas para

responder preguntas ecológicas, comportamentales, evolutivas, entre otras. Para ello, realizamos una búsqueda Booleana de literatura primaria (artículos), secundaria (libros y capítulos de libros), literatura primaria en proceso de revisión, pero disponible en repositorios abiertos (Preprint) y literatura gris (trabajos de grado y conferencias) que fueran citados en Google Scholar y ResearchGate desde 1990 hasta junio del 2020. Realizamos la búsqueda usando las siguientes palabras clave para todos los grupos: "Bioacústica", "sonido", "Colombia" y palabras específicas para cada grupo (Tabla 1), usando la conjunción "AND". Realizamos la búsqueda en inglés y en español, excluyendo fuentes como informes técnicos y páginas web. Para nuestro análisis, construimos matrices de frecuencia con el fin de ver la tendencia temporal, la región del país en el que se desarrolló el trabajo, el tipo de literatura y la tendencia temática para cada uno de los seis grupos mencionados. Para esto último, seleccionamos en total 12 temáticas (Tabla 1) y catalogamos cada una de las publicaciones de acuerdo a las temáticas tratadas.

Resultados

Nuestra revisión arrojó 321 publicaciones. Los grupos taxonómicos con mayor número de estudios en Colombia fueron aves (36.6%) y anfibios (35%), seguidos de mamíferos (17%), insectos (10%), reptiles (1%) y peces (0.6%). En cuanto a la tendencia temporal, antes del año 2000 las publicaciones son relativamente escasas, y a partir del año 2010 se evidencia un notable incremento en el número de publicaciones en casi todos los grupos (Figura 1). El porcentaje de literatura gris es alto en comparación con la literatura primaria en varios grupos (ej. aves, anfibios y mamíferos, Figura 2); la temática más publicada es el uso de acústica para contribuir a la descripción y delimitación de nuevas especies (Figura 2). Además, la región Andina, con el 63%, presentó un mayor número de publicaciones

Insectos. La investigación en acústica de insectos en Colombia es muy limitada. Encontramos 31 resultados, de los cuales 28 son artículos publicados y tres son tesis universitarias (Figura 2A). De esas tesis, dos son de pregrado y una es de doctorado. De los 31 trabajos, 25 están enfocados en el orden Orthoptera, tres Diptera, uno en Homoptera y uno en el orden Coleoptera. Estas publicaciones tratan temas de descripción de caracteres acústicos y descripción de especies usando caracteres de las señales acústicas y biomecánicas (Figura 2B). La mayoría de los trabajos publicados sobre el orden

Tabla 1. Palabras clave utilizadas en la búsqueda de publicaciones sobre bioacústica, por grupo taxonómico. En la parte inferior se enumeran las temáticas encontradas.

Table 1. Keywords used in the search for publications on bioacoustics, by taxonomic group. The topics are listed below.

Grupo	Palabras Clave
Insectos	Acústica, comunicación acústica, insectos, Orthoptera, Diptera, Hemiptera, Coleoptera
Peces	Peces, peces agua dulce, peces marinos, sonidos peces, monitoreo acústico pasivo, peces soníferos
Anfibios	Acústica, vocalizaciones, cantos de anuncio, llamados de advertencia, comunicación de anuros
Reptiles	Acústica, vocalizaciones, cloqueo, sonajero, traqueteo, bramido, pujido, chirridos
Aves	Vocalizaciones, aves, acústica, cantos
Mamíferos	Acústica, vocalizaciones, mamíferos, señales acústicas, ecolocalización, Didelphimorphia, Primates, Cetácea, Carnívora, Chiroptera, Artiodactyla, Perissodactyla, Sirenia y Rodentia

Temáticas:

- 1. Descripción/delimitación:** Descripción acústica de especies o delimitación taxonómica de especies.
- 2. Paisaje sonoro:** Suma de todos los sonidos de un lugar en un momento en particular.
- 3. Trabajos de revisión:** Trabajos de revisión en bioacústica.
- 4. Inventarios:** Acústica como herramienta para inventarios de especies.
- 5. Ecología:** Estudios en ecología con uso de herramientas acústicas.
- 6. Conservación:** Estudios en conservación con uso de herramientas acústicas.
- 7. Comportamiento:** Estudios en comportamiento con descripciones acústicas o uso de herramientas acústicas.
- 8. Evolución:** Estudios evolutivos en acústica.
- 9. Divulgación:** Obras de divulgación de sonidos.
- 10. Biomecánica:** Anatomía y producción sonora.
- 11. Control plagas/vectores:** Manejo de vectores o control de plagas a través de herramientas acústicas.
- 12. Informática:** Desarrollos informáticos para bioacústica y ecoacústica.

Orthoptera tienen tasas de muestreo por encima de los 100 kHz, debido a que algunas de las familias de este orden se comunican en frecuencias ultrasónicas. Desde 2015 hasta 2020 ha aumentado el número de publicaciones en bioacústica de insectos para Colombia (Figura 1). Las temáticas de los artículos fueron, en su mayoría, biomecánica de las alas de ortópteros, ya que las especies de este grupo producen sonidos mediante estridulación. La segunda temática corresponde a descripciones de caracteres acústicos, tanto para describir una especie nueva como para el estudio de su comportamiento, estudios de ecología, biogeografía y el uso de índices de diversidad acústica (Figura 2A). La región Pacífico presentó el mayor número de trabajos, principalmente en el Parque Nacional Natural Gorgona (Cauca) y en el departamento del Valle del Cauca.

Peces. Los resultados de nuestra búsqueda arrojaron dos publicaciones. De los trabajos encontrados, el primero, corresponde a un trabajo de grado (Muñoz-Duque, 2019), en el que se caracterizan los sonidos emitidos por *Prochilodus magdalenae* en los departamentos de Antioquia, Córdoba y Santander, y *Megaleporinus muyscorum* en el departamento de Antioquia.

El segundo trabajo corresponde a un artículo publicado (Ospina-L. *et al.*, 2020), en el cual los autores revisaron y compilaron los registros acústicos de aves, anuros, mamíferos y peces disponibles para el departamento de Santander. Los registros de las dos especies de peces incluidas, corresponden a emisiones de descargas de los órganos eléctricos de peces del orden Gymnotiformes.

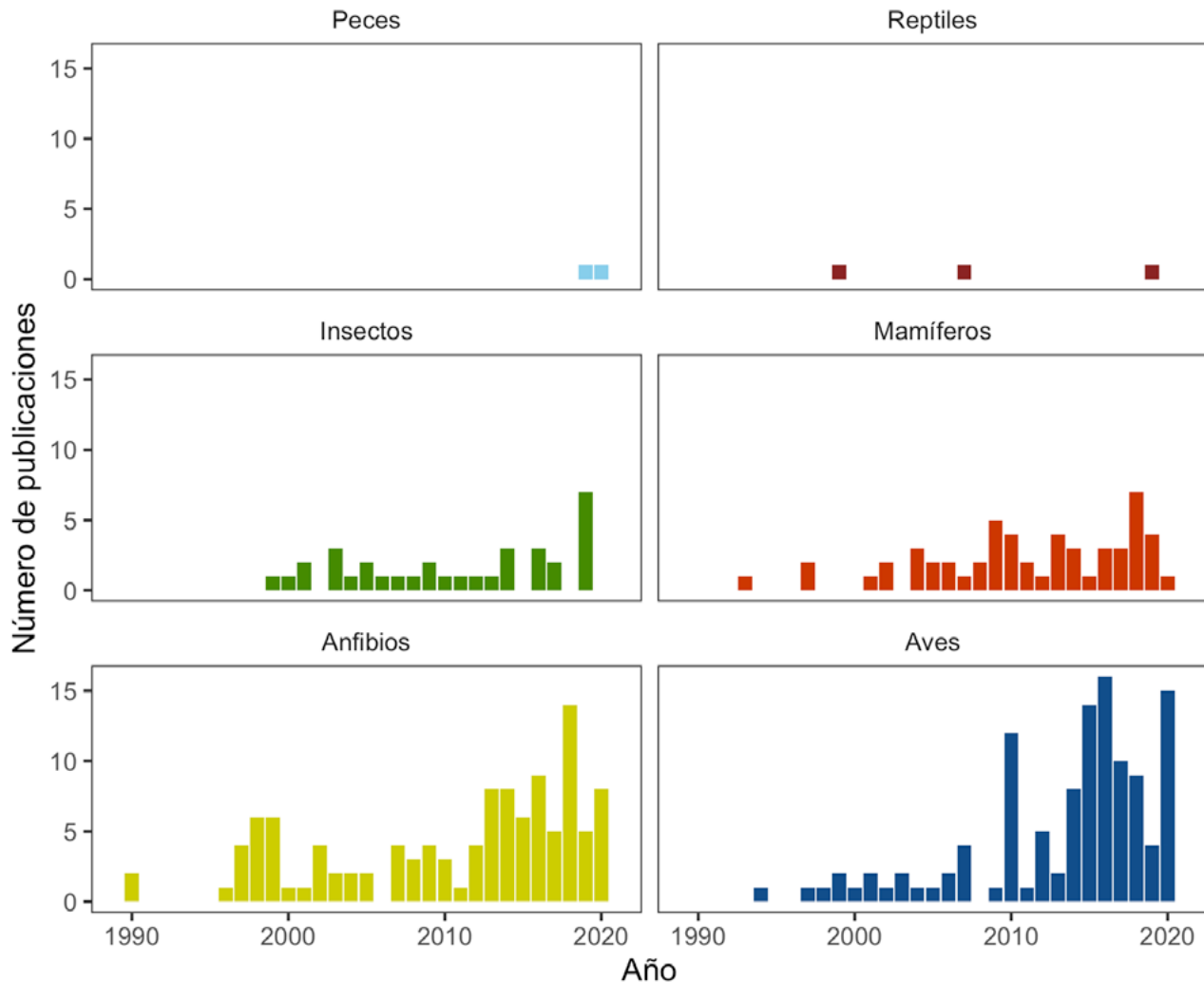


Figura 1. Número de estudios de bioacústica en Colombia, por grupo taxonómico, publicados entre 1990 y 2020.

Figure 1. Number of studies in bioacoustics in Colombia, by taxonomic group, published between 1990 and 2020.

Anfibios. A pesar del gran número de especies de anfibios anuros en Colombia, el número de publicaciones en bioacústica es comparativamente bajo, abarcando diferentes aplicaciones en sistemática, taxonomía, ecología, historia natural y monitoreo de poblaciones, entre otros temas (Rivera-Correa *et al.*, en prensa). Encontramos 72 publicaciones y 41 trabajos de grado, desde 1990 a la fecha (Figura 1), que contemplaron el análisis del canto de anuncio en 77 especies (lo que representa el 9.7% de la diversidad de anuros en el país). Estas publicaciones están concentradas en ocho de las 14 familias taxonómicas que se encuentran en Colombia: Aromobatidae, Bufonidae, Centrolenidae, Craugastoridae, Dendrobatidae,

Eleutherodactylidae, Hylidae y Leptodactylidae, y en su gran mayoría, los estudios fueron hechos en la región Andina (68%).

Reptiles. En Colombia, los estudios acerca de la producción de señales acústicas en reptiles son muy escasos. En nuestra búsqueda encontramos cuatro resultados para cinco especies, todos describiendo aspectos generales, por ejemplo, aspectos sobre ecología reproductiva que no son necesariamente estudios enfocados en la descripción del uso de señales acústicas *per se*. De estas investigaciones, dos corresponden a artículos científicos, en los que las especies de estudio fueron

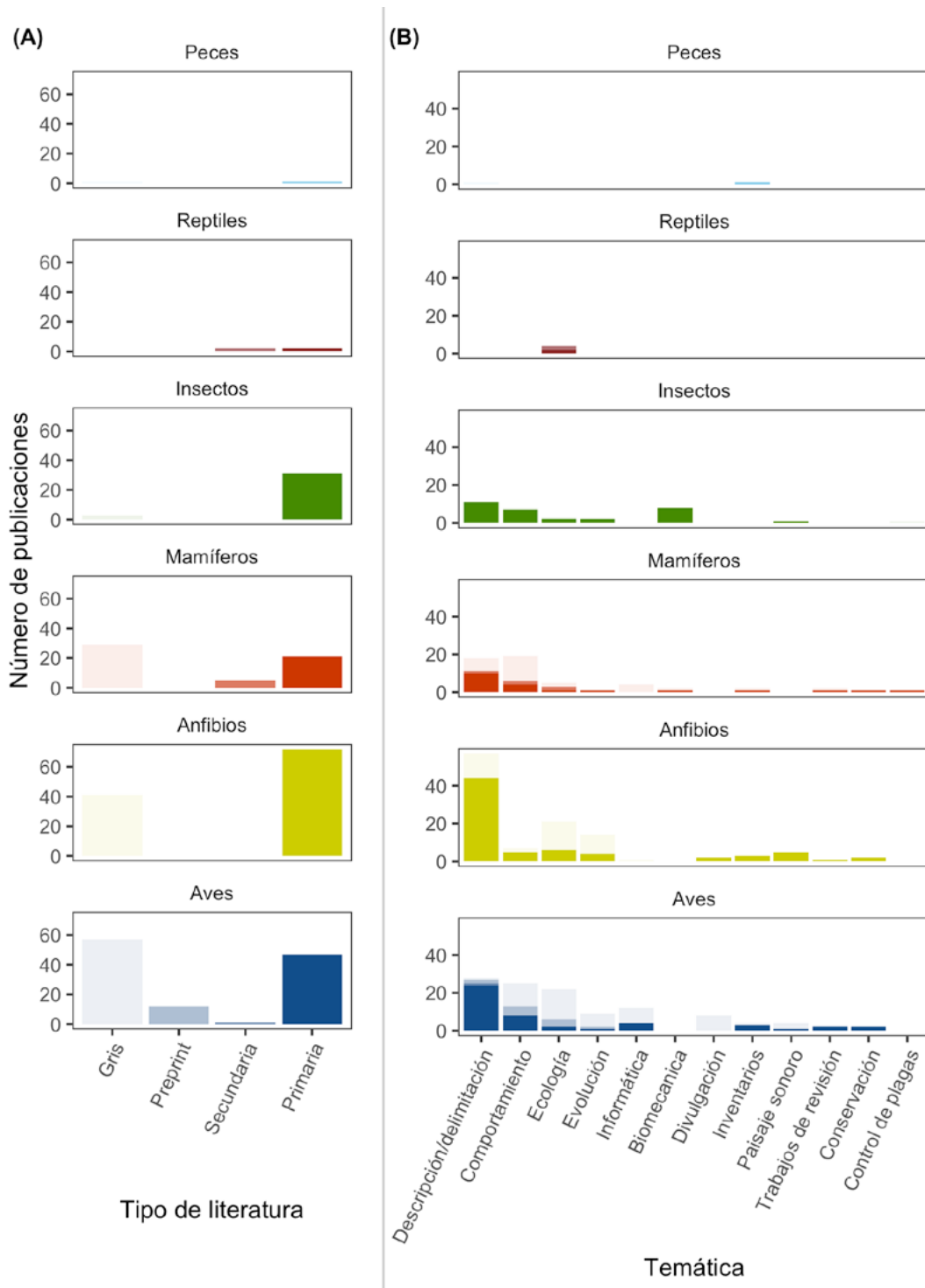


Figura 2. Número de estudios en acústica de fauna en Colombia, segregados por tipo de literatura y temáticas: A, tipo de literatura encontrada para cada grupo; B, temas abordados con mayor frecuencia en estudios acústicos en Colombia.

Figure 2. Number of studies on acoustics of Colombian fauna, arranged by type of literature and topics. A, type of studies from primary literature (articles) to gray literature (thesis); B, topics most frequently addressed in acoustic studies in Colombia.

el cocodrilo *Crocodylus intermedius* (Ardila-Robayo *et al.*, 1999) y las tortugas *Chelonoidis carbonarius* y *C. denticulatus* (Auffenberg, 1965), en las regiones de la Orinoquia, Caribe y Amazonia respectivamente. Si bien este último estudio fue publicado antes de 1990, previo al rango de tiempo en que nuestra búsqueda hizo énfasis, lo incluimos aquí por ser la única publicación que se conoce para individuos de dichas especies en Colombia. La señal acústica reportada para la tortuga *Kinosternon scorpioides* corresponde a observaciones personales hechas por M.A. Bedoya-Cañón, citada en un capítulo de libro sobre aspectos generales de anfibios y reptiles en bosque seco tropical del norte de Colombia (Vargas-Salinas *et al.*, 2019). Finalmente, Rueda-Almonacid *et al.* (2007), describen para *Mesoclemmys dahli* aspectos generales de su historia natural, incluyendo algunas señales acústicas.

Aves. Encontramos 117 trabajos, de los cuales 49 fueron tesis universitarias, entre pregrado (21), maestría (2) o doctorado (2), y 24 de estas han sido presentadas en congresos (24). Entre 2000-2010, fueron publicadas algunas guías sonoras que abrieron el camino hacia una gran diversidad de enfoques entre 2010-2020. Esa década fue la de mayor producción académica para el grupo, incluyendo trabajos principalmente en taxonomía, usando los caracteres acústicos para la delimitación de especies (Figura 2). Otros trabajos han usado el conocimiento de las vocalizaciones de las aves como herramienta para estudiar comportamiento y ecología, o en inventarios biológicos. Recientemente, algunos trabajos han intentado entender las variaciones del canto en aves en ambientes con ruido antrópico, los parámetros que han generado la diversidad de señales acústicas durante la evolución de las aves o han buscado responder cómo las aves aportan a los paisajes sonoros colombianos. La mayoría de trabajos están concentrados en la región Andina (56%), y muy pocos trabajos en las otras regiones del país (Amazonia, 5%; Caribe, 1.7%; Orinoquia, 1.7%; Pacífico, 0.8%; Sierra Nevada de Santa Marta, 3.4%); al porcentaje restante no se le asignó región, porque no se especificaban las localidades o incluían muchas localidades.

Mamíferos. Encontramos un total de 54 publicaciones: 5 capítulos de libros, 16 artículos, 8 resúmenes de conferencias y 25 trabajos de grado entre 1993 y el 2020. El 70.4% de estas publicaciones fueron hechas en los últimos doce años (Figura 1). Encontramos trabajos sobre acústica para siete de los 14 órdenes de mamíferos que hay en Colombia, de los cuales el orden Primates tuvo el mayor número de publicaciones (22) seguido por Cetacea (14) y Chiroptera (11). Los estudios de bioacústica

en mamíferos del país cubren gran variedad de temas, con un mayor número de publicaciones que denominamos Descripción/delimitación de especies. La segunda temática más frecuente fueron los aspectos comportamentales, principalmente para el orden Primates. La mayoría de trabajos se concentraron principalmente en la región Andina (26%) seguido por trabajos realizados *ex situ* (22%).

Discusión

En general, la bioacústica en Colombia presenta un interés creciente, con un incremento en el número de contribuciones en los últimos diez años, relacionado con su potencial uso como una herramienta que permitirá cuantificar, identificar, monitorear y entender mejor dicha diversidad. La ecoacústica se ha identificado como una herramienta poderosa para estudiar los patrones de diversidad con métodos no invasivos, que además puede aplicarse para estimar el grado de intervención de un ecosistema, mediante el uso de índices de diversidad acústica (Grant, 2014; Riede, 1998; Deichmann, 2018). El incremento en los estudios puede estar relacionado con la mayor asequibilidad y avance en el desarrollo de los equipos y softwares.

Por otra parte, se hace necesario el trabajo colaborativo y multidisciplinario, independientemente de los grupos taxonómicos de interés. Esto permitirá construir un consenso en las metodologías, al mismo tiempo que se desarrollan o se prueban herramientas de procesamiento de audio de código abierto, y se llenan vacíos sobre la precisión, la transferibilidad y las limitaciones de muchos métodos analíticos (Greenhalgh *et al.*, 2020). A continuación, presentamos una discusión más detallada de los resultados para cada uno de los grupos.

Insectos. Colombia presenta una alta diversidad y endemismo de insectos, que se encuentran distribuidos tanto en ecosistemas dulceacuícolas como terrestres (Samways, 2005; Kattán *et al.*, 2004). Sin embargo, a pesar de esta diversidad, el conocimiento de la acústica de este grupo es muy limitado. De 28 órdenes de insectos (Amat-García & Fernández, 2011), al menos 10 presentan comunicación acústica (Sanborn, 2008). En Colombia sólo se ha estudiado la acústica de cuatro órdenes, aunque la mayoría de estos estudios se concentran sólo en el orden Orthoptera.

El escaso conocimiento sobre acústica de insectos que encontramos es comparable con la investigación general

sobre insectos, con un marcado vacío de información en los trópicos (Basset & Lamarre, 2019). La implementación de técnicas de bioacústica en futuros estudios puede contribuir a cerrar la brecha de conocimiento acerca de especies tropicales. Por ejemplo, el monitoreo acústico en conjunto con identificación automatizada ha sido evaluado en algunos grupos de insectos (Ganchev & Potamitis, 2007; Aide *et al.*, 2013), y parece ser una herramienta potencial para conservar e identificar los patrones de diversidad acústica en respuesta a la actividad humana (Riede, 1998; Grant, 2014). Además de su uso en conservación, también se pueden implementar futuros estudios de bioacústica para la identificación de especies crípticas (Araki *et al.*, 2009) y especies con importancia agrícola en el contexto local (Gutiérrez *et al.*, 2010), así como para ecosistemas dulceacuícolas, en los que se destacan por la producción de sonidos los coleópteros y hemípteros, pero también algunos odonatos y tricópteros (Desjonquères *et al.*, 2020).

Una aplicación de este tipo de estudios en Colombia se relaciona con las enfermedades transmitidas por vectores, uno de los problemas más importantes en salud pública (Jaimes-Dueñez *et al.*, 2017). Estudios previos han reportado que el sonido tiene un rol importante en el comportamiento de cortejo de insectos hematófagos, como los mosquitos, moscas de arena, triatominos y moscas tsetse (Li *et al.*, 2012; Vigoder *et al.*, 2013). Los caracteres de las señales acústicas son importantes en el aislamiento de especies y en el flujo genético (Araki *et al.*, 2009; de Souza *et al.*, 2004), por lo cual el estudio de los mecanismos de comunicación acústica de los insectos vectores de enfermedades en los órdenes Diptera y Hemiptera puede ser de gran utilidad para control biológico (Vigoder *et al.*, 2013; Li *et al.*, 2012). Hasta el momento, en Colombia no se han realizado estudios sobre bioacústica de insectos en ecosistemas dulceacuícolas, y este tipo de investigaciones pueden ser de gran importancia para evaluar el estado de conservación de cuerpos de agua dulce (Greenhalgh *et al.*, 2020). Abordar este tipo de estudios es muy relevante, ya que los insectos aportan significativamente con sus señales al paisaje sonoro tropical (Aide *et al.*, 2017).

Peces. A escala global, se han reportado más de 700 especies de peces que producen sonidos (Kaatz & Stewart, 2012), de los cuales al menos 80 son peces de agua dulce (Greenhalgh *et al.*, 2020). Sin embargo, este número es probablemente mayor, y se estima que un tercio del total de las especies de peces (34 300 especies www.fishbase.org) tienen la capacidad de emitir algún tipo de señal acústica (Ladich & Bass, 2011).

Generalmente, los sonidos producidos por peces son específicos de cada especie y están asociados con comportamientos y contextos particulares (Amorim *et al.*, 2015), por lo que pueden usarse como una etiqueta acústica natural para detectar, localizar y monitorear la presencia de distintas especies (Luczkovich *et al.*, 2008; Širović *et al.*, 2009; Picciulin *et al.*, 2013).

En Colombia se conocen aproximadamente 4200 especies de peces, cifra cercana al 12% de la riqueza de peces mundial; alrededor de 2600 especies de la ictiofauna colombiana pueden ser consideradas marinas o, al menos, habitantes de los ecosistemas resultantes de la mezcla de las aguas dulces y saladas (Acero & Polanco, 2017). Así mismo, Colombia es uno de los países más diversos del mundo en cuanto a fauna acuática continental o dulceacuícola se refiere (Lasso *et al.*, 2017) ocupando el segundo lugar a nivel mundial, con 1572 especies, de las cuales el 25% (392) son endémicas y el 4,8% se encuentra bajo alguna categoría de amenaza (DoNascimento *et al.*, 2019). Considerando lo anterior, el potencial de estudios de ecoacústica aplicada a la fauna íctica del país es inmenso.

Desde hace años el conocimiento tradicional de los pescadores artesanales en Colombia ha reconocido la existencia de peces soníferos en las cuencas más importantes de nuestro país, tales como el Magdalena, Atrato, Sinú, Amazonia y Orinoquia (TNC, datos no publicados), e incluso existen algunas menciones en la literatura científica sobre la producción de sonidos en ejemplares macho de *Prochilodus magdalenae*, como un indicativo de la madurez gonadal y el acercamiento de la época del desove (Dahl *et al.*, 1963), y a comportamientos asociados a la reproducción de varias especies del género *Prochilodus* (Flórez, 1985). Más recientemente, se reportó la producción de sonidos (ronquidos) en *Prochilodus reticulatus* como un criterio de madurez de machos con fines de reproducción en cautiverio (Quintero-García, 2016) y a la producción de sonidos en especies marinas de la familia Sciaenidae (Tavera, 2002; Von & Grajales, 2007; de la Rosa, 2018). No obstante, sólo encontramos un trabajo sobre bioacústica en peces de Colombia (Muñoz-Duque, 2019), así como la posibilidad de usar herramientas de medición acústica para el estudio de peces de manera alternativa a través de la grabación se sus señales eléctricas (Ospina-L *et al.*, 2020).

La falta de desarrollo en este campo puede deberse al elevado costo de los hidrófonos para la toma de datos y a la falta de reconocimiento de las posibles aplicaciones de este tipo de estudios en el país. Sin embargo, el

costo de las grabadoras de sonidos e hidrófonos ha disminuido sustancialmente en años recientes y, además, la tecnología necesaria para almacenar y analizar datos acústicos está mejorando continuamente (Deichmann *et al.*, 2018). A pesar de esto, el alcance de aplicación del monitoreo acústico pasivo (MAP) sigue estando limitado por la poca disponibilidad de bibliotecas con sonidos de referencia y herramientas de procesamiento de audio (Greenhalgh *et al.*, 2020).

Se ha reconocido a nivel mundial que la hidroacústica puede ser una gran herramienta no invasiva para el monitoreo de la biodiversidad acuática, mostrándo que el empleo del MAP es una técnica que puede usarse para la identificación e inventario de especies y también para la evaluación de procesos, tanto de las especies acuáticas como de los ecosistemas en que habitan (Desjonquères *et al.*, 2020).

De este modo, la ecoacústica puede ser usada en ambientes marinos y continentales para diversos estudios, ecológicos, evolutivos, comportamentales y de biodiversidad, e incluso con fines de manejo de las pesquerías, algunas veces relacionados con la conservación de las especies o hábitats involucrados. Un ejemplo de esta aproximación en sistemas acuáticos continentales es el empleo de la ecoacústica para identificar y caracterizar las áreas de reproducción de peces potamódromos de la cuenca del río Magdalena, y de este modo priorizar dichos hábitats para la conservación de estas especies ante el desarrollo hidroeléctrico en la cuenca (Muñoz-Duque, 2019). La información acústica también se ha utilizado en el monitoreo de peces en grandes sistemas dulceacuícolas, como el río Amazonas (Anderson *et al.*, 2008; Borie *et al.*, 2014; Godinho *et al.*, 2017). Esta información puede ser clave para la conservación o manejo de las pesquerías de que producen sonidos, ya que puede ser posible identificar temporadas de eventos de reproducción y localizar con alta precisión áreas de desove (Rountree *et al.*, 2006; Mann *et al.*, 2008; Casaretto *et al.*, 2014), e inclusive estimar y monitorear la densidad, abundancia y biomasa de stocks de peces agregados en función a eventos de desove durante periodos con tasas estables de producción de sonidos (Gannon & Gannon, 2009; Širović *et al.*, 2009), entre otros datos de la biología reproductiva (Godinho *et al.*, 2017).

Anfibios. En la actualidad, en Colombia se conocen 850 especies de anfibios, 790 de las cuales son anuros (ranas y sapos); las 60 especies restantes pertenecen a los órdenes Caudata (salamandras) y Gymnophiona (cecilias) (<http://www.batrachia.com>). Con esta riqueza de

especies, Colombia es considerado el segundo país en el planeta con mayor biodiversidad en esta clase de vertebrados. Entre los diversos y fascinantes aspectos de la biología de los anfibios están sus sistemas de comunicación (Gerhardt & Huber, 2002; Wells, 2007; Starnberger *et al.*, 2014). Las vocalizaciones, particularmente el canto de anuncio, son el principal y más estudiado mecanismo de comunicación entre los anfibios anuros. Este tipo de canto es usualmente emitido por machos adultos, y se le ha atribuido funciones relacionadas a la atracción de hembras y demarcación de sitios de canto (Duellman & Trueb, 1994; Wells, 2007; Köhler *et al.*, 2017).

La familia Dendrobatidae es la más estudiada desde una perspectiva acústica, lo cual puede estar relacionado con que ha sido una fuente de numerosas investigaciones desde la década de 1970. En Colombia, han sido estudiadas 26 de las 94 especies (28%), principalmente con enfoque taxonómico (Twomey & Brown, 2009; Amézquita *et al.*, 2013; Márquez *et al.*, 2017; Marin *et al.*, 2018), de comportamiento social, biología evolutiva (Rojas *et al.*, 2006; Erdtmann & Amézquita, 2011; Medina *et al.*, 2013) y en ecoacústica (Vargas-Salinas & Amézquita, 2013a, b; Vargas-Salinas *et al.*, 2014). La segunda familia con un mayor análisis de las señales acústicas es la más diversa en Colombia, Craugastoridae, de la que se conocen en el país 264 especies. No obstante, sólo 18 especies (el 6.8%) han sido evaluadas acústicamente. Los estudios en Colombia que incluyen análisis de señales acústicas en especies de esta familia se han centrado en describir sus cantos de anuncio (Bernal *et al.*, 2004; Romero-García *et al.*, 2015; Ríos-Soto y Ospina-L. 2018; Duarte-Marín & Arango-Ospina, 2019) o en utilizar atributos de dichas señales como evidencia en la delimitación de nuevas especies (Ospina-Sarria *et al.*, 2015; Rivera-Correa *et al.*, 2016; Ospina-Sarria & Angarita-Sierra, 2020). El 72% de las investigaciones en señales acústicas de los anuros de Colombia se ha desarrollado en especies con distribución andina. Resultados similares fueron obtenidos por Rivera-Correa *et al.*, (en prensa), quienes asociaron este patrón con la mayor riqueza de especies en esta región geográfica y con que la mayoría de los centros de investigación y universidades que estudian la biología del comportamiento y la historia natural de los anuros en el país están establecidas en esta región. Adicionalmente, un hallazgo llamativo es que 37 de las 77 especies estudiadas acústicamente en estos últimos 30 años, se encuentran en alguna categoría de amenaza, de acuerdo con los criterios de la IUCN (2020). Esto nos revela un desafío importante a la hora de establecer estaciones de monitoreo pasivo particularmente en un grupo altamente amenazado como lo es los anfibios de Colombia.

Nuestros resultados sugieren la necesidad de unir esfuerzos que integren las señales acústicas como sistema de estudio, para incrementar el conocimiento de la diversidad de anuros y como estrategia para abordar múltiples preguntas en biología del comportamiento, bioacústica, ecoacústica y monitoreo de poblaciones.

Reptiles. Se conoce que la producción de señales acústicas en reptiles ha evolucionado en cocodrilos, tortugas, lagartos y en menor medida en serpientes (Frankenberg & Werner, 1992; Chen & Wiens, 2020). También está establecido que la mayoría de reptiles tienen cierta capacidad de percibir sonidos, pero sólo en algunos grupos se ha comprobado comunicación acústica entre conespecíficos (Dooling *et al.*, 2000, Rohtla *et al.*, 2019). En lo referente a Colombia, el segundo país del planeta con mayor diversidad de reptiles (> 600 especies; The Reptile Database, <http://www.reptile-database.org>), los estudios acerca de la producción de señales acústicas en estos vertebrados son muy escasos. La producción de señales acústicas se ha registrado por lo menos para 26 especies de reptiles presentes en Colombia; 21 de ellas son nativas y cinco son introducidas; sin embargo, estudios hechos directamente en Colombia sobre esta temática se limitan a una especie de cocodrilo (*Crocodylus intermedius*) y cuatro especies de tortugas (*Chelonoidis carbonarius*, *C. denticulatus*, *Kinosternon scorpioides*, *Mesoclemmys dahli*).

En *Crocodylus intermedius*, se han reportado señales acústicas producidas por los neonatos antes de la eclosión de los huevos (Ardila-Robayo *et al.*, 1999). Dichas señales simulan un “pugido” con una duración de aproximadamente un segundo. En relación a las tortugas, Auffenberg (1965) reportó que machos de *Chelonoidis carbonarius* y *Chelonoidis denticulatus* producen sonidos (chirridos) cuando montan a la hembra. En *Kinosternon scorpioides*, se reportó un bramido emitido por uno de varios individuos mantenidos en cautiverio (observaciones personales por M.A. Bedoya-Cañón, citada por Vargas-Salinas *et al.*, 2019). Finalmente, se reportó que machos adultos de *Mesoclemmys dahli* (especie endémica a Colombia), suelen restregar su cabeza contra objetos sumergidos en el agua, y de esta forma, producen ruidos que aparentemente tienen como función delimitar su territorio o atraer a las hembras durante la temporada de apareamiento (Rueda-Almonacid *et al.*, 2007).

Aún nos falta mucho por conocer en diversos aspectos relacionados al uso de señales acústicas en reptiles de Colombia. Por ejemplo, es común que haya variación geográfica intraespecífica en características

de señales de comunicación en animales (Wilczynski & Ryan, 1999; Velásquez, 2014; Morton, 2017), lo que hace importante documentar la presencia y grado de variabilidad en reptiles de Colombia, y establecer su relación con características del hábitat, interacciones bióticas y si eventualmente podría promover procesos de aislamiento reproductivo entre poblaciones. Por otro lado, individuos adultos de especies de tortugas, lagartos y serpientes tienen capacidad auditiva que les permite detectar potenciales depredadores (Dooling *et al.*, 2000; Christensen-Dalsgaard & Manley, 2005; Christensen-Dalsgaard *et al.*, 2012; Martin *et al.*, 2012; Cantwell & Forrest, 2013; Lavender *et al.*, 2014; Curlis *et al.*, 2016). Esta capacidad auditiva posiblemente esté difundida en reptiles de Colombia (ver, p. ej., *Amphisbaena alba*, Gans & Wever, 1972). Teniendo en cuenta la gran variedad de reptiles en Colombia, existe un gran potencial de investigación que permita ampliar nuestro conocimiento sobre los procesos que han promovido la evolución de señales acústicas en este grupo y su rol en interacciones ecológicas y comportamentales a nivel intra e interespecífico.

Aves. Tal vez la primera compilación que describe los sonidos de las aves de Colombia fue la guía de aves de Hilty & Brown (1986). En sus recuentos de las especies, hay descripciones onomatopéyicas muy detalladas que permitieron a muchos observadores identificar e incorporar el conocimiento de los cantos en sus observaciones. Sin embargo, en algunas publicaciones previas también habían sido descritos onomatopoyéticamente algunos sonidos (ver Olivares 1964). La grabación direccional de sonidos (Parker 1991) permitió conocer muchos aspectos desconocidos de la avifauna neotropical. Por ejemplo, el trabajo de Ted Parker III entre 1970 y 1990 fue uno de los más importantes e influyentes para muchos de los sonidistas que han captado esta otra dimensión de la biodiversidad neotropical (Robbins *et al.*, 1997), permitiendo predecir el descubrimiento de varios taxones nuevos para la ciencia a partir de las grabaciones que él compiló hace varias décadas (Schulenberg & Parker, 1997; Remsen *et al.*, 1997). Posteriormente, sonidistas colombianos fortalecieron la toma en campo de sonidos y su almacenaje organizado en repositorios, como la Colección de Sonidos Ambientales (o Banco de Sonidos Animales, en su momento). En particular, Mauricio Álvarez-Rebolledo promovió la grabación de sonidos como método complementario para inventarios de biodiversidad en Colombia, a partir de cursos en campo desarrollados en distintas regiones de Colombia. Posteriormente, se generaron piezas de audio para la divulgación de los sonidos de

las aves de los departamentos de Caldas (Álvarez-R. & Córdoba-Córdoba, 2002), Valle del Cauca (Álvarez-R. & Córdoba-Córdoba, 2002), Norte de Santander (Córdoba-Córdoba & Álvarez-R., 2003), la Sierra Nevada de Santa Marta (Strewe *et al.*, 2004), el Santuario de Fauna y Flora de Iguaque (Álvarez-R. *et al.*, 2007), y de los Andes colombianos (Álvarez-R. *et al.*, 2007). Por otro lado, unos años después, Boesman (2012) recopiló más de 5000 sonidos de 1644 especies de aves de Colombia.

La delimitación taxonómica de varios grupos de aves ha sido complementada a partir de integrar la acústica como herramienta para entender la avifauna tropical (Isler *et al.*, 1998). Este tipo de estudios siguen vigentes en la actualidad, resaltando la importancia de seguir grabando y analizando los sonidos de aves colombianas. Esto indica que aún tenemos que seguir descubriendo cómo son las señales acústicas de las aves colombianas, y cómo varían los sonidos de diferentes poblaciones (Cuervo *et al.*, 2014; Cadena *et al.*, 2015). Sin embargo, de manera simultánea, a medida que se toman sonidos en campo asociados a buena información, podríamos ver un incremento en trabajos de ecología (Negret *et al.*, 2015; Sánchez-Guzmán & Losada-Prado, 2016), comportamiento (Dorado-Correa *et al.*, 2016; Cárdenas-Posada *et al.*, 2018) y conservación (Laverde-R. & Cadena, 2014; Negret & Laverde-R., 2015). Dicha información es primordial para el desarrollo de trabajos sobre biología evolutiva (Caro *et al.*, 2013) y herramientas de informática acústica de aves colombianas (Tobón & Posada, 2015).

De los 117 trabajos encontrados, la mayoría corresponden a literatura gris en forma de tesis de pregrado (21), maestría (2) o doctorado (2), algunas compartidas en simposios dentro de congresos (24). Lo que resalta que el mayor reto es fometar la publicación de los resultados de las investigaciones

Durante las últimas décadas, se ha incrementado el interés por el conocimiento de las vocalizaciones de las aves en varios contextos. Sin embargo, cuando hablamos de bioacústica, esta disciplina incluye no sólo la señal (*i. e.*, el canto, llamado u otro tipo de sonido producido por el ave); también incluye la producción y la percepción del sonido; por ejemplo, de las más de 1900 especies registradas en el territorio nacional, no conocemos cómo escuchan, qué escuchan o cómo la audición de los depredadores pudo haber influido en la evolución de las características acústicas de sus presas. Adicionalmente, pocos trabajos han estudiado la estructura de las siringes, especialmente en los suboscines, la cual es

muy interesante, porque su canto no es aprendido. Al parecer, la estructura de su siringe es la que determina la estructura del canto (García *et al.*, 2017). Entender la relación entre siringe y canto puede ayudarnos a entender mejor cómo ha evolucionado el canto en este grupo tan diverso.

Por otro lado, es necesario estudiar los patrones de producción de canto a diferentes escalas, porque puede darnos información sobre cómo los cambios en el clima están afectando los ciclos de las poblaciones de aves. Los patrones de actividad diarios y anuales pueden ser afectados por variaciones climáticas drásticas a gran escala (Pérez-Granados *et al.*, 2019; Pérez-Granados *et al.*, 2020).

Finalmente, la socialización del conocimiento sobre acústica de aves, y otros grupos, requiere seguir fomentando la obtención de grabaciones de alta calidad que permitan extraer variables necesarias para estudios en bioacústica. Sin embargo, con el desarrollo de MAP, el desafío de almacenamiento, visualización y análisis sigue manteniéndose (Deichmann *et al.*, 2018). En este sentido, plataformas modulares (ej. Kass *et al.*, 2018) que integren repositorios de sonidos direccionales y datos provenientes de MAP, así como métodos de análisis novedosos (Ovaskainen *et al.*, 2018; LeBien *et al.*, 2020; Zhong *et al.*, 2020) serán un avance en la estructuración investigativa de la acústica de aves y otros grupos en Colombia.

Mamíferos. Los mamíferos son un grupo con una alta heterogeneidad en su anatomía, biología, ecología y comportamiento (Tirira, 2007). A pesar de esta diversidad, la producción académica sobre acústica de mamíferos en Colombia no es muy extensa y se encuentra más enfocada en unos órdenes que otros.

Para el orden Cetácea, los estudios en acústica han tomado gran relevancia a nivel global, principalmente porque existen dificultades inherentes en estudiarlos y entender los efectos de las actividades humanas sobre estos animales; la aplicación tecnológica es en una herramienta necesaria para su estudio (Gervaise *et al.*, 2007). El desarrollo de grabadoras autónomas fijas de sonido subacuático permite grabar datos acústicos del fondo del océano por meses, permitiendo realizar grabaciones en sitios donde la detección de estos animales es poco frecuente (Sousa-Lima *et al.*, 2013). El uso de MAP en mamíferos acuáticos es un método efectivo para identificar qué especies están presentes en un lugar específico (Heimlich *et al.*, 2005), rastrear individuos (Sousa-Lima & Clark, 2008) y determinar patrones

de distribución (Mellinger *et al.*, 2004), entre otros aspectos. En Colombia, se han realizado estudios que describen el repertorio vocal de especies como *Sotalia fluviatilis* y *S. guianensis* en el Golfo de Morrosquillo (Bernasconi *et al.*, 2005; Bernasconi *et al.*, 2006), de *Inia geoffrensis* y *S. fluviatilis* en los ríos Orinoco y Amazonas (Díaz-Granados & Trujillo, 2002), y de ballenas jorobadas en el golfo de Tribugá (Perazio *et al.*, 2018).

Para el orden Primates, la comunicación acústica es especialmente importante, ya que la usan frecuentemente para mediar diversas interacciones comportamentales (Barbosa *et al.*, 2018). En Colombia existen 13 géneros de primates y todos ellos emiten algún tipo de vocalización (Hernández & Zerda-Ordoñez, 2006). Dentro de los trabajos publicados en acústica de primates encontramos descripciones del repertorio acústico de varias especies, por lo general relacionadas con aspectos de comportamiento. Especies como *Saguinus leucopus*, *S. oedipus*, *Lagothrix lagothricha* y *Ateles hybridus* cuentan con descripciones de su repertorio acústico, pero, aún hay muchas especies que no cuentan con ningún tipo de aproximación acústica. Contar con descripciones básicas del repertorio acústico de las especies de primates en Colombia es relevante, y las herramientas acústicas tienen un gran potencial. Por ejemplo, las vocalizaciones de largo alcance que emiten algunas especies de primates son útiles para incrementar la detección de especies en campo, así como para obtener datos poblacionales a partir del uso de playbacks (Gestich *et al.*, 2017; Barbosa *et al.*, 2018).

El almacenamiento de grabaciones en repositorios disponibles es fundamental a la hora de impulsar la investigación acústica de mamíferos en Colombia (Lozano-Flórez *et al.*, 2021). En el caso de murciélagos, la creación de librerías que almacenan señales acústicas de ecolocalización permiten la comparación y la confirmación en la identificación de especies (Zamora *et al.*, 2020). Colombia es el segundo país con mayor diversidad de especies de murciélagos en el mundo; sin embargo, los estudios en acústica de murciélagos son limitados a seis publicaciones en revistas científicas y cinco trabajos de grado. Si bien es cierto que realizar grabaciones de referencia no es sencillo, especialmente en países megadiversos como Colombia, las aplicaciones potenciales son innumerables. A través de métodos bioacústicos es posible cuantificar y monitorear especies de murciélagos que no son fácilmente detectables a través de métodos tradicionales. Por otro lado, el uso de herramientas acústicas en estudios taxonómicos (Rodríguez & Mora, 2006), ecológicos (Rogers *et al.*, 2006) y comportamentales (Meyer *et al.*, 2004) es cada vez

más común. Además, los murciélagos son indicadores ideales para entender cambios a causa de actividades antrópicas, y por ende, los monitoreos acústicos sistemáticos pueden revelar cambios ambientales y disturbios ecológicos a largo plazo (Zamora *et al.*, 2020).

Los monitoreos acústicos tienen un gran potencial a futuro, no solo porque con los años la tecnología se ha hecho más asequible y maniobrable (los equipos cada vez son más fáciles de instalar y transportar), sino también porque muchas especies de mamíferos emiten señales sonoras continuamente y las grabaciones acústicas pueden brindar una nueva posibilidad de su estudio. Sin embargo, para esto es necesario contar con trabajos de descripciones acústicas y con grabaciones de referencia en Colombia para el desarrollo de estudios de monitoreo. Los resultados que encontramos para los órdenes Carnívora, Sirenia, Artiodactyla y Rodentia fueron muy escasos; esto evidencia un fuerte vacío en el conocimiento en órdenes con un gran potencial de trabajo (Lozano-Flórez *et al.*, 2021). El comportamiento acústico puede proporcionar señales filogenéticas (Peters & Tonking-Leyhausen, 1999; Cap *et al.*, 2008), estimar abundancias (Thompson *et al.*, 2010), apoyar herramientas de reconocimiento individual (Sousa-Lima *et al.*, 2008; Della Libera *et al.*, 2015; Carlson *et al.*, 2020), y por ende, brindar información sobre las poblaciones (Umeed *et al.*, 2018) en especies difíciles de capturar o en categoría de peligro (p. ej., manatíes) en las que las herramientas acústicas tienen una ventaja más, al ser métodos no invasivos.

Consideraciones finales.

En Colombia, al ser un país con una diversidad tan alta, el potencial de la acústica como campo de investigación es inmenso y su estudio en el país amplía las posibilidades de responder preguntas en otras áreas como la conservación, el comportamiento, la evolución y la ecología. Adicionalmente, el monitoreo acústico es una herramienta que puede ayudar a resolver respuestas ecológicas ante la degradación de los hábitats y ecosistemas naturales que cada día experimentan cambios debido al incremento acelerado de las actividades antrópicas (Llusia *et al.*, 2013).

En general, nuestros resultados muestran que los estudios en bioacústica en el país aun son muy escasos, con baja representatividad taxonómica y regional. A esto se suma una baja tasa de publicación de los trabajos desarrollados en los procesos de formación académica,

siendo de acceso limitado y con poco impacto y replicabilidad. Por lo tanto, uno de los retos principales es diseñar estrategias para incentivar la publicación de estos trabajos y la disponibilización de sus repositorios de sonidos.

Adicionalmente, es necesario fortalecer y alimentar las colecciones de sonidos del país, para aumentar la disponibilidad de grabaciones de referencia de todos los grupos taxonómicos. Esto conlleva la necesidad de generar protocolos de construcción de repositorios de referencia, de control de calidad y de su uso y análisis. Esperamos que este trabajo incentive la investigación en acústica en el país, sobre todo en aquellos grupos con vacíos de información. Creemos que la Red de Ecoacústica Colombiana juega un papel muy importante como eje para fortalecer alianzas y fomentar el trabajo multidisciplinario y colaborativo sobre esta temática en el país.

Referencias

- Acero, A. & Polanco, A. (2017). Biodiversidad íctica de los mares colombianos: riqueza amenazada. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 41(159), 200-212.
<http://doi.org/10.18257/raccefyn.480>
- Aide, T. M., Corrada-Bravo, C., Campos-Cerqueira, M., Milan, C., Vega, G. & Alvarez, R. (2013). Real-time bioacoustics monitoring and automated species identification. *PeerJ*, 1, e103.
<https://doi.org/10.7717/peerj.103>
- Aide, T., Hernández-Serna, A., Campos-Cerqueira, M., Acevedo-Charry, O. & Deichmann, J. (2017). Species richness (of insects) drives the use of acoustic space in the tropics. *Remote Sensing*, 9 (11), 1096.
<https://doi.org/10.3390/rs9111096>
- Álvarez-Rebolledo, M. & Córdoba-Córdoba, S. (2002). Guía sonora de las aves del Departamento de Caldas-Colombia: Cuenca de los ríos Tapias y Tareas. Villa de Leyva: Banco de Sonidos Animales-Instituto Humboldt.
- Álvarez-Rebolledo, M., Caro, V., Laverde-R., O., Cuervo, A. (2007). *Guía sonora de las aves de los Andes colombianos*. CDs Instituto Humboldt & The Cornell Lab of Ornithology.
- Anderson, K. A., Rountree, R. A. & Juanes, F. (2008). Soniferous fishes in the Hudson River. *Transactions of the American Fisheries Society*, 137(2), 616-626.
<https://doi.org/10.1577/T05-220.1>
- Amat-García, G. & Fernández, F. (2011). Diversity of Lower Insects (Arthropoda: Hexapoda) in Colombia: I. Entognatha to Polyneoptera. *Acta Biológica Colombiana*, 16(2), 205-220.
- Amorim, M Clara P, Vasconcelos, R. O. & Fonseca, P. J. (2015). Sound communication in fishes. En Ladich, F.(Eds). *Sound Communication in Fishes* (Vol. 4). Springer.
- Amézquita, A., Márquez, R., Medina, R., Mejía-Vargas, D., Kahn, T.R., Suárez, G. & Mazariegos, L. (2013). A new species of Andean poison frog, *Andinobates* (Anura: Dendrobatidae), from the northwestern Andes of Colombia. *Zootaxa*, 3620, 163-178.
- Araki, A. S., Vigoder, F. M., Bauzer, L. G., Ferreira, G. E., Souza, N. A., Araújo, Hamilton, J. C., Brazil, R. P. & Peixoto, A. A. (2009). Molecular and behavioral differentiation among Brazilian populations of *Lutzomyia longipalpis* (Diptera: Psychodidae: Phlebotominae). *PLoS Neglected Tropical Diseases*, 3(1), e365.
<https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0000365>
- Ardila-Robayo, M., Barahona-Buitrago, S., Bonilla-Centeno, O. & Cárdenas-Rojas, D. (1999). Aportes al conocimiento de la reproducción, embriología y manejo de *Crocodylus intermedius* en la Estación de Biología Tropical "Roberto Franco" de Villavicencio. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas*, 23 (suplemento especial), 417-424.
- Auffenberg, W. (1965). Sex and species discrimination in two sympatric South American tortoises. *Copeia*, 1965(3), 335-342.
- Barbosa, C., Romano, V., Ruiz-Miranda, C.R & Grassetto, T.C. (2018). Las voces de los primates neotropicales: ¿qué dicen? En Urbani, B., Kowalewski, M., Cunha, R.G.T., de la Torre, S. & Cortés-Ortiz, L. (Eds.). *La primatología en Latinoamérica 2 - A primatología en América Latina 2. Tomo I Argentina-Colombia*. Caracas: Ediciones IVIC. Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC).
- Basset, Y. & Lamarre, G. P. (2019). Toward a world that values insects. *Science*, 364(6447), 1230-1231.
<https://doi.org/10.1126/science.aaw7071>
- Bernal, M. H., Montealegre, D. P. & Páez, C. A. (2004). Estudio de la vocalización de trece especies de anuros del municipio de Ibagué, Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 28; 385-390.
- Bradbury, J. W. & Vehrencamp, S. L. (1998). Principles of animal communication. Sinauer, Sunderland, MA.
- Bernasconi, M., Dussán-Duque, S., Di Lorio, L. & Passerini, A. (2005). Vocal behaviour of marine tucuxi dolphins (*Sotalia fluviatilis*) in the Gulf of Morrosquillo, Colombia (Caribbean Sea). Trabajo presentado

- en 16th Biennial Conference on the Biology of Marine Mammals. San Diego California, USA.
- Bernasconi, M., Dussan-Duque, S., Di Lorio, L. & Passerini, A. (2006). Comportamiento vocal de *Sotalia Marina* (*Sotalia guianensis*) en el Golfo de Morrosquillo, Colombia. Abstracts Book. Workshop on Research and Conservation of the genus *Sotalia*.
- Boesman, P. (2012). Birds of Colombia MP3 - Sound Collection. BirdSounds.nl.
- Borie, A., Mok, H. K., Chao, N. L. & Fine, M. L. (2014). Spatiotemporal variability and sound characterization in Silver Croaker *Plagioscion squamosissimus* (Sciaenidae) in the Central Amazon. *PloS one*, 9(8), e99326.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0099326>
- Cadena, C. D., Caro, L. M., Caycedo, P. C., Cuervo, A. M., Bowie, R. C. & Slabbekoorn, H. (2015). *Henicorhina anachoreta* (Troglodytidae), another endemic bird species for the Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia. *Ornitología Colombiana*, 15, e68-e74.
- Cantwell, L. R. & Forrest, T. G. (2013). Response of *Anolis sagrei* to acoustic calls from predatory and nonpredatory birds. *Journal of Herpetology*, 47(2); 293-298.
- Cap, H., Deleporte, P., Joachim, J. & Reby, D. (2008). Male vocal behavior and phylogeny in deer. *Cladistics*, 24(6), 917-931.
<https://doi.org/10.1111/j.1096-0031.2008.00223.x>
- Cárdenas-Posada, G., Cadena, C. D., Blake, J. G. & Loisel, B. A. (2018). Display behaviour, social organization and vocal repertoire of Blue-backed Manakin *Chiroxiphia pareola napensis* in northwest Amazonia. *Ibis*, 160(2), 269-282.
<https://doi.org/10.1111/ibi.12548>
- Carlson, N. V., Kelly, E. M. & Couzin, I. (2020). Individual vocal recognition across taxa: a review of the literature and a look into the future. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 375(1802), 20190479.
<https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0479>
- Caro, L. M., Caycedo-Rosales, P. C., Bowie, R. C. K., Slabbekoorn, H. & Cadena, C. D. (2013). Ecological speciation along an elevational gradient in a tropical passerine bird?. *Journal of Evolutionary Biology*, 26(2), 357-374.
<https://doi.org/10.1111/jeb.12055>
- Casaretto, L., Picciulin, M., Olsen, K. & Hawkins, A. D. (2014). Locating spawning haddock (*Melanogrammus aeglefinus*, Linnaeus, 1758) at sea by means of sound. *Fisheries research*, 154, 127-134.
<https://doi.org/10.1016/j.fishres.2014.02.010>
- Chen, Z. & Wiens, J. J. (2020). The origins of acoustic communication in vertebrates. *Nature Communications*, 11(1), 1-8.
- Christensen-Dalsgaard, J. & Manley, G. A. (2005). Directionality of the lizard ear. *Journal of Experimental Biology*, 208(6), 1209-1217.
- Christensen-Dalsgaard, J., Brandt, C., Willis, K. L., Christensen, C. B., Ketten, D., Edds-Walton, P., Fay, R. R., Madsen, P. T. & Carr, C. E. (2012). Specialization for underwater hearing by the tympanic middle ear of the turtle, *Trachemys scripta elegans*. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 279(1739), 2816-2824.
- Córdoba-Córdoba, S. & Álvarez-Rebolledo, M. (2003). Guía sonora de las aves del Departamento de Norte de Santander Colombia: Cucutilla, Toledo y Parque Nacional Natural Tamá. Villa de Leyva: Banco de Sonidos Animales-Instituto Humboldt
- Cuervo, A. M., Stiles, F. G., Lentino, M., Brumfield, R. T. & Derryberry, E. P. (2014). Geographic variation and phylogenetic relationships of *Myiopagis olallai* (Aves: Passeriformes; Tyrannidae), with the description of two new taxa from the Northern Andes. *Zootaxa*, 3873(1), 1-24.
<https://doi.org/10.11646/zootaxa.3873.1.1>
- Curlis, J. D., Macklem, D. C., Davis, R. & Cox, C. L. (2016). Sex-specific antipredator response to auditory cues in the black spiny-tailed iguana. *Journal of Zoology*, 299(1), 68-74.
- Dahl, G., Medem, F. & Henao, A. R. (1963). El "Bocachico": contribución al estudio de su biología y de su ambiente. Montería: Departamento de Pesca de la Corporación Autónoma Regional de los Valles del Magdalena y del Sinú-CVM.
- Della Libera, M., Passilongo, D. & Reby, D. (2015). Acoustics of male rutting roars in the endangered population of Mesola red deer *Cervus elaphus italicus*. *Mammalian Biology*, 80(5), 395-400.
<https://doi.org/10.1016/j.mambio.2015.05.001>
- Deichmann, J. L., Acevedo-Charry, O., Barclay, L., Burivalova, Z., Campos-Cerqueira, M., d'Horta, F., ... & Linke, S. (2018). It's time to listen: there is much to be learned from the sounds of tropical ecosystems. *Biotropica*, 50(5), 713-718.
<https://doi.org/10.1111/btp.12593>
- Díaz-Granados, M. C. & Trujillo, F. (2002). Vocal repertoire of the freshwater dolphins *Inia geoffrensis* and *Sotalia fluviatilis* in Colombia, South America. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 112(5), 2400-2400.
<https://doi.org/10.1121/1.4779794>

- de la Rosa V. Y. P. (2018). Ecología y biología del pez obispo *Pareques acuminatus* (Perciformes: Scianidae) en el Magdalena, Caribe Colombiano. (Trabajo de grado). Santa Marta: Universidad del Magdalena.
- de Souza N. A., Vigoder, F. M., Araki, A. S., Ward, R. D., Kyriacou, C. P., Peixoto, A. A. (2004). Analysis of the copulatory courtship songs of *Lutzomyia longipalpis* in six populations from Brazil. *Journal of Medical Entomology*, 41(5), 906-913.
<https://doi.org/10.1603/0022-2585-41.5.906>
- Desjonqueres, C., Gifford, T. & Linke, S. (2020). Passive acoustic monitoring as a potential tool to survey animal and ecosystem processes in freshwater environments. *Freshwater Biology*, 65 (1), 7-19.
<https://doi.org/10.1111/fwb.13356>
- Dooling, R. J., Lohr, B. & Dent, M. L. (2000). Hearing in birds and reptiles. En Dooling, R. J. y Fay, R. R. (Eds.). *Comparative hearing: Birds and reptiles*. Pp: 308-359. New York: Springer.
- DoNascimento, C., Herrera Collazos, E. E. & Maldonado-Ocampo, J. A. (2019). Lista de especies de peces de agua dulce de Colombia / Checklist of the freshwater fishes of Colombia. v. 2.11. Asociación Colombiana de Ictiólogos. *Dataset/Checklist*.
<http://doi.org/10.15472/numrso>
- Dorado-Correa, A. M., Rodríguez-Rocha, M. & Brumm, H. (2016). Anthropogenic noise, but not artificial light levels predicts song behaviour in an equatorial bird. *Royal Society Open Science*, 3(7), 160231.
<https://doi.org/10.1098/rsos.160231>
- Duarte-Marín, S. & Arango-Ospina, S. (2019). The advertisement call of *Pristimantis erythropleura* (Boulenger, 1896) (Craugastoridae) from a population in the central Andes of Colombia. *The Herpetological Bulletin*, 148, 33-34.
- Duellman, W. E. & Trueb, L. (1994). *Biology of Amphibians*. Baltimore, London: John Hopkins University Press.
- Erdtmann, L. & Amézquita, A. (2009). Differential evolution of advertisement call traits in dart-poison frogs (Anura: Dendrobatidae). *Ethology*, 115, 801-811.
- Flórez, F. (1985). Observaciones ecológicas sobre los peces Bocachico real (*Prochilodus mariae* Eigenmann 1922) y el Bocachico cardumero (*Suprasinelepicthys laticeps* Valenciennes 1849) del sistema del río Metica y algunos datos comparativos del Bocachico (*Prochilodus reticulatus magdalenae* Steindachner 1878) del río Cauca, afluente del río Magdalena, Colombia). *Acta Biológica Colombiana*, 1(2), 9-33.
- Frankenberg, E. & Werner, Y. L. (1992). Vocal communication in the Reptilia—facts and questions. *Acta Zoológica Lilloana*, 41(0), 45-62.
- Ganchev, T. & Potamitis, I. (2007). Automatic acoustic identification of singing insects. *Bioacoustics*, 16(3), 281-328.
<https://doi.org/10.1080/09524622.2007.9753582>
- Gannon, D. P. & Gannon, J. G. (2010). Assessing trends in the density of Atlantic croaker (*Micropogonias undulatus*): a comparison of passive acoustic and trawl methods. *Fishery Bulletin*, 108(1), 106-116.
- Gans, C. & Wever, E. G. (1972). The ear and hearing in *Amphisbaenia* (Reptilia). *Journal of Experimental Zoology*, 179(1), 17-34.
- Gerhardt, H. C. & Huber, F. (2002). *Acoustic Communication in Insects and Anurans: Common Problems and Diverse Solutions*. Chicago: The University of Chicago Press.
- García, S. M., Kopuchian, C., Mindlin, G. B., Fuxjager, M. J., Tubaro, P. L. & Goller, F. (2017). Evolution of vocal diversity through morphological adaptation without vocal learning or complex neural control. *Current Biology*, 27(17), 2677-2683.
<https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.07.059>
- Gervaise, C., Vallez, S., Ioana, C., Stéphan, Y. & Simard, Y. (2007). Passive acoustic tomography: new concepts and applications using marine mammals: a review. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 87(1), 5-10.
- Gestich, C. C., Caselli, C. B., Nagy-Reis, M. B., Setz, E. Z. & da Cunha, R. G. (2017). Estimating primate population densities: The systematic use of playbacks along transects in population surveys. *American Journal of Primatology*, 79(2), e22586.
<https://doi.org/10.1002/ajp.22586>
- Godinho, A. L., Silva, C. C. F. & Kynard, B. (2017). Spawning calls by Zulega, *Prochilodus argenteus*, a Brazilian riverine fish. *Environmental Biology of Fishes*, 100(5), 519-533.
<https://doi.org/10.1007/s10641-017-0582-5>
- Grant, P. B. C. (2014). *Acoustic Profiling of the Landscape*. (Doctoral Thesis). Department of Conservation Ecology and Entomology. University of Stellenbosch, South Africa.
- Greenhalgh, J. A., Genner, M. J., Jones, G. & Desjonquères, C. (2020). The role of freshwater bioacoustics in ecological research. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 7(3), e1416.
<https://doi.org/10.1002/wat2.1416>
- Gutiérrez, A., Ruiz, V., Moltó, E., Tapia, G. & del Mar Téllez, M. (2010). Development of a bioacoustic sensor for

- the early detection of Red Palm Weevil (*Rhynchophorus ferrugineus* Olivier). *Crop Protection*, 29(7), 671-676.
<https://doi.org/10.1016/j.cropro.2010.02.001>
- Heimlich, S. L., Mellinger, D. K. & Nieuwkirk, S. L. (2005). Types, distribution, and seasonal occurrence of sounds attributed to Bryde's whales (*Balaenoptera edeni*) recorded in the eastern tropical Pacific, 1999-2001. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 118, 1830-1837.
<http://dx.doi.org/10.1121/1.1992674>
- Hernández, Í. A. T. & Ordóñez, E. Z. (2006). Estado actual de la investigación sobre comunicación sonora de primates colombianos. *Acta Biológica Colombiana*, 11(1), 158.
- Hilty, S. L. & Brown, W. L. (1986). *Birds of Colombia*. Princeton, New Jersey: Princeton University Press.
- Isler, M. L., Isler, P. R. & Whitney, B. M. (1998). Use of vocalizations to establish species limits in antbirds (Passeriformes: Thamnophilidae). *The Auk*, 115(3), 577-590.
- Jaimes-Dueñez, J., Triana-Chávez, O. & Mejía-Jaramillo, A. M. (2017). Parasitological and molecular surveys reveal high rates of infection with vector-borne pathogens and clinical anemia signs associated with infection in cattle from two important livestock areas in Colombia. *Ticks and Tick-Borne Diseases*, 8(2), 290-299.
<https://doi.org/10.1016/j.ttbdis.2016.12.002>
- Kaatz, I. M. & Stewart, D. J. (2012). Bioacoustic variation of swimbladder disturbance sounds in Neotropical doradoid catfishes (Siluriformes: Doradidae, Auchenipteridae): Potential morphological correlates. *Current Zoology*, 58(1), 171-188.
<https://doi.org/10.1093/czoolo/58.1.171>
- Kass, J. M., Vilela, B., Aiello-Lammens, M. E., Muscarella, R., Merow, C. & Anderson, R. P. (2018). Wallace: A flexible platform for reproducible modeling of species niches and distributions built for community expansion. *Methods in Ecology and Evolution*, 9(4), 1151-1156.
<https://doi.org/10.1111/2041-210X.12945>
- Kattan, G. H., P. Franco, V. Rojas, & G. Morales (2004). Biological diversification in a complex region: a spatial analysis of faunistic diversity and biogeography of the Andes of Colombia. *Journal of Biogeography*, 31(11), 1829-1839.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2004.01109.x>
- Köhler, J., Jansen, M., Rodríguez, A., Kok, P. J. R., Toledo, L. F., Emmrich M, Glaw, F. Haddad, C. F. B., Rödel, M.-O. & Vences, M. (2017). The use of bioacoustics in anuran taxonomy: theory, terminology, methods and recommendations for best practice. *Zootaxa*, 4251(1), 1-124.
<https://doi.org/10.11646/zootaxa.4251.1.1>
- Ladich, F. & Bass, A. H. (2011). Vocal behavior of fishes: Anatomy and physiology. En Farrell, A.P. (Eds). *Encyclopedia of Fish Physiology: From Genome to Environment* (Vol. 1). Elsevier.
- Lasso, C. A., Córdoba, D. & Morales-Betancourt, M. A. (Eds.). (2017). XVI. Áreas clave para la conservación de la biodiversidad dulceacuática amenazada en Colombia: moluscos, cangrejos, peces, tortugas, crocodílidos, aves y mamíferos. Bogotá D. C.: Serie Editorial Recursos Hidrobiológicos y Pesqueros Continentales de Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Llusia, D., Márquez, R., Beltrán, J. F., Benítez, M. & do Amaral, J. P. (2013). Calling behaviour under climate change: Geographical and seasonal variation of calling temperatures in ectotherms. *Global Change Biology*, 19(9), 2655-2674.
<https://doi.org/10.1111/gcb.12267>
- Lavender, A. L., Bartol, S. M. y Bartol, I. K. (2014). Ontogenetic investigation of underwater hearing capabilities in loggerhead sea turtles (*Caretta caretta*) using a dual testing approach. *Journal of Experimental Biology*, 217(14), 2580-2589.
- Laverde-R., O. & Cadena, C. D. (2014). Taxonomy and conservation: a tale of two tinamou species groups (Tinamidae, Crypturellus). *Journal of Avian Biology*, 45(5), 484-492.
<https://doi.org/10.1111/jav.00298>
- LeBien, J., Zhong, M., Campos-Cerqueira, M., Velev, J. P., Dodhia, R., Ferres, J. L. & Aide, T. M. (2020). A pipeline for identification of bird and frog species in tropical soundscape recordings using a convolutional neural network. *Ecological Informatics*, 101113.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2020.101113>
- Li, Y. F., Wen, S. Y. & Ritchie, M. G. (2012). Copulatory song in three species of the *Drosophila montium* subgroup extends copulation and shows unusual genetic control. *Animal Behaviour*, 83(1), 233-238.
<https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2011.10.032>
- Lozano-Flórez, J., Colón-Piñero, Z. & Acevedo-Charry, O. (2021). Un llamado a 528 voces: Oportunidades de investigación con los sonidos de los mamíferos colombianos. *Caldasia*, 43(2).
- Luczkovich, J. J., Mann, D. A. & Rountree, R. A. (2008). Passive acoustics as a tool in fisheries science. *Transactions of the American Fisheries Society*, 137(2), 533-541.
<https://doi.org/10.1577/T06-258.1>
- Mann D.A., Hawkins A.D., Jech J.M. (2008) Active and passive acoustics to locate and study fish.

- En Webb J.F., Fay R.R., Popper A.N. (Eds). *Fish Bioacoustics*. Springer Handbook of Auditory Research, vol 32. New York: Springer.
- Márquez, R., Mejía-Vargas, D., Palacios-Rodríguez, P., Ramírez-Castañeda, V. & Amezcuita, A. (2017). A new species of *Andinobates* (Anura: Dendrobatidae) from the Urabá region of Colombia. *Zootaxa*, 4290, 531-546.
- Marín, C. M., Molina-Zuluaga, C., Restrepo, A., Cano, E. & Daza, J. M. (2018). A new species of *Leucostethus* (Anura: Dendrobatidae) from the eastern versant of the Central Cordillera of Colombia and the phylogenetic status of *Colostethus fraterdanieli*. *Zootaxa*, 4461(3), 359-380.
- Martin, K. J., Alessi, S. C., Gaspard, J. C., Tucker, A. D., Bauer, G. B. y Mann, D. A. (2012). Underwater hearing in the loggerhead turtle (*Caretta caretta*): a comparison of behavioral and auditory evoked potential audiograms. *Journal of Experimental Biology*, 215(17), 3001-3009.
- Medina, I., Wang, I., Salazar, C. & Amézquita, A. (2013). Hybridization promotes color polymorphism in the aposematic harlequin poison frog, *Oophaga histrionica*. *Ecology and Evolution*, 3, 4388-4400.
- Meyer, C. F., Schwarz, C. J. & Fahr, J. (2004). Activity patterns and habitat preferences of insectivorous bats in a West African forest-savanna mosaic. *Journal of Tropical Ecology*, 20(4), 397-407.
<https://doi.org/10.1017/S0266467404001373>
- Mellinger, D. K., Stafford, K. M. & Fox, C. G. (2004a). Seasonal occurrence of sperm whale (*Physeter macrocephalus*) sounds in the Gulf of Alaska, 1999-2001. *Marine Mammal Science*, 20, 48-62.
<http://doi.org/10.1111/j.1748-7692.2004.tb01140.x>
- Morton, E. S. (2017). *Animal Vocal Communication: Assessment and Management Roles*. Cambridge: Cambridge University.
- Muñoz-Duque, S. E. (2019). Caracterización de la señal acústica de apareamiento en *Prochilodus magdalenae* con análisis bioacústico bajo condiciones de confinamiento. (Trabajo de grado). Medellín: Instituto de Biología, Universidad de Antioquia.
- Negret, P. J., Garzón, O., Stevenson, P. R. & Laverde-R, O. (2015). New ecological information for the Black Tinamou (*Tinamus osgoodi hershkovitzii*). *The Auk: Ornithological Advances*, 132(3), 533-539.
<https://doi.org/10.1642/AUK-14-116.1>
- Negret, P. J. & Laverde-R, O. (2015). The enigmatic Black Tinamou: Do distribution, climate, and vocalizations reveal more than one species? *The Auk*, 132(1), 132-139.
- Olivares, A. (1964). Adiciones a las aves de la Comisaría del Vaupés (Colombia), II. *Caldasia*, 9, 150-84
- Ospina-Sarria, J. J., Angarita-Sierra, T. & Pedroza-Banda, R. (2015). A new species of *Craugastor* (Anura: Craugastoridae) from the Magdalena River Valley, Colombia, with evaluation of the characters used to identify species of the *Craugastor fitzingeri* group. *South American Journal of Herpetology*, 10, 165-177.
- Ospina-L, A. M., Borja-Acosta, K. G., Buitrago-Cardona, A., Torres, M., y Acevedo-Charry, O. (2020). Dataset on audio records of animals from the northeast Andes of Colombia II: The vertebrate sounds of Santander department. *Data in Brief*, 29, 105298.
- Ospina-Sarria, J. J. & Angarita-Sierra, T. (2020). A new species of *Pristimantis* (Anura: Strabomantidae) from the eastern slope of the Cordillera Oriental, Arauca, Colombia. *Herpetologica*, 76(1), 83-92.
- Ovaskainen, O., Moliterno de Camargo, U. & Somervuo, P. (2018). Animal Sound Identifier (ASI): software for automated identification of vocal animals. *Ecology letters*, 21(8), 1244-1254.
<https://doi.org/10.1111/ele.13092>
- Parker, T. A., Castillo, A., Gell-Mann, M. & Rocha, O. (1991). Records of new and unusual birds from northern Bolivia. *Bulletin of the British Ornithologists' Club*, 111, 120-138.
- Perazio, C. E., Zapetis, M. E., Roberson, D., Botero, N. & Kuczaj, S. (2018). Humpback whale, *Megaptera novaeangliae*, song during the breeding season in the Gulf of Tribugá, Colombian Pacific. *Madagascar Conservation & Development*, 13(1), 83-90.
- Pérez-Granados, C., Bota, G., Giral, D., Barrero, A., Gómez-Catasús, J., Bustillo-De la Rosa, D. & Traba, J. (2019). Vocal activity rate index: a useful method to infer terrestrial bird abundance with acoustic monitoring. *Ibis*, 161 (4).
<https://doi.org/901-907.10.1111/ibi.12728>
- Pérez-Granados, C. & Schuchmann, K.L. (2020). Monitoring the annual vocal activity of two enigmatic nocturnal Neotropical birds: The Common Potoo (*Nyctibius griseus*) and the Great Potoo (*Nyctibius grandis*). *Journal of Ornithology*, 1-13.
<https://doi.org/10.1007/s10336-020-01795-4>
- Peters, G. & Tonkin-Leyhausen, B. A. (1999). Evolution of acoustic communication signals of mammals: friendly close-range vocalizations in Felidae (Carnivora). *Journal of Mammalian Evolution*, 6(2), 129-159.
<https://doi.org/10.1023/A:1020620121416>

- Picciulin, M., Bolgan, M., Codarin, A., Fiorin, R., Zucchetta, M. & Malavasi, S. (2013). Passive acoustic monitoring of *Sciaena umbra* on rocky habitats in the Venetian littoral zone. *Fisheries research*, 145, 76-81. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2013.02.008>
- Pijanowski, B. C., Villanueva-Rivera, L. J., Dumyahn, S. L., Farina, A., Krause, B. L., Napoletano, B. M., ... & Pieretti, N. (2011). Soundscape ecology: the science of sound in the landscape. *BioScience*, 61(3), 203-216. <https://doi.org/10.1525/bio.2011.61.3.6>
- Quintero-García, C. (2016). Caracterización reproductiva de la especie *Prochilodus reticulatus* como potencial productivo para la zona del Catatumbo-Norte de Santander. *Revista Ingenio Ufpso*, 12, 67-73. <https://doi.org/10.22463/2011642X.2125>
- Remsen, J. V. & Schulenberg, T. S. (1997). The pervasive influence of Ted Parker on Neotropical field ornithology. *Ornithological Monographs*, 7-19.
- Riede, K. (1998). Acoustic monitoring of Orthoptera and its potential for conservation. *Journal of Insect Conservation*, 2, 217-223.
- Ríos-Soto, J. A. & Ospina-L. A. M. (2018). The advertisement call of *Pristimantis boulengeri* (Lynch, 1981) from a population in the Central Andes of Colombia (Anura: Craugastoridae). *Herpetology Notes*, 11, 719-723.
- Rivera-Correa, M., Lamadrid-Feris, F. & Crawford, A. J. (2016). A new small golden frog of the genus *Pristimantis* (Anura: Craugastoridae) from an Andean cloud forest of Colombia. *Amphibia-Reptilia*, 37, 153-166.
- Rivera-Correa M., Ospina-L., A., Rojas-Montoya, M., Venegas-Valencia, K., Rueda-Solano, L. A., Gutiérrez-Cérdenas, P. D. A. & Vargas-Salinas, F. (en prensa). Cantos en ranas y sapos de Colombia: estado del conocimiento y perspectivas de investigación en ecoacústica. *Neotropical Biodiversity*.
- Robbins, M. B., Graves, G. R. & Remsen, Jr. J. V. 1997. In Memoriam: Theodore A. Parker III, 1953-1993. *Ornithological Monographs*, (48), 1-5.
- Rodríguez, A. & Mora, E. C. (2006). The echolocation repertoire of *Eptesicus fuscus* (Chiroptera: Vespertilionidae) in Cuba. *Caribbean Journal of Science*, 42(1), 121.
- Rohtla, E.A., Russell, A.P. & Bauer, A.M. (2019). Sounding Off: Relationships between call properties, body size, phylogeny, and laryngotracheal form of geckos. *Herpetologica*, 75(3), 175-197. <https://doi.org/10.1655/D-19-00021>
- Rogers, D. S., Belk, M. C., González, M. W. & Coleman, B. L. (2006). Patterns of habitat use by bats along a riparian corridor in northern Utah. *The Southwestern Naturalist*, 51(1), 52-58.
- Romero-García, J., Clavijo-Garzon, S. & Bernal, M. H. (2015). The advertisement call of three highland endemic species (Anura: Craugastoridae) from the Andean mountains of Colombia. *Zootaxa*, 4007, 298-300.
- Rojas, B., Amézquita, A. & Delgadillo, A. (2006). Matching and symmetry in the frequency recognition curve of the poison frog *Epipedobates trivittatus*. *Ethology*, 112, 564-571.
- Rountree, R. A., Gilmore, R. G., Goudey, C. A., Hawkins, A. D., Luczkovich, J. J. & Mann, D. A. (2006). Listening to fish: applications of passive acoustics to fisheries science. *Fisheries*, 31(9), 433-446. [https://doi.org/10.1577/1548-8446\(2006\)31\[433:LT-FJ\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8446(2006)31[433:LT-FJ]2.0.CO;2)
- Rueda-Almonacid, J. V., Carr, J. L., Mittermeier, R. A., Rodríguez-Mahecha, J. V., Mast, R. B., Vogt, R. C., Rhodin, A. G., Ossa-Velásquez, J., Rueda, J. N. y Mittermeier, C. G. (2007). *Las tortugas y los cocodrilianos de los países andinos del trópico*. Serie de guías tropicales de campo. Bogotá D.C.: Conservación Internacional.
- Samways, M. J. (2005). *Insect Diversity Conservation*. Cambridge: Cambridge University Press. 76 pp.
- Sanborn A. (2008) Acoustic communication in insects. In: Capinera J.L. (eds) *Encyclopedia of Entomology*. Dordrecht: Springer,
- Sánchez-Guzmán, J. N. & Losada-Prado, S. (2016). Características de la avifauna en un fragmento de bosque húmedo premontano afectado por ruido vehicular. *Revista Mutis*, 6(2), 7-18.
- Schulenberg, T. S. & Parker III, T. A. (1997). A new species of tyrant-flycatcher (Tyrannidae: *Tolmomyias*) from the western Amazon basin. *Ornithological Monographs*, 722-731.
- Sethi, S. S., Ewers, R. M., Jones, N. S., Signorelli, A., Picinali, L. & Orme, C. D. L. (2020). SAFE Acoustics: an open-source, real-time eco-acoustic monitoring network in the tropical rainforests of Borneo. *bioRxiv*. <https://doi.org/10.1101/2020.02.27.968867>
- Sousa-Lima, R. S., Paglia, A. P. & da Fonseca, G. A. (2008). Gender, age, and identity in the isolation calls of Antillean manatees (*Trichechus manatus manatus*). *Aquatic mammals*, 34(1), 109-122. <https://doi.org/10.1578/AM.34.1.2008.109>
- Sousa-Lima, R. S. & Clark, C. W. (2008). Modelling the effect of boat traffic on the fluctuation of humpback whale singing activity in the Abrolhos National Marine Park, Brazil. *Canadian Acoustics*, 36(1), 174-181.

- Sousa-Lima, R. S., Norris, T. F., Oswald, J. N. & Fernandes, D. P. (2013). A review and inventory of fixed autonomous recorders for passive acoustic monitoring of marine mammals. *Aquatic Mammals*, 39(1), 23-53.
<https://doi.org/10.1109/RIOAcoustics.2013.6683984>
- Starnberger I., Preininger D. & Höld, W. (2014). From uni- to multimodality: towards an integrative view on anuran communication. *Journal of Comparative Physiology A*, 200, 777-787.
<https://doi.org/10.1007/s00359-014-0923-1>
- Strewe, R. & Navarro, C. (2004). New and noteworthy records of birds from the Sierra Nevada de Santa Marta region, north-eastern Colombia. *Bulletin of the British Ornithologists' Club*, 124 (1), 38-51.
- Širović, A., Cutter, G. R., Butler, J. L. & Demer, D. A. (2009). Rockfish sounds and their potential use for population monitoring in the Southern California Bight. *ICES Journal of Marine Science*, 66(6), 981-990.
<https://doi.org/10.1093/icesjms/fsp064>
- Tavera, J. J. (2002). *Aspectos filogenéticos y biogeográficos del género Bagre (Ostariophysi: Siluriformes: Ariidae) basados en un análisis morfométrico.* (Trabajo de grado) Bogotá D.C.: Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.
- Tirira, D. (1999). *Mamíferos del Ecuador* (Vol. 2). Quito: Museo de Zoología, Centro de Biodiversidad y Ambiente, Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- Tobón, L. E. & Posada, C. A. (2015). Descomposición de señales bioacústicas usando familias de polinomios ortogonales. *Revista de Investigaciones Universidad del Quindío*, 27(1), 39-45.
- Thompson, M. E., Schwager, S. J., Payne, K. B. & Turkalo, A. K. (2010). Acoustic estimation of wildlife abundance: methodology for vocal mammals in forested habitats. *African Journal of Ecology*, 48(3), 654-661.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2028.2009.01161.x>
- Twomey, E. & Brown, J. L. (2009). Another new species of *Ranitomeya* (Anura: Dendrobatidae) from Amazonian Colombia. *Zootaxa*, 2302, 48-60.
- Umeed, R., Niemeyer Attademo, F. L. & Bezerra, B. (2018). The influence of age and sex on the vocal repertoire of the Antillean manatee (*Trichechus manatus manatus*) and their responses to call playback. *Marine Mammal Science*, 34(3), 577-594.
<https://doi.org/10.1111/mms.12467>
- Vargas-Salinas, F. & Amézquita, A. (2013a). Stream noise, hybridization, and uncoupled evolution of call traits in two lineages of poison frogs: *Oophaga histrionica* and *Oophaga lehmanni*. *PloS one*, 8(10).
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0077545>
- Vargas-Salinas, F. & Amézquita, A. (2013b). Traffic noise correlates with calling time but not spatial distribution in the threatened poison frog *Andinobates bombetes*. *Behaviour*, 150, 569-584.
<https://doi.org/10.1163/1568539X-00003068>
- Vargas-Salinas F., Dorado-Correa, A. & Amézquita, A. (2014). Microclimate and stream noise predict geographic divergence in the auditory signal of a threatened poison frog. *Biotropica*, 46, 748-755.
<https://doi.org/10.1111/btp.12169>
- Vargas-Salinas, F., Angarita-Sierra, T., Ospina-L, A. M., Rocha-Úsuga, A. A. & Rueda-Solano, L. A. (2019). Comunicación y ecología reproductiva. En Vargas-Salinas, F., Muñoz-Avila, J. A. y Morales-Puentes, M. E. (Eds.). *Biología de los Anfibios y Reptiles en el bosque seco tropical del norte de Colombia*. Pp: 264. Tunja: Editorial UPTC.
- Velásquez, N. A. (2014). Geographic variation in acoustic communication in anurans and its neuroethological implications. *Journal of Physiology-Paris*, 108(2-3), 167-173.
- Vigoder, F. M., Ritchie, M. G., Gibson, G. & Peixoto, A. A. (2013). Acoustic communication in insect disease vectors. *Memórias do Instituto Oswaldo Cruz*, 108, 26-33.
<https://doi.org/10.1590/0074-0276130390>
- Von, C. M. H. & Grajales, A. (2007). Comportamiento de dos especies nativas, Dorada (*Brycon moorei*) y Bocachico (*Prochilodus reticulatus*) sembradas en condiciones artificiales de cultivo, en policultivo con tilapia nilótica (*Oreochromis niloticus*). *Revista Electrónica de Ingeniería en Producción Acuícola*, 2(2).
- Wells, K. D. (2007). *The Ecology and Behavior of Amphibians*. Chicago: University of Chicago Press.
- Wilczynski, W. & Ryan, M. J. (1999). Geographic variation in animal communication systems, In Foster S. A. y Endler, J. A. (Eds.) *Geographic Variation in Behavior*. Pp: 234-261. New York: Oxford University Press.
- Zamora-Gutiérrez, V., Ortega, J., Avila-Flores, R., Aguilar-Rodríguez, P. A., Alarcón-Montano, M., Avila-Torresagatón, L. G., ... & Chávez-Cauich, M. (2020). The Sonozotz project: Assembling an echolocation call library for bats in a megadiverse country. *Ecology and Evolution*, 1-16.
<https://doi.org/10.1002/ece3.6245>
- Zhong, M., LeBien, J., Campos-Cerqueira, M., Dodhia, R., Ferres, J. L., Velev, J. P. & Aide, T. M. (2020). Multispecies bioacoustic classification using transfer learning of deep convolutional neural networks with pseudo-labeling. *Applied Acoustics*, 166, 107375.
<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107375>

Daniela Martínez Medina

Fundación Reserva Natural La Palmita,
Centro de Investigación
Bogotá, Colombia
danimmo87@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-9431-8399->

Orlando Acevedo-Charry

Instituto de Investigación de Recursos Biológicos
Alexander von Humboldt
Villa de Leyva, Colombia
oacevedo@humboldt.org.co
<https://orcid.org/0000-0003-4964-8994>

Sofía Medellín-Becerra

Universidad de los Andes
Bogotá, Colombia
sofiamedellin1904@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-6768-2411>

Juliana Rodríguez-Fuentes

Universidad de los Andes
Bogotá, Colombia
j.rodriguez18@uniandes.edu.co
<https://orcid.org/0000-0002-9825-9912>

Silvia López-Casas

The Nature Conservancy
Bogotá, Colombia
silvilopezcasas@yahoo.com
<https://orcid.org/0000-0003-3329-4976>

Sebastián Muñoz-Duque

Universidad de Antioquia
Medellín, Colombia
sebasemd@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-2593-4291>

Mauricio Rivera-Correa

Universidad de Antioquia
Medellín, Colombia
mauricio.rivera1@udea.edu.co
<https://orcid.org/0000-0001-5033-5480>

Yelenny López-Aguirre

Universidad del Quindío
Armenia, Colombia
yelennylopez19@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-5326-4331>

Fernando Vargas-Salinas

Universidad del Quindío
Armenia, Colombia
fvargas@uniquindio.edu.co
<https://orcid.org/0000-0003-1251-647X>

Oscar Laverde-R.

Pontificia Universidad Javeriana
Bogotá, Colombia
laverdeo@javeriana.edu.co
<https://orcid.org/0000-0003-0447-4724>

Miguel E. Rodríguez-Posada

Fundación Reserva Natural La Palmita, Centro de Investigación
Bogotá, Colombia
director.cientifico@lapalmita.com.co
<https://orcid.org/0000-0001-5670-3440>

Estado, desarrollo y tendencias de los estudios en acústica de la fauna en Colombia

Citación del artículo: Martínez-Medina, D., Acevedo-Charry, O., Medellín-Becerra, S., Rodríguez-Fuentes, J., López-Casas, S., Muñoz-Duque, S., Rivera-Correa, M., López-Aguirre, Y., Vargas-Salinas, F., Laverde-R, O. & Rodríguez-Posada, M. (2021). Estado, desarrollo y tendencias de los estudios en acústica de la fauna en Colombia. *Biota Colombiana*, 22(1), 7-25.




<https://doi.org/10.21068/c2021.v22n01a01>

Recibido: 9 de Julio 2020

Aceptado: 15 de noviembre 2020

Relationship between acoustic indices, length of recordings and processing time: a methodological test

Relación entre índices acústicos, duración de las grabaciones y tiempo de procesamiento: una prueba metodológica

Edgar Cifuentes  , Juliana Vélez Gómez  , Simon J. Butler  

Abstract

Ecoacoustic approaches have the potential to provide rapid biodiversity assessments and avoid costly fieldwork. Their use in biodiversity studies for improving management and conservation of natural landscapes has grown considerably in recent years. Standardised methods for sampling acoustic information that deliver reliable and consistent results within and between ecosystems are still lacking. Sampling frequency and duration are particularly important considerations because shorter, intermittent recordings mean recorder batteries last longer and data processing is less computationally intensive, but a smaller proportion of the available soundscape is sampled. Here, we compare acoustic indices and processing time for subsamples of increasing duration clipped from 94 one-hour recordings, to test how different acoustic indices behave, in order to identify the minimum sample length required. Our results suggest that short recordings distributed across the survey period accurately represent acoustic patterns, while optimizing data collection and processing. ACI and H are the most stable indices, showing an ideal sampling schedule of ten 1-minute samples in an hour. Although ADI, AEI and NDSI well represent acoustic patterns under the same sampling schedule, these are more robust under continuous recording formats. Such targeted subsampling could greatly reduce data storage and computational power requirements in large-scale and long-term projects.

Keywords. Ecoacoustics. Frequency of samples. Processing time. Soundscape ecology.

Resumen

La ecoacústica tiene el potencial de proporcionar evaluaciones rápidas de biodiversidad, evitando costosas salidas de campo. Su uso en estudios de biodiversidad para mejorar la gestión y conservación de paisajes naturales ha crecido considerablemente en los últimos años. Aún faltan métodos estandarizados para muestrear información acústica, que brinden resultados confiables y consistentes dentro y entre ecosistemas. La frecuencia y la duración de las muestras son consideraciones particularmente importantes, porque grabaciones cortas e intermitentes hacen que el consumo de las baterías de la grabadora sea menor y el procesamiento de datos sea menos intenso computacionalmente, pero se muestrea una proporción menor del paisaje sonoro. En este estudio, comparamos índices acústicos y el tiempo de procesamiento para submuestras de diferentes duraciones, recortadas de 94 grabaciones de una hora, para entender el comportamiento de los diferentes índices, a fin de identificar la duración mínima requerida de las muestras. Nuestros resultados sugieren que grabaciones de corta duración, distribuidas a lo largo del período estudiado, representan con precisión los patrones acústicos y a su vez optimizan la recopilación y el procesamiento de datos. ACI y H son los índices más estables, mostrando un cronograma de muestreo ideal de diez muestras de 1 minuto por hora. Aunque ADI, AEI y NDSI representan bien los patrones acústicos bajo el mismo cronograma de muestreo, éstos son más robustos bajo formatos de grabación continua. Este tipo de submuestreo podría reducir en gran medida el almacenamiento de datos y los requisitos de potencia computacional en proyectos a gran escala y a largo plazo.

Palabras clave. Ecoacústica. Ecología del paisaje sonoro. Diseño experimental. Frecuencia de muestreo.

Introduction

Quantifying biological diversity is fundamental for setting priorities for conservation (Brooks *et al.*, 2006; Mittermeier *et al.*, 1998), particularly in the current period of dramatic biodiversity loss (Ceballos *et al.*, 2015). This has traditionally relied on detailed species inventories, which often demands an intense, costly sampling effort, especially in high-biodiversity areas (Lawton *et al.*, 1998). Funding constraints mean many countries have been unable to implement adequate monitoring and therefore lack vital biodiversity information (Collen *et al.*, 2008), and there is an urgent need to develop more efficient monitoring strategies. One approach has been to develop rapid biodiversity assessment methods that obtain indicators from indirect cues of diversity, such as the sound produced by animals (Sueur *et al.*, 2008).

Examining the spatial and temporal variation in, and relationships between, sounds that emerge from biological, geophysical and anthropogenic sources to form a “soundscape” can provide fundamental insights into environmental patterns and processes operating across landscapes (Pijanowski *et al.*, 2011; Sueur & Farina, 2015). Whilst the use of acoustic tools in biodiversity conservation is not new (Baptista & Gaunt, 1997), its use as a tool for monitoring biodiversity health and quantifying responses to land-use change and management has grown rapidly in recent years (Ritts *et al.*, 2016). It is particularly valuable in ecological research and conservation biology, because it is non-invasive, sensitive to multiple taxa, and allows widespread data collection since several places can be simultaneously surveyed (Gasc *et al.*, 2015; Machado *et al.*, 2017).

Analytical tools for processing soundscape recordings have improved in recent years, enabling large amounts of data to be readily analysed with minimal acoustical expertise through the use of standardised acoustic indices (Gasc *et al.*, 2015). These acoustic indices can be used to quantify, for example, the acoustic complexity, diversity or evenness of a soundscape at a specific place during a limited time period (Gasc *et al.*, 2013). Given that the biophony – sounds generated by the community of species present – is a major contributor to soundscapes, the potential for using acoustic indices for biodiversity monitoring has been explored using both computational experiments (Zhao *et al.*, 2019) and by evaluating their correlation with field-derived measurements such as number of song types (Sueur *et al.*, 2008), species richness (Jorge *et al.*, 2018; Towsey *et al.*, 2014), and functional diversity (Gasc *et al.*, 2013). Indeed, acoustic analyses

are now widely used for biodiversity monitoring and methodological guidelines for sampling design (Sugai *et al.*, 2019), which recommend the use of continuous recordings and the selection of a range of acoustic indices to better capture site variability and acoustic complexity, have recently been developed (Bradfer-Lawrence *et al.*, 2019). However, meeting these guidelines requires the collection and storage of large data files and can pose significant data processing challenges that remain to be explored. Furthermore, there are still unresolved questions around how acoustic indices represent different elements of biodiversity and how to optimize their use for acoustic monitoring and their relationship with sampling schedule and recording duration.

The present study focuses on the behaviour of acoustic indices according to recording duration and sampling regularity, in order to inform the optimal sampling strategy for biodiversity assessments; shorter and less frequent recordings result in a slower drain of recording device batteries and reduced storage requirements, thus allowing devices to be deployed for longer periods of time, but may not capture fine-scale temporal variation in acoustic characteristics. We also calculated the processing time required to undertake each acoustic analysis. Specifically, we test the performance of and required processing time for five different acoustic indices (Acoustic Complexity Index (ACI) (Pieretti *et al.*, 2011); Acoustic Diversity Index (ADI) (Villanueva-Rivera *et al.*, 2011); Acoustic Evenness Index (AEI) (Villanueva-Rivera *et al.*, 2011); Acoustic Entropy Index (H) (Sueur *et al.*, 2008); and Normalized Difference Soundscape Index (NDSI) (Kasten *et al.*, 2012), using recordings varying in length from 1 minute to 60 minutes and collected in the mega diverse settings of the Brazilian Amazon and Cerrado.

Material and methods

Study area. Sound files were recorded in two locations in Brazil: Site 1 (0°01′08.0″S–51°07′22.1″W) is a secondary Amazon rainforest patch surrounded by farms and minor urban areas, whilst Site 2 (21°42′51.3″S–45°00′42.4″W) is three kilometres away from an urban area and located in a secondary forest of transition between Mata Atlantica and Cerrado.

Data collection. SongMeter SM4 © recorders (Wildlife Acoustics, Inc.) were used to record sounds in both sampling sites in January 2018. The devices were programmed to continuously record one-hour WAV files

at the default settings (*i. e.* 24 kHz sampling rate, 16 bits, stereo), for a total of 88 hours in site 1 and 50 hours in site 2. Each one-hour file was 345.3 MB and all 138 files together sum 47.7 GB. However, 44 files were subsequently discarded due to loud geophysical sounds (*e.g.* rain, thunder) that masked sounds from other sources (Sánchez-Giraldo *et al.*, 2020). This selection was done by checking spectrograms made with Kaleidoscope software version 4.5.4 (Wildlife Acoustics Inc, 2017).

Subsampling. To analyse the influence of recording duration on acoustic index characteristics, each of the 94 one-hour recordings was split into consecutive length class subsamples of 1, 5, 10, 15, 20, 30 and 40 minutes, resulting in 60 subsamples of 1 minute, 12 of 5 minutes, 6 of 10 minutes, 4 of 15 minutes, 3 of 20 minutes, 2 of 30 minutes and 1 of 40 minutes per original recording. The 40-minute subsample was taken from between minutes 10 and 50 of the original recording. To evaluate the appropriate number of subsamples to take (hereafter subsample frequency), we compared the performance of acoustic indices derived from continuous blocks of recording, with those derived from recordings representing the same total duration, but comprising multiple, shorter recordings spread evenly across the full-hour recording period. For example, acoustic indices for 40 subsamples of 1 minute, 8 of 5 minutes, 4 of 10 minutes, 2 of 20 minutes and 1 of 40 minutes were compared (Figure 1).

Data processing. All statistical and sound analyses were performed using R software version 3.4.3 (R Core Team, 2018) and the *soundecology* package (Villanueva-Rivera & Pijanowski, 2016), with ACI, ADI, AEI, H and NDSI calculated using default parameters in the *multiple_sounds* function. Since ACI is a cumulative index, it was divided by the length in minutes of each subsample to get a comparable range of values, as recommended in *soundecology* package description; other indices had no further calculations.

Statistical analysis. Spearman Rank correlations were performed to test for associations between the five indices and, for each index in turn, between the value derived from processing the complete one-hour recording and those from processing subsamples of varying duration. For the subsample frequency analysis, index values derived from all subsamples present in a specific combination of frequency and recording duration (Figure 1) were averaged, and this value was then correlated with the index value derived from processing the complete one-hour recording they were subsampled from.

Processing time. Processing time was defined as the time taken to calculate each acoustic index for a given recording and is expected to vary according to computing capabilities. This study was performed in two phases, each with different computing capabilities.

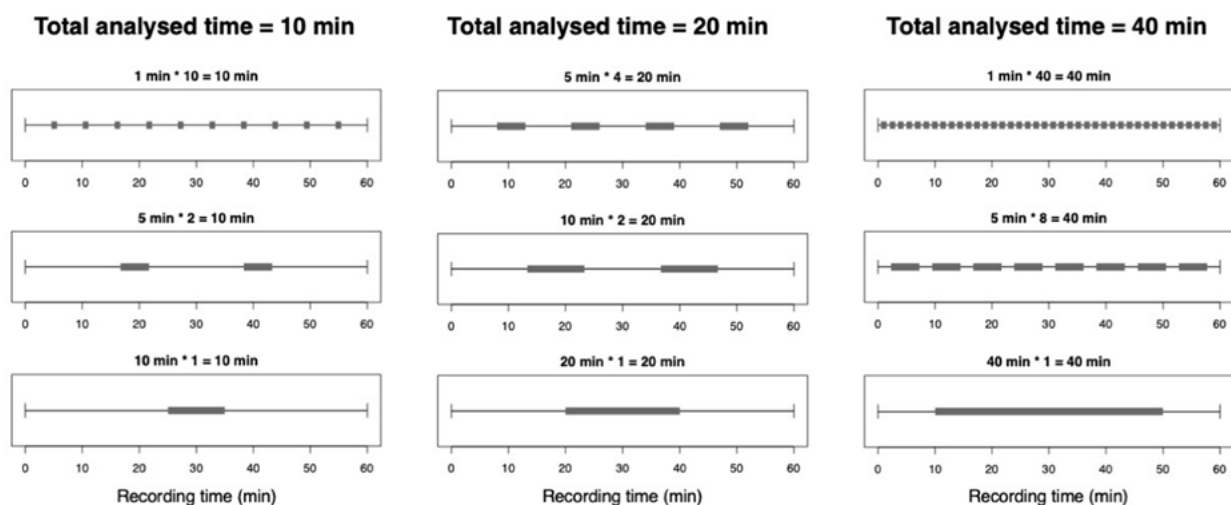


Figure 1. Experimental design examples for different combinations of subsample frequency, adding up to a total analysed time of 10, 20 and 40 minutes. Grey segments represent the subsamples taken from one-hour files.

Figura 1. Ejemplos de diseño experimental para diferentes combinaciones de frecuencia de las submuestras que suman un tiempo total analizado de 10, 20 y 40 minutos. Los segmentos grises representan las submuestras tomadas de archivos de una hora.

Phase 1 was a preliminary analysis, for which calculations were run on a computer with an Intel Core i7 processor running at 1.8 GHz, using 4GB 1333 MHz DDR3 of RAM, running Mac OS X 10.8 Mountain Lion. Phase 2 was run in a more powerful computer with an Intel Core i7 processor running at 3.2 GHz, using 64GB 2667 MHz DDR4 of RAM, running macOS 10.14 Mojave. Note that, ACI can only be calculated for recordings up to about 20 minutes; in phase 1, a simple linear regression was used to predict processing time for recordings of 30, 40 and 60 minutes, but in phase 2, ACI processing times for 30, 40 and 60 minutes were obtained by summing index values derived from the appropriate number of 10-minute recordings.

Results

Acoustic Complexity Index (ACI). Whilst statistically significant, the correlations between ACI and the other acoustic indices were weakest, with no clear linear patterns identified (Figure 2). Reducing recording length introduced most variation in ACI, with correlation values for indices for individual 1-minute samples and their associated one-hour recording varying between 0.55 and 0.87, with a median of 0.76 (Figure 3A). As subsample duration increased, median correlation values increased and the range of correlation values for individual subsamples of the same duration decreased, with the level of the lowest correlation values increasing quicker than that of the highest correlation value (Figure 3A). Splitting the total sampling period into multiple, shorter sampling periods of the same total length improved sample representativeness (Figure 3B). This is especially noticeable for shorter subsamples, with the average metric across 10 or more one-minute subsamples having a correlation values with the index from the associated one-hour recording of >0.97 (Figure 3B).

Acoustic Diversity Index (ADI) and Acoustic Evenness Index (AEI). Although ADI and AEI measure different acoustic characteristics (Villanueva-Rivera *et al.*, 2011), they were very strongly and negatively correlated (Spearman $\rho = -0.99$, $n = 42\ 864$, $p < 0.001$, Figure 2). As subsample duration increased, so the strength of the correlation between the ADI for the subsample and ADI for the associated one-hour recording also increased, with variability in correlation strength between individual subsamples of the same duration and the full recording also decreasing. A

similar pattern was evident for AEI (Figure 3A). Continuous recordings were more representative of the associated one-hour recording than recordings of the same total duration, but split over multiple, shorter subsamples (Figure 3B). Interestingly, index values averaged over multiple subsamples were never truly representative of the full hour recording, even if the cumulative time sampled was very high. For instance, averaged ADI values for 60 1-minute subsamples had the same degree of correlation (0.88) with the whole hour as the averaged ADI values for 10 1-minute subsamples (Figure 3B).

Acoustic Entropy (H). H showed a strong positive correlation with ADI and NDSI, a strong negative correlation with AEI, and a very weak but significant negative correlation with ACI (Figure 2). Among all indices, H showed the highest correlation between values for subsamples and full recordings and lowest variability between subsamples of the same duration (Figure 3A). Half of the correlations between 1-minute subsamples and their associated one-hour recording were above 0.9, with the lowest correlation value was 0.72 (Figure 3A). H follows a similar pattern to ACI in that index values averaged across multiple, shorter samples were more representative of the one-hour recording than values from a continuous recording of the same total length (Figure 3B). That is, for example, the average index value for 10 samples of 1-minute was more strongly correlated with the index value for the associated one-hour recording than the average metric across 2 samples of 5 minutes or the metric for one 10-minute sample (Figure 3B).

Normalized Difference Soundscape Index (NDSI). This index is weakly associated with the other indices calculated in this study (Figure 2) but shows similar patterns to ADI and AEI with regard recording length and subsampling frequency (Figure 3). NDSI was the most sensitive index to recording length, showing the sharpest decline in correlation values when shortening subsample length (Figure 3A). However, the variability in correlation strength between individual sub-samples of the same length and the associated one-hour recording was lower than for the other indices examined, particularly at shorter subsample lengths (Figure 3A). As with ADI and AEI, index values from continuous recordings tended to be more representative of the one-hour recordings than averaged values from across multiple, shorter subsamples of the same total length (Figure 3B).

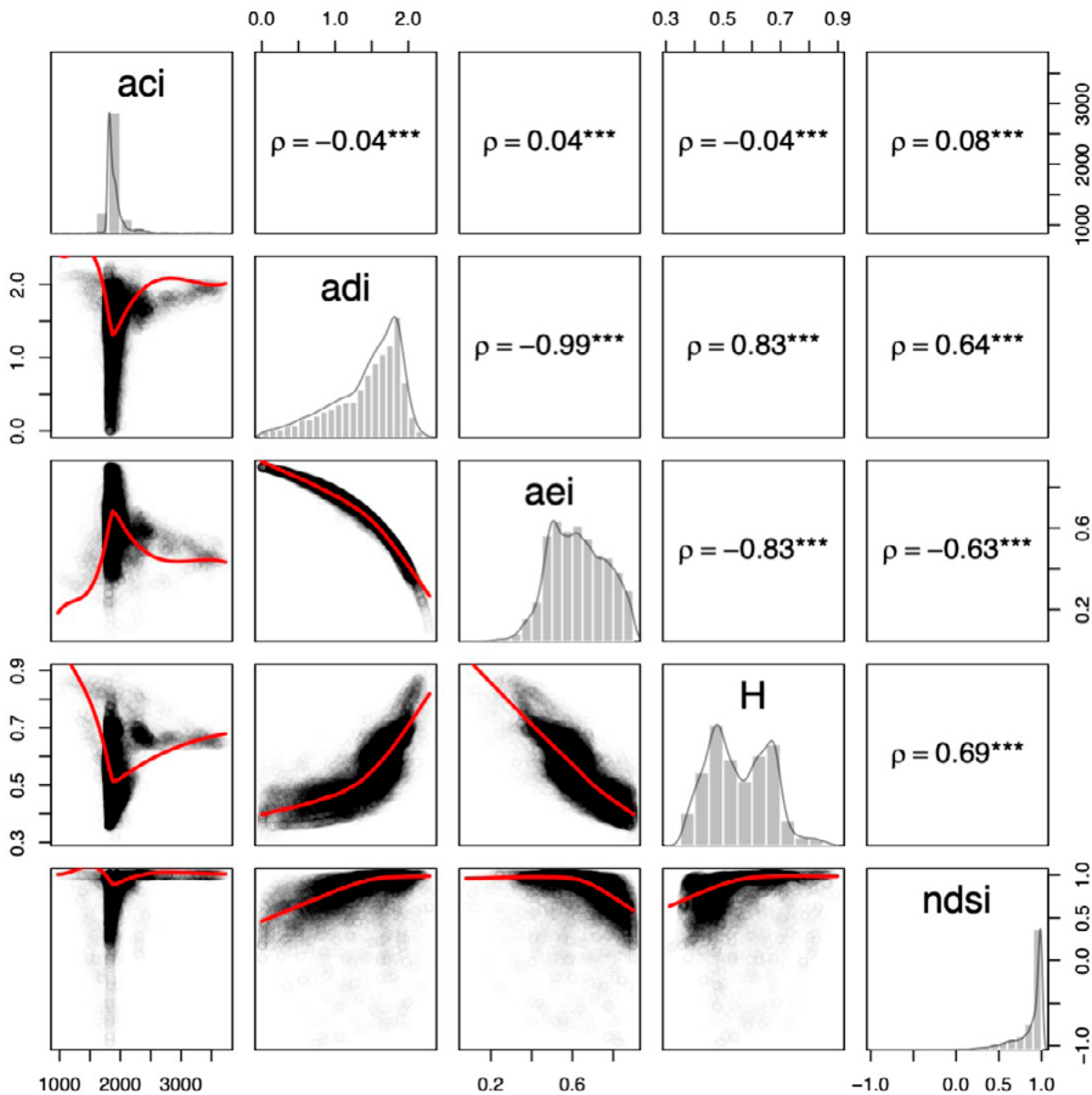


Figure 2. Data distribution and associations between acoustic indices. Spearman correlation values and scatterplots between indices ($n = 42\,864$), and histograms with a density line for each index are shown. Red line indicates a LOESS (locally estimated scatterplot smoothing). All correlations have p-values less than 0.001 (***). ACI-Acoustic Complexity Index, ADI-Acoustic Diversity Index, AEI-Acoustic Evenness Index, H-Acoustic Entropy Index and NDMS-Normalized Difference Soundscape Index.

Figura 2. Distribución de datos y asociaciones entre índices acústicos. Se muestran los valores de correlación de Spearman y los diagramas de dispersión entre los índices ($n = 42\,864$), y los histogramas con línea de densidad para cada índice. La línea roja indica LOESS (regresión local). Todas las correlaciones tienen valores p inferiores a 0,001 (***). ACI: índice de complejidad acústica, ADI: índice de diversidad acústica, AEI: índice de uniformidad acústica, H: índice de entropía acústica y NDMS: índice de paisaje sonoro de diferencia normalizada.

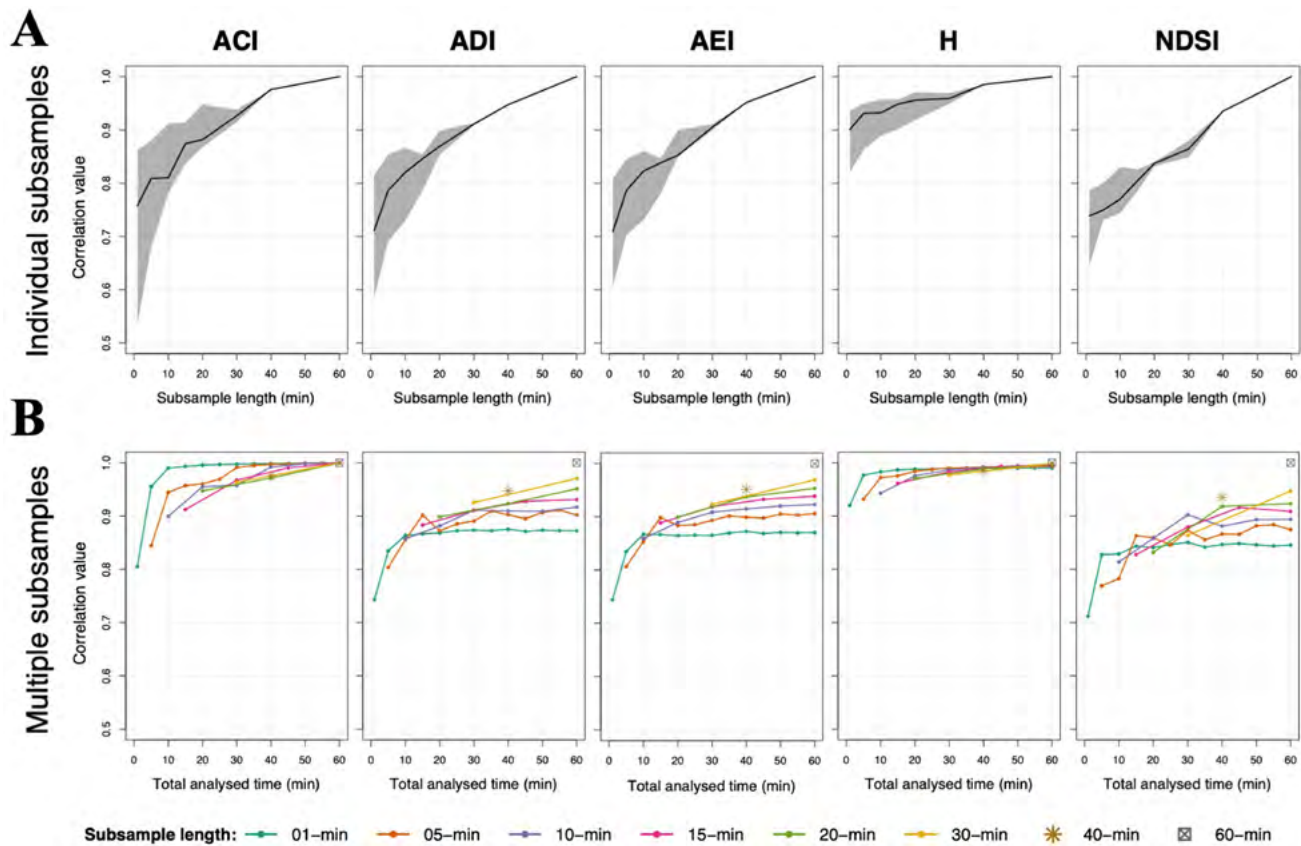


Figure 3. Spearman rank correlation between: A, the acoustic index value for each subsample duration and the complete one-hour recording from which it was subsampled; B, mean index values for subsamples representing combinations of recording length and subsample frequency (see Methods and Figure 1 for more details) and the complete one-hour recording. In A, the black line indicates the median of correlation values and the shaded areas denote the range. ACI, Acoustic Complexity Index; ADI, Acoustic Diversity Index; AEI, Acoustic Evenness Index; H, Acoustic Entropy Index; NDSI, Normalized Difference Soundscape Index.

Figura 3. Correlación de rango de Spearman entre: A, el valor del índice acústico para cada submuestra y la grabación de una hora de la cual se submuestreó; B, valor promedio del índice de las submuestras presentes en cada combinación de duración y frecuencia de muestreo (ver Métodos y Figura 1 para más detalles) y la grabación completa de una hora. En A, la línea negra indica la mediana de los valores de correlación y las áreas sombreadas denotan el rango. ACI, índice de complejidad acústica; ADI, índice de diversidad acústica; AEI, índice de uniformidad acústica; H, índice de entropía acústica; NDSI, índice de paisaje sonoro de diferencia normalizada.

Processing time. Processing time for all indices increased with increasing recording length, but the rate of increase differed between indices. Both absolute time and rate of increase was substantially lower with increased computational capabilities. For short-duration recordings, or with high computing capabilities (3.2 GHz processor and 64GB RAM), ADI, AEI and

ACI processing times were approximately one-third to one-quarter those of H and NDSI but, at lower computing capabilities (1.7 GHz processor and 4GB RAM), processing time for ADI and AEI increased exponentially with increasing recording duration and exceeding NDSI processing time for 60-minute recordings (Figure 4).

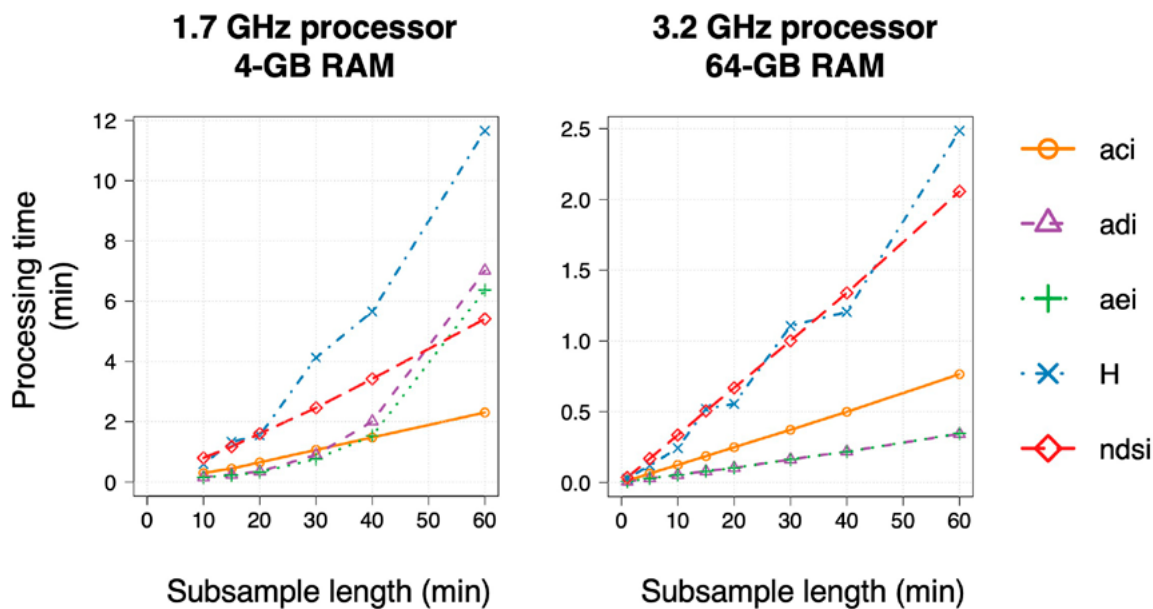


Figure 4. Mean processing time for computing acoustic indices at each recording length with two different equipments, using the *multiple_sounds* function in *soundecology* R package (Villanueva-Rivera & Pijanowski, 2016). Standard error bars are not shown as they were negligible, due to consistency in processing time (mean relative standard error of 0.28%).

Figura 4. Tiempo promedio de procesamiento que tardó el cálculo de los índices acústicos en cada tamaño de grabación con dos equipos diferentes, utilizando la función *multiple_sounds* de la biblioteca *soundecology* en R (Villanueva-Rivera & Pijanowski, 2016). Las barras de error estándar no se muestran, debido a que el tiempo de procesamiento fue altamente consistente y el error no fue significativo (error estándar relativo medio de 0.28%).

Total processing time was 195.9 hours, equivalent to ~8 days, using high computing capabilities for calculating five acoustic indices to all subsamples and the complete one-hour file (*i.e.* 120.9 hours of subsamples divided in: 391 of 1 minute, 78 of 5 minutes, 21 of 10 minutes, 10 of 15 minutes, 6 of 20 minutes, 3 of 30 minutes, 1 of 40 minutes and 1 of 60 minutes). Total processing time for each index was 28.1 hours for ACI, 13.5 hours for ADI, 13.5 hours for AEI, 64.0 hours for H and 76.8 hours for NDSI.

Discussion

Studies into the use of acoustic indices in environmental research suggest that continuous recordings in the field are preferable, because they might reduce the deployment times required to capture soundscape variability (Bradfer-Lawrence *et al.*, 2019). However, we show that distributing samples of shorter recording length across the survey period (*i.e.*, representative of the population of continuous recordings) can

offer an opportunity to optimize data collection and processing, while identifying analogous patterns in acoustic indices values, much more for ACI and H than for AEI, ADI or NDSI. Given that recommendations for acoustic monitoring suggest collecting a minimum of 120 hours of audio recordings per site to reduce acoustic indices variability and improve precision (Bradfer-Lawrence *et al.*, 2019), such targeted subsampling could greatly reduce data storage and computational power requirements.

Index choice, frequency of recording and optimal recording length will all depend on the biodiversity characteristics being inferred from soundscape records. For example, NDSI is highly informative in measuring changes of anthropogenic pressures, as it gives an indication of an increase (or decrease) in anthrophony (Kasten *et al.*, 2012), whilst ACI, ADI, AEI, and H are more related to direct diversity measures (*e.g.* Bradfer-Lawrence *et al.*, 2019; Gasc *et al.*, 2013; Jorge *et al.*, 2018; Sueur *et al.*, 2008; Towsey *et al.*, 2014). Whilst indices derived from shorter recordings are broadly

representative of the immediate time period from which they are sampled, our results do suggest that both the precision and accuracy of ACI, ADI and AEI in particular will decrease with recording duration (Figure 3A). However, NDSI precision seems less affected by recording duration, whilst the precision and accuracy of H appear more stable under changes in recording duration. Each acoustic index also behaves differently in response to changes in sampling frequency, with measures of AEI, ADI and NDSI more robust under continuous recording formats and ACI and H more robust under shorter, more frequent recording formats.

Although index choice should primarily be determined by the research objectives, other considerations, such as processing time, might help in the index selection, especially if computational power is a limiting factor. When computational capability is limited, calculation time of H from short recordings is equivalent to that for other indices, but as recording length increases, processing times for H increase exponentially and the calculation time of H from a one-hour recording is twice that required for other indices. This could be related to the way it is computed, as it is estimated as the product of both temporal and a spectral entropy, which requires the computation of a mean spectrum using a Short Time Fourier Transform based on a non-overlapping sliding function window (Sueur *et al.*, 2008). If focusing on acoustic characteristics represented by H, it would be much more efficient to use multiple shorter recording lengths, especially as the index value itself seems robust to this type of recording schedule. ADI and AEI processing time also increased exponentially with recording duration, but only with low computational capabilities. This is likely to be related to computer memory saturation and reduction of processing performance. Conversely, NDSI and ACI present a linear trend for both computational capabilities, probably explained by their simpler calculation that involves few steps, and their relative slow rate of increase in processing time with increasing recording duration makes them valuable indices when dealing with large amounts of data (Pieretti *et al.*, 2011). Index computation optimization can also be achieved by evaluating the correlation between indices before conducting further processing and analysis; ADI, AEI and H appear highly correlated so computing all of them may be redundant as they reflect the same acoustic patterns.

When designing a recording schedule for biodiversity assessments using acoustic information, it is important to consider how the acoustic index behaves in relation

to the duration and periodicity of samples. Long term projects for monitoring changes in biodiversity may prefer to use shorter recordings to prolong sampling periods and capture a wider temporal space. In such cases, we recommend the use of ACI and H, due to their accuracy and precision to representing soundscape characteristics with short recordings. Additionally, data processing would be less demanding (in particular for big data analysis), thus enabling rapid assessments and on-time actions to changes under the scope of biodiversity conservation.

Acknowledgments

We would like to thank Itxaso Quintana for her valuable comments and support in field work. E.F. Cifuentes was financially supported by the European Commission through the program Erasmus Mundus Master Course – International Master in Applied Ecology (EMMC-IMAE) (FPA 532524-1-FR-2012-ERA MUNDUS-EMMC).

References

- Baptista, L. F. & Gaunt, S. L. L. (1997). Bioacoustics as a tool in conservation studies. In J. Clemmons & R. Buchholtz (Eds.). *Behavioral approaches to conservation in the wild* (pp. 212-242). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Bradfer-Lawrence, T., Gardner, N., Bunnefeld, L., Bunnefeld, N., Willis, S. G. & Dent, D. H. (2019). Guidelines for the use of acoustic indices in environmental research. *Methods in Ecology and Evolution*, 10(10), 1796-1807.
<https://doi.org/10.1111/2041-210X.13254>
- Brooks, T. M., Mittermeier, R. A., Da Fonseca, G. A. B., Gerlach, J., Hoffmann, M., Lamoreux, J. F., ... Rodrigues, A. S. L. (2006). Global biodiversity conservation priorities. *Science*, 313(5783), 58-61.
<https://doi.org/10.1126/science.1127609>
- Ceballos, G., Ehrlich, P. R., Barnosky, A. D., García, A., Pringle, R. M. & Palmer, T. M. (2015). Accelerated modern human-induced species losses: Entering the sixth mass extinction. *Science Advances*, 1(5), e1400253.
<https://doi.org/10.1126/sciadv.1400253>
- Collen, B., Ram, M., Zamin, T. & McRae, L. (2008). The Tropical Biodiversity Data Gap: Addressing Disparity in Global Monitoring. *Tropical Conservation Science*, 1(2), 75-88.
<https://doi.org/10.1177/194008290800100202>

- Gasc, A., Pavoine, S., Lellouch, L., Grandcolas, P., & Sueur, J. (2015). Acoustic indices for biodiversity assessments: Analyses of bias based on simulated bird assemblages and recommendations for field surveys. *Biological Conservation*, 191, 306–312.
<https://doi.org/10.1016/j.biocon.2015.06.018>
- Gasc, A., Sueur, J., Jiguet, F., Devictor, V., Grandcolas, P., Burrow, C., ... Pavoine, S. (2013). Assessing biodiversity with sound: Do acoustic diversity indices reflect phylogenetic and functional diversities of bird communities? *Ecological Indicators*, 25, 279–287.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.10.009>
- Jorge, F. C., Machado, C. G., da Cunha Nogueira, S. S. & Nogueira-Filho, S. L. G. (2018). The effectiveness of acoustic indices for forest monitoring in Atlantic rainforest fragments. *Ecological Indicators*, 91, 71–76.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.04.001>
- Kasten, E. P., Gage, S. H., Fox, J. & Joo, W. (2012). The remote environmental assessment laboratory's acoustic library: An archive for studying soundscape ecology. *Ecological Informatics*, 12, 50–67.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2012.08.001>
- Lawton, J. H., Bignell, D. E., Bolton, B., Bloemers, G. F., Eggleton, P., Hammond, P. M., ... Watt, A. D. (1998). Biodiversity inventories, indicator taxa and effects of habitat modification in tropical forest. *Nature*, 391(6662), 72–76.
<https://doi.org/10.1038/34166>
- Machado, R. B., Aguiar, L., & Jones, G. (2017). Do acoustic indices reflect the characteristics of bird communities in the savannas of Central Brazil? *Landscape and Urban Planning*, 162, 36–43.
<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.01.014>
- Mittermeier, R. A., Myers, N., Thomsen, J. B., da Fonseca, G. A. B. & Olivieri, S. (1998). Biodiversity hotspots and major tropical wilderness areas: Approaches to setting conservation priorities. *Conservation Biology*, 12(3), 516–520.
<https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1998.012003516.x>
- Pieretti, N., Farina, A. & Morri, D. (2011). A new methodology to infer the singing activity of an avian community: The acoustic complexity index (ACI). *Ecological Indicators*, 11(3), 868–873.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2010.11.005>
- Pijanowski, B. C., Farina, A., Gage, S. H., Dumyahn, S. L. & Krause, B. L. (2011). What is soundscape ecology? An introduction and overview of an emerging new science. *Landscape Ecology*, 26(9), 1213–1232.
<https://doi.org/10.1007/s10980-011-9600-8>
- R Core Team. (2018). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Retrieved from <https://www.r-project.org/>
- Ritts, M., Gage, S. H., Picard, C. R., Dundas, E. & Dundas, S. (2016). Collaborative research praxis to establish baseline ecoacoustics conditions in Gitga'at Territory. *Global Ecology and Conservation*, 7, 25–38.
<https://doi.org/10.1016/j.gecco.2016.04.002>
- Sánchez-Giraldo, C., Bedoya, C. L., Morán, Vázquez, R. A., Isaza, C. V. & Daza, J. M. (2020). Ecoacoustics in the rain: understanding acoustic indices under the most common geophonic source in tropical rainforests. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, rse2.162.
<https://doi.org/10.1002/rse2.162>
- Sueur, J. & Farina, A. (2015). Ecoacoustics: the ecological investigation and interpretation of environmental sound. *Biosemiotics*, 8(3), 493–502.
<https://doi.org/10.1007/s12304-015-9248-x>
- Sueur, J., Pavoine, S., Hamerlynck, O. & Duvail, S. (2008). Rapid acoustic survey for biodiversity appraisal. *PLoS ONE*, 3(12), e4065.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0004065>
- Sugai, L. S. M., Desjonquères, C., Silva, T. S. F. & Llusia, D. (2019). A roadmap for survey designs in terrestrial acoustic monitoring. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, rse2.131.
<https://doi.org/10.1002/rse2.131>
- Towsey, M., Parsons, S. & Sueur, J. (2014). Ecology and acoustics at a large scale. *Ecological Informatics*, 21, 1–3.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2014.02.002>
- Villanueva-Rivera, L. J. & Pijanowski, B. C. (2016). *soundecology: Soundscape Ecology. R package version 1.3.2*. Retrieved from <https://cran.r-project.org/package=soundecology>
- Villanueva-Rivera, L. J., Pijanowski, B. C., Doucette, J. & Pekin, B. (2011). A primer of acoustic analysis for landscape ecologists. *Landscape Ecology*, 26(9), 1233–1246.
<https://doi.org/10.1007/s10980-011-9636-9>
- Wildlife Acoustics, Inc. (2017). *Kaleidoscope Version 4.5.4*. Retrieved from <https://www.wildlifeacoustics.com>
- Zhao, Z., Xu, Z. yong, Bellisario, K., Zeng, R. wen, Li, N., Zhou, W. Yang & Pijanowski, B. C. (2019). How well do acoustic indices measure biodiversity? Computational experiments to determine effect of sound unit shape, vocalization intensity, and frequency of vocalization occurrence on performance of acoustic indices. *Ecological Indicators*, 107, 105588.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105588>

Edgar Cifuentes

Universidad de Los Andes

Bogotá, Colombia

ed-cifue@uniandes.edu.co

<https://orcid.org/0000-0001-5918-5861>

Juliana Vélez Gómez

University of Minnesota, Saint Paul

United States of America

julianavelezgomez@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-0412-2761>

Simon J. Butler

University of East Anglia

Norwich, United Kingdom

Simon.J.Butler@uea.ac.uk

<https://orcid.org/0000-0002-5111-5639>

Relationship between acoustic indices, length of recordings and processing time: a methodological test

Citación del artículo: Cifuentes, E. Vélez-Gómez, J. & Butler, S.J. (2021). Relationship between acoustic indices, length of recordings and processing time: a methodological test. *Biota Colombiana*, 22(1), 26-35.

<https://doi.org/10.21068/c2021.v22n01a02>

Received: June 1, 2020.

Accepted: November 15, 2020

Estándares para registrar señales de ecolocalización y construir bibliotecas de referencia de murciélagos en Colombia

Standards for recording echolocation signals and building reference libraries of bats in Colombia

Daniela Martínez-Medina ^{id} ✉, Jefferson Sánchez ^{id} ✉, Danny Zurc ^{id} ✉, Francisco Sánchez ^{id} ✉, Aída Otálora- Ardila ^{id} ✉, Carlos Restrepo-Giraldo ^{id} ✉, Orlando Acevedo-Charry ^{id} ✉, Fabián Hernández Leal ^{id} ✉, Diego J. Lizcano ^{id} ✉

Resumen

La bioacústica permite monitorear murciélagos difícilmente detectados con métodos tradicionales, como las redes de niebla, y permiten obtener información sobre diferentes aspectos de la biología de las especies de estudio. En los últimos años se ha incrementado el interés por la aplicación de estos métodos y, en consecuencia, ha sido rápido el desarrollo de los equipos de grabación ultrasónica y las herramientas de análisis. Sin embargo, en el Neotrópico la bioacústica de murciélagos está en etapa de crecimiento en algunos países y apenas ahora está apareciendo en otros, por lo cual es necesario fortalecer este campo para estudiar la alta diversidad taxonómica y funcional de la región. En este contexto, es indispensable contar con bibliotecas de señales acústicas, que sirvan como referencia para identificar, validar y comparar las grabaciones de diferentes especies y localidades. Algunos países del Neotrópico han avanzado en este proceso y están construyendo estas bibliotecas de referencia. En Colombia, el trabajo a futuro implica un reto, debido a las más de 200 especies de murciélagos presentes. Este trabajo presenta las bases metodológicas para tomar grabaciones de referencia de murciélagos en Colombia y generar una guía para aquellos que se están iniciando en este campo de investigación.

Palabras clave. Bibliotecas de referencia. Chiroptera. Ecolocalización. Métodos bioacústicos. Métodos de grabación.

Abstract

Bioacoustic tools allow monitoring bats usually not detected with traditional methods, such as mist nets, and also provide information about different biological aspects of the species. The interest in applying these methods has increased in the last years, and consequently, there has been a rapid development of ultrasonic recording equipment and analysis tools. However, in the Neotropics, bat bioacoustics is emerging in some countries and just appearing in others; therefore it is necessary to reinforce this field to study the high taxonomic and functional diversity of the region. Therefore, it is essential to have bat call libraries that serve as a reference to validate and compare recordings from different species and localities. Some countries in the Neotropics have advanced in this process and are already building these reference libraries. In Colombia, the future work is challenging, due to the more than 200 bat species present. This paper establishes the methodological basis to obtain bat-reference calls in the Colombia and allow those who are just starting out in this research field.

Key words. Bioacoustic methods. Chiroptera. Echolocation. Recording methods. Reference libraries.

Introducción

La mayoría de los murciélagos son capaces de ecolocalizar, es decir de emitir señales acústicas de alta frecuencia y utilizar sus ecos para formar una “imagen” en tres dimensiones del espacio (Altringham & Fenton, 2003). En otras palabras, cuentan con un biosonar que les permite realizar complejas tareas como evitar obstáculos, identificar objetos estáticos como flores y frutos, o detectar presas potenciales en movimiento, como insectos en vuelo. Esta adaptación les ha permitido colonizar con éxito la noche y lograr una considerable diversificación que se refleja en las más de 1400 especies de murciélagos que se encuentran en el mundo (Wilson & Mittermeier, 2019; Burgin *et al.*, 2018).

Debido a las características temporales y espectrales de las señales que emiten los murciélagos en el ultrasonido, estas se pueden clasificar en tres fases: búsqueda de alimento, aproximación a una potencial fuente, y fase terminal (Griffin *et al.*, 1960). Además de presentar “llamadas sociales” las cuales se han descrito como señales empleadas para interactuar con otros individuos (Knörnschild *et al.*, 2012). Diferentes estudios han indicado que los sonidos producidos por los murciélagos presentan variabilidad ecológica (Barlow & Jones, 1997; Barclay *et al.*, 1999), geográfica (Jiang *et al.*, 2015; López-Baucells *et al.*, 2018), comportamental (Obrist, 1995), entre sexos (Puechmaille *et al.*, 2014), edades (Jones & Ransome, 1993; Siemers *et al.*, 2005), y plasticidad frente a condiciones ambientales diferentes (Gillam & McCracken, 2007).

Los murciélagos son el grupo de mamíferos más diverso Colombia (Ramírez-Chaves *et al.*, 2016). Su estudio se ha realizado principalmente usando redes de niebla como método de captura. Sin embargo, la aparición y evolución de los detectores ultrasónicos, y sus precios progresivamente más asequibles, han permitido un incremento en el uso de herramientas bioacústicas para estudiar la diversidad en ambientes tropicales (Russo & Voigt, 2016; Braun de Torrez *et al.*, 2017; Brigham, 2018). Estas herramientas han adquirido mayor relevancia para la cuantificación y monitoreo de poblaciones y ensamblajes de aquellos murciélagos que generalmente no son detectados con métodos tradicionales (Meyer *et al.*, 2011). Por lo tanto, los estudios acústicos son complementarios a los muestreos de murciélagos con redes de niebla, con trampas harpa o capturas con redes manuales (MacSwiney *et al.*, 2008; Zamora-Gutierrez *et al.*, 2016). Estudios acústicos de murciélagos han permitido obtener información sobre patrones de actividad (Bartonička & Zukal, 2003; Kalcounis-Rüppell *et al.*,

2003; Meyer *et al.*, 2004), identidad taxonómica (Barclay, 1983; Rodríguez & Mora, 2006; Xu *et al.*, 2008), uso de hábitat (Agosta, 2002; Rogers *et al.*, 2006) y otros aspectos ecológicos de los murciélagos.

En años recientes los métodos de clasificación automatizada de señales de ecolocalización de los murciélagos han tenido un considerable desarrollo estadístico y computacional para la identificación de las especies (Stathopoulos *et al.*, 2018; Heim *et al.*, 2019). El uso de métodos estadísticos de clasificación y la asequibilidad de los dispositivos de detección ultrasónica proveen el potencial para implementar programas de monitoreo a escala regional, continental y global, así como para estudios estandarizados a largo plazo (Haase *et al.*, 2018; Schmeller *et al.*, 2018; Beason *et al.*, 2019). La ventaja es que estos métodos de clasificación permiten analizar una gran cantidad de datos en un tiempo relativamente corto, aunque se ha cuestionado su precisión a la hora de diferenciar especies con señales de ecolocalización similares y el tipo de señales con las que se han entrenado los algoritmos de clasificación (Russo & Voigt, 2016).

Para que los métodos de clasificación automática sean aplicables y funcionales en países biodiversos como Colombia, se requiere de un conocimiento básico y organizado de las señales acústicas de los murciélagos, que permitan calibrar correctamente los modelos y algoritmos de clasificación. Esto implica contar con una buena identificación taxonómica de cada una de las especies de murciélagos junto con las características de las señales acústicas que emiten. Por estas razones, es fundamental contar con bibliotecas de referencia de señales acústicas de una amplia serie de localidades y hábitats (López-Baucells *et al.*, 2018), como soporte para la adecuada identificación, principalmente porque existen muchos otros factores que influyen en la variación de la estructura de las señales a nivel intraespecífico.

Si bien algunos países en Latinoamérica, como México (Zamora-Gutiérrez *et al.*, 2020), Ecuador (Rivera-Parrá & Burneo, 2013) y Brasil (Arias-Aguilar *et al.*, 2018; López-Baucells *et al.*, 2016), han dado grandes pasos para construir estas colecciones, Colombia, aún no cuenta con una biblioteca de referencia para la identificación de murciélagos, a pesar de ser el segundo país en el mundo con mayor diversidad de estos organismos. En este trabajo se proponen estándares para el registro y almacenamiento de señales de ecolocalización de murciélagos colombianos. Esta propuesta tiene como objetivo establecer las bases metodológicas mínimas para la toma, procesamiento y almacenamiento de datos

acústicos de murciélagos a nivel nacional. A continuación, se propone un marco de trabajo que plantea las bases para registrar, analizar y almacenar señales de ecolocalización de murciélagos en Colombia (Figura 1, Tabla 1).

Toma de datos en campo. Como el objetivo final de una biblioteca de referencia es permitir a futuro la identificación de las señales acústicas de murciélagos en vuelo libre bajo condiciones naturales (Zamora *et al.*, 2020), es muy importante tener en cuenta los rasgos ecológicos y comportamentales de la especie que se quiere grabar. Con base en esto, se debe escoger la metodología más apropiada. A continuación, se presentan las metodologías de grabación más utilizadas con sus respectivas recomendaciones.

Cuarto de vuelo. Los encierros o cuartos de vuelo son espacios en los cuales se libera al murciélago para obtener grabaciones controladas. Pueden construirse con

redes sintéticas sostenida por postes o tubos PVC, o pueden usarse construcciones abandonadas o invernaderos. Las grabaciones en encierro de vuelo tienen dos ventajas: 1) Se puede obtener el espécimen testigo para una colección científica. 2) Es posible tener varias grabaciones de un mismo individuo (Siemers, 2004).

Sin embargo, ya que las características de las señales son modificadas por los murciélagos en respuesta a las características específicas del espacio circundante, es posible que las grabaciones realizadas en encierros de vuelo estrechos o pequeños, contengan señales de ecolocalización similares a los tipos de señales que un murciélago emitiría dentro de un espacio cerrado o estructuralmente complejo (“cluttered”) (Anexo 1). Esta es la mayor desventaja de esta técnica, puesto que es probable que en un encierro de vuelo pequeño los murciélagos no emitan el tipo de señal que usan en vuelo libre o en un espacio abierto (Parsons & Szwedczak, 2009; Anexo 1).

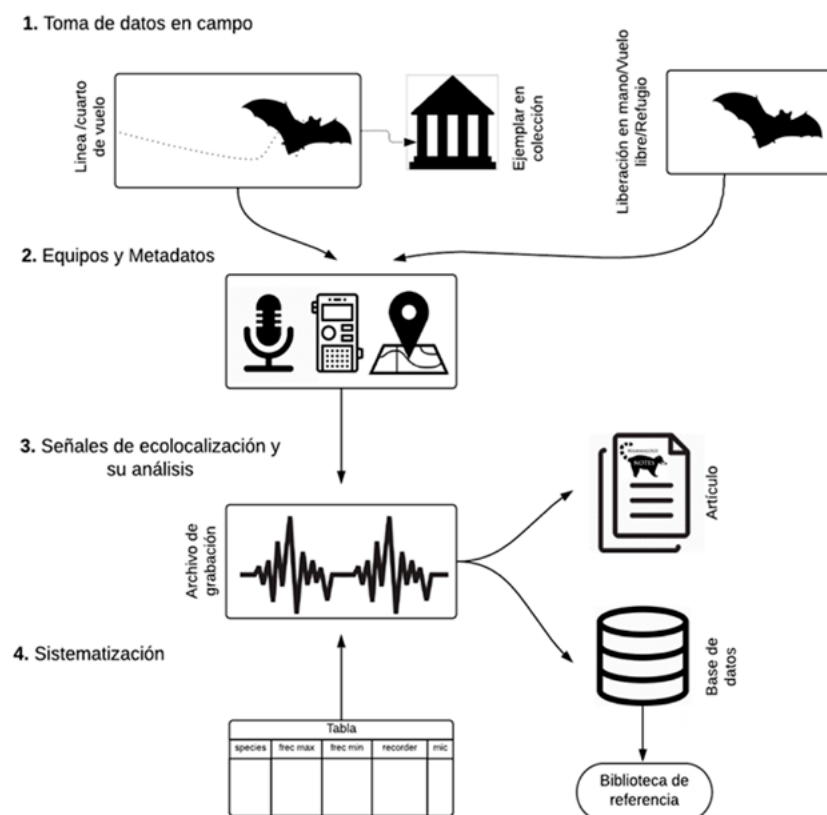


Figura 1. Marco de trabajo para registrar, analizar y almacenar señales de ecolocalización de murciélagos en Colombia.

Figure 1. Framework to record, analyze and store echolocation bat calls in Colombia.

Otra desventaja surge de la superposición de la señal acústica emitida por el murciélago y el eco resultante de las superficies que componen el encierro, que puede afectar la calidad de la grabación. Es recomendable realizar una revisión del trabajo de [Mora *et al.* \(2004\)](#) para una mejor comprensión del fenómeno de superposición y enmascaramiento de las señales acústicas. **Recomendaciones:** Se deben grabar especies de murciélagos que vuelan en espacios estructuralmente complejos o especies con señales de intensidad baja; no es recomendable usar esta metodología en especies adaptadas a volar en espacios abiertos. Para construir el encierro se debe considerar un espacio lo suficientemente amplio que permita el desplazamiento del animal a lo largo del mismo y se deben usar materiales poco ecoicos. Las telas, cuanto más porosas y menos brillantes visualmente, reflejan menos las frecuencias. Por ejemplo, la tela de toldillo para insectos es menos tupida, por lo que produce menos reflexiones y el sonido es más limpio; sin embargo, la limitante sería el ruido exterior. Otro material adecuado sería el paño escorial, que aísla el ruido exterior, pero su manipulación en el campo es más complicada.

Cuerda de vuelo (Zip-line). Esta técnica consiste en extender una cuerda de nylon de pesca (2 mm de calibre) entre dos puntos distanciados 10-30 m, y a una distancia mínima de 1 m del suelo. Sobre esta cuerda se introduce un aro metálico muy liviano a modo de guía, que estará atado a un hilo de nylon de menor calibre (0.3 mm), de 2 a 3 m de longitud, y en su extremo se dispone un collar de goma que se le colocará al individuo a referenciar ([Szewczak, 2004](#)). Esta técnica de grabación tiene varias ventajas: 1) Facilita que el murciélago alcance una velocidad y altura de vuelo estables en las que puede emitir señales de ecolocalización típicas, 2) permite recapturar el individuo y realizar múltiples grabaciones, hasta obtener una con buena calidad, y 3) se puede obtener el espécimen testigo para una colección científica. Por otro lado, sus desventajas están relacionadas con el cambio en la estructura de las señales de ecolocalización en individuos de la familia Molossidae y algunos de la familia Vespertilionidae ([Parsons & Szewczak, 2009](#)). **Recomendaciones:** No todos los murciélagos alcanzan un vuelo estable al primer intento en la cuerda de vuelo, por lo que se necesita realizar varios intentos. De igual forma, algunos individuos rechazan el montaje o no vuelan, lo que impide obtener grabaciones. Por último, es importante realizar el montaje en un sitio abierto que le permita al murciélago volar y no enredarse con ningún tipo de vegetación.

Liberación manual (Hand release). Este método consiste en registrar las señales de ecolocalización de los murciélagos inmediatamente son liberados. Permite registrar señales representativas de especies de vuelo lento o murciélagos que se alimentan de presas estáticas ([Parsons & Szewczak, 2009](#)). Una desventaja de este método constituye el hecho de que generalmente los murciélagos recién liberados no emiten señales que representen fielmente su comportamiento ecolocalizador típico cuando están en vuelo libre ([Szewczak, 2004](#)), aunque si se logra hacer adecuadamente, se pueden obtener señales más parecidas que las que se obtienen en cuarto de vuelo o en cuerda de vuelo. Las principales desventajas de esta metodología son: 1) no se obtiene un espécimen testigo para una colección científica y 2) solo se puede hacer una grabación. Otra dificultad asociada a este método es que se debe seguir el movimiento del murciélago una vez liberado, asegurando que la distancia entre éste y el detector sea la adecuada para que el micrófono tenga buen registro de las señales. **Recomendación:** Para compensar esta última dificultad, se puede incluir el uso de señaladores lumínicos (glow stick) para seguir el vuelo en la oscuridad y obtener secuencias de ecolocalización largas ([Broders *et al.*, 2004](#)). Esta metodología es recomendada solo cuando el investigador tiene certeza sobre la identidad taxonómica de la especie.

Grabaciones cerca a refugios. Encontrar un refugio es una gran oportunidad para hacer grabaciones de referencia, puesto que se pueden obtener múltiples grabaciones de una especie en vuelo libre. De igual forma, el investigador cuenta con la posibilidad de capturar un espécimen para corroborar su identificación taxonómica e ingresar un espécimen a una colección científica. Una de las desventajas de esta metodología es que cuando la actividad de los murciélagos es muy alta, se puede registrar más de un individuo y las grabaciones pueden quedar saturadas, lo cual puede ser problemático al individualizar señales de un taxón para su análisis. Así mismo, se debe tener certeza de que las señales acústicas son grabadas cuando los murciélagos ya han entrado en la fase de búsqueda, para facilitar su identificación o comparación con otras grabaciones ([Parsons *et al.*, 2009](#)).

Grabar murciélagos desde perchas. Estas grabaciones se hacen después de dejar a los individuos posados en un árbol, palmera o superficie donde el murciélago pueda percharse. La finalidad es registrar las señales emitidas una vez los murciélagos inician el vuelo. La distancia del grabador puede variar y dependerá de la

altura a la que el murciélago se ubique para volar. Este método es útil para especies que requieren de una altura considerable para lanzarse al vuelo como es el caso de las especies de la familia Molossidae, las cuales han sido de las más registradas con este método (Zamora *et al.*, 2020). **Recomendaciones:** Identificar un árbol o palmera en un área abierta. El árbol debe tener pocas ramas y no presentar huecos o estructuras donde los murciélagos puedan ocultarse. El investigador debe estar atento con el sistema de detección encendido para hacer los registros al momento en que el murciélago tome el vuelo.

Equipos y Metadatos.

Equipos. La selección del equipo debe estar guiada por la pregunta que se quiere responder, el presupuesto con el que se cuenta, las especies que se quieren monitorear, y la capacidad de almacenamiento y análisis de datos, entre otros factores. Es recomendable hacer una revisión de la compilación de Brigham *et al.* (2002), donde se explican las diferencias de los equipos utilizados, sus capacidades y limitaciones. A continuación, se mencionan las características más relevantes de los diferentes equipos de detección y en el Anexo 2 se mencionan los fabricantes y los modelos más usados hasta el año 2020.

Los detectores de murciélagos heterodinos (Anexo 1), son los equipos menos costosos del mercado y proporcionan el método de identificación de especies más rápido, ya que su identificación se lleva a cabo en el campo y cuando hay una buena idea de las especies de la zona (Russ, 2012). Son equipos útiles para hacer un seguimiento en tiempo real de la actividad de los murciélagos, pero usualmente no incluyen un dispositivo de grabación, y cuando se le acopla uno, sus grabaciones suelen tener pobre resolución temporal y no retienen toda la información espectral de las señales de ecolocalización.

Existen sistemas de grabación basados en el registro de cruces por cero (“zero-crossing”) (Anexo 1). Estos dispositivos sólo graban la frecuencia de mayor intensidad por unidad de tiempo, lo que implica que la representación gráfica de las señales de ecolocalización sea una serie de puntos, de los cuales se puede extraer poca información espectral y temporal, pero que ocupan poco espacio de almacenamiento.

Otros dispositivos de detección graban el espectro completo o “full spectrum” (Anexo 1), y cuentan con una

alta resolución temporal y espectral. Este tipo de detectores usualmente cuentan con un dispositivo de grabación integrado y un sistema con disparador automático, que permite desplegar estaciones de monitoreo pasivo en campo por periodos prolongados. Adicionalmente, se ha argumentado que las grabaciones de señales acústicas realizadas con detectores de espectro completo son las más adecuadas para identificar especies (Corben, 2002).

Micrófono El potencial de detección de señales ultrasónicas depende de la sensibilidad del micrófono, la cual debe ser superior a los 10 kHz. Actualmente la mayoría de los dispositivos para detectar señales ultrasónicas cumplen con este requisito. Los micrófonos de estos dispositivos pueden ser omnidireccionales o unidireccionales, y su uso depende del interés de investigación, ya que los micrófonos omnidireccionales pueden ser usados para estudios de diversidad en los que se requiere registrar la mayor cantidad de especies posible, mientras que los unidireccionales se adaptan mejor a situaciones donde se requiere enfocar el área de detección del micrófono sobre un espacio reducido, como cuando se realizan experimentos en espacios cerrados.

Los micrófonos más comúnmente usados son: 1) micrófonos Piezo, que tienen un pico agudo de sensibilidad a frecuencias medias (aproximadamente 40 kHz); 2) micrófonos Electret, que son menos sensibles a frecuencias medias y más sensibles a 20 y 100 kHz, y 3) los micrófonos Capacitancia, que son más sensibles a frecuencias altas (> 80 kHz) (Russ, 2012). Los detectores que traen MEMS micrófonos tienen respuestas de frecuencia más consistentes entre los 40 y 60 kHz, con sensibilidad más baja a otras frecuencias, mientras que otros detectores tienen más de un micrófono, con el fin de incrementar la sensibilidad a través de un rango de frecuencias (Russ, 2012).

Tasa de muestreo Uno de los atributos fundamentales en la grabación de señales acústicas de alta frecuencia, es la tasa de muestreo (Anexo 1), la cual determina la frecuencia máxima obtenida para reconstruir una señal acústica. Por lo general, la tasa de muestreo es el doble de la mayor frecuencia contenida en el sonido de interés, de acuerdo con el teorema de Nyquist-Shannon (Nyquist, 1928; Shannon, 1949). Entonces, para murciélagos que emiten señales acústicas hasta de 125 kHz, la tasa de muestreo debe ser por lo menos de 250 kHz.

Formatos de grabación. Los dispositivos de grabación digital pueden grabar en diferentes formatos, pero el

formato estándar es sin compresión Waveform (ej. wav); por lo anterior es recomendable usar este formato, ya que conserva toda la información del archivo de sonido; sin embargo, es el formato con el tamaño de archivo más grande de almacenamiento (Russ, 2012). Existen otros formatos en los que se comprimen los archivos de sonido y necesitan menos espacio de almacenamiento, pero estos pierden información (p. ej. mp3, WMA, AAC, ATRAC) (Russ, 2012), por lo que no es recomendable para identificar especies de murciélagos. El problema de almacenamiento se puede resolver a través de servidores online o realizando grabaciones de corta duración.

Metadatos. A cada archivo de audio grabado en campo se le deben asignar metadatos, *i. e.*, información sobre el archivo de grabación (Tabla 1). La propuesta de metadatos incluida aquí se basa en los campos exigidos por el protocolo de la Colección de Sonidos Ambientales del Instituto Humboldt (IAvH-CSA), los cuales pueden ser luego transformados a formatos Darwin Core estandarizados (<https://www.tdwg.org/standards/dwc/>).

Señales de ecolocalización y su análisis. Las señales de ecolocalización emitidas por los murciélagos son moldeadas por diversas fuentes de variación, como la historia evolutiva, los mecanismos de procesamiento de la información y las necesidades sensoriales impuestas por el tipo de hábitat, la estrategia de búsqueda de alimento y la dieta (Schnitzler *et al.*, 1994; Siemers *et al.*, 2001). Adicionalmente, el comportamiento de ecolocalización puede dividirse generalmente en tres fases, indistintamente de la especie en cuestión: cuando un murciélago insectívoro aéreo busca alimento (fase de búsqueda), cuando localiza la presa y se aproxima a ella (fase de aproximación) y, finalmente, cuando el murciélago intenta capturar la presa, se da la emisión de la fase terminal o “feeding buzz” (Anexo 1; Schnitzler & Kalko, 2001; Russ, 2012). Las señales emitidas en la fase de búsqueda son relativamente uniformes, presentando poca variabilidad en rasgos espectrales o temporales, mientras que en las fases de acercamiento o fase terminal ocurren cambios en dichos rasgos (Obriest, 1995; Schnitzler & Kalko, 2001). Por esta razón, se recomienda hacer las mediciones correspondientes para identificar las especies en la fase de búsqueda (O’Farrell & Miller, 1999).

Tabla 1. Campos de metadatos requeridos y recomendados en la grabación de señales acústicas emitidas por murciélagos de Colombia.

Table 1. Required and recommended metadata fields while recording echolocation bat signals in Colombia

Campo	Tipo	Descripción
Fecha y hora	Obligatorio	Fecha y hora de la grabación
ID de la grabación	Obligatorio	Nombre dado al archivo, que lo diferencia de otras grabaciones
Identidad del sitio	Obligatorio	Nombre de la localidad específica o punto donde las grabaciones fueron realizadas (vereda, finca)
Coordenadas	Obligatorio	Latitud y Longitud
Metodología	Obligatorio	Bajo qué metodología se llevó a cabo la grabación (Cuarto de vuelo, cuerda de vuelo o liberación manual)
Equipo de grabación	Obligatorio	Referencia (marca y modelo) del detector utilizado, pasivo o activo etc.
Marca y tipo de Micrófono	Obligatorio	Referencia, unidireccional, omnidireccional
Ganancia	Obligatorio	Ninguna o número en dB
Tasa de muestreo	Obligatorio	Número en kHz
Formato archivo	Obligatorio	Ejemplos: wav, W4V
Vecindad inmediata	Obligatorio	Descripción del sitio: Cerrado, abierto, borde, sobre agua
Datos del individuo	Obligatorio	Especie y sexo
Datos del individuo	Opcional	Estado de desarrollo
Datos de Colección	Sugerido	Número de colección y nombre de la colección donde se depositó el individuo.

La identificación de especies con base en las señales de ecolocalización implica necesariamente que se procesen las grabaciones en el laboratorio, filtrando, segmentando y clasificando los archivos grabados (Caycedo-Rosales *et al.*, 2013). Una vez clasificado y ordenado, el material se podrá visualizar en algún software comercial especializado para tal fin, como BatSound (Pettersson Elektronik AB, Uppsala, Suecia), Raven Pro (The Cornell Lab of Ornithology, Ithaca, NY, USA), Avisoft SAS Lab Pro (Avisoft Bioacoustics, Berlín, Alemania), BatExplorer (Elekon A.G, Suiza), BatScope (WSL, Suiza), Kaleidoscope (Wildlife Acoustics, Inc. Maynard, Massachusetts, USA), Anabat Insight (Titely Scientific, USA), entre otros. Otra opción para el análisis y visualización es usar softwares libres, como los paquetes SeeWave (Sueur *et al.*, 2008), Bioacoustics (Marchal *et al.*, 2020) o WarbleR (Araya-Salas & Smith-Vidaurre, 2017), del lenguaje libre de programación R (R Core Team, 2018).

Las señales ultrasónicas o pulsos emitidos por los murciélagos pueden describirse a través de la medición de variables temporales, como la duración del pulso, y espectrales, como la frecuencia inicial, final o de máxima energía. Además, los pulsos pueden caracterizarse en función de su forma y estructura (Anexo 1). En cuanto a la forma, los pulsos pueden ser hiperbólicos, cóncavos, curvi-lineares, rectos, entre otros. Basados en la estructura, el pulso puede tener un solo elemento de frecuencia modulada (FM) o una combinación de segmentos de frecuencia modulada y frecuencia constante (FM-FC) (Figura 2). Se recomienda registrar un conjunto básico de parámetros acústicos para asegurar el éxito de la biblioteca de referencia: frecuencia inicial, final, máxima y mínima, de máxima energía, ancho de banda, la dirección de la modulación, duración de pulso, intervalo interpulso (Anexo 1, Figura 2).

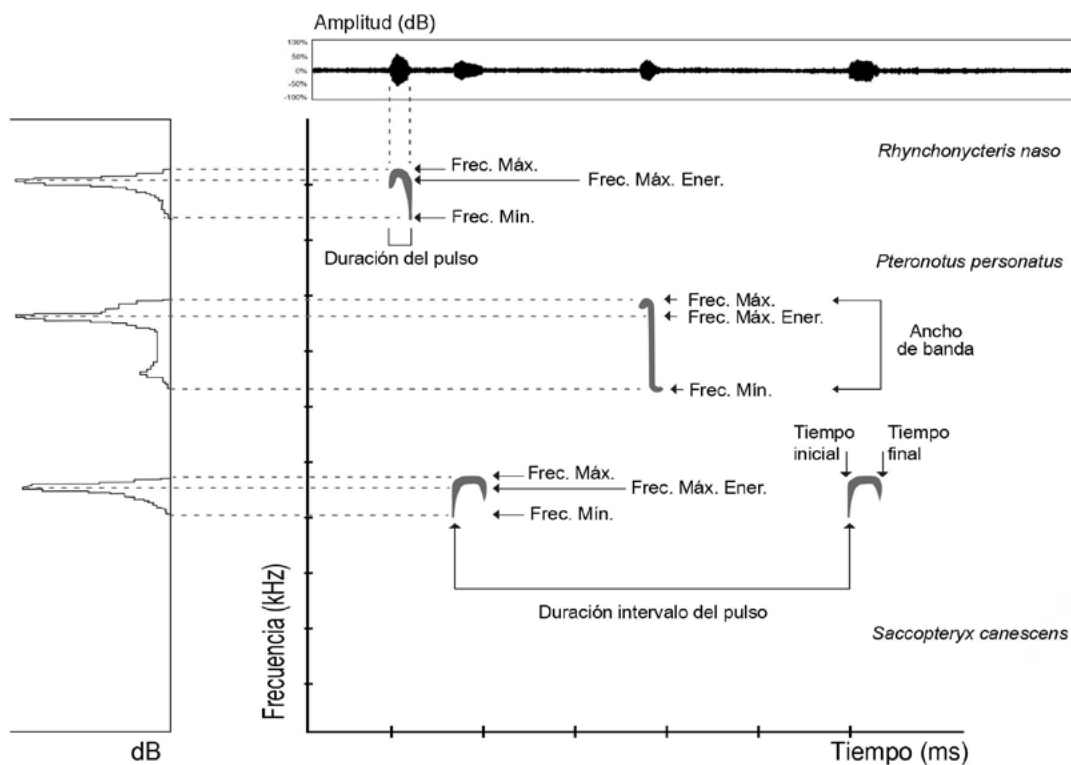


Figura 2. Algunos parámetros acústicos para caracterizar pulsos de ecolocalización. En la parte superior se muestra un oscilograma. A la izquierda se muestra un espectro de poder, a la derecha un espectrograma (Frec. Mín.= Frecuencia Mínima; Frec. Máx. Ener. = Frecuencia de Máxima Energía; Frec. Máx.= Frecuencia máxima)

Figure 2. Some acoustic parameters to characterize bat echolocation pulses. In the graph are shown power spectra (left), a spectrogram (right) and oscillogram (top). (Frec. Mín.= Minimum Frequency; Frec. Máx. Ener.= Peak Frequency; Frec. Máx. = Maximum Frequency)

En el [Anexo 1](#) se definen y señalan (*) los parámetros básicos que se deben extraer y medir de las señales de ecolocalización de los murciélagos, para generar una descripción confiable del comportamiento de ecolocalización de una especie.

Debe tenerse en cuenta que cuando se abre un archivo de audio es necesario asignar una “función de ventana”, con lo cual se extrae el contorno de frecuencia vs. tiempo, con el propósito de reducir energía no deseada dentro de una banda útil de frecuencias ([Fu & Kloepper, 2018](#)). Entre las funciones de ventana más utilizadas en el análisis de las señales de ecolocalización se encuentra la ventana Hamming ([Jung *et al.*, 2014](#); [Anexo 1](#)). Por esto se recomienda usar el mismo tipo de función de ventana en el programa usado para visualizar todos los espectrogramas ([Avila-Flores & Fenton, 2005](#)) [Anexo 1](#). Las medidas de los parámetros acústicos seleccionados deben realizarse sobre el armónico o los armónicos que presenten mayor energía. Es recomendable hacer las mediciones de las frecuencias desde el espectro de poder, y la duración del pulso y el intervalo de pulsos desde el oscilograma ([Russo & Jones, 2002](#)). Como se mencionó anteriormente, una de las fuentes de variación que moldea el diseño de las señales de ecolocalización de los murciélagos es la historia evolutiva de cada especie y cada linaje, por lo que a continuación se presentan recomendaciones específicas para trabajar con algunas familias de murciélagos.

Emballonuridae. En esta familia los pulsos son multiarmónicos y generalmente la mayor energía se presenta en el segundo armónico ([Barclay, 1983](#)). Cada uno de los pulsos se caracteriza por ser de frecuencia constante (FC), de banda estrecha y con un barrido de frecuencia modulada (FM) corto al inicio y al final de cada pulso ([Orozco-Lugo *et al.*, 2013](#), [Jung *et al.*, 2007](#), [Zurc *et al.* 2017](#)). Algunas de las especies de esta familia presentan alternación de pulsos, es decir, exhiben un pulso bajo y un pulso alto (p. ej. *Saccopteryx bilineata*, *S. leptura*, y *Diclidurus albus*). Por lo tanto, es necesario medir los parámetros acústicos elegidos en ambos pulsos ([Figura 3D](#)).

Molossidae. La familia Molossidae tiene diseños de pulsos género-específicos y especie-específicos ([Jung *et al.* 2014](#)). El armónico de mayor energía es el primero ([Mora *et al.*, 2014](#)). En las especies de esta familia cuyo comportamiento de ecolocalización se ha descrito hasta ahora, la alternancia en los pulsos siempre está presente ([Anexo 1](#)). Por lo tanto, es necesario medir las

variables temporales y espectrales seleccionadas, tanto en el pulso bajo como el pulso alto. Para el caso de *Molossus molossus* y *Nyctinomops laticaudatus*, se ha registrado la alternancia de hasta tres pulsos (bajo, medio y alto); en este caso, lo recomendado es medir los tres pulsos ([Jung *et al.*, 2014](#); [Figura 3A](#)).

Vespertilionidae. Algunas especies de esta familia presentan la mayor energía en el primer armónico; otras presentan la misma energía en el primer y segundo armónico ([Denzinger *et al.*, 2001](#)). Generalmente, los vespertilionidos exhiben pulsos cortos de frecuencia modulada descendente. En la mayoría de las especies que presentan este comportamiento, el parámetro espectral más importante es la frecuencia mínima ([O’Farrell & Miller, 1999](#)). Algunas especies de esta familia presentan variaciones en la emisión de señales de ecolocalización, dependiendo de la complejidad estructural del espacio por donde vuelan. Por ejemplo, especies de los géneros *Myotis* y *Eptesicus* exhiben cierta plasticidad en la emisión de sus pulsos de ecolocalización. En espacios cerrados, emiten pulsos FM descendentes de modulación rápida, y cuando pasan a ambientes más abiertos, los pulsos se modifican, reduciendo la velocidad de modulación y exhibiendo una estructura FM descendente, con un componente de frecuencia cuasi-constante ([Barataud *et al.*, 2013](#); [Figura 3E](#)).

Noctilionidae. Las especies de esta familia se caracterizan por tener una estructura de pulsos compuesta por segmentos de frecuencia constante (FC) finalizando con segmentos de frecuencia modulada (FM) descendente, los cuales se denominan “pulso alto”, mientras que los pulsos que presentan un segmento breve de frecuencia cuasi-constante (FQC) al inicio, y que terminan en FM se les denomina “pulso bajo”. La frecuencia de máxima energía se encuentra en el primer armónico. Las dos especies de este género pueden diferenciarse porque *Noctilio albiventris* tiene una mayor frecuencia de máxima energía (FME) en el componente cuasi-constante (67-76 kHz) mientras que *N. leporinus* (53-61 kHz) ([Barataud *et al.*, 2013](#); [Arias-Aguilar *et al.*, 2018](#); [Figura 3C](#)).

Phyllostomidae. La mayoría de las especies usan regularmente áreas con vegetación densa, como el sotobosque, y por lo general emiten señales de ecolocalización de alta frecuencia, banda ancha y con varios armónicos. La mayoría de los murciélagos de esta familia son llamados murciélagos “susurradores”, debido a la baja intensidad con la que emiten sus señales de ecolocalización. Esto dificulta su registro, a menos

que emitan a una corta distancia del detector (Fenton *et al.*, 2001). Las principales limitantes para implementar estudios acústicos sobre la familia Phyllostomidae son la baja especificidad de los diseños de señal, la baja amplitud (Anexo 1) y la alta frecuencia de estas señales (Yoh *et al.*, 2020). En esta familia hay pocos casos de especialización en el diseño de las señales acústicas, y puede que esto se deba probablemente a que muchas especies usan el olfato o la visión en combinación con la ecolocalización para ubicar a sus objetivos (Leiser-Miller *et al.*, 2020).

Mormoopidae. Esta familia se caracteriza por emitir usualmente pulsos con componentes multiarmónicos, siendo el segundo armónico aquel sobre el cual se concentra la mayor cantidad de la energía de la señal (Arias-Aguilar *et al.*, 2018). Las especies presentan patrones en la estructura de los pulsos que son relativamente fáciles de distinguir. *Pteronotus davyi* y *P. gymnotus* tienen una forma de pulso similar, que sigue una forma de “z” alargada, como la describen O’Farrell & Miller (1999). Este patrón se caracteriza por presentar una FC inicial muy corta, seguida de una FM descendente, con alrededor de 15 kHz de ancho de banda, y finaliza con una FC corta. *Pteronotus parnellii* emite señales con un ciclo de trabajo alto (Fenton *et al.*, 2012) y sus pulsos son largos, de frecuencia constante, con segmentos de FM muy cortos al inicio (ascendente) y al final de la señal (descendente) (Barataud *et al.*, 2013). Finalmente, las señales de ecolocalización de *Mormoops megalophylla* se caracterizan por carecer del componente FC, presentando sólo el componente de estructura FM descendente (O’Farrell & Miller, 1999).

Thyropteridae. Los pulsos emitidos por las especies de esta familia tienen una estructura FM descendente y son de corta duración (Barataud *et al.*, 2013; Arias-Aguilar *et al.*, 2018). Algunas especies pueden presentar la FME en el primer armónico y otras en el segundo (Barataud *et al.*, 2013). Los sonidos emitidos por estas especies son de baja intensidad y se han registrado a distancias relativamente cortas del micrófono (1-3 m; Fenton *et al.*, 1999; Tschapka *et al.*, 2000). Los datos sobre las características del comportamiento de ecolocalización para esta familia son escasos.

Natalidae. Esta familia se caracteriza por emitir señales de ecolocalización con estructura FM descendente, con una alta inclinación o PLM, (Periodo Linealmente Modulado) y con un segmento terminal FQC corto. Así mismo, la duración del pulso es corta (<4 ms;

Arias-Aguilar *et al.*, 2018; Barataud *et al.*, 2013; Rydell *et al.*, 2002; Sánchez *et al.*, 2017). La frecuencia de máxima energía se encuentra en el segundo armónico, arriba de 100 kHz (Arias-Aguilar *et al.*, 2018; Rydell *et al.*, 2002). Al igual que las especies de la familia Thyropteridae, las grabaciones de las señales de ecolocalización de los murciélagos de esta familia, solo son bien registrados si se graban muy cerca al micrófono, ya que, por su baja intensidad, las señales tienden a atenuarse rápido, impidiendo que los parámetros acústicos más relevantes sean capturados por el dispositivo de detección (Rydell *et al.*, 2002).

Furipteridae. Los pulsos de ecolocalización de las especies de esta familia consisten en barridos cortos de banda ancha modulada, de corta duración (2.3-4.7 ms), con una frecuencia mínima entre 67 y 135 kHz, una frecuencia máxima entre 150 y 191 kHz y un pico de frecuencia entre 75 y 161 kHz (Falcão *et al.*, 2015), no obstante, los pulsos pueden llegar hasta los 210 kHz, ante la presencia de artefactos muestrales en la grabación.

Finalmente, para describir los parámetros acústicos de una especie, es recomendable contar con grabaciones de varios individuos, para poder caracterizar la variación intraespecífica de dichos parámetros, y así tener una muestra representativa de la población. Es necesario medir una cantidad considerable de pulsos en fase de búsqueda por secuencia analizada (más de 20), ojalá de diferentes secuencias, seleccionando aquellos pulsos donde los parámetros acústicos permanecen poco variables. Se debe indicar el número de individuos, secuencias y pulsos usados para extraer las medidas.

Sistematización. Es necesario que todos los registros acústicos obtenidos estén organizados de forma que se permita su gestión y administración, lo que permitirá articular a diferentes investigadores e iniciativas de monitoreo. Para esto, sugerimos seguir un formato unificado de base de datos que pueda “enlazarse” con diferentes motores de bases de datos (ej. Postgres, Mongo, MySQL), como lo permite el formato Darwin Core (Darwin Core Task Group, 2009). El formato Darwin Core está compuesto por información estandarizada de taxonomía, lugares y eventos de registros de biodiversidad, y es la matriz de datos unificada en repositorios nacionales (p. ej. SiB Colombia) e internacionales (GBIF), por lo que constituye un excelente estándar a seguir por los investigadores de bioacústica de murciélagos colombianos.

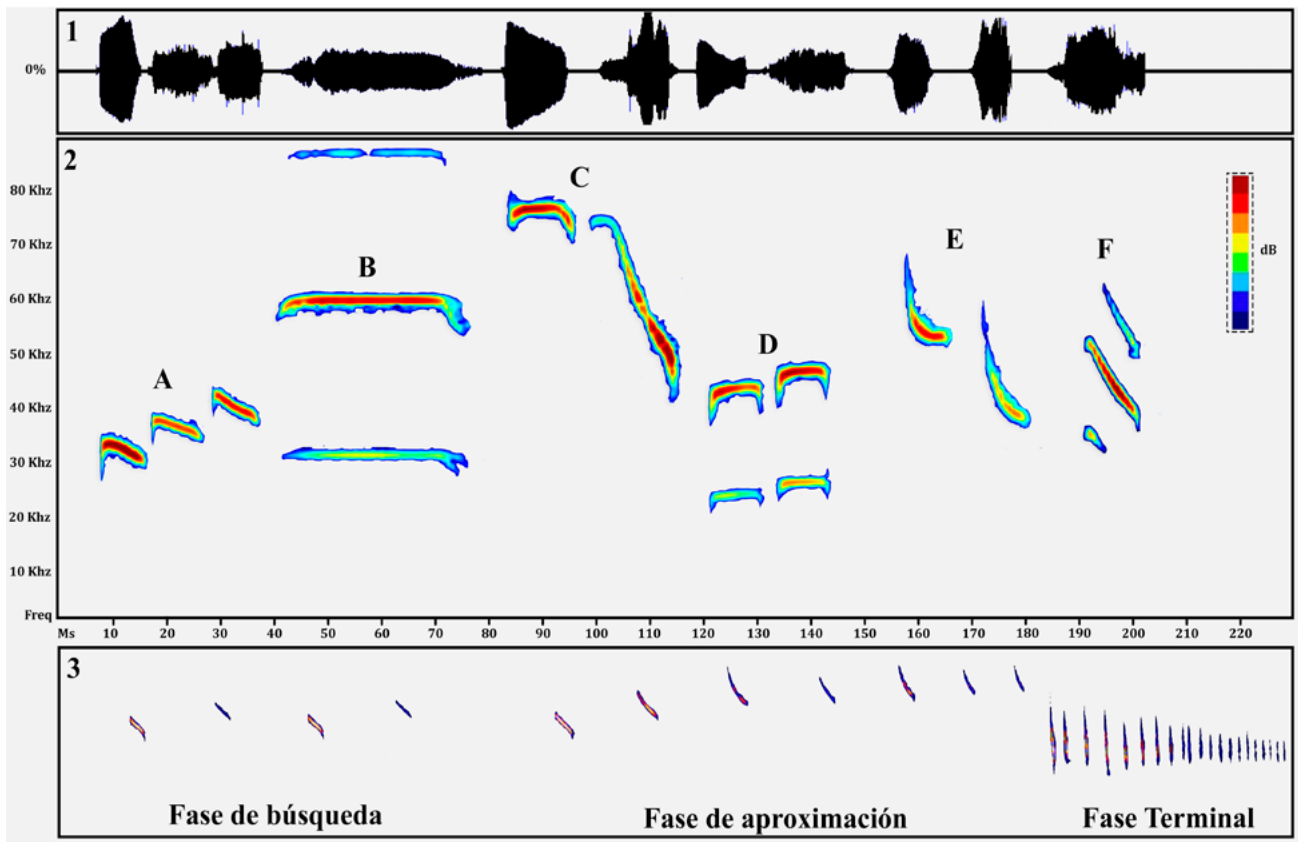


Figura 3. Ejemplos de parámetros acústicos para caracterizar pulsos de ecolocalización. 1, oscilograma; 2, espectrograma: pulsos característicos de algunas familias de murciélagos: A, Molossidae; B, Mormoopidae; C, Noctilionidae; D, Emballonuridae; E, Vespertilionidae; F, Phyllostomidae; 3, fases de ecolocalización de *Molossus molossus*.

Figure 3. Examples of acoustic parameters to characterize bat echolocation pulses. 1, oscillogram; 2, spectrogram: typical calls emitted by some bat families: A, Molossidae; B, Mormoopidae; C, Noctilionidae; D, Emballonuridae; E, Vespertilionidae; F, Phyllostomidae; 3, echolocation phases in *Molossus molossus*.

Recomendación: Al igual que sucede con los especímenes que se recolectan en campo, las grabaciones ultrasónicas con señales de ecolocalización de murciélagos también deben ser procesadas para su correcta sistematización. Este procesamiento implica cortar los archivos de audio que contiene la información relevante para analizar: dada la probabilidad de detección de cada especie, un archivo de audio debe contener al menos tres señales de ecolocalización para calcular parámetros temporales, como intervalos interpulso. Cuando la probabilidad de detección lo permite, en un archivo de audio quedarán registradas las distintas fases del comportamiento ecolocalizador (búsqueda, aproximación y terminal); de este modo, la duración máxima del archivo de audio será equivalente a la de las tres fases, incluyendo un par de pulsos posteriores al final de la fase terminal, cuando sea posible.

Adicionalmente, solo deben considerarse archivos de audio con señales de ecolocalización que posean una relación señal-ruido lo suficientemente buena para poder distinguir las señales de interés del ruido de fondo, lo que facilita la medición de los parámetros acústicos relevantes. Para esto se debe visualizar el espectro de poder del audio y verificar que haya una diferencia de al menos 25 dB entre el espectro de poder máximo del ruido de fondo y el espectro de poder mínimo de las señales de interés. Si la diferencia entre estos espectros de poder no sobrepasa los 25 dB no es recomendable usar ese archivo de audio, pues la medición de parámetros como la intensidad o las frecuencias pico puede verse afectada, y los valores medidos podrían no ser confiables.

Conclusiones

Establecer estándares para registrar las señales de ecolocalización de murciélagos es el primer paso para construir bibliotecas de referencia en cada país. Esto evita duplicar esfuerzos, y permite que todas las grabaciones sean útiles, facilitando la extracción de los parámetros acústicos de interés que integrarán la biblioteca de referencia.

Los dispositivos disponibles actualmente para la detección y grabación de las señales de ecolocalización de murciélagos tienen ventajas y desventajas. Por ello no se recomienda el uso específico de un tipo o marca de detector ultrasónico, micrófono o grabadora. Sin importar cuál sea el equipo, es crucial que todos los investigadores que tengan grabaciones ultrasónicas de murciélagos puedan compartirlas junto con el conjunto de metadatos asociados a éstas. Se recomienda que las grabaciones se hagan en espectro completo (full spectrum) y que se registren todos los detalles técnicos y de configuración del detector o la grabadora, tales como ganancia en dB, tasa de muestreo, tipo de archivo de almacenamiento, tiempo de grabación, duración de archivos, tiempo del disparador automático, entre otros. En los casos en los que el detector ultrasónico no este equipado para realizar grabaciones, es relevante registrar el modelo y marca de la grabadora y el micrófono o detector.

El método de monitoreo acústico en campo, el registro de los metadatos de campo, y el registro de referencia de las señales de ecolocalización dependen de la especie a tratar. Por ello, es recomendable conocer previamente los detalles del comportamiento de vuelo y forrajeo de cada especie, con el fin de registrar de manera adecuada el comportamiento de ecolocalización con todas sus variaciones.

Los parámetros acústicos que se miden varían para cada especie. Sin embargo, es importante registrar parámetros básicos cuando se describe el comportamiento ecolocalizador de una especie nueva. En lo posible, se deben capturar individuos de distintas especies y grabarlos de manera controlada, haciendo uso de al menos una de las técnicas de grabación mencionadas. Esto permitirá identificar y describir las señales acústicas propias de las especies presentes en el lugar de estudio.

Es importante que los investigadores envíen sus grabaciones junto con los metadatos a la Colección de Sonidos Ambientales del Instituto Humboldt; si bien es cierto

que existen diferentes iniciativas en el país que están generando esta información en Colombia, actualmente esta es la única colección accesible en el país.

Referencias

- Agosta, S. J. (2002). Habitat use, diet and roost selection by the big brown bat (*Eptesicus fuscus*) in North America: a case for conserving an abundant species. *Mammal Review*, 32(3), 179-198.
<https://doi.org/10.1046/j.1365-2907.2002.00103.x>
- Altringham, J. D. & Fenton, M. B. (2003). Sensory ecology and communication in the Chiroptera. En Kunz, T.H & Fenton, M.B. (Eds.). *Bat Ecology*. Pp. 90-127. Chicago: The University of Chicago Press.
- Araya-Salas, M., Smith-Vidaurre, G. (2017). "warbleR: an r package to streamline analysis of animal acoustic signals."
<http://doi.org/10.1111/2041-210X.12624>
- Arias-Aguilar, A., Hintze, F., Aguiar, L.M.S., Ruf-ray, V., Bernard, E. & Ramos, P. (2018). Who's calling? Acoustic identification of Brazilian bats. *Mammal Research*, 63(3), 231-253.
<https://doi.org/10.1007/s13364-018-0367-z>
- Avila-Flores, R. & Fenton, M. B. (2005). Use of spatial features by foraging insectivorous bats in a large urban landscape. *Journal of Mammalogy*, 86(6), 1193-1204.
<https://doi.org/10.1644/04-MAMM-A-085R1.1>
- Barataud, M., Giosa, S., Leblanc, F., Ruf-ray, V., Disca, T., Tillon, L., Delaval, M., Haquart, M. & Dewynter, M. (2013). Identification et écologie acoustique des chiroptères de Guyane française. *Le Rhinolophe*, 19 (1), 103-145.
- Barclay, R. M. (1983). Echolocation calls of emballonurid bats from Panama. *Journal of Comparative Physiology*, 151(4), 515-520.
<https://doi.org/10.1007/BF00605468>
- Barclay, R. M., Fullard, J. H., & Jacobs, D. S. (1999). Variation in the echolocation calls of the hoary bat (*Lasiurus cinereus*): influence of body size, habitat structure, and geographic location. *Canadian Journal of Zoology*, 77(4), 530-534.
- Barlow, K. E., & Jones, G. (1997). Differences in songflight calls and social calls between two phonic types of the vespertilionid bat *Pipistrellus pipistrellus*. *Journal of Zoology*, 241(2), 315-324.
<https://doi.org/10.1111/j.1469-7998.1997.tb01962.x>
- Bartoničcka, T., & Zúkal, J. (2003). Flight activity and habitat use of four bat species in a small town revealed by bat detectors. *Folia Zoologica*, 52(2), 155-166.

- Beason, R. D., Riesch, R., & Koricheva, J. (2019). AU-RITA: an affordable, autonomous recording device for acoustic monitoring of audible and ultrasonic frequencies. *Bioacoustics*, 28 (4), 381-396.
<https://doi.org/10.1080/09524622.2018.1463293>
- Braun de Torrez, E. C., Wallrichs, M. A., Ober, H. K., & McCleery, R. A. (2017). Mobile acoustic transects miss rare bat species: implications of survey method and spatio-temporal sampling for monitoring bats. *PeerJ*, 5, e3940.
<https://doi.org/10.7717/peerj.3940>
- Brigham, R. M., Kalko, E. K. V., Jones, G., Parsons, S., & Limpens, H. J. G. A. (2002). *Bat Echolocation Research: Tools, Techniques and Analysis*. Austin, Texas: Conservation International. 174 pp.
- Brigham, R. M. (2018). Learning to listen: a primer on bat echolocation research. *Canadian Journal of Zoology*, 96(9), 3-4.
<https://doi.org/10.1139/cjz-2018-0060>
- Broders, H. G., Findlay, C. S., & Zheng, L. (2004). Effects of clutter on echolocation call structure of *Myotis septentrionalis* and *M. lucifugus*. *Journal of Mammalogy*, 85(2), 273-281.
- Burgin, C.J., Colella, J.P., Kahn, P.L., & Upham, N.S. (2018). How many species of mammals are there? *Journal of Mammalogy*, 99(1), 1-11.
- Caycedo-Rosales, P.C., Ruiz-Muñoz, J.F. & Orozco-Alzate, M. (2013). Reconocimiento automatizado de señales bioacústicas: una revisión de métodos y aplicaciones. *Ingeniería y Ciencia*, 9(18), 171-195.
- Corben, C. (2002). Zero-crossings analysis for bat identification: An overview. En Brigham, R. M., Kalko, E. K. V., Jones, G., Parsons, S., & Limpens, H. J. G. A. (Eds.). *Bat Echolocation Research: Tools, Techniques and Analysis*. Pp: 95-107. Austin, Texas: Conservation International.
- Corben, C. (2003). How Anabat works. *The Australasian Bat Society Newsletter*, 20, 19-23.
- Darwin Core Task Group. (2009). Darwin Core text guide. Biodiversity Information Standards (TDWG).
<http://rs.tdwg.org/dwc/terms/guides/text/>
- Denzinger, A., Siemers, B. M., Schaub, A., & Schnitzler, H. U. (2001). Echolocation by the barbastelle bat, *Barbastella barbastellus*. *Journal of Comparative Physiology—A Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, 187(7), 521-528.
<https://doi.org/10.1007/s003590100223>
- Falcão, F., Ugarte-Núñez, J. A., Faria, D., & Caselli, C. B. (2015). Unravelling the calls of discrete hunters: acoustic structure of echolocation calls of furipterid bats (Chiroptera, Furipteridae). *Bioacoustics*, 24(2), 175-183.
<https://doi.org/10.1080/09524622.2015.1017840>
- Fenton, M.B., Rydell, J., Vonhof, M.J., Eklöf, J., & Lancaster, W.C. (1999). Constant-frequency and frequency-modulated components in the echolocation calls of three species of small bats (Emballonuridae, Thyropteridae, and Vespertilionidae). *Canadian Journal of Zoology*, 77(12), 1891-1900.
<https://doi.org/10.1139/z99-168>
- Fenton, M. B., Bouchard, S., Vonhof, M. J., & Zigouris, J. (2001). Time-expansion and zero-crossing period meter systems present significantly different views of echolocation calls of bats. *Journal of Mammalogy*, 82(3), 721-727.
<https://doi.org/10.1644/1545-1542>
- Fenton, M.B., Faure, P.A. & Ratcliffe, J.M. (2012). Evolution of high duty cycle echolocation in bats. *Journal of Experimental Biology*, 215(17), 2935-2944.
<https://doi.org/10.1242/jeb.073171>
- Fu, Y., & Kloepper, L. N. (2018). A systematic method for isolating, tracking and discriminating time-frequency components of bat echolocation calls. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 143(2), 716-726.
<https://doi.org/10.1121/1.5023205>
- Gillam, E. H., & McCracken, G. F. (2007). Variability in the echolocation of *Tadarida brasiliensis*: effects of geography and local acoustic environment. *Animal Behaviour*, 74(2), 277-286. <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2006.12.006>
- Griffin, D. R., Webster, F. A., & Michael, C. R. (1960). The echolocation of flying insects by bats. *Animal behaviour*, 8(3-4), 141-154.
- Haase, P., Tonkin, J. D., Stoll, S., Burkhard, B., Frenzel, M., Geizendorffer, I. R., Häuser, C., Klotz, S., Kühn, I., McDowell, W.H., Mirti, M., Müller, F., Musche, M., Penner, J., Zacharias, S., & Schmeller, D. S. (2018). The next generation of site-based long-term ecological monitoring: Linking essential biodiversity variables and ecosystem integrity. *Science of the Total Environment*, 613, 1376-1384.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.111>
- Heim, O., Heim, D. M., Marggraf, L., Voigt, C. C., Zhang, X., Luo, Y., & Zheng, J. (2019). Variant maps for bat echolocation call identification algorithms. *Bioacoustics*, 1-15.
<https://doi.org/10.1080/09524622.2019.1621776>
- Jiang, T., Wu, H., & Feng, J. (2015). Patterns and causes of geographic variation in bat echolocation pulses. *Integrative Zoology*, 10(3), 241-256.
<https://doi.org/10.1111/1749-4877.12129>
- Jones, G., & Ransome, R. D. (1993). Echolocation calls of bats are influenced by maternal effects and chan-

- ge over a lifetime. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 252(1334), 125-128.
<https://doi.org/10.1098/rspb.1993.0055>
- Jung, K., Kalko, E. A. V., & Von Helversen, O. (2007). Echolocation calls in Central American emballonurid bats: signal design and call frequency alternation. *Journal of Zoology*, 272(2), 125-137.
<https://doi.org/10.1111/j.1469-7998.2006.00250.x>
- Jung K, Molinari J., & Kalko, E.K.V. (2014). Driving factors for the evolution of species-specific echolocation call design in new world free-tailed bats (Molossidae). *PLoS One*, 9(1).
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0085279>
- Kalcounis-Rüppell, M. C., Brown, T. J., Handford, P. T., & Ojeda, R. A. (2003). Preliminary notes on bat activity and echolocation in northwestern Argentina. *Mastozoología Neotropical*, 10(2), 331-339.
- Knörnschild, M., Jung, K., Nagy, M., Metz, M., & Kalko, E. (2012). Bat echolocation calls facilitate social communication. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 279(1748), 4827-4835.
<https://doi.org/10.1098/rspb.2012.1995>
- Leiser-Miller, L. B., Kaliszewska, Z. A., Lauterbur, M. E., Mann, B., Riffel, J. A., & Santana, S. E. (2020). A fruitful endeavor: Scent cue and echolocation behavior used by *Carollia castanea* to find fruit. *Integrative Organismal Biology*, 2(1), obaa007.
<https://doi.org/10.1101/532614>
- López-Baucells, A., Torrent, L., Rocha, R., Pavan, A. C., Bobrowiec, P. E. D., & Meyer, C. F. (2018). Geographical variation in the high-duty cycle echolocation of the cryptic common mustached bat *Pteronotus cf. rubiginosus* (Mormoopidae). *Bioacoustics*, 27(4), 341-357.
<https://doi.org/10.1080/09524622.2017.1357145>
- MacSwiney, M. C., Clarke, F. M., & Racey, P. A. (2008). What you see is not what you get: the role of ultrasonic detectors in increasing inventory completeness in Neotropical bat assemblages. *Journal of Applied Ecology*, 45(5), 1364-1371.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2008.01531.x>
- Marchal J., F. Fabianek, C. Scott, C. Corben, D. Riggs, P. Wilson, Wildlife Acoustics, inc. (2020). Bioacoustics package.
<https://cran.r-project.org/web/packages/bioacoustics/bioacoustics.pdf>
- Meyer, C. F., Schwarz, C. J., & Fahr, J. (2004). Activity patterns and habitat preferences of insectivorous bats in a West African forest-savanna mosaic. *Journal of Tropical Ecology*, 20(4), 397-407.
<https://doi.org/10.1017/S0266467404001373>
- Meyer, C. F. J., Aguiar, L. M. S., Aguirre, L. F., Baumgarten, J., Clarke, F. M., Cosson, J.-F., & Kalko, E. K. V. (2011). Accounting for detectability improves estimates of species richness in tropical bat surveys. *Journal of Applied Ecology*, 48(3), 777-787.
<https://doi.org/10.1111/j.1365->
- Mora, E. C., Macías, S., Vater, M., Coro, F., & Kössl, M. (2004). Specializations for aerial hawking in the echolocation system of *Molossus molossus* (Molossidae, Chiroptera). *Journal of Comparative Physiology A*, 190(7), 561-574.
- Nyquist, H. (1928). Certain topics in telegraph transmission theory. *Trans AIEE*, 47:617-644.
- Obrist, M. K. (1995). Flexible bat echolocation: the influence of individual, habitat and conspecifics on sonar signal design. *Behavioral Ecology Sociobiology*, 36(3), 207-219.
<https://doi.org/10.1007/BF00177798>
- O'Farrell M. J., & Miller, B.W. (1999). Use of vocal signatures for the inventory of free-flying neotropical bats. *Biotropica*, 31(3), 507-516.
<https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.1999.tb00394.x>
- Orozco-Lugo, L., Guillén-Servent, A., Valenzuela-Galván, D., & Arita, H. T. (2013). Descripción de los pulsos de ecolocalización de once especies de murciélagos insectívoros aéreos de una selva baja caducifolia en Morelos, México. *Therya*, 4(1), 33-46.
- Parsons, S., & Szewczak, J.M. (2009). Detecting, recording, and analyzing the vocalizations of bats. En Kunz, T.H & Parsons, S. (Eds.). *Ecological and Behavioral Methods for the Study of Bats*. Pp. 91-111. Baltimore, Maryland Second. Johns Hopkins University Press.
- Puechmaille, S. J., Borissov, I. M., Zsebok, S., Allegri, B., Hizem, M., Kuenzel, S., ... & Siemers, B.M. (2014). Female mate choice can drive the evolution of high frequency echolocation in bats: a case study with *Rhinolophus mehelyi*. *PLoS One*, 9(7), e103452.
- R Core Team. (2018). R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. Recuperado de <http://www.r-project.org/>.
- Ramírez-Chaves, H., Suárez-Castro, A., & González-Maya, J. F. (2016). Cambios recientes a la lista de los mamíferos de Colombia. *Notas Mastozoológicas*, 3(1), 1-20.
<https://doi.org/2382-3704>
- Rivera-Parra, P., & Burneo, S. F. (2013). Primera biblioteca de llamadas de ecolocalización de murciélagos del Ecuador. *Therya*, 4(1), 79-88.
<http://doi.org/10.12933/therya-13-104>

- Rodríguez, A., & Mora, E. C. (2006). The echolocation repertoire of *Eptesicus fuscus* (Chiroptera: Vespertilionidae) in Cuba. *Caribbean Journal of Science*, 42(1), 121.
- Rogers, D. S., Belk, M. C., González, M. W., & Coleman, B. L. (2006). Patterns of habitat use by bats along a riparian corridor in northern Utah. *The Southwestern Naturalist*, 51(1), 52-58.
- Rojas, V. G., Loeb, S. C., & O'Keefe, J. M. (2019). False-positive occupancy models produce less-biased occupancy estimates for a rare and elusive bat species. *Journal of Mammalogy*, 100(1), 212-222.
<https://doi.org/10.1093/jmammal/gyy162>
- Russ, J. (2012). British bat calls: A guide to species identification. Pelagic Publishing. 183 pp.
- Russo, D., & Jones, G. (2002). Identification of twenty-two bat species (Mammalia: Chiroptera) from Italy by analysis of time-expanded recordings of echolocation calls. *Journal of Zoology*, 258(1), 91-103.
<https://doi.org/10.1017/S0952836902001231>
- Russo, D., & Voigt, C. C. (2016). The use of automated identification of bat echolocation calls in acoustic monitoring: A cautionary note for a sound analysis. *Ecological Indicators*, 66, 598-602.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.02.036>
- Rydell, J., Arita, H. T., Santos, M., & Granados, J. (2002). Acoustic identification of insectivorous bats (order Chiroptera) of Yucatan, Mexico. *Journal of Zoology*, 257(1), 27-36.
<https://doi.org/10.1017/S0952836902000626>
- Sánchez, L., C.R. Moreno & E. C. Mora. (2017). Echolocation calls of *Natalus primus* (Chiroptera: Natalidae): Implications for conservation monitoring of this species. *Cogent Biology*, 3(1), 1355027.
<https://doi.org/10.1080/23312025.2017.1355027>
- Schmeller, D. S., Weatherdon, L. V., Loyau, A., Bondeau, A., Brotons, L., Brummitt, N., Regan, E. C. (2018). A suite of essential biodiversity variables for detecting critical biodiversity change. *Biological Reviews*, 93(1), 55-71.
<https://doi.org/10.1111/brv.12332>
- Schnitzler, H.-U., Kalko, E. K. V., Kaipf, I., & Grinnell, A. D. (1994). Fishing and echolocation behavior of the greater bulldog bat, *Noctilio leporinus*, in the field. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 35(5), 327-345.
<https://doi.org/10.1007/BF00184422>
- Schnitzler, H.-U., and E. K. V. Kalko. (2001). Echolocation by insect-eating bats. *BioScience*, 51(7), 557-569.
[https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2001\)051\[0557:E-BIEB\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2001)051[0557:E-BIEB]2.0.CO;2)
- Shannon, C.E. (1949). Communication in the presence of noise. *Proc IRE*, 37(1), 10-21.
- Siemers, B. M. (2004). Bats in the field and in a flight cage: recording and analysis of their echolocation calls and behavior. *Bat Echolocation Research: Tools, Techniques, and Analysis*, 107-113 Austin, Texas, US.: Bat Conservation International.
- Siemers, B. M. (2014). Female mate choice can drive the evolution of high frequency echolocation in bats: a case study with *Rhinolophus mehelyi*. *PLoS One*, 9(7), e103452.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0103452>
- Siemers, B. M., Kalko, E. K. V., & Schnitzler, H.-U. (2001). Echolocation behavior and signal plasticity in the Neotropical bat *Myotis nigricans* (Schinz, 1821) (Vespertilionidae): a convergent case with European species of *Pipistrellus*? *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 50(4), 317-328.
<https://doi.org/10.1007/s002650100379>
- Siemers, B. M., Beedholm, K., Dietz, C., Dietz, I., & Ivanova, T. (2005). Is species identity, sex, age or individual quality conveyed by echolocation call frequency in European horseshoe bats? *Acta Chiropterologica*, 7(2), 259-274.
<https://doi.org/10.3161/150811005775162579>
- Sueur, J., Aubin, T., & Simonis, C. (2008). Seewave: a free modular tool for sound analysis and synthesis. *Bioacoustics*, 18, 213-226. <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09524622.2008.9753600>.
- Simmons, N. B. (2005). An Eocene big bang for bats. *Science*, 307(5709), 527-528.
<https://doi.org/10.1126/science.1108871>
- Stathopoulos, V., Zamora-Gutiérrez, V., Jones, K. E., & Girolami, M. (2018). Bat echolocation call identification for biodiversity monitoring: a probabilistic approach. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, 67(1), 165-183.
<https://doi.org/10.1111/rssc.12217>
- Staton, T., & Poulton, S. (2012). Seasonal variation in bat activity in relation to detector height: A case study. *Acta Chiropterologica*, 14(2), 401-408.
<https://doi.org/10.3161/150811012X661710>
- Szewczak, J. M. (2004). Advanced analysis techniques for identifying bat species. En Brigham M.R., E.K.V. Kalko, G. Jones, S. Parsons, H. J.G.A. Limpens (Eds.). *Bat Echolocation Research: Tools, Techniques and Analysis*. Pp 121-126. Austin, Texas: Bat Conservation International.
- Tschapka, M., Brooke, A.P., & Wasserthal, L.T. (2000). *Thyroptera discifera* (Chiroptera: Thyropteridae): A new record for Costa Rica and observations on echolocation. *International Journal of Mammalian Biology*, 65(4), 193-198.

- Wilson, D.E., & Mittermeier, R.A. (Ed.). 2019. Handbook of the mammals of the world: bats. Lynx Edicions, Conservation International, IUCN. Barcelona. 1008 p.
- Xu, Z., Jing, W., Keping, S., Tinglei, J., Yunlei, J., & Jiang, F. (2008). Echolocation calls of *Rhinolophus ferrumequinum* in relation to habitat type and environmental factors. *Acta Ecologica Sinica*, 28(11), 5248-5258.
[https://doi.org/10.1016/S1872-2032\(09\)60007-X](https://doi.org/10.1016/S1872-2032(09)60007-X)
- Yoh, N., Syme, P., Rocha, R., Meyer, C. F., & López-Bauccells, A. (2020). Echolocation of Central Amazonian 'whispering' phyllostomid bats: call design and interspecific variation. *Mammal Research*, 1-15.
<https://doi.org/10.1007/s13364-020-00503-0>
- Zamora-Gutiérrez, V., López-González, C., MacSwiney González, M. C., Fenton, B., Jones, G., Kalko, E. K. V., Jones, K. E. (2016). Acoustic identification of Mexican bats based on taxonomic and ecological constraints on call design. *Methods in Ecology and Evolution*, 7(9), 1082-1091.
<https://doi.org/10.1111/2041-210X.12556>
- Zamora-Gutiérrez, V., Ortega, J., Avila-Flores, R., Aguilar-Rodríguez, P. A., Alarcón-Montano, M., Avila-Torresagatón, L. G., ... & Chávez-Cauich, M. (2020). The Sonozotz project: Assembling an echolocation call library for bats in a megadiverse country. *Ecology and Evolution*, 1-16.
<https://doi.org/10.1002/ece3.6245>
- Zurc, D., Guillén-Servent, A., & Solari, S. (2017). Chillidos de ecolocación de murciélagos Emballonuridae en una sabana xerófila-semiseca del Caribe Colombiano. *Mastozoología Neotropical*, 24(1), 201-218.

Anexo 1. Glosario

Término	Definición
Alternación de pulsos*	Algunas familias de murciélagos presentan de dos a tres tipos de pulsos. Estos pueden variar en frecuencia, duración y estructura y generalmente se identifican como alternación de frecuencia baja, media y alta. Sin embargo, esto varía entre géneros y familias.
Amplitud	Volumen de una señal, a menudo medido en decibeles (dB). Para estudios de bioacústica, la amplitud se entiende como la cantidad de energía que el organismo imprime al generar la señal acústica.
Ancho de banda*	El ancho de banda es la diferencia entre la frecuencia inicial y la final de un pulso. La banda ancha se refiere a cambios amplios en frecuencia sobre una duración corta. La banda estrecha significa que hay poco cambio en frecuencia sobre el tiempo (Fenton, 2010).
Armónico*	Son las frecuencias múltiplos enteros de una frecuencia fundamental en la señal acústica. Algunas especies emiten pulsos de ecolocalización que presentan mayoritariamente un solo armónico, el cual se denomina armónico fundamental, pero otras presentan además estos conjuntos de pulsos sobre y bajo el armónico fundamental, que suele ser el segundo y contener una cantidad de energía mayor si se le compara con los demás armónicos. El estudio de armónicos es importante para la caracterización de ciertas familias (Lisón, 2011).
Biblioteca de referencia	Banco o colección de sonidos de referencia los cuales fueron obtenidos mediante técnicas de grabación que permiten tener certeza que el sonido captado pertenece al individuo en estudio. Estas bibliotecas no sólo permiten captar la variación inter e intraespecífica de las especies registradas, sino que facilitan la identificación de especies, mediante la comparación con otras grabaciones.
Cruces por cero (Zero Crossing o ZC)	Es un método de grabación de señales de ecolocalización de murciélagos, basado en retener la frecuencia con mayor energía en cada segmento de tiempo de progresión de la señal acústica. Se utiliza cuando es necesario optimizar el espacio de almacenamiento de datos. Las grabaciones ZC no contienen información de amplitud, ni representan frecuencias de menor amplitud en el mismo segmento temporal de la frecuencia registrada. Esto implica que se pierdan las características del ancho de banda de la señal, como los armónicos.
Dirección de modulación	Hace referencia a la forma ascendente (de una frecuencia inicial baja a una frecuencia final alta) o descendente (de una frecuencia inicial alta a una frecuencia final baja) en el cambio de frecuencias de un pulso de ecolocalización o de un segmento de este a través del tiempo.
División de frecuencia	Es una técnica para grabar o reproducir en tiempo real una señal ultrasónica, cuya frecuencia, al ser captada, se divide en múltiplos fijos (10X, 20X, etc), para que puedan ser escuchados por humanos y/o ser almacenados fácilmente.
Duración del pulso (ms)*	Tiempo transcurrido entre el inicio del pulso y el final del pulso. La unidad es el milisegundo (ms). Para los análisis de duración se utiliza el oscilograma.
Ecolocalización	Uso de ultrasonido y los ecos de retorno, para orientar y navegar en el ambiente. Se ha usado como sinónimo de "ecolocación", pero esta opción no es correcta dado que "locar" no es un verbo reconocido en castellano, mientras que "localizar" sí.
Espacio estructuralmente complejo	En el ámbito acústico, el "clutter" se define como todo aquello que está dentro de un espacio determinado en forma desordenada, que al ser ensonificado genera distintos frentes de eco que se superponen, y que corresponden a muchas superficies reflejantes. Cuando se dice que es un espacio estructuralmente complejo, o con un alto clutter, significa que hay muchos objetos en el espacio de forma desordenada, que para un murciélago implicaría ruido de fondo. Ejemplo, un bosque con muchos árboles.
Espacios abiertos	Contrario al espacio estructuralmente complejo. Representa un espacio con poco clutter, una zona abierta como un pastizal o por encima del dosel del bosque, a gran altura.

Término	Definición
Espectro completo (full spectrum)	Es un método de muestreo que captura toda la información de la onda de sonido emitida por el murciélago. El espectro completo describe una grabación de audio que incluye tiempo, frecuencia y amplitud.
Espectro de poder	Es una representación gráfica de la amplitud de las distintas frecuencias que componen un pulso. Suele usarse para identificar sobre qué frecuencia o grupos de frecuencias se concentra mayor energía en una señal emitida.
Espectrograma	Representación visual de una señal acústica. El eje horizontal representa el tiempo, el cual transcurre de izquierda a derecha. En el eje vertical se ubican las frecuencias. La amplitud está representada por la intensidad del color con la que se representa cada pulso de ecolocalización.
Estructura del pulso*	Combinación de diferentes segmentos con distinta modulación en una sola señal. Al describir un pulso de un murciélago de la familia Emballonuridae, por ejemplo, su estructura se compone de un segmento FM ascendente, un segmento de FQC y un segmento FM descendente.
Fase de aproximación	Es emitida una vez el murciélago detecta una presa potencial. Usualmente aumenta la tasa de emisión de pulsos y el ancho de banda, y se reduce la duración de los pulsos. Esto le permite al murciélago recopilar información relevante sobre la situación espacial de la presa y ajustar su comportamiento de vuelo para realizar la captura.
Fase de búsqueda	Conjunto de pulsos emitidos por el murciélago cuando se desplaza o busca comida. Se caracteriza por presentar parámetros con valores estereotípicos, lo que significa que variables como las frecuencias iniciales y finales, la duración del pulso, del intervalo interpulso, entre otras, se mantienen poco variables. Por esta razón se utilizan los pulsos emitidos en fase de búsqueda para describir e identificar distintas especies.
Fase terminal (Feeding Buzz)	Esta es emitida una vez concluye la fase de aproximación. El murciélago tiene poco control vocal en su emisión por lo que se trata de una emisión automática, caracterizada por una alta tasa de repetición de pulsos de corta duración, cortos intervalos entre pulsos y modulación muy rápida. Brinda información precisa al murciélago sobre la localización exacta de la presa en el instante previo a su captura. Usualmente se usa el registro de fases terminales o <i>feeding buzzes</i> para estimar la intensidad de forrajeo en estudios de uso de hábitat.
Forma del pulso	La descripción de un pulso de ecolocalización puede apoyarse en el uso de formas geométricas: pulsos rectos, curvilíneos, cóncavos, etc.
Frecuencia constante (FC)	Generalmente se refiere a un tipo de pulso cuya frecuencia se mantiene invariable sobre un tiempo relativamente prolongado (>10 ms). La poca variabilidad en las frecuencias componentes de este tipo de pulsos hace que sean de banda estrecha.
Frecuencia de máxima energía*	También conocida como frecuencia de energía máxima (FME) o frecuencia principal. Es aquella sobre la cual el murciélago concentra la mayor cantidad de energía durante la emisión de la señal de ecolocalización. Este resulta ser un parámetro importante para la identificación de murciélagos, ya que llega a tener valores típicos para una determinada especie o grupo de especies. La desviación estándar de la frecuencia pico permite la detección de especies de llamada alternantes.
Frecuencia del punto de inflexión	Frecuencia o grupo de frecuencias que se encuentran en el punto donde la velocidad de modulación del pulso cambia abruptamente.
Frecuencia final*	Frecuencia con la que termina cada señal de ecolocalización. Puede ser menor a la inicial en pulsos descendentes, mayor a la inicial en pulsos ascendentes.
Frecuencia inicial*	Frecuencia con la que comienza cada señal de ecolocalización. Puede ser menor a la inicial en pulsos descendentes, mayor a la inicial en pulsos ascendentes.
Frecuencia máxima*	Frecuencia más alta contenida en la señal de ecolocalización. Equivalente a la frecuencia inicial en pulsos descendentes o a la frecuencia final en pulsos ascendentes. Se mide en kilohertz (kHz).

Término	Definición
Frecuencia mínima*	Frecuencia más baja contenida en la señal de ecolocalización. Equivalente a la frecuencia final en pulsos descendentes o a la frecuencia inicial en pulsos ascendentes. Se mide en kilohertz (kHz).
Frecuencia modulada (FM)	Generalmente se refiere a un tipo de pulsos que contienen un amplio conjunto de frecuencias banda ancha, las cuales cambian en un segmento de tiempo muy corto (1-5 ms). Típicamente van de frecuencias iniciales relativamente altas a frecuencias finales relativamente bajas en pulsos FM descendentes, y viceversa para pulsos FM ascendentes.
Heterodino	Técnica que combina una frecuencia de una señal de ecolocalización de entrada, con una frecuencia fija generada por un oscilador interno en el dispositivo de detección, resultando en un sonido audible para humanos. Generalmente los dispositivos de detección que usan esta técnica son de banda estrecha.
Intervalo entre pulso*	Es el tiempo que transcurre entre el inicio de un pulso de ecolocalización y el inicio del pulso subsecuente. Medido en milisegundos (ms).
Modulación del pulso	Es el cambio de frecuencias componentes de un pulso de ecolocalización frente al tiempo de progresión de este. Cuando el cambio de frecuencias se hace sobre una banda ancha en lapsos de poca duración, se dice que es un pulso muy modulado o de modulación rápida (FM). Por otro lado, cuando el cambio de frecuencias de un pulso se hace sobre una banda estrecha en lapsos de alta duración, se dice que es un pulso poco modulado, de modulación lenta o de frecuencia cuasiconstante (FQC).
Número de pulsos*	Cantidad de pulsos que contiene una secuencia de ecolocalización. En bioacústica, este término se refiere a los pulsos que componen la fase de búsqueda analizados para una especie en particular.
Número de secuencias	En los estudios de diversidad de murciélagos donde se emplea la bioacústica, siempre es necesario registrar el número de secuencias que se analizan, como si estas fueran un "n" o un número de muestras.
Oscilograma	Representación gráfica de una forma de onda de audio. El tiempo se muestra en el eje horizontal, y la amplitud se muestra en el eje vertical.
Parámetros acústicos	Son todas las variables relevantes que se miden de las señales de ecolocalización de los murciélagos. Estos pueden ser del dominio espectral como la frecuencia o la amplitud, o del dominio temporal como la duración o el intervalo interpulso.
Pico de la frecuencia	Es la amplitud en dB que tiene la frecuencia con mayor energía dentro del pulso. Usualmente es útil para discriminar especies que usan la misma banda de frecuencias.
Señal acústica	Una emisión discreta de sonido, equivalente a un pulso.
Tasa de muestreo	Determina la cantidad de bits que debe muestrear un dispositivo por unidad de tiempo. Esta debe ser el doble de la frecuencia máxima que se desea muestrear (Teorema de Nyquist-Shannon), pues solo así se puede lograr una muestra representativa de una señal acústica con muchas oscilaciones por unidad de tiempo (alta frecuencia).
Ventana hamming	Es uno de los atributos que se configuran para la representación gráfica de señales acústicas, con el fin de evitar la discontinuidad entre los bloques de información analizados. Se utiliza en los programas de análisis acústico para "suavizar" la imagen de los pulsos. Usualmente se toma como el estándar para la representación de señales acústicas de murciélagos.

Anexo 2. Características de los equipos más comunes del mercado para la detección de señales de ecolocalización en murciélagos.

Marca de equipo	Tecnología de grabación	Detector pasivo/activo	Tasa de muestreo	Microfófono	Tipo de archivo	Precio	Software	Gps	Notas
Wildlife Acoustics									
SM4 BAT FS	FS	Pasivo/Activo	192, 256, 384, 500	1 o 2 microfófonos, Externo, omnidireccional/ Cardioide	WAV/ WAV comprimido	949 US*	Kaleidoscope	No	
Echo Meter Touch 2Pro	FS	Activo	256, 384	Incorporado, omnidireccional	WAV	349 US	Kaleidoscope	Sí	Microfófono USB que requiere equipo tablet o smartphone; permite visualización en tiempo real
ANABAT									
ANABAT SWIFT	FS/ZC	Pasivo	192, 320, 500	Omnidireccional/Unidireccional	WAV/Zero Crossing	999 US	Anabat Insight	Sí	
ANABAT Walkabout	FS/ZC	Activo	500	Omnidireccional/Unidireccional	WAV/Zero Crossing	1595 US	Anabat Insight	Sí	Visualización en tiempo real
Petterson									
D500X MKI	FS	Pasivo	500	Incorporado, omnidireccional*	WAV	1771 US	Bat Sound	No	Microfono USB que requiere equipo tablet, smathphone o computador, permite visualización en tiempo real
USB Ultra-sound u384	FS	Activo	384	Microfófono USB, MEMS (Micro Electro-Mechanic Systems), omnidireccional	WAV	330 US	Bat Sound	Sí	Microfófono USB que requiere equipo tablet o smartphone, permite visualización en tiempo real
M500 -384 USB	FS	Activo	384	Incorporado, omnidireccional/unidireccional	WAV	400 US	Bat Sound	Sí	Microfono USB que requiere equipo tablet, smathphone o computador; permite visualización en tiempo real
D1000X Ultra-sound Detector	FS	Activo	32-768	Incorporado o Externo; Omnidireccional/Unidireccional, Electret	WAV	4450US	Bat Sound	Sí	

Marca de equipo	Tecnología de grabación	Detector pasivo/activo	Tasa de muestreo	Microfófono	Tipo de archivo	Precio	Software	Gps	Notas
Elekon									
Batlogger M	RT-FS	Pasivo/Activo	312.5	Microfófono por extensión, omni y unidireccional, Electret	WAV/ WAV comprimido	1448 US	Batexplorer	Sí	Sensor de temperatura
Batlogger WE X	RT-FS	Pasivo	312.5	1,2 o 4 microfófonos BATALOGGER X, Electret, Omnidireccional/Unidireccional	WAV/ WAV comprimido	2727 US	Batexplorer	Sí	Equipo diseñado para turbinas eólicas; Sensor de temperatura
Dodotronic									
Ultramic UM250K	FS	Activo	250	Electret, omnidireccional, MEMS (Micro Electro-Mechanic Systems)	WAV	234 US	SEA Wave	No	Microfono USB que requiere equipo de computo, permite visualización en tiempo real
Ultramic UM200K	FS	Activo	200	Electret, omnidireccional, MEMS (Micro Electro-Mechanic Systems)	WAV	235 US	SEA Wave	No	Microfono USB que requiere equipo de computo, permite visualización en tiempo real
Ultramic UM 192K	FS	Activo	192	Electret, omnidireccional, MEMS (Micro Electro-Mechanic Systems)	WAV	235 US	SEA Wave	No	Microfono USB que requiere equipo de computo, permite visualización en tiempo real
Ultramic 384 BLE	FS	Pasivo/Activo	348	Electret, omnidireccional, MEMS (Micro Electro-Mechanic Systems)	WAV	342 US	SEA Wave	No	Microfono USB que puede requerir equipo de computo o puede funcionar de forma autónoma con fuente de poder y una tarjeta Micro SD.

Daniela Martínez-Medina

Fundación Reserva Natural La Palmita, Centro de Investigación

Bogotá, Colombia

danimmo87@gmail.com<https://orcid.org/0000-0002-9431-8399>**Jefferson Sánchez**

Cuántico Global Eco Services

Medellín, Colombia

jefferson.sanchez1@correo.uis.edu.co<https://orcid.org/0000-0002-8652-1776>**Danny Zurc**Centro de Ciencia Museo de Ciencias Naturales de La Salle
Instituto Tecnológico Metropolitano

Medellín, Colombia

curaduriamuseo@itm.edu.co<https://orcid.org/0000-0003-4830-281X>**Francisco Sánchez**

Universidad de los Llanos

Villavicencio, Colombia

fsanchezbarrera@unillanos.edu.co<https://orcid.org/0000-0001-8826-5692>**Aída Otálora-Ardila**

Instituto de Investigación de Recursos Biológicos

Alexander von Humboldt

Villa de Leyva, Colombia

aotalora@gmail.com<https://orcid.org/0000-0002-0020-7509>**Carlos Restrepo-Giraldo**

Sonoran Institute

Mexicali, México

carlos.restrepo.giraldo@gmail.com<https://orcid.org/0000-0003-4111-2669>**Orlando Acevedo-Charry**Instituto de Investigación de Recursos Biológicos
Alexander von Humboldt

Villa de Leyva, Colombia

oacevedo@humboldt.org.co<https://orcid.org/0000-0003-4964-8994>**Fabián Hernández Leal**

Universidad de los Llanos

Villavicencio, Colombia

orlando.hernandez@unillanos.edu.co<https://orcid.org/0000-0003-1545-0349>**Diego Lizcano**

The Nature Conservancy

Bogotá, Colombia

diego.lizcano@tnc.org<https://orcid.org/0000-0002-9648-0576>

**Estándares para registrar señales de ecolocalización
y construir bibliotecas de referencia de murciélagos
en Colombia**

Citación del artículo: Martínez-Medina, D. Sánchez, J., Zurc, D., Sánchez, F., Otálora-Ardila, A., Restrepo-Giraldo, C., Acevedo-Charry, O., Hernández-Leal, F. & Lizcano, D. (2021). Estándares para registrar señales de ecolocalización y construir bibliotecas de referencia de murciélagos en Colombia. *Biota Colombiana*, 22(1), 36-56

<https://doi.org/10.21068/c2021.v22n01a03>

Recibido: 31 de mayo 2020

Aceptado: 15 de noviembre 2020

Vegetation, bird and soundscape characterization: a case study in Braulio Carrillo National Park, Costa Rica

Caracterización de la vegetación, aves y paisajes sonoros: un caso de estudio en el Parque Nacional Braulio Carrillo, Costa Rica

Mónica Isabel Retamosa Izaguirre ^{id} ✉, David Segura Sequeira ^{id} ✉,
Jimmy Barrantes-Madriral ^{id} ✉, Manuel Spínola Parallada ^{id} ✉, Óscar Ramírez-Alán ^{id} ✉

Abstract

We assessed the structural complexity of vegetation, birds and soundscapes in two areas of Braulio Carrillo National Park, Costa Rica, with different road exposure, as baseline information for conservation and management. We measured vegetation structure complexity, surveyed birds and recorded soundscapes in an area adjacent to the National Highway 32 (Quebrada) and another area 20 km away (Ceibo). Quebrada presented a more open forest structure and lower density of trees and shrubs; lower evenness and higher acoustic complexity, higher bioacoustic activity and sound pressure level; higher bird abundance and richness. Ceibo showed a higher density of trees and shrubs, higher complexity of vegetation structure, higher proportion of biophonies than anthroponies, and an acoustic community with higher diversity and entropy. The study sites differed in characteristics of their bird communities in an unexpected way; these differences appear to be mostly influenced by the structure and complexity of the vegetation surrounding the road. However, the soundscapes seemed to properly reflect the habitat condition, and are promising for evaluating the ecological condition of a site.

Keywords. Acoustic indices. Birds. Ecoacoustics. Noise. Road. Tropical rainforest.

Resumen

Evaluamos la complejidad estructural de la vegetación, las aves y los paisajes sonoros en dos áreas del Parque Nacional Braulio Carrillo, Costa Rica, con diferente exposición a carreteras, como información de base para la conservación y el manejo. Medimos la complejidad estructural de la vegetación, registramos las aves y grabamos los paisajes sonoros en un área adyacente a la Carretera Nacional 32 (Quebrada) y otra área a 20 km (Ceibo). Quebrada presentó una estructura forestal más abierta y menor densidad de árboles y arbustos, menor equitatividad y mayor complejidad acústica, mayor actividad bioacústica y nivel de presión sonora y mayor abundancia y riqueza de aves. Ceibo mostró una mayor densidad de árboles y arbustos, mayor complejidad de la estructura de la vegetación, mayor proporción de biofonías que antroponías, y una comunidad acústica con mayor diversidad y entropía. Los sitios de estudio variaron en las características de sus comunidades de aves de manera imprevista; estas diferencias parecen estar mayormente influenciadas por la estructura y complejidad de la vegetación que rodea la carretera. Sin embargo, los paisajes sonoros parecieron reflejar adecuadamente la condición del hábitat y son prometedores para evaluar la condición ecológica de un sitio.

Palabras clave. Aves. Bosque húmedo tropical. Carretera. Ecoacústica. Índices acústicos. Ruido.

Introduction

Roads and their traffic can affect wildlife over large areas and, in regions with dense road networks, may influence a high proportion of the ecological landscape (Cooke *et al.*, 2020a). In Costa Rica, for example, 41.2 % of the protected areas are directly or indirectly influenced by the effect of roads, and 532.52 km of roads are adjacent to, or less than 2 km away from protected areas (Arévalo & Blau, 2018).

Due to the complexity of biotic communities in tropical ecosystems, roads generate a soaring pressure in their vicinity (Trombulak & Frissell, 2000). Among the negative impacts related to roads are: a) isolation of wildlife populations and road kills (Keller & Lurgiader, 2003); b) proliferation of exotic species along the roadside (Forman & Deblinger, 2000); c) changes in the microclimatic conditions at forest edges (Pohlman *et al.*, 2009); d) exposure to chemicals pollutants (dust, heavy metals, nutrients, ozone and organic molecules; Laurance *et al.*, 2009); e) invasions of hunters, miners, colonists and land speculators, which can be a cause of additional hunting pressure on wildlife (Laurance *et al.*, 2009); and f) noise pollution (Francis & Barber, 2013).

Many studies have associated road disturbances with noise, since it can interfere with the acoustic communication, due to a masking effect from vehicular noise (Dooling & Popper, 2007). The masking effect occurs when the distance at which an acoustic signal can be heard is reduced by the anthropogenic background noise (Marten & Marler, 1977). Many bird species modify their vocalization behavior to overcome the masking effect by modifying the amplitude, frequency, duration, timing or rate of their vocalizations (Pieretti & Farina, 2013; Roca *et al.*, 2016). Furthermore, noise can impose selective constraints and pressures on species using acoustic signals to communicate and reproduce (Pieretti & Farina, 2013). For instance, short-term noise exposure may decrease nestling body size and increase in the oxidative stress of Tree Swallows (Injaian *et al.*, 2018).

Species spatial distribution can also be affected by road exposure. For example, bird movements, abundance, occurrence, and richness have been negatively correlated with road exposure (Reijnen *et al.*, 1997; Laurance *et al.*, 2004; Herrera-Montes & Aide, 2011; Cooke *et al.*, 2020b). In Costa Rica, the number of biophonies (measured as the seconds occupied by bird vocalizations) was significantly lower near the road in Carara National Park (Arévalo & Blau, 2018). This difference was

probably related to decreased bird density where road noise was highest (Arévalo & Newhard, 2011).

Other authors have used acoustic indices to characterize biotic communities relative to road disturbances, as they offer a relatively fast method of processing acoustic data (Sueur *et al.*, 2008). For example, Pieretti & Farina (2013) used the Acoustic Complexity Index (ACI) (Pieretti *et al.*, 2011) to quantify bird vocalization dynamics in a landscape influenced by road noise; they found a positive relationship between ACI and distance to the road. In Costa Rica, Tenez (2016) also found higher ACI values at the edge of the road in Santa Rosa National Park and attributed this result to bird vocalizations. In addition, sites located 10 m away from the road showed the highest proportion of anthrophonies, while sites located 500 m away presented the highest proportion of biophonies.

The Braulio Carrillo National Park (BCNP) is one of the most extensive protected areas in central Costa Rica, with 47 689 hectares. It holds approximately 6000 species of plants and thousands of animal species (Boza, 1992). This protected area is crossed by National Highway 32, through which 80 % of the country's import and export goods are transported (Fernández, 2013). Furthermore, plans exist to expand Highway 32, which might increase vehicular flow through this protected area. Updated information about possible influences of Highway 32 on biodiversity is required to assess present and future impacts, and to support management actions.

The objective of this study was to assess the structural complexity of vegetation, soundscape and bird communities in two areas of BCNP with different anthropogenic alteration related to road exposure, as baseline information for park biodiversity conservation and management. The area near the Highway 32 was expected to show higher habitat disturbance, higher sound pressure level and more disturbed vegetation structure than the remote area. In addition, we expected also the bird community to be less diverse, the soundscape to have a lower proportion of biophonies than anthrophonies, and lower acoustic diversity or acoustic complexity.

Materials and methods

Study area. The BCNP is located in the Central Volcanic Mountain Range in Costa Rica. It receives almost 6000 mm of precipitation annually, with two brief dry

periods between January-April and September-October (Blake & Loiselle, 2000). The park belongs to the Phytogeographic Unit of the Caribbean Foothill, characterized by abundant and heterogeneous vegetation, and an understory dominated by palms (Zamora, 2008). The park is crossed by the national Highway 32; this road was constructed in 1977 to connect the Central Valley with the Caribbean coast. The construction of the road implied the opening of forest cover in a radius of up to 1 km for the passage of machinery and storage of materials (Pérez *et al.*, 2009). To avoid further destruction of the forest, the national park was created in 1978.

The study was conducted at two sites within the BCNP, each selected based on its distance from Highway 32 (Figure 1). The sites are named "Quebrada" ($10^{\circ}09'42.35''\text{N}$ - $83^{\circ}56'16.11''\text{W}$; on Highway 32 and "Ceibo" ($10^{\circ}19'14.25''\text{N}$ - $84^{\circ}04'28.87''\text{W}$; ~ 20km from Highway 32, and ~10 km from another paved road). Quebrada is a Ranger Station dedicated mostly

to public use, and it is located on Highway 32. The area surrounding the trails belonged to cattle farms in the mid-20th century, thus the vegetation composition still maintains the characteristics of a regenerating forest (Pérez *et al.*, 2009). Ceibo is a Sector of the BCNP devoted exclusively to protection and research and it is located at about 20 km away from Quebrada. The access to Ceibo is by a low-traffic unpaved road, and there is a minimum distance of 1.5 km from this road to the sampling points. Both Ceibo and Quebrada sites are included in the life zone "Very Humid Tropical Forest Transition to Premontane" and present an altitude between 500 and 600 m a.s.l. (TEC, 2014).

Sampling points:

At each study site we systematically placed 12 sampling points in transects along all available trails, where permission was granted by park rangers (Figure 1).

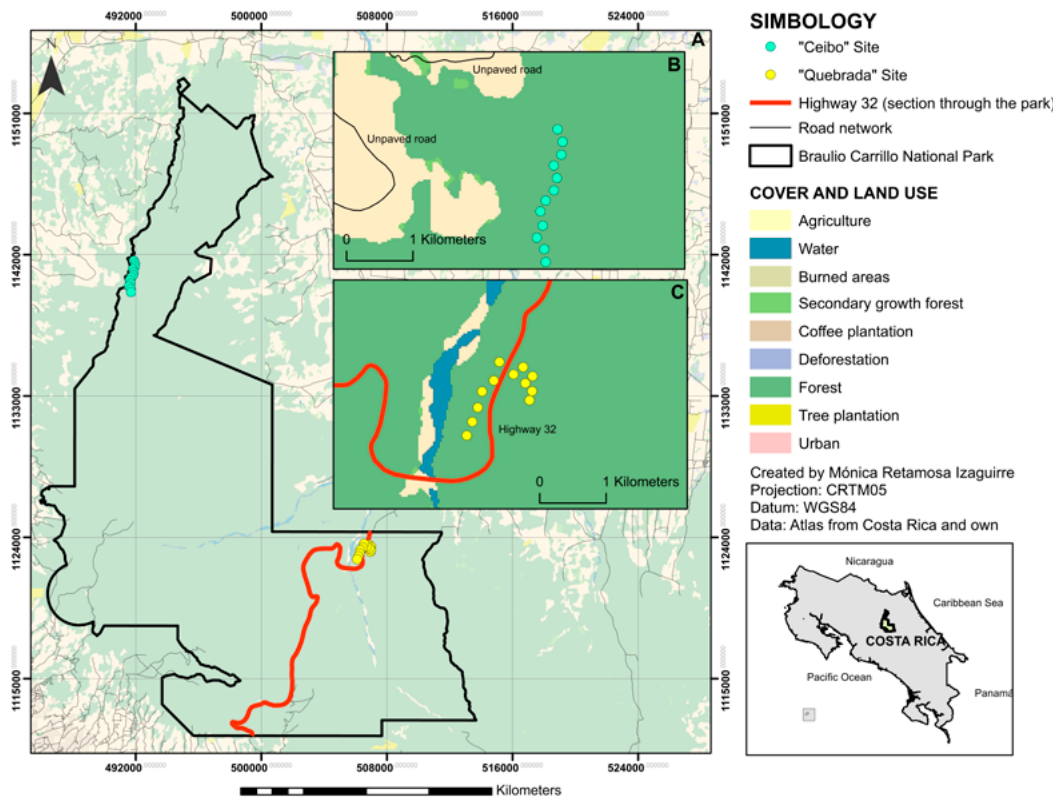


Figure 1. Location of Ceibo and Quebrada sites within the Braulio Carrillo National Park, Costa Rica, in reference to their distance from Highway 32. **A**, global view of the park; **B**, zoom view of Ceibo study site; **C**, zoom view of Quebrada study site

Figura 1. Ubicación de los sitios Ceibo y Quebrada dentro del Parque Nacional Braulio Carrillo, en referencia a su distancia a la carretera 32. **A**, vista global del parque; **B**, vista ampliada del sitio de estudio de Ceibo; **C**, vista ampliada del sitio de estudio de Quebrada

We placed the recorders 50 m away from the trail, on a central tree selected trying to avoid obstacles that could interfere with sound propagation. All sampling points were located at a distance of 200 m from each other, to reduce the superposition of sounds between two adjacent recording points and ensure a good spatial sampling of the soundscape (Farina *et al.*, 2011). However, we did not quantify detection spaces of the sites (as recommended in Darras *et al.*, 2015).

We made four visits to each study site between June 2017 and August 2018. Sampling periods were not simultaneous at both sites; however, we systematically alternated visits between sites, to get a representative sample of the bird and soundscape events that occur throughout the year. Two visits were conducted during the rainy season of 2017 (Quebrada: June and October; Ceibo: September and November), one visit during the dry season of 2018 (Ceibo: February; Quebrada: April),

and one visit during the rainy season of 2018 (Ceibo: May; Quebrada: August).

Habitat Survey:

We measured the vegetation structure around each of the 12 sampling points. From a central tree we established four 3x20 m plots, to measure the stem diameter of trees greater than 5 cm of diameter at breast height (DBH). Within each plot, we established two 3x3 m subplots to measure the DBH of those individuals between 1 and 5 cm with an approximate height ≥ 1.30 m; otherwise, they were only counted for that diameter class. Within these subplots, we established two 2x1 m subplots to count individuals with less than 1 cm of DBH. With the vegetation data, we calculated three vegetation structure variables for each sampling point (Table 1).

Table 1. Description of the environmental variables, bird parameters and acoustic indices calculated for each sampling point at Ceibo and Quebrada sites of Braulio Carrillo National Park, Costa Rica

Tabla 1. Descripción de las variables ambientales, parámetros de aves e índices acústicos calculados para cada punto de muestreo en los sitios Ceibo y Quebrada del Parque Nacional Braulio Carrillo, Costa Rica.

Environmental Variable	Code	Description
Basal Area	basal_total	Total Basal Area
Abundance 5 cm	abund_ind_5	Number of individuals more than 5 cm DBH
Abundances 1-5 cm	abund_1 to 5	Number of individuals 1-5 cm DBH
Vertical canopy opening	GAP_v	Measures the opening of the forest in relation to the number of opening pixels and forest cover for pictures taken at 45°
Horizontal canopy opening	GAP_h	Measures the opening of the forest in relation to the number of opening pixels and forest cover for pictures taken horizontally.
Vertical Mean information gain	MIG_v	Vegetation vertical structural complexity
Horizontal Mean information gain	MIG_h	Vegetation horizontal structural complexity
Bird parameter		Description
Bird abundance	Abundance	Number of individuals of all bird species.
Bird richness	Richness	Number of species.
Shannon index	Shannon	Shannon diversity (Shannon & Weaver, 1949).
Pielou index	Pielou	Evenness of Pielou (Pielou, 1984).
Acoustic Indices		Description

Environmental Variable	Code	Description
Acoustic Complexity Index	ACI	Measures the variability of sound intensity over time and frequency. Higher values indicate more complex soundscapes (Pieretti <i>et al.</i> , 2011).
Acoustic Diversity Index	ADI	Summarizes sound intensity distribution applying the Shannon index over the proportion of signals above an intensity threshold across the spectrum. High values indicate that sound intensity is spread evenly across frequency bands (Villanueva-Rivera <i>et al.</i> , 2011).
Acoustic Evenness Index	AEI	Same as the ADI, but the Gini index is applied across all frequency bins (Villanueva-Rivera <i>et al.</i> , 2011). High values indicate sound intensity is restricted to a narrow frequency range.
Bioacoustic Index	BIO	Is a function of both amplitude and number of occupied frequency bands between 2-11 kHz. It is calculated as the area under each curve included all frequency bands associated with the dB value that was greater than the minimum dB value for each curve. The higher values indicate greater disparity between bands (Boelman <i>et al.</i> , 2007).
Median Amplitude Envelope	MAE	Shows the median of the amplitude envelope normalized by the maximum value to give results between 0-1. Higher values reflect noisier soundscapes (Depraetere <i>et al.</i> , 2012).
Normalized Difference Soundscape Index	NDSI	Calculates the ratio (biophony – anthrophony) / (biophony + anthrophony). Where biophony is the energy on the frequency range 2-8 kHz and anthrophony between 1-2 kHz. (Kasten <i>et al.</i> , 2012). Higher values indicate a higher proportion of sound intensity in the biophony band.
Number of Peaks	NP	Counts the number of major frequency peaks obtained on a mean spectrum scaled between 0 and 1. Higher values indicates a greater frequency spectral complexity (Gasc <i>et al.</i> , 2013).
Spectral Entropy	Hf	Divides intensity values by the sum of intensity in a frequency band. Calculates the entropy for these values using the negative sum of each value multiplied by the log of the value and divided by the log of the number of intensity values (Sueur <i>et al.</i> , 2008). Higher values indicate evenly distributed sound across frequency bands.
Temporal Entropy	Ht	Divides intensity values by the sum of intensities in a time step. Calculates entropy for these values using the negative sum of each value multiplied by the log of the value and divided by the log of the number of intensity values. (Sueur <i>et al.</i> , 2008). Higher values indicate evenly distributed sound over time.
Total Entropy	TE	It is the product of Hf * Ht. Quantifies the variation across time and frequency (Sueur <i>et al.</i> , 2008). Higher values indicate evenly distributed sounds across frequency and time.
Mean Sound Pressure Level	SPLMean	Calculates the average sound pressure level in dB, using a decibel reference value of 2x10 ⁻⁵ Pa. Higher values indicate louder soundscapes.

Additionally, we took four horizontal and four vertical photographs (at about 45° angle) at each sampling point, following the recommendations provided in Martin and Proulx (2016), with the modification that no photograph touched the ground. For this, we used a Canon 80D camera with an 18-135 mm canon lens (EF-S f / 3.5-5.6 IS USM, Canon Inc.) and the following

settings: variable exposure, 15 mm focal length, f / 6.3 aperture, variable ISO, 2816-1880 resolution, automatic focus, image stabilizer on, and JPG type of compression. Each group of photographs was sorted by study site and sampling point to characterize the geometry of the forest using the following variables: MIG (average information gain, a measure of structural complexity;

Proulx & Parrott, 2008) and GAP (opening fraction, which measures the opening of the forest in relation to the number of opening pixels and forest cover; Rosin, 2001). The estimation parameters were obtained by using the “gap_fraction” and “calculateHisto” functions of the “LAI and imagemetrics” package (<https://github.com/cmartin/ImageAnalysisPrimer>). Four vegetation structure complexity variables were obtained for each sampling point (Table 1).

Bird Community Survey. We conducted bird point counts on each sampling point at a distance of about 20 meters from the recorders, to avoid interference during recording times. We conducted two daily counting sessions (four counts per visit) during peak hours of bird activity (~ 6:00-8:00 and ~ 14:00-16:00). At each point, we recorded number of species and number of individuals of each species detected visually and aurally during 6 minutes in a 25 meters radius. We obtained four bird “parameters” for each sampling point (Table 1). However, these parameters do not represent actual estimated parameters at the population or community level, as we did not consider detectability. For example, richness represents observed richness (number of species) at each sampling point. Abundance represents observed total abundance, i.e. the total numbers of individuals of all species detected at each sampling point.

Soundscape Survey. We located 12 “Song Meter Digital Field Recorders 2 Plus” (SM2 +; Wildlife Acoustics Inc.) to make soundscape recordings. We installed recorders at the central tree of each sampling point at an approximate height of 1.30 m. In each recorder, two omnidirectional microphones were placed, so the recording was made through two channels (in stereo). Audio files were recorded in wav format (16-bit, 44.1 kHz) and stored on 64GB capacity SDHC memory cards. The recorders were programmed to make continuous recordings during bird activity peaks (4:00-6:59 and 15:00-17:59), and for periods of 10 minutes at the beginning of each hour between 7:00 and 14:59. This recording scheme was implemented for two consecutive days during each visit to each study site, for a total of four separate visits per site.

The soundscape recordings were previewed aurally and visually through a spectrogram to facilitate identification of undesired noise such as heavy rain in the audio file, using the Adobe Audition CC v.6 program. We removed the minute files showing heavy rains, keeping in

total 81 060 minutes of recordings used in the analysis (42 480 minutes at Ceibo and 38 580 minutes at Quebrada). We analyzed soundscape recordings using eleven of the most commonly used acoustic indices, because they represent different components of the soundscape (Table 1). The acoustic indices ACI, ADI, AEI and BIO were calculated using a maximum frequency of 11 000 Hz. All acoustic indices were calculated for one-minute recording fragments and averaged for each study site, sampling point and time of day (4:00 to 17:00).

Data Analysis. To compare environmental variables, bird parameters and acoustic indices between sites, we conducted Welch tests for each of them, separately. This approach was chosen to take into account variance heterogeneity of the data. The results were represented graphically, showing P value, using an alpha of 0.05.

To conduct a multivariable description of variability at both sites, based on the measured variables, we used a multiple factor analysis (Pagès, 2002). Variables were assembled into three groups: environmental variables, bird parameters and acoustic indices (Table 1). All variables, except site, were numerical and therefore scaled to have a mean of 0 and a variance of 1 (each variable was subtracted from its mean and divided by its standard deviation).

All analyses and graphs were performed using the R programming environment (R Core Team, 2019). To calculate acoustic indices, we used the following packages for R: Sinax (<https://rdr.io/github/osoramirez/Sinax/>), Soundecology (Villanueva-Rivera & Pijanowski, 2016) and Seewave (Sueur *et al.*, 2016). We used the Biodiversity® package (Kindt, 2015) to analyze bird point count data; ggstatsplot for comparison of variables between sites (Patil, 2018), and FactoMine® for multiple factorial analysis (Lê *et al.*, 2008).

Results

Comparison of variables between sites: Ceibo showed a higher density of trees with a DBH > 5 cm, and shrubs with a DBH of 1-5 cm, and higher complexity of forest structure (higher MIG, both vertically and horizontally). On the contrary, Quebrada showed more open vegetation structure, with larger gaps both vertically and horizontally. However, total basal area was similar at both sites (Figure 2).

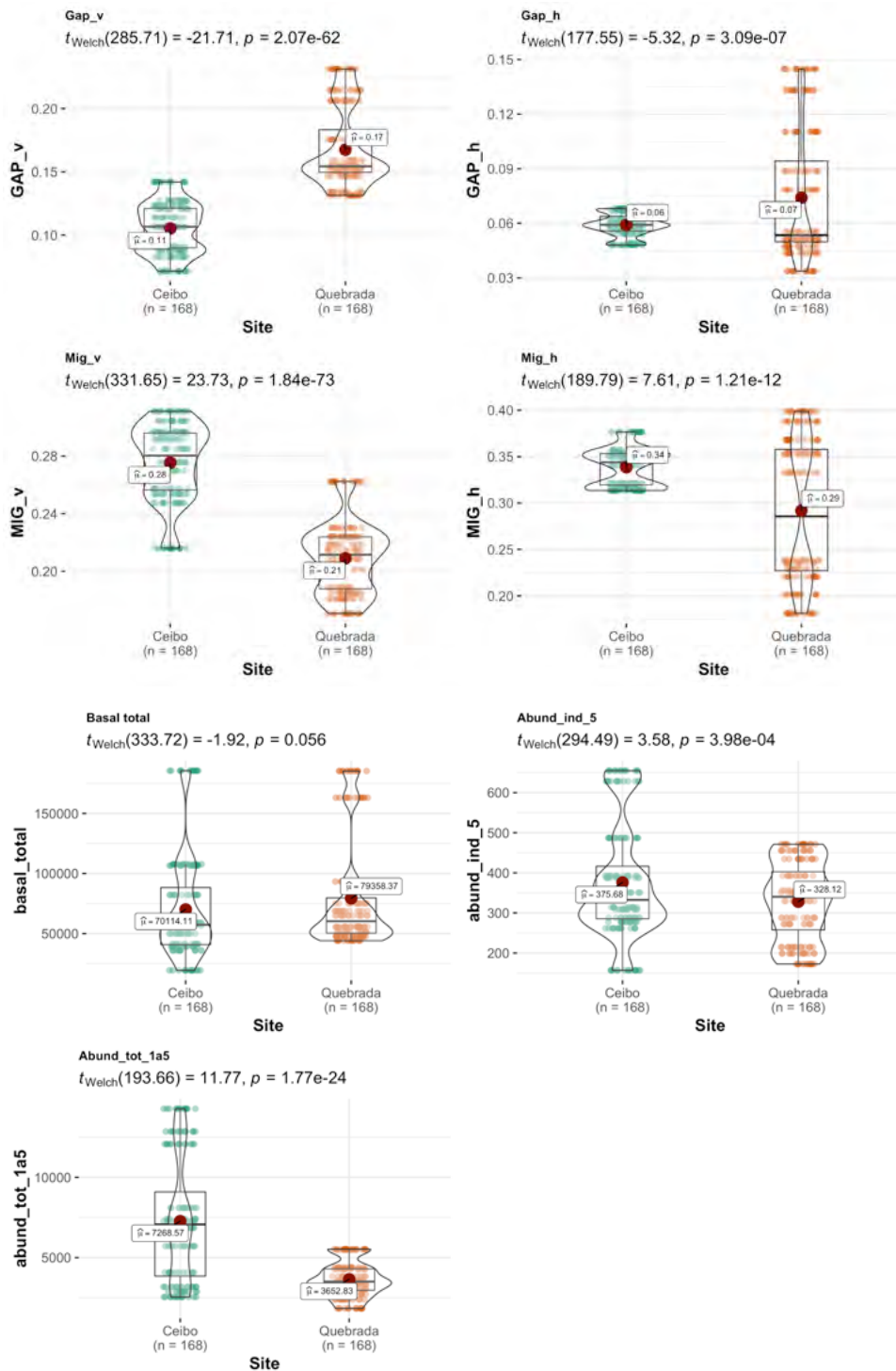


Figure 2. Comparison of environmental variables between Ceibo and Quebrada sites in the Braulio Carrillo National Park, Costa Rica. Graphic shows Welch test results, 95% confidence interval, p-value (for an alpha value of 0.05) and n.

Figura 2. Comparación de variables ambientales entre los sitios Ceibo y Quebrada en el Parque Nacional Braulio Carrillo, Costa Rica. El gráfico muestra los resultados de la prueba de Welch, el intervalo de confianza del 95%, el valor p (para un valor alfa de 0.05) y n.

Based on bird point counts, we found that bird community was more abundant, rich and diverse at Quebrada than at Ceibo; however, it was more even at Ceibo than at Quebrada (Figure 3). We detected 127 bird species in Ceibo (33 families and 111 genera), and 157 species in Quebrada (40 families and 124 genera). Of the total 170 species, 73 (43 %) were shared

by both sites, 75 (44 %) were detected only in Quebrada, and 22 (13 %) were found only in Ceibo. Bird community at Ceibo was mainly composed of forest and forest-edge species, while Quebrada had several species from open areas as well (those preferring environments with reduced forest cover or early successional states).

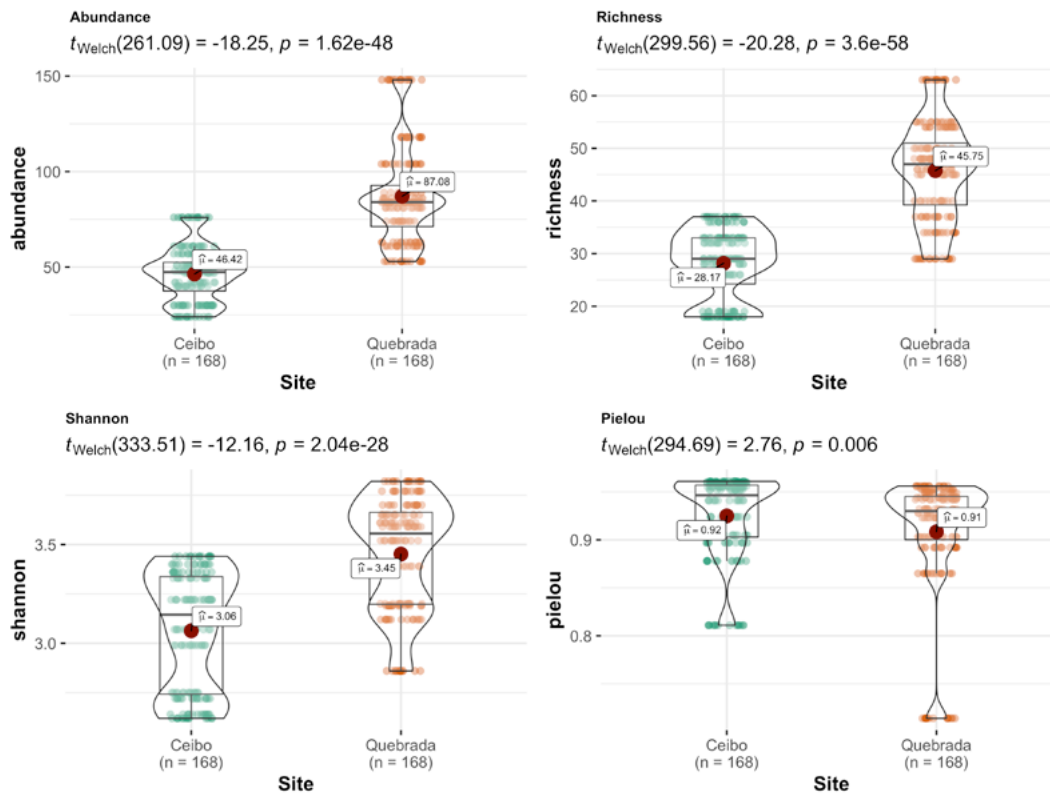
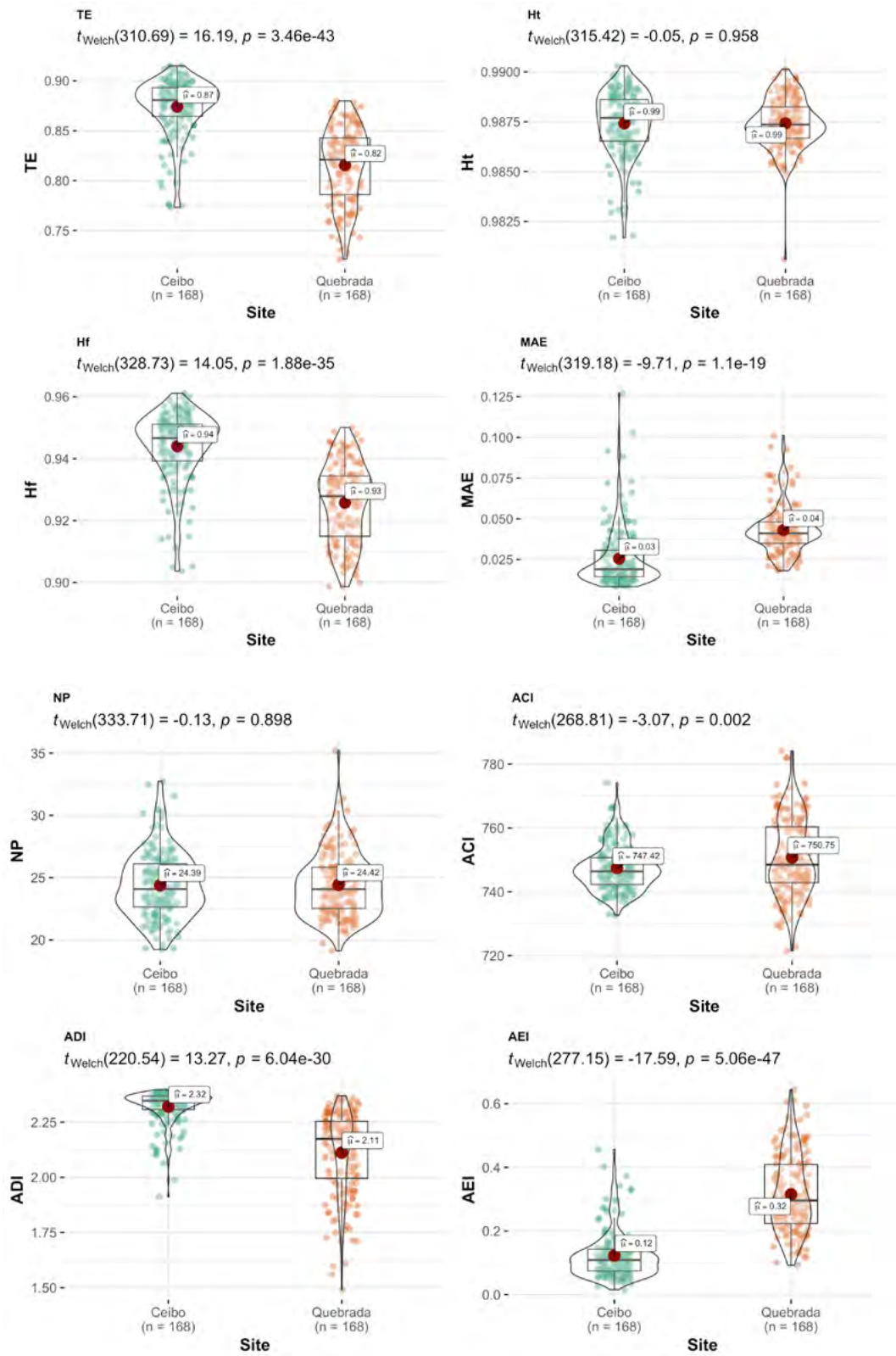


Figure 3. Comparison of bird parameters between Ceibo and Quebrada sites in the Braulio Carrillo National Park, Costa Rica. Graphic shows Welch test results, 95% confidence interval, p-value (for an alpha value of 0.05) and n.

Figura 3. Comparación de parámetros de aves entre los sitios Ceibo y Quebrada en el Parque Nacional Braulio Carrillo, Costa Rica. El gráfico muestra los resultados de la prueba de Welch, el intervalo de confianza del 95%, el valor p (para un valor alfa de 0.05) y n.

Acoustic indices showed a community with higher complexity and bioacoustic activity in Quebrada than Ceibo; however, Ceibo presented higher proportion of biophonies than anthroponies, and an acoustic

community with higher diversity, higher frequency entropy, and total entropy than Quebrada. Indices SPLmean and MAE also showed higher sound pressure level in Quebrada than in Ceibo (Figure 4).



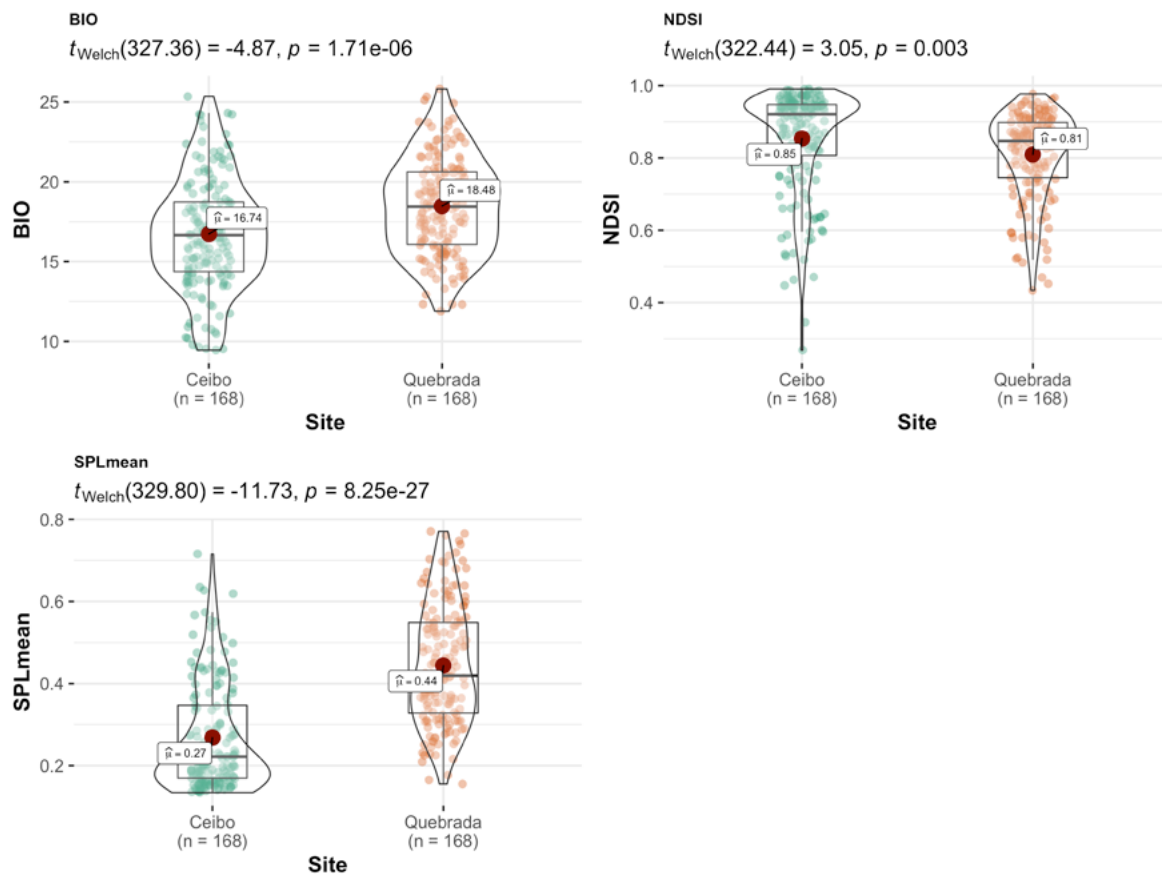


Figure 4. Comparison of acoustic indices between Ceibo and Quebrada sites in the Braulio Carrillo National Park, Costa Rica. Graphic shows Welch test results, 95% confidence interval, p-value (for an alpha value of 0.05) and n.

Figura 4. Comparación de índices acústicos entre los sitios Ceibo y Quebrada en el Parque Nacional Braulio Carrillo, Costa Rica. El gráfico muestra los resultados de la prueba de Welch, el intervalo de confianza del 95%, el valor p (para un valor alfa de 0.05) y n.

Multivariable description of variability at the study sites: Ceibo and Quebrada sites separated completely in the multiple factor analysis; besides, each of the sampling points clustered around the ellipse that represents the corresponding study site (Figure 5).

The first axis was mainly explained by bird indices (richness and abundance) and the vertical opening of the forest. The second axis was mostly explained by

environmental variables representing abundance of shrubs 1-5 cm DBH and abundance of trees > 5 cm of DBH (Figure 6). The variables with the most explanatory value are those representing vegetation structure and complexity, and bird parameters. However, axis one and axis two together explain 47 % of the variance, meaning that there are still other factors explaining data variability, other than the ones measured in this study.

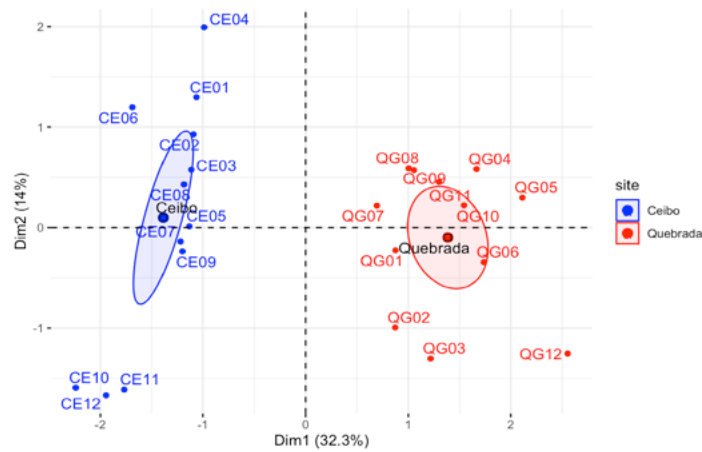


Figure 5. Multiple factor analysis in Ceibo and Quebrada sites at the Braulio Carrillo National Park of Costa Rica, according to 3 groups of variables used (environmental variables, acoustic indices, and bird parameters). Each sampling point is named on the graphic using 4 digits, the first two indicate the study site (CE = Ceibo and QG = Quebrada) and the last two refer to a consecutive number for each point from 1 to 12.

Figura 5. Análisis factorial múltiple en los sitios Ceibo y Quebrada del Parque Nacional Braulio Carrillo de Costa Rica, de acuerdo con 3 grupos de variables utilizadas (variables ambientales, índices acústicos y parámetros de aves). Cada punto de muestreo se nombra en el gráfico con 4 dígitos, los dos primeros indican el sitio de estudio (CE = Ceibo y QG = Quebrada) y los dos últimos se refieren a un número consecutivo para cada punto del 1 al 12.

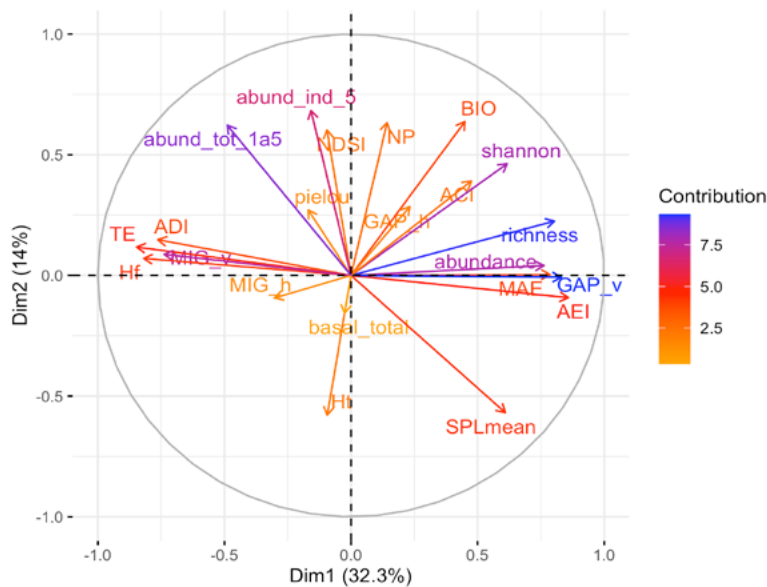


Figure 6. Multiple factor analysis in Ceibo and Quebrada sites of the Braulio Carrillo National Park of Costa Rica, according to three variable groups used (environmental variables, acoustic indices, and bird parameters). The variables with the larger value of contribution (darker color of arrow), contribute the most to the definition of the dimensions. Variables that contribute the most to Dim.1 and Dim.2 are the most important in explaining the variability in the data set.

Figura 6. Análisis de factores múltiples en los sitios Ceibo y Quebrada del Parque Nacional Braulio Carrillo de Costa Rica, de acuerdo con tres grupos variables utilizados (variables ambientales, índices acústicos y parámetros de aves). Las variables con mayor valor de contribución (color más oscuro de flecha) son las que más contribuyen a la definición de las dimensiones. Las variables que más contribuyen a Dim.1 y Dim.2 son las más importantes para explicar la variabilidad en el conjunto de datos.

Discussion

Our observations suggest that Ceibo was a more mature and preserved site than Quebrada, due to its higher horizontal and vertical complexity of vegetation structure, and higher density of trees and shrubs (Oosterhoorn & Kappelle, 2000; Proulx & Parrott, 2009). However, Quebrada presented a higher richness, abundance and diversity of birds than Ceibo, contrary to what we expected. This is inconsistent with other studies, which have found higher richness and abundance in sites with higher complexity of vegetation structure (Schulze *et al.*, 2004; Mulwa *et al.*, 2012); however, other authors have shown a higher bird diversity in secondary habitats, which provide a variety of niches for species with different habitat requirements (Becker & Agreda, 2005; Gray *et al.*, 2007). Furthermore, our results are also inconsistent with other studies showing a negative correlation between abundance, occurrence and richness of birds and levels of vehicular noise (Reijnen *et al.*, 1997; Herrera-Montes & Aide, 2011; Arévalo & Newhard, 2011).

We found bird species commonly inhabiting open areas, such as *Dives dives*, *Myiozetetes granadensis*, and *Tyrannus melancholicus*, only in Quebrada. These results could be related to a more disturbed vegetation structure in Quebrada, as a possible consequence of anthropogenic factors, such as road exposure, tourism activity, and historical management in the site (Pérez *et al.*, 2009). Roads themselves create open gaps, favoring microclimatic edge gradients (Pohlman *et al.*, 2007), and the proliferation of plant species that attract and sustain a higher diversity of birds in these areas (Levey, 1988; Flores & Dezzeo, 2005). Moreover, the nearby presence of the Río Sucio canyon could also contribute to explain the higher diversity of birds in Quebrada, since it connects the site with grasslands in the lower plains of the Caribbean slope (Gillies & Clair, 2008).

ACI and BIO were higher at Quebrada than at Ceibo, like bird parameters. ACI has shown mixed results regarding its ability as a bird indicator. Some studies found positive relationships between ACI and number of bird vocalizations (Pieretti *et al.*, 2011), species richness and bird abundance (Eldridge *et al.*, 2018; Retamosa *et al.*, 2018), or bioacoustic activity in general (Towsey *et al.*, 2014). Other studies found weak or negative relationships between ACI and species richness or biophonic activity (Mammides *et al.*, 2017; Eldridge

et al., 2018). Nevertheless, ACI has been more consistently associated with vehicular noise in other studies, showing a positive relationship with traffic noise (Pieretti & Farina, 2013; Tenez, 2016). These authors argued that birds may be attempting to propagate their signals with greater emphasis (e.g. amplified redundancy or song intensity) to offset noise masking effect. On the other hand, BIO has been tested in different environments, showing positive correlation with bird richness (Eldridge *et al.*, 2018), abundance (Retamosa *et al.*, 2018), number of vocalizations (Pieretti *et al.*, 2011) and biotic diversity (Fairbrass *et al.*, 2017).

Despite higher bird diversity in Quebrada, this site seemed to be less acoustically diverse than Ceibo, with sound intensity spread unevenly across frequency bands (Villanueva-Rivera *et al.*, 2011, Bradfer-Lawrence *et al.*, 2019). Characteristics of some bird species found in Quebrada could help to understand these results. For example, many species in open areas rely more on visual signals compared to species that inhabit the interior of the forest, which rely primarily on acoustic signals (Laverde-R. *et al.*, 2017, 2018). In fact, Laverde-R. *et al.* (2017) found evidence that birds that occupy closed or darker habitats have a greater variety of song syllables and less colorful plumages.

Furthermore, we observed bird flocks more frequently in Quebrada than in Ceibo, and they also included more individuals. Some species within the flock use special vocalizations to maintain group cohesion (Powell, 1985). However, these sounds are generally simple with notes designed for close-range communication to reduce predator detection risk (Greenberg, 2001). It has also been hypothesized that mixed flock species may have converged using similar vocalizations to mimic members of other species (Powell, 1985; Goodale & Kotagama, 2006). Based on this, presence of more abundant mixed flocks in Quebrada might help explain high bird abundance in this site, without necessarily resulting in higher acoustic diversity.

Presence of Highway 32 seemed to reflect in the acoustic environment. For example, SPLMean and MAE indices indicated an environment with higher sound pressure in Quebrada than Ceibo. Moreover, there was a higher proportion of anthrophonies than biophonies in Quebrada than in Ceibo. This is consistent with Tenez (2018), who found more anthrophonies near the paved entrance road to Santa Rosa National Park, Costa

Rica. However, we found positive, high values in the NDSI index in both Ceibo and Quebrada, which indicated that soundscapes at both sites were mostly composed of biophonies.

In general, composition of both acoustic communities in Ceibo and Quebrada appears to indicate a better partitioned acoustic community in Ceibo. According to the acoustic niche hypothesis, soundscape is a limited resource, and individuals must compete to communicate effectively, resulting in sound niches, where the soundscape is spatially and temporally divided (Krause, 1987; Pijanowski *et al.*, 2011). Therefore, the more complex the habitat, the more complex and specific the acoustic partition (Pieretti & Farina, 2013).

Some authors have criticized the use of population or community parameters as indicators of environmental disturbance (Temple & Wiens, 1989; Niemi *et al.*, 1997; Campos-Cerqueira *et al.*, 2019). For example, abundance of bird species fluctuates in a specific way, and may not represent the trend of other species (Venier & Pearce, 2004). Furthermore, changes in bird populations are generally associated with various factors, making it difficult to establish a cause-effect relationship with respect to the environmental changes evaluated (Temple & Wies, 1989). However, further insight could be attained by studying particular bird species, as well as other parameters related to communication behavior, condition, or reproductive success.

Overall, we could argue for an indirect effect of the road on the variables and parameters considered, through changes in the structural complexity of the vegetation surrounding it. Although bird parameters behaved unexpectedly in this study, soundscapes did seem to reflect well the habitat condition of both study sites, as seen in other studies (Do Nascimento *et al.*, 2020), and are promising for evaluating the ecological condition of a site.

Acknowledgements

We thank the staff of Sector Quebrada González and Puesto El Ceibo and UNA students for their collaboration during field work. We thank Christopher Vaughan for proof reading of the manuscript and recommendations. In memory of our friend and colleague, Óscar Ramírez Alán.

References

- Arévalo, J. E. & Blau, E. (2018). Road encroachment near protected areas alters the natural soundscape through traffic noise pollution in Costa Rica. *Revista de Ciencias Ambientales*, 52(1), 27-48.
<https://doi.org/10.15359/rca.52-1.2>
- Arévalo, J. E. & Knewhard, K. (2011). Traffic noise affects bird species in a protected tropical forest. *Revista de Biología Tropical*, 59(2), 969-980.
- Becker, C. D. & Ágreda, A. (2005). Bird community differences in mature and second growth garúa forest in Machalilla National Park, Ecuador. *Ornitología Neotropical*, 16, 297-319.
- Blake, J. G. & Loiselle, B. A. (2000). Diversity of birds along an elevational gradient in the Cordillera Central, Costa Rica. *The Auk*, 117(3), 663-686.
<https://doi.org/10.1093/auk/117.3.663>
- Boelman, N., Asner, G., Hart, P. & Martin, R. (2007). Multi-trophic invasion resistance in Hawaii: Bioacoustics, field surveys, and airborne remote sensing. *Ecological Applications*, 17(8), 2137-2144.
<https://doi.org/10.1890/07-0004.1>
- Boza, M. (1992). *Parques Nacionales de Costa Rica*. Guías Periplo. Costa Rica: Editorial Incafo. 91 pp.
- Bradfer-Lawrence, T., Gardner, N., Bunnefeld, L., Bunnefeld, N., Willis, S. & Dent, D. (2019). Guidelines for the use of acoustic indices in environmental research. *Methods in Ecology and Evolution*, 10(10), 1796-1807.
<https://doi.org/10.1111/2041-210X.13254>
- Buxton, R., McKenna, M., Clapp, M., Meyer, E., Stanebau, E., Angeloni, L., Crooks, K. & Wittemyer, G. (2018). Efficacy of extracting indices from large-scale acoustic recordings to monitor biodiversity. *Conservation Biology*, 32(5), 1174-1184.
<https://doi.org/10.1111/cobi.13119>
- Campos-Cerqueira, M., Mena J., Tejada-Gómez V., Aguilar-Amuchástegui, N., Gutiérrez, N. & Mitchell Aide, T. (2019). How does FSC forest certification affect the acoustically active fauna in Madre de Dios, Peru? *Remote Sensing in Ecology and Conservation*.
<https://doi.org/10.1002/rse2.120>
- Cooke, S., Balmford, A., Johnston, A., Newson, S. & Johnston, A. (2020a). Roads as a contributor to landscape-scale variation in bird communities. *Nature communications*, 11, 3125.
<https://doi.org/10.1038/s41467-020-16899-x>

- Cooke, S., Balmford, A., Johnston, A., Newson, S. & Donald, P. (2020b). Variation in abundances of common bird species associated with roads. *Journal of Applied Ecology*, 57, 1271-1282.
<https://doi.org/10.1111/1365-2664.13614>
- Darras, K., Pütz, P., Rembold, K., & Tschardt, T. (2016). Measuring sound detection spaces for acoustic animal sampling and monitoring. *Biological Conservation*, 201, 29-37.
<https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.06.021>
- Depaertere, M., Pavoine, S., Jiguet, F., Gasc, A., Duvail, S. & Sueur J. (2012). Monitoring animal diversity using acoustic indices: implementation in a temperate woodland. *Ecological Indicators*, 13(1), 46-54.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.05.006>
- Do Nascimento, L., Campos-Cerqueira, M. & Bearda, K. (2020). Acoustic metrics predict habitat type and vegetation structure in the Amazon. *Ecological Indicators*, 117, 106679
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106679>
- Dooling, R. J. & Popper, A. N. (2007). *The Effects of Highway Noise on Birds*. Sacramento, California: The California Department of Transportation, Division of Environmental Analysis.
- Eldridge, A., Guyot, P., Moscoso, P., Johnston, A., Eyre-Walker, Y. & Peck, M. (2018). Sounding out ecoacoustic metrics: Avian species richness is predicted by acoustic indices in temperate but not tropical habitats. *Ecological Indicators*, 95(1), 939-952.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.06.012>
- Fairbrass, A., Rennett, P., Williams, C., Titheridge, H. & Jones, K. (2017). Biases of acoustic indices measuring biodiversity in urban areas. *Ecological Indicators*, 83, 169-177.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.07.064>
- Farina, A., Pieretti, N., & Piccioli, L. (2011). The soundscape methodology for long-term bird monitoring: A Mediterranean Europe case-study. *Ecological Informatics*, 6(6), 354-363.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2011.07.004>
- Fernández, E. (2013). *Carretera es motor y prioridad para la economía costarricense*. San José, Costa Rica: El Financiero.
- Flores, S., & Dezzio, N. (2005). Variaciones temporales en cantidad de semillas en el suelo y en lluvia de semillas en un gradiente bosque-sabana en la Gran Sabana, Venezuela. *Interciencia*, 30(1), 39-43.
- Forman, R. T., & Deblinger, R. D. (2000). The ecological road effect zone of a Massachusetts (USA) suburban highway. *Conservation biology*, 14(1), 36-46.
<https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.2000.99088.x>
- Francis, C. D., & Barber, J. R. (2013). A framework for understanding noise impacts on wildlife: an urgent conservation priority. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 11(6), 305-313.
<https://doi.org/10.1890/120183>
- Gasc, A., Sueur, J., Pavoine, S., Pellens, R., & Grandcolas, P. (2013). Biodiversity sampling using a global acoustic approach: contrasting sites with microendemics in New Caledonia. *PloS one*, 8(5).
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0065311>
- Gillies, C. S., & Clair, C. C. S. (2008). Riparian corridors enhance movement of a forest specialist bird in fragmented tropical forest. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(50), 19774-19779.
<https://doi.org/10.1073/pnas.0803530105>
- Goodale, E., & Kotagama, S. W. (2006). Context-dependent vocal mimicry in a passerine bird. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 273(1588), 875-880.
<https://doi.org/10.1098/rspb.2005.3392>
- Gray, M. A., Baldauf, S. L., Mayhew, P. J., & Hill, J. K. (2007). The response of avian feeding guilds to tropical forest disturbance. *Conservation Biology*, 21(1), 133-141.
<https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2006.00557.x>
- Greenberg, R. (2001). Birds of many feathers: the formation and structure of mixed-species flocks of forest birds. En Boinski, S. & Garber, P. (Eds.). *On the Move: How and Why Animals Travel in Groups*. Pp: 521-558. Chicago, United States of America: University of Chicago Press.
- Herrera-Montes, M. I., & Aide, T. M. (2011). Impacts of traffic noise on anuran and bird communities. *Urban Ecosystems*, 14(3), 415-427.
<https://doi.org/10.1007/s11252-011-0158-7>
- Injaian, A. S., Taff, C. C., & Patricelli, G. L. (2018). Experimental anthropogenic noise impacts avian parental behaviour, nestling growth and nestling oxidative stress. *Animal behaviour*, 136, 31-39.
<https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2017.12.003>
- Kasten, E. P., Gage, S. H., Fox, J., & Joo, W. (2012). The remote environmental assessment laboratory's acoustic library: An archive for studying soundscape ecology. *Ecological Informatics*, 12, 50-67.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2012.08.001>
- Keller, I., & Lurgiader, C. R. (2003). Recent habitat fragmentation caused by major roads leads to reduction of gene flow and loss of genetic variability in ground beetles. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 270(1513), 417-423.
<https://doi.org/10.1098/rspb.2002.2247>

- Kindt, R. (2015). Biodiversity R: Package for Community Ecology and Suitability Analysis, R Package Version 2.9-2.
- Krause, B. (1987). Bioacoustics, habitat ambiance in ecological balance. *Whole Earth Review*, 57, 14-18.
- Laurance, W. F., Stouffer, P., & Laurance, S. G. (2004). Effects of road clearings on movement patterns of understory rainforest birds in Central Amazonia. *Conservation Biology*, 18(4), 1099-1109.
<https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2004.00268.x>
- Laurance, W. F., Goosem, M., & Laurance, S. G. (2009). Impacts of roads and linear clearings on tropical forests. *Trends in Ecology & Evolution*, 24(12), 659-669.
<https://doi.org/10.1016/j.tree.2009.06.009>
- Laverde-R, O., Ryan, M. J., & Cadena, D. (2017). Evolution of bird communication signals: transference between signals mediated by sensory drive. *bioRxiv*, 142463.
<https://doi.org/10.1101/142463>
- Laverde-R, O., Ryan, M. J., & Cadena, D. (2018). Songs in the understory and colors in the canopy: habitat structure leads to different avian communication strategies in a tropical montane forest. *bioRxiv*, 393595
<https://doi.org/10.1101/393595>
- Lê, S., Josse, J., & 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>
- Levey, D. J. (1988). Tropical wet forest treefall gaps and distributions of understory birds and plants. *Ecology*, 69, 1076-1089.
- Mammides, C., Goodale, E., Dayananda, S. K., Kang, L., & Chen, J. (2017). Do acoustic indices correlate with bird diversity? Insights from two biodiverse regions in Yunnan Province, south China. *Ecological Indicators*, 82, 470-477.
- Marten, K., & Marler, P. (1977). Sound transmission and its significance for animal vocalization. *Behavioral ecology and sociobiology*, 2(3), 271-290.
- Martin, C. A., & Proulx, R. (2016). Habitat geometry, a step toward general bird community assembly rules in mature forests. *Forest Ecology and Management*, 361, 163-169.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.11.019>
- Mulwa, R. K., Böhning-Gaese, K., & Schleuning, M. (2012). High bird species diversity in structurally heterogeneous farmland in western Kenya. *Biotropica*, 44(6), 801-809.
- Niemi, G.J., Hanowski, J.M., Lima, A.R., Nicholls, T., & Weiland, N. (1997). A critical analysis on the use of indicator species in management. *The Journal of Wildlife Management*, 61, 1240-1251.
<https://doi.org/10.2307/3802123>
- Oosterhoorn, M., & Kappelle, M. (2000). Vegetation structure and composition along an interior-edge-exterior gradient in a Costa Rican montane cloud forest. *Forest Ecology and Management*, 126(3), 291-307.
- Pagès, J. (2002). Analyse factorielle multiple appliquée aux variables qualitatives et aux données mixtes. *Revue de statistique appliquée*, 50(4), 5-37.
- Patil, I. (2018). ggstatsplot: 'ggplot2' Based Plots with Statistical Details. CRAN, retrieved from <https://cran.r-project.org/web/packages/ggstatsplot/index.html>
- Pérez, P. E., Hernández, A. A., & Gutiérrez, L. F. (2009). Caracterización de la vegetación alrededor de los senderos del sector Quebrada González, Parque Nacional Braulio Carrillo, Costa Rica. *Uniciencia*, 23(1-2), 41-49.
- Pielou, E. C. (1984). *The Interpretation of Ecological Data: A Primer on Classification and Ordination*. USA: John Wiley y Sons.
- Pieretti, N., & Farina, A. (2013). Application of a recently introduced index for acoustic complexity to an avian soundscape with traffic noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 134(1), 891-900.
<https://doi.org/10.1121/1.4807812>
- Pieretti, N., Farina, A., & Morri, D. (2011). A new methodology to infer the singing activity of an avian community: The Acoustic Complexity Index (ACI). *Ecological Indicators*, 11(3), 868-873.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2010.11.005>
- Pijanowski, B. C., Villanueva-Rivera, L. J., Dumyahn, S. L., Farina, A., Krause, B. L., Napoletano, B. M., Gage, S. H. & Pieretti, N. (2011). Soundscape ecology: the science of sound in the landscape. *BioScience*, 61(3), 203-216.
<https://doi.org/10.1525/bio.2011.61.3.6>
- Pohlman, C. L., Turton, S. M., & Goosem, M. (2007). Edge effects of linear canopy openings on tropical rain forest understory microclimate. *Biotropica*, 39(1), 62-71.
<https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2006.00238.x>
- Pohlman, C. L., Turton, S. M., & Goosem, M. (2009). Temporal variation in microclimatic edge effects near powerlines, highways and streams in Australian tropical rainforest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(1), 84-95.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.07.003>

- Powell, G. V. (1985). Sociobiology and adaptive significance of interspecific foraging flocks in the Neotropics. *Ornithological Monographs*, 713-732.
- Proulx, R., & Parrott, L. (2008). Measures of structural complexity in digital images for monitoring the ecological signature of an old-growth forest ecosystem. *Ecological Indicators*, 8(3), 270-284.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2007.02.005>
- Proulx, R., & Parrott, L. (2009). Structural complexity in digital images as an ecological indicator for monitoring forest dynamics across scale, space and time. *Ecological Indicators*, 9(6), 1248-1256.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2009.03.015>
- R Core Team. 2019. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing.
<https://www.R-project.org/>
- Reijnen, R., Foppen, R., & Veenbaas, G. (1997). Disturbance by traffic of breeding birds: evaluation of the effect and considerations in planning and managing road corridors. *Biodiversity & Conservation*, 6(4), 567-581.
- Retamosa, I. M., Ramírez-Alán, O., & De la O, C. J. (2018). Acoustic indices applied to biodiversity monitoring in a Costa Rica dry tropical forest. *Journal of Ecoacoustics*, 2, TNW2NP.
<https://doi.org/10.22261/jea.tnw2np>
- Roca, I. T., Desrochers, L., Giacomazzo, M., Bertolo, A., Bolduc, P., Deschesnes, R., Martin, C. A., Rainville, V., Rheault, G. & Proulx, R. (2016). Shifting song frequencies in response to anthropogenic noise: a meta-analysis on birds and anurans. *Behavioral Ecology*, 27(5), 1269-1274.
<https://doi.org/10.1093/beheco/arw060>
- Rosin, P. L. (2001). Unimodal thresholding. *Pattern recognition*, 34(11), 2083-2096.
- Schulze, C. H., Waltert, M., Kessler, P. J., Pitopang, R., Veddeler, D., Mühlenberg, M., Gradstein, R., Leuschner, C., Steffan-Dewenter, I. & Tschardtke, T. (2004). Biodiversity indicator groups of tropical land-use systems: comparing plants, birds, and insects. *Ecological applications*, 14(5), 1321-1333.
<https://doi.org/10.1890/02-5409>
- Shannon, C. & Weaver, W. (1964). *The Mathematical Theory of Communication*. Urbana, USA: University of Illinois Press. 144 pp.
- Sueur, J., Pavoine, S., Hamerlynck, O., & Duvail, S. (2008). Rapid acoustic survey for biodiversity appraisal. *PloS one*, 3(12).
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0004065>
- Sueur, J., Simonis, C., Brown, E., Depraetere, M., Desjonqueres, C., Fabianek, F., Gasc, A., LaZerte, S., Lees, J., Marchal, J., Pavoine, S., Stotz, A., Villanueva-Rivera, L., Ross, Z., Witthoft, C., & Zhivomirov, H. (2016). *Paquete para R: Seewave, Sound Analysis and Synthesis*. Version 2.0.5.
<https://rug.mnhn.fr/seewave>
- Tecnológico de Costa Rica-TEC. (2014). *Atlas de Costa Rica*. San José, Costa Rica.
- Temple, S. A., & Wiens, J. A. (1989). Bird populations and environmental changes: can birds be bio-indicators? *American Birds*, 43, 260-270.
- Tenez, E. D. (2016). *Caracterización del paisaje sonoro asociado a las carreteras internas del parque nacional Santa Rosa, Costa Rica* (M.Sc. Tesis). Heredia, Costa Rica: Universidad Nacional, Instituto Internacional en Conservación y Manejo de Vida Silvestre.
- Towsey, M., Wimmer, J., Williamson, I., & Roe, P. (2014). The use of acoustic indices to determine avian species richness in audio-recordings of the environment. *Ecological Informatics*, 21, 110-119.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2013.11.007>
- Trombulak, S. C., & Frissell, C. A. (2000). Review of ecological effects of roads on terrestrial and aquatic communities. *Conservation biology*, 14(1), 18-30.
<https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.2000.99084.x>
- Venier, L. A., & Pearce, J. L. (2004). Birds as indicators of sustainable forest management. *The Forestry Chronicle*, 80(1), 61-66.
<https://doi.org/10.5558/tfc80061-1>
- Villanueva-Rivera, L. J., & Pijanowski, B. C. (2016). Soundecology: soundscape ecology. *R package version 1.3. 2*.
<http://ljjvillanueva.github.io/soundecology/>
- Villanueva-Rivera, L. J., Pijanowski, B. C., Doucette, J., & Pekin, B. (2011). A primer of acoustic analysis for landscape ecologists. *Landscape ecology*, 26(9), 1233.
<https://doi.org/10.1007/s10980-011-9636-9>
- Zamora, N. (2008). Unidades fitogeográficas para la clasificación de ecosistemas terrestres en Costa Rica. *Recursos Naturales y Ambiente*, 54, 14-20.

Mónica Isabel Retamosa-Izaguirre

Universidad Nacional de Costa Rica,
Heredia, Costa Rica
mretamos@una.cr
<https://orcid.org/0000-0002-4010-2998>

David Segura Sequeira

Universidad Nacional de Costa Rica,
Heredia, Costa Rica
davidsegura719@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-6088-638X>

Jimmy Barrantes-Madrigal

Universidad Nacional de Costa Rica,
Heredia, Costa Rica
jimmybarrantesm@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-6088-638X>

Manuel Spínola Parallada

Universidad Nacional de Costa Rica,
Heredia, Costa Rica
mspinola10@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-7839-1908>

Óscar Ramírez-Alán

Universidad Nacional de Costa Rica,
Heredia, Costa Rica
osoramirez@gmail.com

**Vegetation, bird and soundscape characterization:
a case study in Braulio Carrillo National Park,
Costa Rica**

Citación del artículo: Retamosa-Izaguirre, M.I., Segura-Sequeira-D., Barrantes-Madrigal, J. Spínola-Parallada, M. & Ramírez-Alán, O. (2021). Vegetation, bird and soundscape characterization: a case study in Braulio Carrillo National Park, Costa Rica. *Biota Colombiana*, 22(1), 57-73.

<https://doi.org/10.21068/c2021.v22n01a04>

Received: May 29, 2020

Accepted: November 9, 2020

Diferencias en paisajes sonoros de sistemas silvopastoriles y potreros tradicionales del piedemonte llanero, Meta, Colombia

Differences in soundscapes of silvopastoral systems and traditional paddocks of the piedmont plain, Meta, Colombia

Andrea Morales Rozo  , Diego J. Lizcano  , Sergio Montoya Arango  ,
Álvaro Velásquez Suarez  , Evelyn Álvarez Daza  , Orlando Acevedo-Charry  

Resumen

Registramos el paisaje sonoro en cuatro fincas ganaderas en el piedemonte llanero del departamento del Meta, Colombia. Se utilizaron ocho grabadoras acústicas, cuatro en silvopastoriles de potreros arbolados y cuatro en sistemas de ganadería tradicional. Cada grabadora estuvo grabando 1 minuto cada 10 minutos, durante un promedio de 4 días, en noviembre de 2019. Se obtuvieron 4743 grabaciones de un minuto, 57.3% para sistemas de potreros tradicionales y 42.7% para potreros arbolados. Se encontraron diferencias en la actividad acústica y el uso del espacio acústico, el cual está relacionado a la distancia a las quebradas. Las variables distancia a vías y a quebradas explicaron la variación de riqueza de aves y anuros, la cual fue menor para potreros arbolados en relación a los potreros tradicionales, lo que puede estar relacionado con el diseño del sistema silvopastoral (monocultivo de falso yopo, *Mimosa trianae*). Futuras iniciativas silvopastoriles deberían incluir diseños más diversos para poder contrastar el tipo de métricas evaluadas en este estudio.

Palabras clave. Anuros. Aves. Colombia. Detecciones. Espacio acústico. Huella acústica. Orinoquia.

Abstract

We recorded the soundscape at four cattle ranches at the foothills of the Meta department, Colombia. We used eight acoustic recorders, four in silvopastoral systems and four in traditional cattle systems. Each recorder operated for 1 minute every 10 minutes, for an average of 4 days, in November 2019. We obtained 4743 one-minute recordings, 57.3% for traditional cattle systems and 42.7% for silvopastoral systems. Differences were found in the acoustic activity and use of the acoustic space, which are related to the distance to the streams. The variables distance to roads and streams explain the variation in richness of bird and anuran, which was lower in silvopastoral systems than traditional cattle systems. This may be related to the design of the silvopastoral system (*Mimosa trianae* monoculture). Future silvopastoral initiatives should include more diverse designs in order to contrast the type of metrics evaluated in this study.

Key words: Acoustic space. Acoustic print. Anurans. Birds. Orinoco.

Introducción

La ecología del paisaje sonoro es una ciencia emergente que permite tener una aproximación a la dinámica de los paisajes (Campos-Cerqueira & Aide, 2017; Tucker *et al.*, 2014) y ha venido desarrollando nuevas herramientas para su estudio (Depraetere *et al.*, 2012; Pekin *et al.*, 2012; Pijanowski *et al.*, 2011; Sueur *et al.*, 2008). Particularmente, la ecología de los paisajes sonoros usa el sonido para investigar los procesos que afectan la diversidad biológica de un ecosistema y recopilar información sobre la composición, estructura y actividad acústica de la fauna, y cómo se relaciona esto con ciertas variables de paisaje (Campos-Cerqueira & Aide, 2017; Joo *et al.*, 2011; Rodríguez-Buriticá *et al.*, 2018; Tucker *et al.*, 2014). El monitoreo acústico automatizado se ha vuelto más popular y asequible desde la aparición de equipos de grabación portátiles y de bajo costo (Gibb *et al.*, 2019), los cuales permiten cuantificar la biodiversidad a través de la actividad vocal de una comunidad en un ecosistema y evidenciar cambios a través del espacio y el tiempo (Depraetere *et al.*, 2012). Además, este método automatizado ha sido implementado en el estudio de ciertos grupos taxonómicos, entre los que se destacan los insectos (Manakin *et al.*, 2011), anuros (Ospina *et al.*, 2013), mamíferos (Kalan *et al.*, 2015), aves (Campos-Cerqueira & Aide, 2016), o a escala de comunidades (Aide *et al.*, 2017).

Recientemente se estableció la Red de Ecoacústica Colombiana, que generó el primer reporte de paisajes sonoros para Colombia, con 330 áreas de estudio de monitoreo acústico pasivo. Estas áreas incluyen ecosistemas naturales poco perturbados y transformados (Rodríguez-Buriticá *et al.*, 2018). Sin embargo, para la Orinoquia colombiana no existen estudios de este tipo que permitan describir la biodiversidad desde una dimensión acústica (Rodríguez-Buriticá *et al.*, 2018). En esta región, los procesos de ganadería extensiva y el desarrollo agroindustrial han generado cambios en los usos del suelo (Romero-Ruiz *et al.*, 2012), lo cual se ha acelerado en el nuevo escenario de postacuerdo, sumado a la alta presión de desarrollo agroindustrial (Williams *et al.*, 2020). Esta transformación es evidente especialmente en el departamento del Meta, donde la tasa de deforestación en 2018 fue una de las más altas en el país, principalmente asociada a actividades agrícolas a gran escala, como ganadería extensiva y cultivos ilícitos (IDEAM, 2019). Bajo este desalentador escenario, una de las estrategias de conservación que se ha venido impulsando a través del proyecto Ganadería

Colombiana Sostenible es la implementación de sistemas silvopastoriles como sistemas productivos que promueven la diversidad biológica en zonas ganaderas y agrícolas homogéneas (Murgueitio *et al.*, 2013), al generar pequeñas manchas aisladas de vegetación y corredores de hábitat heterogéneos (Naranjo, 1992).

Los sistemas silvopastoriles son un escenario interesante para estudiar cómo la heterogeneidad espacial influye en la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas (Wu, 2004). Esta heterogeneidad generada por los sistemas silvopastoriles puede verse reflejada en variaciones de composición del paisaje acústico (Bormpoudakis *et al.*, 2013). A pesar de que son pocos los estudios de biodiversidad en sistemas silvopastoriles en Colombia, se han encontrado diferencias en la composición y estructura de las comunidades de aves entre sistemas silvopastoriles y sistemas productivos no silvopastoriles (Fajardo *et al.*, 2009). Teniendo en cuenta que las comunidades de aves pueden ser diferentes y que las comunicaciones acústicas de los animales se reflejan directamente en el paisaje sonoro (Aide *et al.*, 2017), esperamos encontrar diferencias entre los paisajes sonoros de sistemas silvopastoriles y los sistemas de ganadería tradicional.

Con base en lo anterior, el objetivo general de este estudio fue evaluar si existen diferencias entre el uso del espacio acústico en sistemas silvopastoriles y sistemas ganaderos tradicionales en el piedemonte llanero de la Orinoquia colombiana. En particular, analizamos los componentes del paisaje sonoro, a través de detecciones de dos grupos indicadores y mejor conocidos en su acústica (aves y anuros) y diferencias entre el número de especies acústicamente activas en estos sistemas productivos.

Materiales y métodos

Área de estudio. El trabajo se desarrolló en el piedemonte llanero de la Orinoquia colombiana en el departamento del Meta (Figura 1). El muestreo se realizó en cuatro fincas que hacen parte del proyecto Ganadería Colombiana Sostenible (<http://ganaderiacolombianasostenible.co>), con elevaciones entre 424 y 738 m s.n.m: El Porvenir, con 37 ha y 70-80 cabezas de ganado (Dorado); La Rosania, con 79 ha y 150 cabezas de ganado; la finca Andorra, con 257 ha y 421 cabezas de ganado; y finca La Pradera con 217 ha y 316 cabezas de ganado (San Luis Cubarral; Tabla 1).

La zona de piedemonte del Meta tiene una humedad que oscila entre el 47% y el 75%, temperatura promedio de 26 ° C y una precipitación anual unimodal de 4500 mm, con una temporada de lluvias de abril a noviembre (IDEAM, 2005). Los sistemas de ganadería tradicional usan potreros tradicionales sin árboles y dominados por pastos exóticos, como *Brachiaria* spp. Aunque existen diferentes sistemas silvopastoriles en el piedemonte, en este estudio se incluyeron solo potreros con árboles dispersos o potreros arbolados con falso yopo (*Mimosa trianae*), una especie arbórea nativa con un dosel poco

denso que permite la filtración de la luz; además, sus foliolos pequeños se descomponen rápidamente, retienen agua y son claves en la fijación de nitrógeno (Calle *et al.*, 2012). Los árboles en los potreros tenían entre 6 y 12 años al momento del estudio. La finca El Porvenir era la única donde los potreros tradicionales estaban junto a una plantación de *Theobroma cacao* de 6 a 8 años. Los bosques nativos dentro de las fincas estaban asociados a cursos de agua, y se caracterizaban por tener árboles de 12-25 m. Adicionalmente, todas las fincas utilizan cercas vivas para dividir potreros o predios.

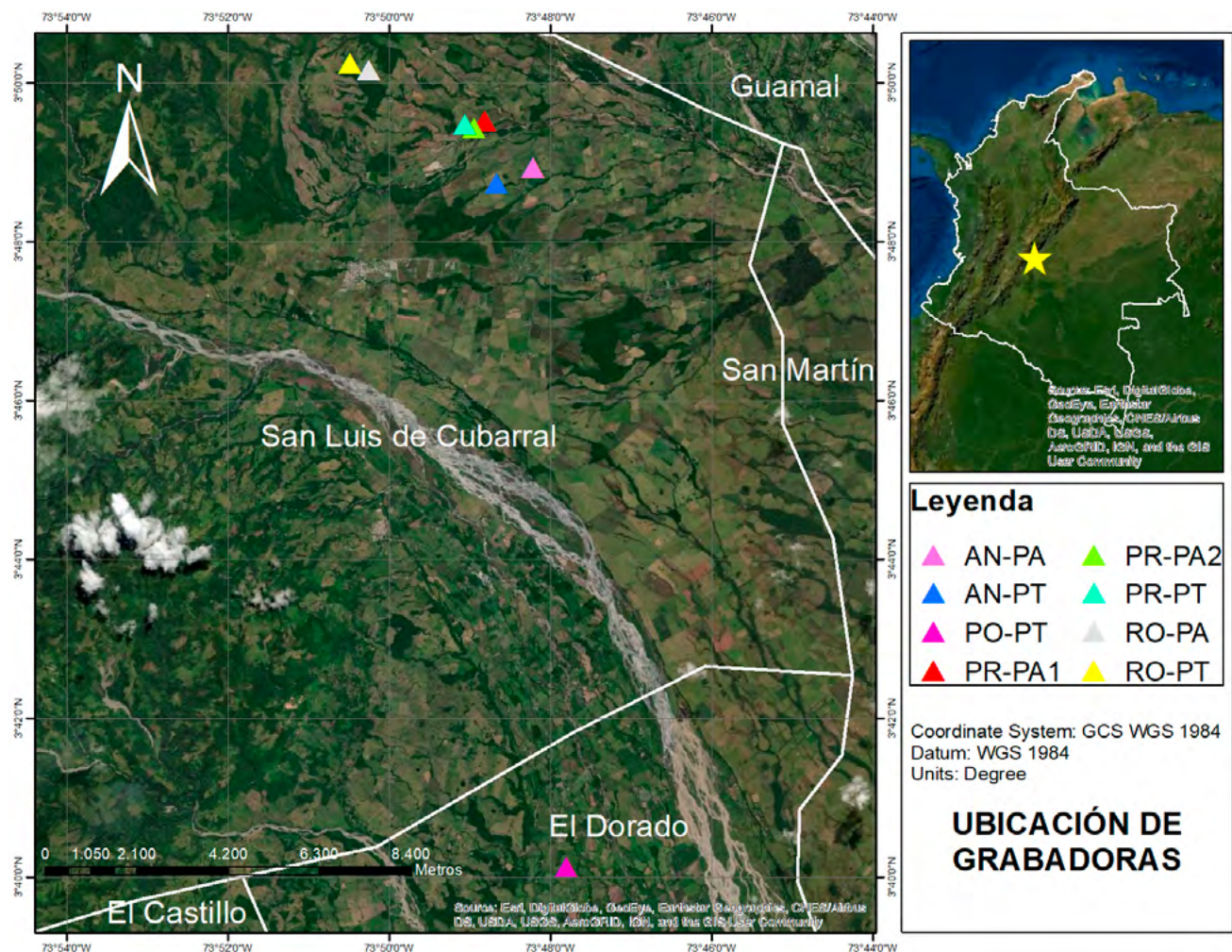


Figura 1. Ubicación de las fincas donde se muestrearon los paisajes sonoros en el departamento del Meta, Colombia. AN, Andorra; PO, El Porvenir; PR La Pradera; RO, La Rosanía; PA, potreros arbolados (sistemas silvopastoriles); PT potreros tradicionales.

Figure 1. Location of the farms where the soundscapes were sampled in the department of Meta, Colombia. AN, Andorra; PO, El Porvenir; PR La Pradera; RO, La Rosanía; PA, wooded pastures (silvopastoral systems); PT traditional paddocks.

Tabla 1. Características de los sitios donde se muestrearon los paisajes sonoros en el departamento del Meta, Colombia. PA, potreros arbolados (sistemas silvopastoriles); PT, potreros tradicionales.

Table 1. Characteristics of the sites where soundscapes were studied in the department of Meta, Colombia. PA, wooded pasture (silvopastoral systems); PT, traditional pasture.

Finca	Sistema	Nombre sitio	Latitud	Longitud	Elevación (m)	Grabaciones	Días
Porvenir	PT	PT_Porvenir	3°40'07.39" N	73°22'46.83" O	424	719	4.99
Andorra	PT	PT_Andorra	3°48'44.50" N	73°48'41.04" O	534	727	5.05
Pradera	PT	PT_Pradera	3°49'28.78" N	73°49'04.04" O	560	541	3.76
Rosania	PT	PT_Rosania	3°50'15.04" N	73°50'29.29" O	770	730	5.07
Andorra	PA	PA_Andorra	3°48'56.23" N	73°48'13.07" O	520	728	5.06
Pradera	PA	PA_1Pradera	3°49'31.66" N	73°48'49.36" O	525	437	3.03
Pradera	PA	PA_2Pradera	3°49'26.00" N	73°48'56.74" O	525	142	0.99
Rosania	PA	PA_Rosania	3°50'09.74" N	73°50'15.11" O	738	729	5.06

Toma de datos. Entre el 9 y el 27 de noviembre de 2019 se instalaron grabadoras en sistemas silvopastoriles de árboles dispersos de falso yopo (*M. trianae*) y en sistemas de ganadería tradicional. Usamos sistemas de grabación pasiva ARBIMON de Sieve Analytics, por medio de la aplicación ARBIMON Touch para Android, instalada en teléfonos celulares marca Motorola MotoG1, los cuales se instalaron dentro de una caja plástica (Grace Digital Eco Pod) que protegía el dispositivo de la lluvia. Cada celular se conectó a un micrófono (Monoprice) que permitía ampliar el rango de grabación de los teléfonos celulares (Herrera-Montes, 2018). Los teléfonos se programaron con la aplicación para grabar a una frecuencia de 44.1 kHz con 16 bits de resolución durante 1 minuto, a intervalos de 10 minutos por un promedio de 4 días en cada lugar (Tabla 1), generando grabaciones con formato no comprimido WAV. Las grabadoras se instalaron manteniendo una distancia mínima de 200 metros, a una altura de 1.50 metros del suelo y aseguradas con cuerdas a un tronco de árbol, con el micrófono dirigido hacia abajo (Herrera-Montes, 2018).

Covariables ambientales. Para evaluar el efecto en el paisaje sonoro, se definieron covariables ambientales a partir de la imagen del satélite Sentinel-2 del 25 de diciembre de 2018 (Dymond *et al.*, 2002; Samarawickrama *et al.*, 2017), que permite una resolución entre 10 y 20 m (Vrieling *et al.*, 2018). Se calculó el porcentaje de bosque natural (incluso secundario), potrero arbolado y potrero tradicional en radios de 50, 100 y 200 m

(Información Suplementaria y Tabla S1). Aunque las variables de porcentaje de bosque natural, potrero arbolado y potrero tradicional a diferentes radios estuvieron altamente correlacionadas, para las comparaciones se usaron solo los valores a un radio de 200 m. Así mismo, se estimaron las distancias a vías y quebradas. Estas covariables ambientales fueron usadas para una escogencia múltiple de modelos lineales generalizados que pudieran explicar las variables respuesta, para lo cual fueron estandarizadas (i.e., reescaladas para tener como promedio 0). Se usó la función *glmulti* del paquete *glmulti* para generar automáticamente todos los posibles modelos. Para determinar el modelo más factible o mejor ajustado se usó el criterio de información de Akaike (AICc), considerando un $\Delta AICc < 2$ para los modelos más robustos (Burnham & Anderson, 2004).

Análisis de paisajes sonoros. Cada grabación fue normalizada a -3 dB y se aplicó un filtro de paso alto de 150 Hz en el programa Ocenaudio, con el fin de disminuir un poco la cantidad de viento en algunas grabaciones, que dificultaba la visualización de emisiones acústicas de aves y anuros. Posteriormente, se cargaron en la plataforma de análisis bioacústico ARBIMON II (<https://arbimon.sieve-analytics.com>) y se realizó un análisis de paisaje sonoro por agregación de grabaciones por hora, para obtener el comportamiento de la huella acústica de cada sitio (Campos-Cerqueira *et al.*, 2019; Furumo & Aide, 2019; Herrera-Montes, 2018). Para obtener los paisajes sonoros, se definió la agregación de

las grabaciones en escala de tiempo de la hora del día (24 h), un tamaño de intervalo de frecuencia de 21 Hz, un umbral de amplitud de 0.05 (relativo al pico máximo), y la distancia mínima entre picos a 0 Hz. Los parámetros fueron escogidos primero siguiendo estudios publicados (Campos-Cerqueira *et al.*, 2019; Furumo & Aide, 2019; Herrera-Montes, 2018), y luego manteniendo la mejor representación ajustada a nuestros datos durante un análisis preliminar. La configuración de análisis de paisajes sonoros genera un total de 25 200 celdas (24 horas x 1050 bandas de frecuencia) para cada sitio, con información en cada celda de la proporción de grabaciones con picos de actividad acústica por encima del umbral definido.

Para comparar los paisajes sonoros, se realizó una ordenación no métrica multidimensional escalonada (NMDS) a partir de las celdas que arrojaron más información en alguno de los sitios (sumatoria de proporciones de grabaciones entre los sitios >1). Dichas celdas (806) incluyeron actividad acústica concentrada principalmente en frecuencias del espectro audible por debajo de los 10 kHz, rango de frecuencia que incluye la mayoría de los sonidos de aves y anfibios (Aide *et al.*, 2017); por eso centramos los análisis para la ordenación solo en esa franja de frecuencia audible (0-10 kHz). La ordenación se corrió usando la distancia de disimilitud Jaccard, al ser datos de incidencia, con 20 permutaciones

y a partir del uso de la función *metaMDS*. La matriz usada para correr la ordenación también sirvió para comparar los paisajes sonoros y relacionarlos con diferentes covariables ambientales, a partir de un análisis de varianza (ANDEVA) multivariado, con la función *adonis*, usando 999 permutaciones. Finalmente, comparamos la dispersión de los puntos de cada sistema con la función *betadisper*. Las tres funciones mencionadas pertenecen al paquete *vegan* en R (Oksanen *et al.*, 2019).

Composición del paisaje sonoro y actividad acústica de aves y anuros. Se revisaron 15 grabaciones por hora, por día, por sitio aleatoriamente en las franjas de horas 06:00-07:00, 12:00-13:00, 18:00-19:00 y 00:00-01:00 con el fin de identificar los principales componentes del paisaje sonoro. En el caso de la finca La Pradera, tanto para potreros arbolados como para potrero tradicional, solamente se encontraron 6 archivos para el periodo de muestreo, al parecer debido a un fallo con la grabadora, así que revisamos el total de archivos en estos sitios (Tabla 2). Se anotó la presencia y ausencia de componentes del paisaje sonoro usando la herramienta en ARBIMON II “Composición de paisaje sonoro”; se seleccionaron, para cada grabación revisada, presencia de geofonía (viento, lluvia, movimiento de agua), biofonía (aves, anfibios, insectos, mamíferos, domésticos) y antropofonía (vehículos terrestres, vehículos aéreos, maquinaria, voces, sonidos eléctricos).

Tabla 2. Número de archivos revisados para la composición del paisaje sonoro en el departamento del Meta, Colombia, para noviembre de 2019. PA, potrero arbolado; PT, potrero tradicional.

Table 2. Number of files revised for the composition of the soundscape in the department of Meta, Colombia, November 2019. PA, wooded pasture (silvopastoral systems); PT, traditional pasture.

Sitio	Hora				Total
	12 AM	6 AM	12 PM	6 PM	
PT_Porvenir_norm	14	15	15	14	58
PT_Andorra_norm	15	13	11	13	52
PT_Pradera_norm	6	6	7	6	25
PT_Rosania_norm	14	15	15	15	59
PA_Andorra_norm	13	14	13	16	56
PA_1Pradera_norm	14	11	15	15	55
PA_2Pradera_norm	6	6	5	5	22
PA_Rosania_norm	13	15	15	15	58
Total	95	95	96	99	385

Adicionalmente, se revisaron entre 30 y 40 grabaciones al azar de cada sitio durante el coro de amanecer (5:00-8:00) y el coro nocturno (17:00- 20:00), identificando principalmente aves y anuros. Aunque los insectos son uno de los principales componentes de la biofonía en sistemas tropicales (Aide *et al.*, 2017), centramos este análisis en aves y anuros, dado que la mayor concentración de actividad acústica fue por debajo de los 10 kHz, y para poder identificar fielmente la mayoría de fuentes de sonido biótico. La revisión significó otras 587 grabaciones diferentes a las anteriormente revisadas para este componente específico de la biofonía de cada paisaje sonoro. Para la identificación de las especies se usaron como referencias bases de datos de sonidos de aves como xeno-canto (<https://www.xeno-canto.org>), Macaulay Library (<https://www.macaulaylibrary.org>), AmphibiaWeb (<https://amphibiaweb.org>), batrachia (<https://www.batrachia.com>) y archivos particulares de los autores. Con este conjunto de datos, comparamos las detecciones (número de grabaciones con presencia de alguna especie o componente del paisaje sonoro), la riqueza (número de especies del submuestreo) y composición (lista de especies) entre los sitios y tipos de potreros.

Para determinar las diferencias en la composición del paisaje sonoro entre los sistemas tradicionales y arbolados, se realizó un conteo de los dos grupos taxonómicos seleccionados (anuros y aves) y se estimó la riqueza de especies. Posteriormente, se realizó un modelo lineal generalizado que vinculaba la variable respuesta (conteo y riqueza de especies) con los factores fijos de sistema (tradicional o arbolado), componente (geofonía, biofonía, antropofonía) y grupo taxonómico (anuros y aves), así como sus interacciones. Cada modelo lineal generalizado fue vinculado con la función de enlace Poisson. Para determinar los tipos diferentes se realizó una prueba post-hoc de comparación múltiple de Tukey. Por su parte, se comparó la composición de especies entre los sitios con sistema tradicional o arbolado con el índice de disimilitud de Jaccard (Jaccard, 1912). Entre más altos los valores del índice de Jaccard, más alto el recambio o mayor disimilitud entre los sitios.

Resultados

Se obtuvieron 4743 grabaciones de un minuto, 2717 para sistemas de potreros tradicionales y 2026 para potreros arbolados (Tabla 1). En promedio se muestreo 4.99 días por sitio, con algunas excepciones en el PA de finca La Pradera (Tabla 1), debido a una falla en la grabadora. La huella acústica de cada sitio representó, en general,

actividad acústica en horas de la noche y principalmente por debajo de los 7 kHz de frecuencia (Figura 2A). El uso del espacio acústico en promedio fue del 4.46 %, pero varió entre sitios. Los sitios con mayor porcentaje de espacio acústico usado fueron PT_Andorra (20.04 %), PT_Pradera (16.16 %) y PA_2Pradera (14.18 %). Por otro lado, los sitios con menor uso del espacio acústico fueron PT_Rosania (0.66 %), PA_1Pradera (2.15 %), y PT_Porvenir (3.98 %).

Al comparar los paisajes sonoros de los diferentes sitios por medio del NMDS (Figura 2B), el cual tuvo un valor de estrés de 0.048 con dos dimensiones (Figura S1), se observó que tanto los sistemas de potreros arbolados como los potreros tradicionales parecen distanciarse en el eje 2, con los potreros arbolados hacia valores positivos y potreros tradicionales hacia valores negativos, aunque la dispersión entre ellos no varió significativamente ($F_{1,6} = 0.630$, $P = 0.46$). Aunque los sitios se ven aparentemente muy cercanos (promedio distancia 900 m, rango 241-15 963 m), la distancia a la grabadora más cercana no se correlaciona con ninguno de los ejes del NMDS, es decir que la ordenación es independiente de la distribución espacial de los sitios. El análisis de varianza (ANDEVA) mostró una variación que estuvo significativamente relacionada con el espacio acústico usado (Figura 2C; $F_{1,7} = 2.784$, $P = 0.02$) y con la distancia a quebradas (Figura 2D; $F_{1,7} = 2.092$, $P = 0.05$).

Los componentes del paisaje sonoro variaron diferencialmente entre los dos tipos de sistemas de potreros (Figura 3A). Los potreros arbolados se caracterizaron por bajas detecciones de antropofonía, mientras que geofonía y biofonía fueron similares. En potreros tradicionales, las detecciones de geofonía fueron similares a antropofonía, mientras que las detecciones de biofonía fueron más altas que antropofonía. Todos los modelos mejor ajustados ($\Delta AICc < 2$) para las detecciones de componentes de paisajes sonoros incluyeron la distancia a vías como variable más importante (Tabla S2, Figura S2).

La mayor diferencia de las detecciones del componente biofonía se encontró en las aves (Tabla 3). Las detecciones de aves fueron marginalmente diferentes entre los dos sistemas (Figura 3B, $P = 0.08$). Sin embargo, se encontraron pocas detecciones de anuros en sistemas de potreros arbolados. Al igual que con las detecciones de componente de paisaje sonoro, todos los modelos mejor ajustados para las detecciones de los dos grupos taxonómicos revisados (aves y anuros) incluyeron la distancia a vías como variable más importante (Tabla S2, Figura S3). En cuanto al número de especies de anuros

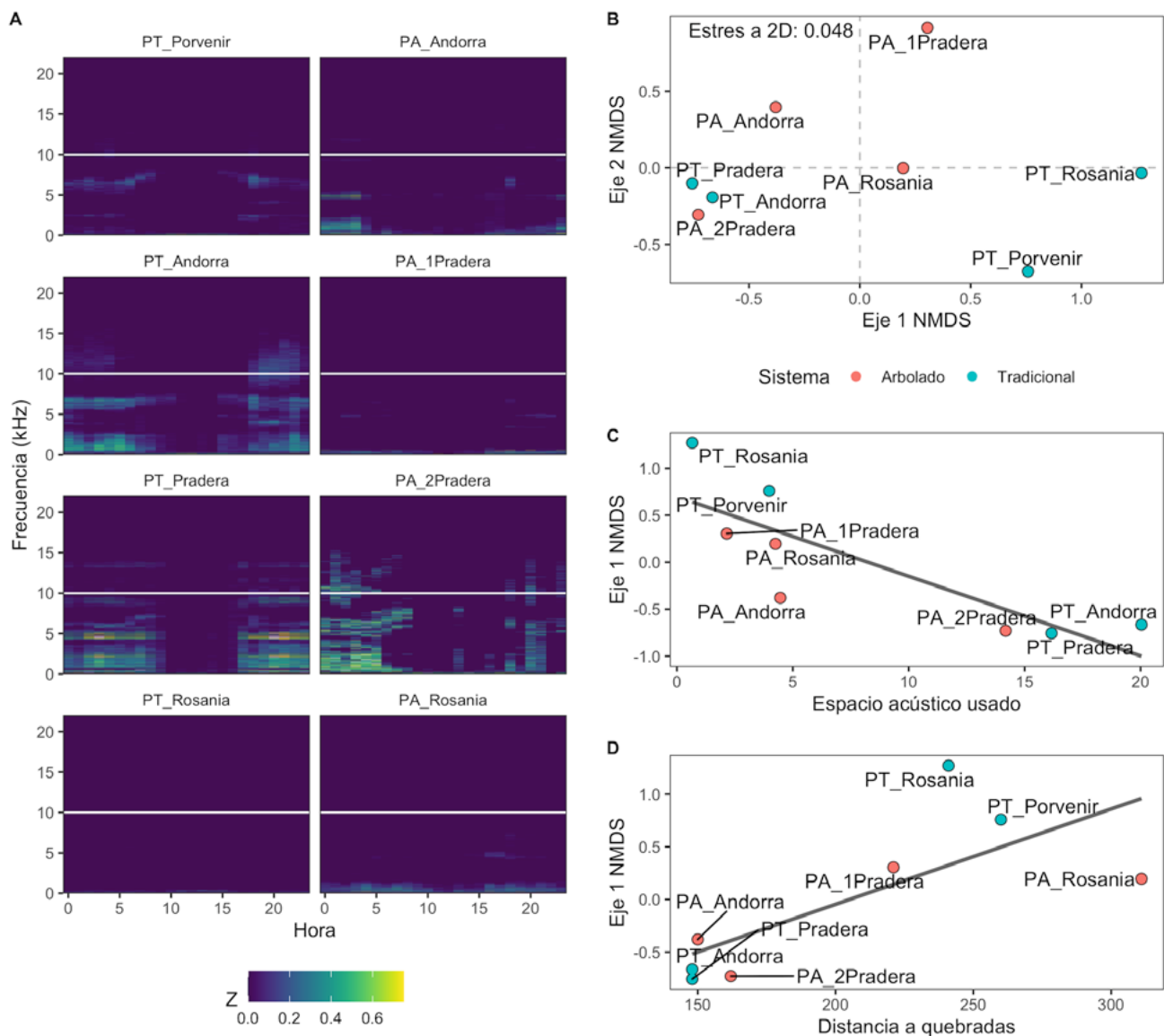


Figura 2. Representación visual (A) y comparación (B) del paisaje acústico de ocho sitios muestreados en el departamento del Meta, Colombia (ver Tabla 1 para descripción de los sitios). **A**, Los ejes representan la hora del día (X), frecuencia en kHz (Y) y proporción de grabaciones con actividad por encima de un umbral de 0.05 (Z); nótese que la mayoría de la actividad se concentra por debajo de los 10 kHz (línea horizontal blanca). El uso del espacio se calculó por la suma de número de celdas de tiempo/banda de frecuencia que fuera ocupado. **B**, Ordenación multidimensional no métrica escalonada (NMDS) a partir de celdas de tiempo/banda de frecuencia por cada sitio con bandas de frecuencia hasta 10 kHz. Relación del eje 1 de NMDS con el espacio acústico usado (C) y con la distancia a quebradas (D).

Figure 2. Visual representation (A) and comparison (B) of the soundscape of eight sampled sites in the department of Meta, Colombia (see Table 1 for description of the sites). **A**, The axes represent the time of day (X), frequency in kHz (Y) and proportion of recordings with activity above a threshold of 0.05 (Z); note that almost all acoustic activity was concentrated below 10 kHz (white horizontal line). The use of space was calculated by the sum of the number of time cells/frequency band that was occupied. **B**, Non-metric multidimensional scaling (NMDS) ordination from time cells/frequency band for each site with frequency bands up to 10 kHz. Relationship of the axis 1 of NMDS and acoustic space used (C) and distance to streams (D).

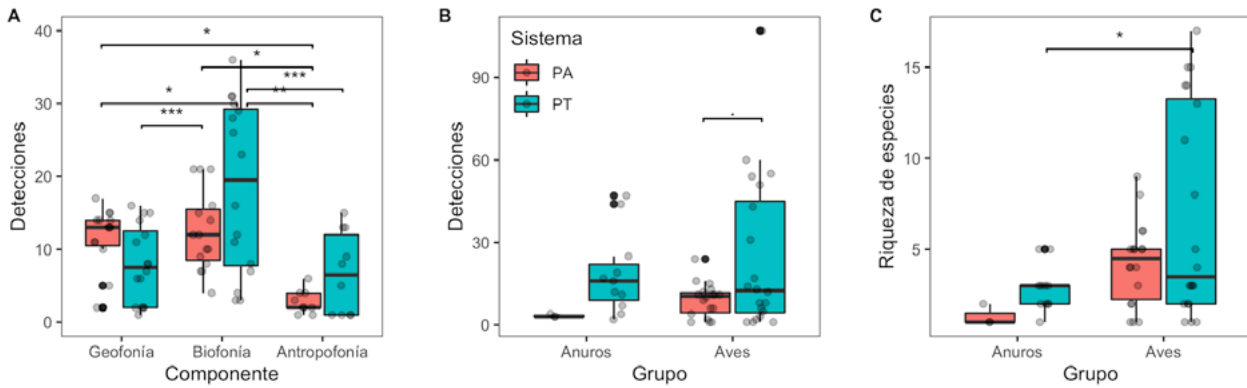


Figura 3. Variación del paisaje sonoro en potreros arbolados (PA) y potreros tradicionales (PT) en el departamento del Meta, Colombia. **A**, detecciones de componentes del paisaje sonoro (geofonía, biofonía o antropofonía); **B**, detecciones de anuros y aves; **C**, número de especies de anuros y aves reportadas por hora y sitio para sistemas silvopastoriles. Diagrama de cajas representa la mediana y el rango intercuartílico (IQR; 50 % de los datos), el bigote (línea vertical) se extiende ± 1.5 veces el IQR. Las líneas horizontales vinculan grupos significativamente diferentes (significancia: [.], $P > 0.1$; [*], $P > 0.05$; [**], $P > 0.01$; [***], $P > 0.001$)

Figure 3. Variation of the soundscape in wooded pastures (PA) and traditional pastures (PT) in Meta department, Colombia. **A**, detections of the soundscape component (geophony, biophony or anthrophony); **B**, detections of anurans and birds; **C**, number of species of anurans and birds reported per hour and site. Box plot represents median and interquartile range (IQR; 50% of data), mustache (vertical line) extends ± 1.5 times IQR. Horizontal lines link significantly different groups (significance: [.], $P > 0.1$; [*], $P > 0.05$; [**], $P > 0.01$; [***], $P > 0.001$)

Tabla 3. Efecto de sistema (PT, potreros tradicionales), componente del paisaje sonoro (B, biofonía; G, geofonía), grupo de aves (Av) e interacciones sobre las detecciones del componente sonoro, detecciones de anuros o aves y número de especies de anuros y aves, en el departamento del Meta, Colombia.

Table 3. System effect (PT, traditional pastures), soundscape component (B, biophony; G, geophony), group of birds (Av) and interactions on the detections of the sound component, detections of anurans or birds and number of species of anurans and birds in Meta department, Colombia.

	Detecciones por componente sonoro		Detecciones de anuros o aves		Riqueza de especies de anuros y aves	
	Coef \pm SE	P	Coef \pm SE	P	Coef \pm SE	P
Intercepto	1.02 \pm 0.20	<0.001	1.20 \pm 0.32	<0.001	0.29 \pm 0.50	0.565
Sistema (PT)	0.88 \pm 0.23	<0.001	1.72 \pm 0.32	<0.001	0.75 \pm 0.53	0.159
Componente (B)	1.50 \pm 0.21	<0.001	-	-	-	-
Grupo (Av)	-	-	1.01 \pm 0.33	0.002	1.15 \pm 0.51	0.025
Componente (G)	1.40 \pm 0.21	<0.001	-	-	-	-
Sistema (PT)*Componente (B)	-0.48 \pm 0.25	0.058	-	-	-	-
Sistema (PT)*Grupo (Av)	-	-	-0.72 \pm 0.34	0.032	-0.27 \pm 0.55	0.631
Sistema (PT)*Componente (G)	-1.23 \pm 0.26	<0.001	-	-	-	-

y aves (Figura 3C), la diferencia más marcada fue entre la riqueza de aves y anuros en potreros tradicionales (Figura 3c, $P = 0.043$). Cinco de los seis modelos mejor ajustados incluyeron las variables distancia a vías y distancia a quebradas como las variables más importantes para explicar la variación de riqueza de estos dos grupos (Tabla S2, Figura S4). Aunque no se profundizó en la identificación de insectos acústicamente activos, se obtuvieron 237 detecciones (102 para potreros arbolados y 135 para potreros tradicionales).

Al revisar la lista de especies detectadas, se resalta la poca diversidad total reportada en potreros arbolados, con 2 especies de anuros y 23 especies de aves (Tabla 4, ver datos extendidos en Tabla S3). Por su parte, los potreros

tradicionales registraron 5 especies de anuros y 30 especies de aves. La especie de anuro con más detecciones fue *Dendropsophus mathiassoni*, únicamente registrado en potreros tradicionales, principalmente al atardecer, seguido por *Leptodactylus fuscus* presente en ambos sistemas, pero con muchas más detecciones (59) en potrero tradicional. El ave con mayor número de detecciones fue *Cyanocorax violaceus*, seguido por *Sturnella magna* y *Mesembrynibis cayennensis*, registrados en ambos sistemas, pero mayoritariamente en potreros tradicionales. Este patrón se mantuvo para casi todas las especies, excepto *Tyrannus melancholicus*, *Crypturellus cinereus*, *Pachyramphus polychopterus*, *Gymnomystax mexicanus*, *Ramphastos vitellinus* y *Machaeropterus striolatus* (Tabla 4), que tuvieron más detecciones en potreros arbolados que en tradicionales.

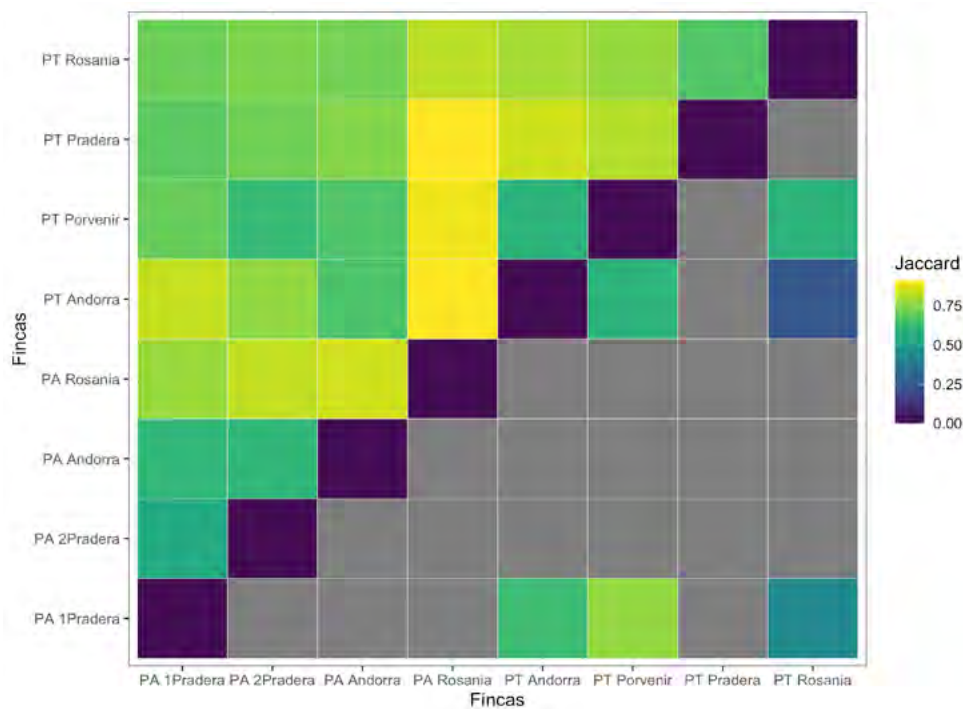


Figura 4. Matriz de disimilitud por pares entre las fincas muestreadas para sonidos de aves (arriba de la diagonal) y anuros (debajo de la diagonal) en el departamento del Meta, Colombia. El índice de Jaccard fue calculado a partir de la presencia de especies detectada en 587 grabaciones revisadas. Los valores más altos (más amarillos) indican una mayor disimilitud entre sitios pareados. Bloques grises representan sitios que no tuvieron presencia de anuros durante la revisión de coros de amanecer (5:00-8:00) o nocturno (17:00-20:00).

Figure 4. Pairwise dissimilarity matrix between the farms sampled for sounds of birds (above the diagonal) and anurans (below the diagonal) in Meta department, Colombia. The Jaccard index was calculated from the presence of species detected in 587 reviewed recordings. Higher values (more yellow) indicate greater dissimilarity between paired sites. Gray blocks represent sites that had no presence of anurans during the review of dawn (5:00-8:00) and dusk (17:00-20:00) choruses.

Tabla 4. Listado de especies de anuros y aves registrados en coros de amanecer (AM: 05:00-08:00) y coro nocturno (PM: 17:00-20:00) en potreros arbolados y tradicionales en el piedemonte llanero del departamento del Meta, Colombia. Los números indican el promedio de grabaciones con detecciones positivas por franja (AM y PM), así como el total de detecciones para cada sistema y general por especie.

Table 4. List of species of anurans and birds recorded in sunrise (AM: 05: 00-08: 00) and nocturnal (PM: 17: 00-20: 00) choruses in wooded and traditional pastures in the foothills of the Meta department, Colombia. Numbers indicate the average of recordings with positive detections per time-group (AM and PM), as well as the total detections for each system and overall by species.

Especies	Potreros Arbolados			Potreros Tradicionales			Total
	AM	PM	Total	AM	PM	Total	
Anuros							
<i>Dendropsophus mathiassoni</i>	0.0	0.0		1.0	24.0	75	75
<i>Leptodactylus fuscus</i>	0.0	1.3	4	2.7	18.3	63	67
<i>Elachistocleis ovalis</i>	0.0	2.0	6	0.0	12.7	38	44
<i>Leptodactylus colombiensis</i>	0.0	0.0		5.3	2.7	24	24
<i>Rhinella beebei</i>	0.0	0.0		0.0	1.3	4	4
Aves							
<i>Cyanocorax violaceus</i>	16.7	4.3	63	24.0	10.0	102	165
<i>Sturnella magna</i>	1.3	0.0	4	19.0	1.7	62	66
<i>Mesembrinibis cayennensis</i>	5.0	1.3	19	10.0	3.0	39	58
<i>Vanellus chilensis</i>	3.0	0.3	10	7.0	4.7	35	45
<i>Cercomacroides tyrannina</i>	0.0	0.0		12.7	1.3	42	42
<i>Milvago chimachima</i>	0.0	0.0		5.7	2.3	24	24
<i>Tyrannus melancholicus</i>	4.0	1.3	16	2.3	0.0	7	23
<i>Ara severus</i>	0.0	0.0		4.3	3.0	22	22
<i>Rupornis magnirostris</i>	1.7	0.0	5	4.0	1.7	17	22
<i>Orthopsittaca manilatus</i>	0.3	0.3	3	3.7	2.3	18	21
<i>Ortalis guttata</i>	2.0	0.0	6	4.3	0.3	14	20
<i>Turdus leucomelas</i>	0.3	0.0	1	5.7	0.7	19	20
<i>Amazona ochrocephala</i>	0.7	0.7	4	2.3	2.7	15	19
<i>Syrigma sibilatrix</i>	2.7	0.3	9	3.0	0.3	10	19
<i>Crypturellus cinereus</i>	2.3	1.3	11	1.0	0.7	5	16
<i>Leistes militaris</i>	0.0	0.0		4.3	0.7	15	15
<i>Myrmophylax atrothorax</i>	1.0	0.0	3	1.7	0.0	5	8
<i>Nyctidromus albicollis</i>	0.3	0.0	1	1.7	0.3	6	7
<i>Eupsittula pertinax</i>	0.3	0.0	1	1.0	0.7	5	6

Especies	Potreros Arbolados			Potreros Tradicionales			Total
	AM	PM	Total	AM	PM	Total	
<i>Ictinia plumbea</i>	0.0	0.0		1.0	1.0	6	6
<i>Pitangus sulphuratus</i>	0.0	0.0		2.0	0.0	6	6
<i>Pteroglossus castanotis</i>	0.3	0.3	2	0.3	1.0	4	6
<i>Legatus leucophaeus</i>	0.0	0.0		0.7	0.7	4	4
<i>Camptostoma obsoletum</i>	0.0	0.0		1.0	0.0	3	3
<i>Crotophaga ani</i>	0.3	0.0	1	0.7	0.0	2	3
<i>Pachyramphus polychopterus</i>	0.7	0.0	2	0.3	0.0	1	3
<i>Cacicus cela</i>	0.3	0.0	1	0.3	0.0	1	2
<i>Megascops choliba</i>	0.0	0.3	1	0.0	0.3	1	2
<i>Gymnomystax mexicanus</i>	0.7	0.0	2	0.0	0.0		2
<i>Ramphastos vitellinus</i>	0.3	0.0	1	0.0	0.0		1
<i>Machaeropterus striolatus</i>	0.3	0.0	1	0.0	0.0		1
<i>Patagioenas cayennensis</i>	0.0	0.0		0.3	0.0	1	1
<i>Turdus ignobilis</i>	0.0	0.0		0.3	0.0	1	1
Total			174			696	870

El índice de disimilitud de Jaccard fue más alto en las comparaciones del sitio PA_Rosania con los potreros tradicionales de PT_Pradera, PT_Andorra y PT_Porvenir (Figura 4). Esto indica que hay un mayor recambio entre estos sitios. Sin embargo, PA_Rosania presentó un recambio de especies considerable con relación a los potreros arbolados, como PA_2Pradera y PA_Andorra. Esta disimilitud ocurrió también en fincas de potreros tradicionales, como la comparación de las fincas Pradera y Andorra. La comunidad de anuros tuvo muy pocas detecciones para poder hacer comparaciones adecuadas en el recambio de especies, pero los valores de mayor disimilitud estuvieron entre PT_Porvenir y PA_1Pradera. Al contrario, la comparación pareada con menor recambio estuvo entre PT_Andorra y PT_Rosania.

Discusión

Los resultados en este estudio resaltan las diferencias en el paisaje sonoro y actividad acústica entre los sistemas de potreros arbolados y tradicionales, en particular relacionados con la distancia a las vías y a las quebradas. En el caso de los sistemas de potreros arbolados no hay una relación clara, pero para los potreros tradicionales,

a menor distancia de quebradas, mayor el uso del espacio acústico y viceversa (Tabla S1). Las quebradas en el área de estudio están asociadas a parches de bosque y probablemente esto permita establecimiento de mayor número de especies acústicamente activas cerca de los potreros tradicionales. Uno de los potreros arbolados (PA_2Pradera) resultó muy similar a algunos potreros tradicionales (PT_Andorra, PT_Pradera), con mayor actividad acústica, lo cual refleja un patrón de zona abierta, donde el paisaje acústico es saturado por la actividad de insectos y anfibios, similar a lo encontrado en un estudio de sistemas productivos (pastos para ganado, cultivos de arroz) al norte de Colombia (Furumo & Aide, 2019). Si bien los bosques tropicales intactos poseen mayor diversidad acústica que sistemas agroforestales o agrícolas (Burivalova *et al.*, 2019), es importante tener en cuenta la importancia de la heterogeneidad espacial a la hora de conservar y mantener la diversidad en los sistemas agrícolas en paisajes dominados por humanos (Fahrig *et al.*, 2011).

En cuanto a los componentes del paisaje sonoro y riqueza de grupos indicadores, también se encontraron diferencias entre los sistemas ganaderos tradicionales y sistemas silvopastoriles, en especial en el componente

de biofonía, explicada por las aves. Aun así, otros componentes no analizados en detalle en este estudio pueden estar influenciando los paisajes sonoros del piedemonte de la Orinoquia (p. ej., insectos; Aide *et al.*, 2017).

Contrario a lo que se esperaba, los sistemas de potreros arbolados presentaron menor riqueza de aves y anuros. Esto puede estar relacionado con la ya mencionada cercanía a quebradas con los relictos de bosque en potreros tradicionales, pero también con el diseño del sistema silvopastoril, que involucra árboles de falso yopo (*M. trianae*) de la misma edad, en ocasiones muy cercanos entre sí, lo cual podría considerarse un monocultivo de yopo. Sería ideal poder incrementar la heterogeneidad en los árboles sembrados y aumentar la distancia entre los mismos, como estrategia de mantenimiento de biodiversidad (Hendershot *et al.*, 2020). Igualmente, integrar diseños que involucren diferentes estados sucesionales y por ende estructuras que permitan la colonización de otro tipo de biota en los sistemas silvopastoriles (Acevedo-Charry & Aide, 2019). Dentro de las nuevas propuestas de sistemas agroforestales (silvopastoriles) para la conservación de la biodiversidad y soberanía alimentaria se plantea un manejo con palmas de regeneración (p. ej., *Acronomia aculeata*) y diferentes especies de árboles maderables (p. ej. *Swietenia macrophylla*, *Erythrina*, *Inga*, *Ficus*), lo cual podría ser una herramienta prometedora para aumentar la diversidad de especies leñosas nativas en tierras degradadas (Calle *et al.*, 2017). Sin embargo, esto requiere esfuerzos de largo plazo y depende de los recursos e incentivos de programas estatales y globales, además de la disposición de los propietarios (Acevedo-Charry & Aide, 2019).

Nuestros resultados mostraron una mayor detección de individuos de anuros en sistemas de potrero tradicional, lo cual posiblemente está determinado por la disponibilidad de cuerpos de agua temporales o permanentes, que son dispuestos en los sistemas tradicionales para permitir el acceso del ganado al agua, como bebederos artificiales. Igualmente, el pisoteo reiterado del ganado cambia las condiciones del suelo, generando pequeñas charcas que pueden ser aprovechadas por especies del género *Leptodactylus* (Angarita-Sierra, 2014). Esta opción puede ocurrir en la mayoría de las fincas que manejan más de 300 cabezas de ganado, a excepción de El Porvenir, que maneja 70-80 cabezas. Por ejemplo, *L. fuscus* y *L. colombiensis* depositan sus huevos en nidos de espuma que flotan en cuerpos de agua de sistemas lénticos y las larvas salen del nido a la charca (Crump, 1974). Las especies más abundantes en nuestro estudio,

D. mathiassoni, *E. ovalis* y *R. beebei*, tienen una estrategia reproductiva caracterizada por depositar huevos en cuerpos de agua lénticos, y sus larvas tienen desarrollo acuático (Crump, 1974). Adicionalmente, se ha documentado que algunas especies generalistas de anuros (*Rhinella marina* y *Boana punctata*) aprovechan los cuerpos de agua en áreas abiertas como medio de reproducción (Acevedo-Charry & Aide, 2019).

Futuras aproximaciones al paisaje sonoro neotropical deben incluir detecciones de insectos (Aide *et al.*, 2017; Bobryk *et al.*, 2015; Furumo & Aide, 2019), que ocupan un amplio rango de frecuencia en espectro audible (Aide *et al.*, 2017). A pesar de que no fue evaluado cuantitativamente, en este estudio también se detectaron especies de mamíferos como *Dactylomys dactylinus*, especialistas de bambú (Emmons, 1981; LaVal, 1976; Reyes Díaz, 2019). Los registros de esta especie se encontraron asociados a tres potreros tradicionales (fincas Andorra, Rosania y Porvenir) y dos potreros arbolados (fincas Andorra, Rosania) cercanos a bosque y quebradas. Adicionalmente, se detectaron también mamíferos grandes y perseguidos por conflicto con ganaderos, como *Panthera onca* en potreros arbolados en la finca Rosania y *Puma concolor* en potrero tradicional en la finca Andorra, en ambos casos relativamente cerca a un bosque. Aunque ambas especies son nativas, de amplia distribución y generalistas en sus presas, la disponibilidad de presas y reducción de hábitat podría atraerlas a los sistemas productivos de ganadería (Garrote *et al.*, 2017). Aun así, estos registros sugieren que los parches de bosque conservados en las fincas contribuyen a mantener posibles movimientos de estas especies dentro de los predios (Polisar *et al.*, 2003) y postula posibles oportunidades de conservación en estos sistemas productivos en una escala regional.

La industria agrícola y ganadera seguirá recibiendo cada vez más presión para ser simultáneamente productiva y sostenible, así que la atención a técnicas novedosas que apoyen sus decisiones de manejo seguirá siendo relevante. El uso de técnicas de monitoreo acústico muestra tener un gran potencial ya que puede ser fácilmente estandarizada y aplicada a gran escala para proveer indicadores del impacto y la sostenibilidad de la industria agrícola (Doohan *et al.*, 2019). Es importante que se propicie que los sistemas silvopastoriles generen una estructura más heterogénea y se conviertan en hábitat para otras plantas y animales, de forma que ayuden a incrementar la biodiversidad y mantener diferentes procesos ecológicos vitales en los paisajes ganaderos (Jose *et al.*, 2019; Murgueitio *et al.*, 2013; Rivera *et al.*, 2013).

Agradecimientos

Agradecemos al Proyecto Ganadería Colombiana Sostenible y sus socios: Global Environment Facility (GEF), gobierno del Reino Unido, Grupo Banco Mundial, Federación Colombiana de Ganaderos (FEDEGAN), Centro para la Investigación en Sistemas de Producción Agropecuaria (CIPAV), Fondo Acción y The Nature Conservancy, por la coordinación de la ejecución de los recursos para el desarrollo del proyecto-consultoría STEP CO-TNC-108529-CS-CLS. A la Universidad de los Llanos y todas sus dependencias, y especialmente a la Oficina de Proyección Social y la decanatura de la Facultad de Ciencias Básicas e Ingeniería. A los dueños o administradores de las fincas: El Porvenir, Clemente Eleazar Burgos; La Rosania, Humberto Castro; Hacienda La Andorra y La Pradera, José Felipe Sánchez. A todo el equipo de la consultoría por su apoyo en campo. The Nature Conservancy y Sieve Analytics Inc. gestionaron el almacenamiento y acceso para análisis de los datos en la plataforma ARBIMON II. A T. Mitchell Aide por el préstamo de las grabadoras.

Referencias

Acevedo-Charry, O., & Aide, T. M. (2019). Recovery of amphibian, reptile, bird and mammal diversity during secondary forest succession in the tropics. *Oikos, April*, 1065-1078.

<https://doi.org/10.1111/oik.06252>

Aide, T. M., Hernández-Serna, A., Campos-Cerqueira, M., Acevedo-Charry, O., & Deichmann, J. L. (2017). Species richness (of insects) drives the use of acoustic space in the tropics. *Remote Sensing*, 9(11), 1-12.

<https://doi.org/10.3390/rs9111096>

Angarita-Sierra, T. (2014). Diagnóstico del estado de conservación del ensamblaje de anfibios y reptiles presentes en los ecosistemas de sabanas inundables de la cuenca del río Pauto, Casanare, Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 38(146), 53-78.

Bobryk, C. W., Rega-Brodsky, C. C., Bardhan, S., Farina, A., He, H. S., & Jose, S. (2015). A rapid soundscape analysis to quantify conservation benefits of temperate agroforestry systems using low-cost technology. *Agroforestry Systems*, 90(6), 997-1008.

<https://doi.org/10.1007/s10457-015-9879-6>

Bormpoudakis, D., Sueur, J., & Pantis, J. D. (2013). Spatial heterogeneity of ambient sound at the habitat type level: Ecological implications and applications. *Landscape Ecology*, 28(3), 495-506.

<https://doi.org/10.1007/s10980-013-9849-1>

Burivalova, Z., Wahyudi, B., Boucher, T. M., Ellis, P., Truskinger, A., Towsey, M., Roe, P., Marthinus, D., Griscom, B., & Game, E. T. (2019). Using soundscapes to investigate homogenization of tropical forest diversity in selectively logged forests. *Journal of Applied Ecology*, 56(11), 2493-2504.

Burnham, K. P., & Anderson, D. R. (2004). Multimodel inference: Understanding AIC and BIC in model selection. *Sociological Methods and Research*, 33(2), 261-304.

<https://doi.org/10.1177/0049124104268644>

Calle, Z., Giraldo, A. M., Cardozo, A., A., G., & Murgueitio, E. (2017). Chapter 17: Enhancing biodiversity in Neotropical silvopastoral systems: Use of indigenous trees and palms. In Montagnini, F. (Ed.). *Integrating Landscapes: Agroforestry for Biodiversity*. Pp. 417-438. Springer International Publishing.

https://doi.org/10.1007/978-3-319-69371-2_17

Calle, Z., Murgueitio, E., & Chará, J. (2012). Integrating forestry, sustainable cattle-ranching and landscape restoration. *Unasylva*, 63(1), 31-40.

Campos-Cerqueira, M., & Aide, T. M. (2016). Improving distribution data of threatened species by combining acoustic monitoring and occupancy modelling. *Methods in Ecology and Evolution*, 7(11), 1340-1348.

<https://doi.org/10.1111/2041-210X.12599>

Campos-Cerqueira, M., & Aide, T. M. (2017). Changes in the acoustic structure and composition along a tropical elevational gradient. *Journal of Ecoacoustics*, 1(December), PNCO7I.

<https://doi.org/10.22261/jea.pnco7i>

Campos-Cerqueira, M., Mena, J. L., Tejada-Gómez, V., Aguilar-Amuchastegui, N., Gutierrez, N., & Aide, T. M. (2019). How does FSC forest certification affect the acoustically active fauna in Madre de Dios, Peru? *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 1-12.

<https://doi.org/10.1002/rse2.120>

Crump, M. L. (1974). Reproductive strategies in a tropical anuran community. *Miscellaneous Publication*, 61, 1-68.

Depraetere, M., Pavoine, S., Jiguet, F., Gasc, A., Duvail, S., & Sueur, J. (2012). Monitoring animal diversity using acoustic indices: Implementation in a temperate woodland. *Ecological Indicators*, 13(1), 46-54.

<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.05.006>

Doohan, B., Fuller, S., Parsons, S., & Peterson, E. E. (2019). The sound of management: Acoustic monitoring for agricultural industries. *Ecological Indicators*, 96(September 2018), 739-746.

<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.09.029>

- Dymond, C. C., Mladenoff, D. J., & Radeloff, V. C. (2002). Phenological differences in Tasseled Cap indices improve deciduous forest classification. *Remote Sensing of Environment*, 80(3), 460-472.
[https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00324-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00324-8)
- Emmons, L. H. (1981). Morphological, ecological, and behavioral adaptations for arboreal browsing in *Dactylomys dactylinus* (Rodentia, Echimyidae). *Journal of Mammalogy*, 62(1), 183-189.
- Fahrig, L., Baudry, J., Brotons, L., Burel, F. G., Crist, T. O., Fuller, R. J., Sirami, C., Siriwardena, G. M., & Martin, J. (2011). Functional landscape heterogeneity and animal biodiversity in agricultural landscapes. *Ecology Letters*, 14(2), 101-112.
- Fajardo, D., Johnston González, R., Neira, L., Chará, J., & Murgueitio, E. (2009). Influencia de sistemas silvopastoriles en la diversidad de aves en la cuenca del río La Vieja, Colombia. *Recursos Naturales y Ambiente (CATIE)*, 58, 9-16.
- Furumo, P. R., & Aide, T. M. (2019). Using soundscapes to assess biodiversity in Neotropical oil palm landscapes. *Landscape Ecology*, 34(4), 911-923.
<https://doi.org/10.1007/s10980-019-00815-w>
- Garrote, G., Rodríguez-Castellanos, F., Trujillo, F., & Mosquera-Guerra, F. (2017). Características de los ataques de jaguar (*Panthera onca*) sobre el ganado y evaluación económica de las pérdidas en fincas ganaderas de los Llanos Orientales (Vichada, Colombia). En Casdtaño-Urbe, C. et al. (Eds.). *II. Conflicto Entre Felinos y Humanos en América Latina*. Pp. 89-102. Instituto Alexander von Humboldt, Fundación Herencia Ambiental Caribe, Fundación Panthera, Bogotá.
- Gibb, R., Browning, E., Glover-Kapfer, P., & Jones, K. E. (2019). Emerging opportunities and challenges for passive acoustics in ecological assessment and monitoring. *Methods in Ecology and Evolution*, 10(2), 169-185.
<https://doi.org/10.1111/2041-210X.13101>
- Hendershot, J. N., Smith, J. R., Anderson, C. B., Letten, A. D., Frishkoff, L. O., Zook, J. R., Fukami, T., & Daily, G. C. (2020). Intensive farming drives long-term shifts in avian community composition. *Nature*, 579(7799), 393-96.
<https://doi.org/10.1038/s41586-020-2090-6>
- Herrera-Montes, M. I. (2018). Protected area zoning as a strategy to preserve natural soundscapes, reduce anthropogenic noise intrusion, and conserve biodiversity. *Tropical Conservation Science*, 11(1).
<https://doi.org/10.1177/1940082918804344>
- IDEAM. (2005). *Atlas climatológico de Colombia [en línea]*. IDEAM. (2019). *Décimo séptimo Boletín de Detecciones Tempranas de Deforestación*.
<http://www.ideam.gov.co/documents/24277/84382637/Detecciones+Tempranas+de+Deforestación/96e81976-195e-4d0f-8aaf-24c05c7312f8>
- Jaccard, P. (1912). The distribution of the flora in the Alpine zone. *New Phytologist*, 11(2), 37-50.
<https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1912.tb05611.x>
- Joo, W., Gage, S. H., & Kasten, E. P. (2011). Analysis and interpretation of variability in soundscapes along an urban-rural gradient. *Landscape and Urban Planning*, 103(3-4), 259-276.
<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.08.001>
- Jose, S., Walter, D., & Mohan Kumar, B. (2019). Ecological considerations in sustainable silvopasture design and management. *Agroforestry Systems*, 93(1), 317-331.
<https://doi.org/10.1007/s10457-016-0065-2>
- Kalan, A. K., Mundry, R., Wagner, O. J. J., Heinicke, S., Boesch, C., & Köhl, H. S. (2015). Towards the automated detection and occupancy estimation of primates using passive acoustic monitoring. *Ecological Indicators*, 54, 217-226.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.02.023>
- LaVal, R. K. (1976). Voice and habitat of *Dactylomys dactylinus* (Rodentia: Echimyidae) in Ecuador. *Journal of Mammalogy*, 57(2), 402-404.
- Manakin, R. W., Hagstrum, D. W., Smith, M. ., Roda, A. L., & Kairo, M. T. K. (2011). Perspective and promise: A century of insect acoustic detection and monitoring. *American Entomologist*, 57(1), 30-44.
<https://doi.org/10.1093/ae/57.1.30>
- Murgueitio, E., Chará, J., Solarte, A. J., Uribe, F., Zapata, C., & Rivera, J. E. (2013). Agroforestería pecuaria y sistemas silvopastoriles intensivos (SSPi) para la adaptación ganadera al cambio climático con sostenibilidad. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 26, 313-316.
- Naranjo, L. G. (1992). Estructura de la avifauna en un área ganadera en el Valle del Cauca, Colombia. *Caldasia*, 17(1), 55-66.
- Oksanen, J., Blanchet, F. G., Michael, F., Kindt, R., Legendre, P., McGlinn, D., Minchin, P. R., O'Hara, R. B., Simpson, G. L., & Solymos, P. (2019). *Vegan: Community Ecology Package*. R package version 2.5-5.
- Ospina, O. E., Villanueva-Rivera, L. J., Corrada-Bravo, C. J., & Mitchell Aide, T. (2013). Variable response of anuran calling activity to daily precipitation and temperature: Implications for climate change. *Ecosphere*, 4(4), 1-12.
<https://doi.org/10.1890/ES12-00258.1>

- Pekin, B. K., Jung, J., Villanueva-Rivera, L. J., Pijanowski, B. C., & Ahumada, J. A. (2012). Modeling acoustic diversity using soundscape recordings and LIDAR-derived metrics of vertical forest structure in a neotropical rainforest. *Landscape Ecology*, 27(10), 1513-1522. <https://doi.org/10.1007/s10980-012-9806-4>
- Pijanowski, B. C., Villanueva-Rivera, L. J., Dumyahn, S. L., Farina, A., Krause, B. L., Napoletano, B. M., Gage, S. H., & Pieretti, N. (2011). Soundscape ecology: The science of sound in the Landscape. *BioScience*, 61(3), 203-216. <https://doi.org/10.1525/bio.2011.61.3.6>
- Polisar, J., Maxit, I., Scognamillo, D., Farrell, L., Sunquist, M. E., & Eisenberg, J. F. (2003). Jaguars, pumas, their prey base, and cattle ranching: ecological interpretations of a management problem. *Biological Conservation*, 109(2), 297-310.
- Reyes Díaz, M. C. (2019). *Aproximación etológica de Dactylomys dactylinus (RODENTIA: Echymyidae-Desmarest, 1871) en la Universidad de los Llanos*. Tesis. Villavicencio: Departamento de Biología y Química, Universidad de los Llanos. 103 pp.
- Rivera, L. F., Armbrrecht, I., & Calle, Z. (2013). Silvopastoral systems and ant diversity conservation in a cattle-dominated landscape of the Colombian Andes. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 181, 188-194. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.09.011>
- Rodríguez-Buriticá, S., Savageb, D., Caycedo, P., Acevedo-Charrya, O., Isazad, C., Daza, J. M., Almeida, J., Ulloaf, J. S., Orozco-Alzateh, M., Villamizari, N., José Francisco Ruizh, J., Loperak, A., Oliverl, B., Laverdem, Ó., Pijanowski, B., & Colombiana, R. E. (2018). *Paisajes sonoros de Colombia: La otra dimensión de la biodiversidad*. Ficha 103 para el Reporte de Estado y Tendencias de la Biodiversidad Continental de Colombia 2018. Ficha 103. Bogotá D. C.: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt Disponible en <https://reporte.humboldt.org.co/biodiversidad/2018/cap1/103/>
- Romero-Ruiz, M. H., Flantua, S. G. A., Tansey, K., & Berrío, J. C. (2012). Landscape transformations in savannas of northern South America: Land use/cover changes since 1987 in the Llanos Orientales of Colombia. *Applied Geography*, 32(2), 766-776. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.08.010>
- Samarawickrama, U., Piyaratne, D., & Ranagalage, M. (2017). Relationship between NDVI with Tasseled cap indices : A remote sensing based analysis. *International Journal of Innovative Research in Technology*, 3(12), 13-19.
- Sueur, J., Aubin, T., & Simonis, C. (2008). Sound analysis and synthesis with the package Seewave, a free modular tool for sound. *Bioacoustics*, 18(2), 213-226. <https://doi.org/10.1080/09524622.2008.9753600>
- Tucker, D., Gage, S. H., Williamson, I., & Fuller, S. (2014). Linking ecological condition and the soundscape in fragmented Australian forests. *Landscape Ecology*, 29(4), 745-758. <https://doi.org/10.1007/s10980-014-0015-1>
- Vrieling, A., Meroni, M., Darvishzadeh, R., Skidmore, A. K., Wang, T., Zurita-Milla, R., Oosterbeek, K., O'Connor, B., & Paganini, M. (2018). Vegetation phenology from Sentinel-2 and field cameras for a Dutch barrier island. *Remote Sensing of Environment*, 215(March 2018), 517-529. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.03.014>
- Williams, B. A., Grantham, H. S., Watson, J. E. M., Alvarez, S. J., Simmonds, J. S., Rogéliz, C. A., Da Silva, M., Forero-Medina, G., Etter, A., & Nogales, J. (2020). Minimising the loss of biodiversity and ecosystem services in an intact landscape under risk of rapid agricultural development. *Environmental Research Letters*, 15(1), 14001.
- Wu, J. (2004). Effects of changing scale on landscape pattern analysis: Scaling relations. *Landscape Ecology*, 19(2), 125-138. <https://doi.org/10.1023/b:land.0000021711.40074.ae>

Información suplementaria

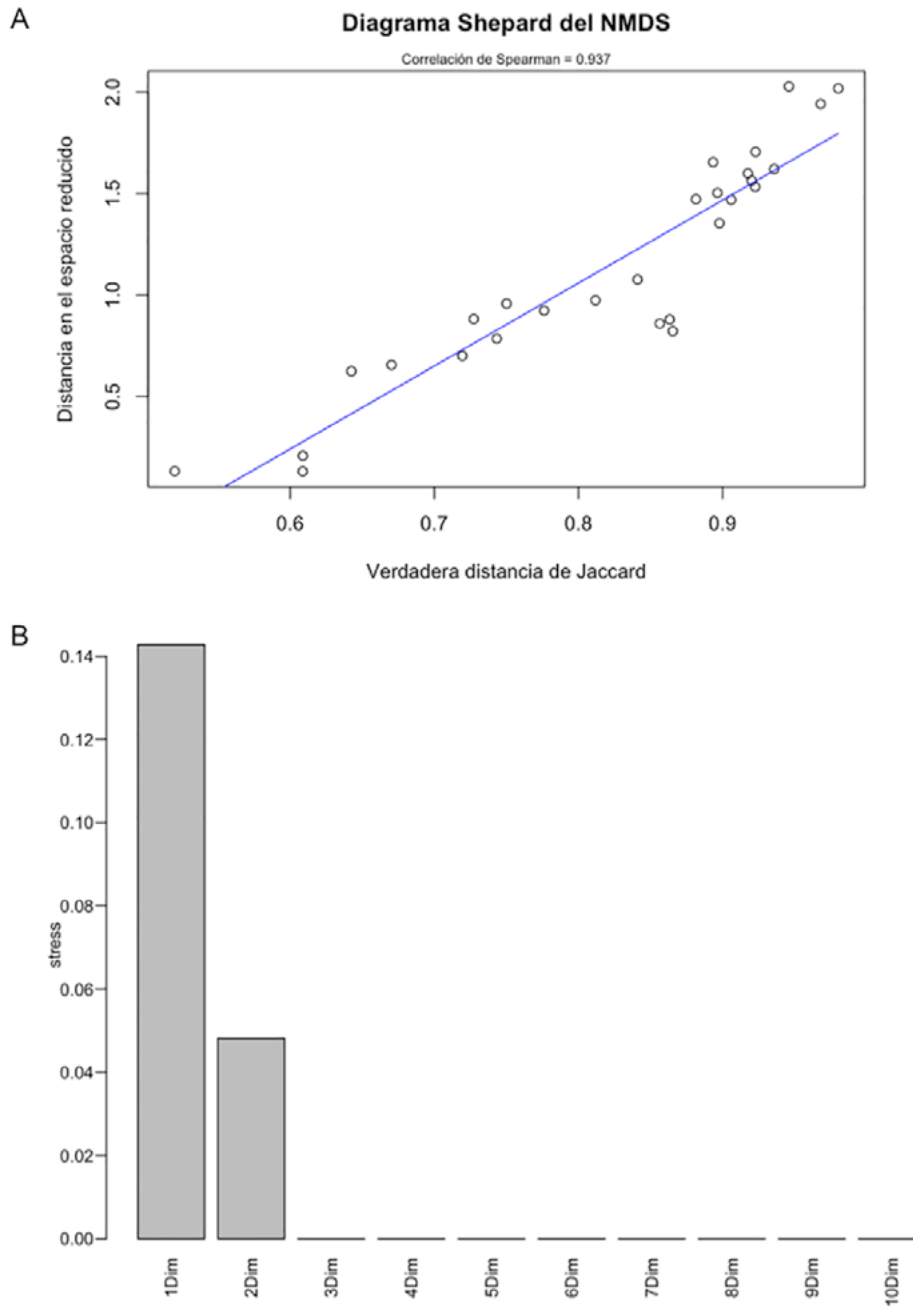


Figura S1. Estudio de paisajes sonoros en el departamento del Meta, Colombia. A, diagrama de Shepard para verificación y visualización de calidad en la representación en dos dimensiones para NMDS; B, gráfico de barras del valor de estrés de la ordenación para diferentes dimensiones (nótese que después de dos dimensiones el estrés declina drásticamente).

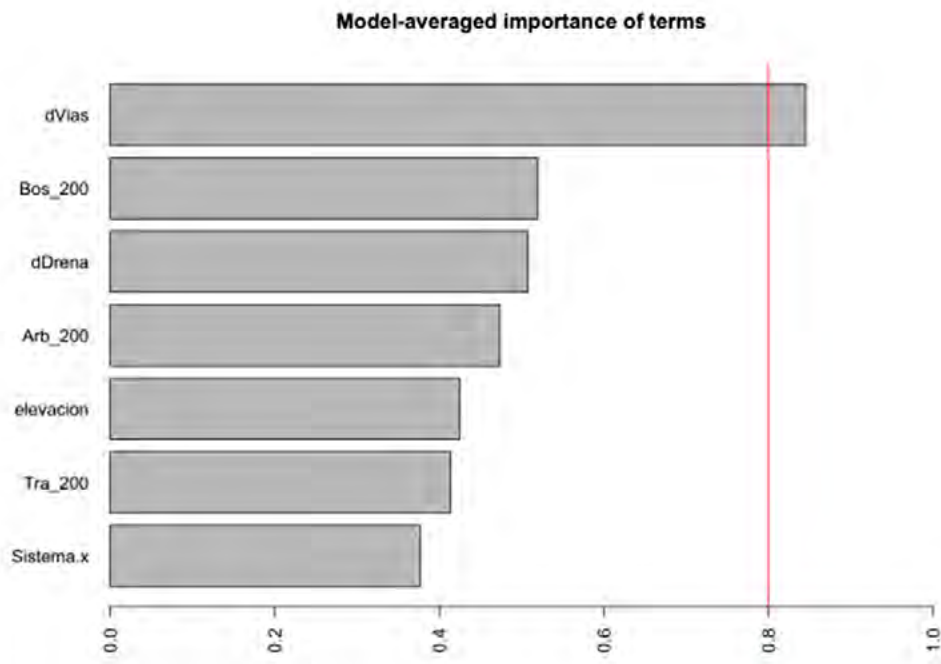


Figura S2. Estudio de paisajes sonoros en el departamento del Meta, Colombia. Importancia de variables en selección de modelos para detecciones de componente de paisaje sonoro.

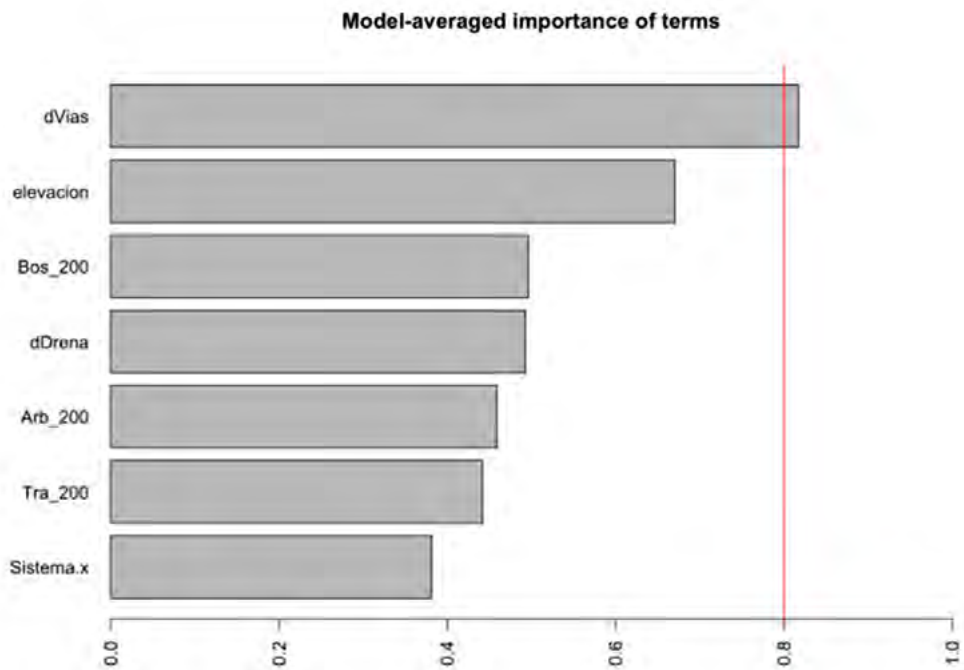


Figura S3. Estudio de paisajes sonoros en el departamento del Meta, Colombia. Importancia de variables en selección de modelos para detecciones de aves y anuros.

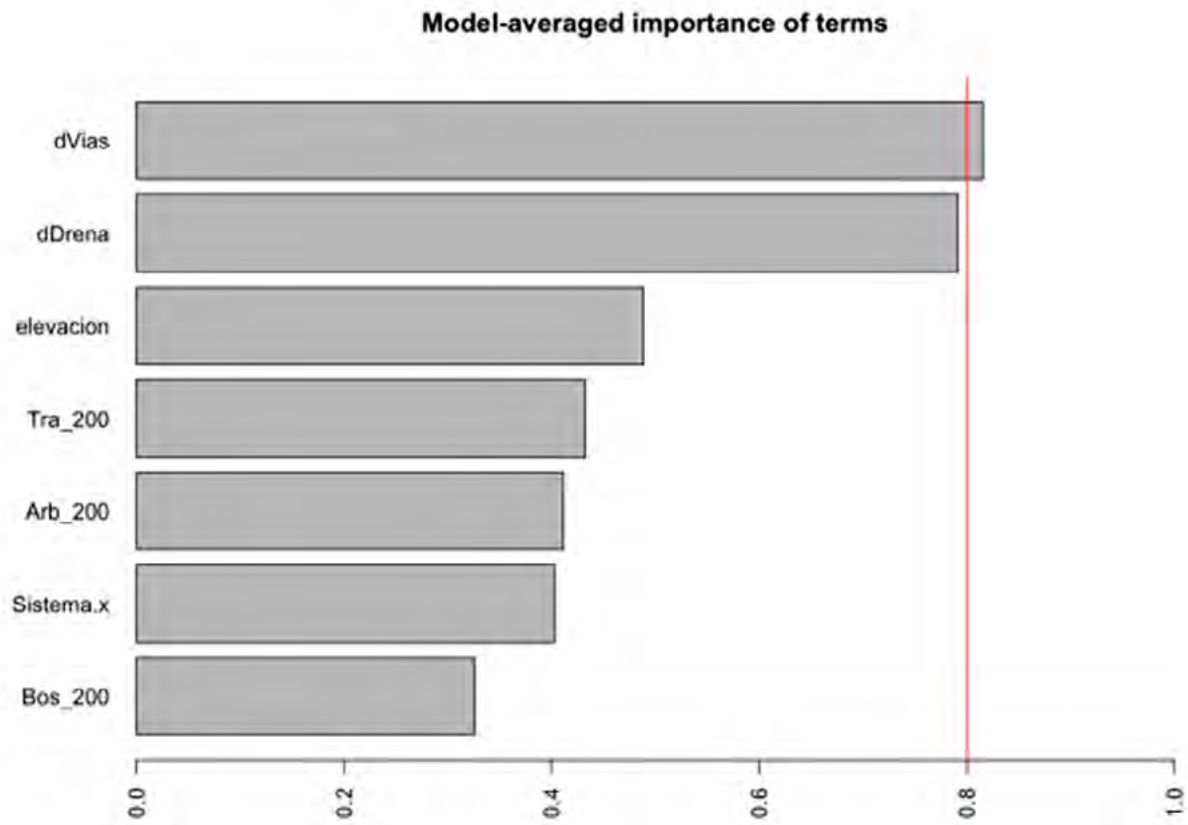


Figura S4. Estudio de paisajes sonoros en el departamento del Meta, Colombia. Importancia de variables en selección de modelos para riqueza de aves y anuros

Tabla S1. Estudio de paisajes sonoros en el departamento del Meta, Colombia. Variables ambientales para los diferentes sitios muestreados.

Sitio	Porcentaje de Espacio Acústico	Elevación (m)	% Bosque en radio 200 m	% Arbolado en radio 200 m	% P. Tradicional en radio 200m	% Bosque en radio 100 m	% P. Arbolado en radio 100 m	% P. Tradicional en radio 100m	% Bosque en radio 50 m	% P. Arbolado en radio 50 m	% P. Tradicional en radio 50m	Distancia a cuenca o microcuena (m)
PT_Porvenir_norm	7.960	424	7.344	17.336	75.321	0.000	7.214	92.786	0.001	0.000	100.000	240
PT_Andorra_norm	28.060	534	5.568	9.997	84.435	0.000	0.000	100.000	0.000	0.000	100.000	485
PT_Pradera_norm	21.520	560	1.053	19.385	79.561	0.000	0.621	99.379	0.000	0.000	100.000	1665
PT_Rosania_norm	0.960	770	4.021	5.288	90.691	0.000	0.526	99.947	0.000	0.000	100.000	1153
PA_Andorra_norm	6.990	520	1.607	81.694	16.700	0.435	98.792	0.773	1.744	96.532	1.724	1389
PA_1Pradera_norm	2.180	525	0.140	91.579	8.281	0.000	99.936	0.064	0.000	100.000	0.000	1723
PA_2Pradera_norm	14.180	525	2.165	76.503	21.332	0.000	99.565	0.435	0.000	100.000	0.000	1550
PA_Rosania_norm	5.830	738	19.409	48.536	32.055	7.796	65.559	26.644	14.175	78.501	7.323	686
												311

Tabla S2. Estudio de paisajes sonoros en el departamento del Meta, Colombia. Modelos mas posibles ($\Delta AICc < 2$) para variables explicativas de tres variables respuesta.

Variable respuesta	Modelo	AICc	Peso
Detecciones Componente	freq ~ 1 + Bos_200 + dVias + dDrena	542.479	0.053
Detecciones Componente	freq ~ 1 + Sistema.x + elevacion + Arb_200 + dVias	542.564	0.051
Detecciones Componente	freq ~ 1 + dVias	543.480	0.032
Detecciones Componente	freq ~ 1 + Sistema.x + Bos_200 + dVias + dDrena	543.592	0.031
Detecciones Componente	freq ~ 1 + Bos_200 + Arb_200 + dVias + dDrena	543.724	0.029
Detecciones Componente	freq ~ 1 + Bos_200 + Tra_200 + dVias + dDrena	543.724	0.029
Detecciones Componente	freq ~ 1 + Bos_200 + Arb_200 + Tra_200 + dVias + dDrena	543.724	0.029
Detecciones Componente	freq ~ 1 + Arb_200 + Tra_200 + dVias + dDrena	543.724	0.029
Detecciones Grupo	freq ~ 1 + elevacion + Bos_200 + dVias	379.849	0.050
Detecciones Grupo	freq ~ 1 + elevacion + Tra_200 + dVias	380.301	0.040
Detecciones Grupo	freq ~ 1 + Sistema.x + elevacion + dVias	380.503	0.036
Detecciones Grupo	freq ~ 1 + Sistema.x + Arb_200 + dVias + dDrena	380.544	0.036
Detecciones Grupo	freq ~ 1 + elevacion + dVias + dDrena	380.789	0.032
Detecciones Grupo	freq ~ 1 + elevacion + Bos_200 + dVias + dDrena	380.810	0.031
Detecciones Grupo	freq ~ 1 + elevacion + Arb_200 + dVias	380.866	0.030
Detecciones Grupo	freq ~ 1 + Sistema.x + Tra_200 + dVias + dDrena	380.915	0.030
Detecciones Grupo	freq ~ 1 + Bos_200 + dVias + dDrena	381.457	0.023
Detecciones Grupo	freq ~ 1 + elevacion + Bos_200 + Arb_200 + dVias	381.581	0.021
Detecciones Grupo	freq ~ 1 + elevacion + Bos_200 + Arb_200 + Tra_200 + dVias	381.581	0.021
Detecciones Grupo	freq ~ 1 + elevacion + Bos_200 + Tra_200 + dVias	381.581	0.021
Detecciones Grupo	freq ~ 1 + elevacion + Arb_200 + Tra_200 + dVias	381.581	0.021
Detecciones Grupo	freq ~ 1 + Bos_200 + dVias	381.627	0.021
Detecciones Grupo	freq ~ 1 + Arb_200 + Tra_200 + dVias + dDrena	381.705	0.020
Detecciones Grupo	freq ~ 1 + Bos_200 + Tra_200 + dVias + dDrena	381.705	0.020
Detecciones Grupo	freq ~ 1 + Bos_200 + Arb_200 + dVias + dDrena	381.705	0.020
Detecciones Grupo	freq ~ 1 + Bos_200 + Arb_200 + Tra_200 + dVias + dDrena	381.705	0.020
Detecciones Grupo	freq ~ 1 + Sistema.x + elevacion + Bos_200 + dVias	381.735	0.020
Detecciones Grupo	freq ~ 1 + Sistema.x + elevacion + dVias + dDrena	381.755	0.019
Riqueza Grupo	freq ~ 1 + Arb_200 + dVias + dDrena	248.937	0.086
Riqueza Grupo	freq ~ 1 + Tra_200 + dVias + dDrena	249.180	0.076
Riqueza Grupo	freq ~ 1 + elevacion + dVias + dDrena	249.389	0.068
Riqueza Grupo	freq ~ 1 + Sistema.x + dVias + dDrena	249.808	0.055
Riqueza Grupo	freq ~ 1 + dVias + dDrena	249.973	0.051
Riqueza Grupo	freq ~ 1 + Sistema.x + elevacion + Tra_200	250.712	0.035

Tabla S3. Estudio de paisajes sonoros en el departamento del Meta, Colombia. Lista de especies de anuros y aves con detecciones para cada especie (número de grabaciones).

Especies	Potrerros Arbolados									Potrerros Tradicionales									Total
	5	6	7	AM Prom	17	18	19	PM Prom	Total	5	6	7	AM Prom	17	18	19	PM Prom	Total	
Anuros				0	0	0	0	2		0	0	0	3				5		
<i>Dendropsophus mathiassoni</i>	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0		3	0	0	1,0	4	32	36	24,0	75	75
<i>Leptodactylus fuscus</i>	0	0	0	0,0	3	1	0	1,3	4	8	0	0	2,7	18	22	15	18,3	63	67
<i>Elachistocleis ovalis</i>	0	0	0	0,0	0	3	3	2,0	6	0	0	0	0,0	8	16	14	12,7	38	44
<i>Leptodactylus colombiensis</i>	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0		14	0	2	5,3	0	1	7	2,7	24	24
<i>Rhinella beebei</i>	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0		0	0	0	0,0	0	1	3	1,3	4	4
Aves				20				10					29				21		
<i>Cyanocorax violaceus</i>	9	26	15	16,7	13	0	0	4,3	63	16	35	21	24,0	30	0	0	10,0	102	165
<i>Sturnella magna</i>	0	2	2	1,3	0	0	0	0,0	4	12	32	13	19,0	5	0	0	1,7	62	66
<i>Mesembrinibis cayennensis</i>	5	5	5	5,0	3	1	0	1,3	19	9	10	11	10,0	9	0	0	3,0	39	58
<i>Vanellus chilensis</i>	5	0	4	3,0	0	1	0	0,3	10	5	9	7	7,0	12	2	0	4,7	35	45
<i>Cercomacroides tyrannina</i>	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0		8	23	7	12,7	4	0	0	1,3	42	42
<i>Milvago chimachima</i>	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0		4	12	1	5,7	7	0	0	2,3	24	24
<i>Tyrannus melancholicus</i>	5	4	3	4,0	4	0	0	1,3	16	2	3	2	2,3	0	0	0	0,0	7	23
<i>Ara severus</i>	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0		5	7	1	4,3	9	0	0	3,0	22	22
<i>Rupornis magnirostris</i>	0	2	3	1,7	0	0	0	0,0	5	0	7	5	4,0	5	0	0	1,7	17	22
<i>Orthopsittaca manilatus</i>	1	0	0	0,3	1	0	0	0,3	3	5	5	1	3,7	7	0	0	2,3	18	21
<i>Ortalis guttata</i>	1	2	3	2,0	0	0	0	0,0	6	3	8	2	4,3	1	0	0	0,3	14	20
<i>Turdus leucomelas</i>	1	0	0	0,3	0	0	0	0,0	1	10	6	1	5,7	2	0	0	0,7	19	20
<i>Amazona ochrocephala</i>	1	1	0	0,7	2	0	0	0,7	4	1	4	2	2,3	8	0	0	2,7	15	19
<i>Syrigma sibilatrix</i>	2	4	2	2,7	1	0	0	0,3	9	3	4	2	3,0	1	0	0	0,3	10	19
<i>Crypturellus cinereus</i>	0	3	4	2,3	3	1	0	1,3	11	2	1	0	1,0	2	0	0	0,7	5	16
<i>Leistes militaris</i>	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0		0	7	6	4,3	2	0	0	0,7	15	15
<i>Myrmophylax atrothorax</i>	0	3	0	1,0	0	0	0	0,0	3	2	3	0	1,7	0	0	0	0,0	5	8
<i>Nyctidromus albicollis</i>	1	0	0	0,3	0	0	0	0,0	1	5	0	0	1,7	0	0	1	0,3	6	7
<i>Eupsittula pertinax</i>	0	0	1	0,3	0	0	0	0,0	1	1	2	0	1,0	2	0	0	0,7	5	6
<i>Ictinia plumbea</i>	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0		1	2	0	1,0	3	0	0	1,0	6	6
<i>Pitangus sulphuratus</i>	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0		0	2	4	2,0	0	0	0	0,0	6	6
<i>Pteroglossus castanotis</i>	1	0	0	0,3	1	0	0	0,3	2	0	1	0	0,3	3	0	0	1,0	4	6
<i>Legatus leucophaeus</i>	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0		0	1	1	0,7	1	1	0	0,7	4	4
<i>Camptostoma obsoletum</i>	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0		0	3	0	1,0	0	0	0	0,0	3	3
<i>Crotophaga ani</i>	0	0	1	0,3	0	0	0	0,0	1	0	2	0	0,7	0	0	0	0,0	2	3
<i>Pachyrhamphus polychopterus</i>	0	2	0	0,7	0	0	0	0,0	2	0	0	1	0,3	0	0	0	0,0	1	3
<i>Cacicus cela</i>	0	0	1	0,3	0	0	0	0,0	1	0	0	1	0,3	0	0	0	0,0	1	2
<i>Megascops choliba</i>	0	0	0	0,0	0	1	0	0,3	1	0	0	0	0,0	0	1	0	0,3	1	2
<i>Gymnomystax mexicanus</i>	0	2	0	0,7	0	0	0	0,0	2	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0		2
<i>Ramphastos vitellinus</i>	0	1	0	0,3	0	0	0	0,0	1	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0		1
<i>Machaeropterus striolatus</i>	0	0	1	0,3	0	0	0	0,0	1	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0		1
<i>Patagioenas cayennensis</i>	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0		0	1	0	0,3	0	0	0	0,0	1	1
<i>Turdus ignobilis</i>	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0		1	0	0	0,3	0	0	0	0,0	1	1
Total	32	55	45		31	8	3		174	120	190	91		143	76	76		696	870

Andrea Morales Rozo

Universidad de Los Llanos

Villavicencio, Colombia

amoralesrozo@unillanos.edu.co

<https://orcid.org/0000-0002-6920-8438>

Diego J. Lizcano

The Nature Conservancy

Bogotá, Colombia

diego.lizcano@tnc.org

<https://orcid.org/0000-0002-9648-0576>

Sergio Montoya Arango

Investigador independiente

sergioama123@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-8734-7514>

Álvaro Velásquez Suarez

Universidad de Los Llanos

Villavicencio, Colombia

alvaro.velasquez@unillanos.edu.co

<https://orcid.org/0000-0002-8126-4758>

Evelyn Álvarez Daza

Universidad de Los Llanos

Villavicencio, Colombia

evelyn.alvarez@unillanos.edu.co

<https://orcid.org/0000-0001-6764-9523>

Orlando Acevedo-Charry

Instituto de Investigación de Recursos Biológicos

Alexander von Humboldt

Villa de Leyva, Colombia

oacevedo@humboldt.org.co

<https://orcid.org/0000-0003-4964-8994>

Heterópteros acuáticos y semiacuáticos asociados al bosque seco del Patía, suroeste de Colombia

Citación del artículo: Morales-Rozo, A., Lizcano, D., Montoya-Arango, S., Velásquez-Suarez, A., Álvarez-Daza, E. & Acevedo-Charry, O. (2021). Diferencias en paisajes sonoros de sistemas silvopastoriles y potreros tradicionales del piedemonte llanero, Meta, Colombia. *Biota Colombiana*, 22(1), 74-95.

<https://doi.org/10.21068/c2021.v22n01a05>

Recibido: 30 de mayo 2020

Aceptado: 9 de noviembre 2020

Biophony in a noisy tropical urban forest fragment

Biofonía en un ruidoso fragmento de bosque urbano tropical

Sara Gonçalves Santos  , Nadia Pieretti  , Robert John Young  , Marina Duarte  

Abstract

Anthropogenic noise, which is part of an urban soundscape, can negatively affect the behaviour of wild animals. Here we investigated how biophony (animal sounds) was affected by noise in an urban Brazilian forest fragment. Our hypothesis was that noise and biophony would differ between the border and the centre of the forest fragment (i.e., lower biophony predicted in noisy areas). Two passive acoustic monitoring devices were used to record soundscapes one week per month, 24 hour per day, from May to July 2012. The Acoustic Complexity Index (ACI) was used to quantify biophony and the Power Spectral Density (PSD) to quantify urban noise. PSD and ACI were higher on the border than in the centre of the fragment. PSD was lower in July, while the ACI did not significantly vary between months. Noise levels were also higher on the border. Conversely, potential species richness was higher in the centre of the forest fragment. Higher biophony at noisy sites can be interpreted as behavioural responses of species for communicating in noisy areas. Alternatively, they could be the result of species segregation by degree of vocal plasticity or due to differences in composition of communities.

Keywords. Animal communication. Ecoacoustics. Noise. Soundscapes. Urban environment.

Resumen

El ruido antropogénico, que forma parte de un paisaje sonoro urbano, puede afectar negativamente el comportamiento de los animales. En este estudio investigamos cómo la biofonía (sonidos de animales) se vio afectada por el ruido antropogénico en un fragmento de bosque urbano brasileño. Nuestra hipótesis es que el ruido y la biofonía difieren entre el borde y el centro del fragmento de bosque (es decir, una menor biofonía en áreas ruidosas). Se usaron dos dispositivos de monitoreo acústico pasivo para grabar paisajes sonoros una semana al mes, 24 horas al día, de mayo a julio de 2012. El índice de complejidad acústica (ACI) se usó para cuantificar la biofonía y la densidad espectral de potencia (PSD) para cuantificar el ruido urbano. Se obtuvieron mayores valores de PSD y ACI en el borde que en el centro del fragmento. La PSD fue menor en julio, mientras que el ACI no varió significativamente entre meses. Los niveles de ruido también fueron más altos en el borde, mientras que la riqueza potencial de especies fue mayor en el centro del fragmento de bosque. Una mayor biofonía en áreas ruidosas puede ser interpretada como el efecto de respuestas conductuales de las especies con el fin de establecer una comunicación efectiva. Alternativamente, podrían ser el resultado de la segregación de especies por grado de plasticidad vocal o debido a diferencias en la composición de las comunidades.

Palabras clave. Ambiente urbano. Comunicación animal. Ecoacústica. Paisajes sonoros. Ruido.

Introduction

Several studies have shown that noise pollution can affect the behaviour, reproduction and survival of wild animals living in cities (Slabbekoorn & Peet, 2003; Warren *et al.*, 2006; Bonier *et al.*, 2007; Duarte *et al.*, 2011; Santos *et al.*, 2017). However, most of these studies are experimental and made under controlled conditions, usually with a single species (Berger-Tal *et al.*, 2019). Few studies have addressed the impact of noise pollution at a broader ecological level, the community, by using an ecoacoustics approach. Ecoacoustics investigates all the sound sources (the soundscape) as a means conveying important information about the ecological status of ecosystems (Sueur & Farina, 2015).

According to Schafer (1977), sounds are ecological properties of landscapes, and soundscapes are the acoustic characteristics of an area that reflect natural and anthropogenic processes. A soundscape is formed by three acoustic components: biophony (biological sounds such as animal vocalizations), geophony (natural non-biological sounds, such as that produced by wind, rain, and thunder) and anthropophony (sounds generated by humans such as traffic noise; Pijanowski *et al.*, 2011). The study of soundscapes can provide valuable information on animal communication dynamics, help the assessment of the environmental status of habitats and their spatiotemporal variations, and investigate the noise effects on different ecosystems (Pieretti *et al.*, 2011).

All habitats have some level of anthropogenic noise, but urban sounds produced by cars, motorcycles, trains, and airplanes, in addition to the sounds produced in buildings and industries, are significantly different from most natural sounds because most of their energy is concentrated in low frequencies (below 2000 Hz) and has longer duration (Warren *et al.*, 2006; Brumm, 2006; Slabbekoorn & Ripmeester, 2008). High noise levels can mask animal acoustic signals, such as sounds from reproductive partners, alarm calls, parental care and territorial defense songs (Brumm *et al.*, 2004; Santos *et al.*, 2017). The masking effect can force species to use compensatory mechanisms to vocally communicate or abandon noisy areas (Nemeth & Brumm, 2009; Santos *et al.*, 2017). A common behavioural adaptation employed to overcome masking consists in increasing the amplitude of calls, a response known as Lombard Effect (Brumm & Zollinger, 2011). Additionally, many species have been found to change the features of the calls, such as frequency, duration, number of notes in noisy places (Warren *et al.*, 2006; Duarte *et al.*, 2017;

Tolentino *et al.*, 2018). Studies on the impact of noise pollution on animals are important because they can drive the elaboration of management strategies and conservation of urban forests, which are wildlife refuges (Barber *et al.*, 2009; Duarte *et al.*, 2011; Teixeira *et al.*, 2015; Santos *et al.*, 2017).

In the present study, we investigated the soundscape comparing biophony and noise levels (i.e., sound pressure levels) between the border and the centre of a tropical urban forest fragment. We also identified and quantified the number of species calling at both sites. Our hypothesis was that noise and biophony levels would differ significantly between the two sites. We predicted higher levels of biophony and potential species richness where noise was lower.

Materials and methods

General considerations on passive acoustic monitoring (PAM).

Passive acoustic monitoring is a method used in the study of soundscape ecology, both in terrestrial and aquatic environments. Acoustic sensors can record sounds for prolonged periods and produce a massive amount of data. Several acoustic indexes have been developed to optimize data analysis and extract relevant ecological information from such recordings. Among them, the acoustic complexity index (ACI) has the purpose of quantifying biophony by processing the intensities of the vocalizations recorded in audio files, even in the presence of continuous anthropogenic noise (Pieretti *et al.*, 2011). By providing an estimate of the amount of biophony in an environment, the ACI has proven to be a useful tool to evaluate behavioural changes and define the composition of an animal community (Pieretti *et al.*, 2011; Farina *et al.*, 2011a).

Study area. This study was conducted in an urban tropical forest fragment located inside the campus of the Pontifical Catholic University (PUC) of Minas Gerais, in the Northwest Zone of Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil (19°55'10 S 43°59'31 W; Figure 1). The elevation of the area ranges from 870 to 930 m above sea level. The PUC forest is a remnant fragment of Atlantic forest of 66 755 m², characterized as a semideciduous seasonal secondary forest with many species of insects, anurans, reptiles, birds (approximately 134 species, see Vasconcelos *et al.*, 2013) and mammals. Currently, this area is surrounded by a densely anthropized

urban matrix, which hampers or prevents the dispersal of many species to other fragments. A museum of Natural Sciences, a sport centre and a small airport (Aeroporto Carlos Prates in activity since 1944) are located in the area surrounding the forest fragment (i.e. within 2 km radius).

Data collection. The data were collected using two passive acoustic monitoring sensors (Song Meter Digital Field Recorder -SM2- Wildlife Acoustics, Inc., USA) installed at 1.5 m height above ground level in the central area (points A and B) and other two on the border of the forest fragment (points C and D; [Figure 1](#)). To prevent overlap of the sound recorded (i.e., to ensure independence of data sources), the distance between each SM2s in the centre and border stations was 80 meters. The distance between the stations (centre and border) was approximately 300 meters. The distances between the SM2s and roads were 30 meters for the border station and 100 meters for the centre station ([Figure 1](#)). Similar distances were tested and published in our previous studies in Atlantic forest areas ([Duarte *et al.*, 2015](#)). SM2 were configured to record 24 hours per day, one week per month, during three consecutive months, from May to July 2012. In May, data were collected between the 24th and 31st, in June from the 21st to the 28th, and in July from the 24th to the 31st. The devices recorded by using a sampling rate of 44.1 kHz, 36 dB microphone gain, wave format files and on stereo channel using two omnidirectional waterproof microphones with a

flat frequency response of 0.020–20 kHz, sensitivity of -36 ± 4 dB and a signal to noise ratio of >62 dB.

We also conducted two 15-minute measurements of the background sound pressure levels once per month at each recording point, using a Z-weighted B&K2270 sound level meter. All the animal sounds close to the microphone were excluded from the recordings using the BZ5503 software (Bruel and Kjaer, Denmark). The equivalent sound levels (L_{eq}), which are the standard for sound-pollution measurements, were then calculated ([Rossing, 2007](#)).

Together with noise, species richness and species abundance could influence acoustic differences between border and centre of the forest fragment. Unfortunately, abundance is difficult to evaluate using PAM ([Duarte *et al.*, 2015](#)). Therefore, potential species richness was calculated for each site using aural identification (i.e., manual) of animal sounds. This analysis was done using spectrograms created in Raven Pro 1.5 software. One day (24 hours) per recording session was randomly selected from each sampling point for species' identification surveys. Sounds emitted by insects, anurans, birds and mammals were identified by taxon group specialists who visually and aurally inspected the first three-minutes of every quarter hour. Where the sounds could not be associated to a particular species, they were classified as sound types in order to determine the potential number of species at each site.



Figure 1. Sampling points for biophony at the Pontifical Catholic University forest fragment, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil. A and B represent the centre, and C and D the forest border .

Data analysis. All files were processed via the ACI (Pieretti *et al.* 2011) to obtain a measure of biophony. Anthropogenic noise was quantified using the power spectral density (PSD). ACI and PSD were extracted using Wavesurfer software (Sjölander & Beskow, 2000).

The ACI metrics, like other indices created to operate in soundscape analysis, are based on the fact that there is a strict and direct relationship between the complexity of animal communities, and the spectral and temporal complexity of a soundscape. In other words, the acoustic information expressed by the ACI is greater in a location where there are more individuals and/or more species. (Farina *et al.*, 2011b). The ACI algorithm has already been successfully applied in terrestrial habitats (Pieretti & Farina, 2013; Bobryk *et al.*, 2015), including forest fragments in neotropics (Pieretti *et al.*, 2015; Duarte *et al.*, 2015).

The power spectral density is a quantitative measure of the acoustic energy of the environmental sounds expressed per unit frequency (Duarte *et al.*, 2015). It is commonly used to obtain the distribution of the power across the frequency domain. At low frequencies, the acoustic energies at our study sites were mainly driven by urban noise pollution. Consequently, the PSD was used as an indicator of anthropogenic noise.

The sampling points were grouped in central area (points A and B) and border area (points C and D). Recordings were subsampled analyzing three minutes of every fifteen minutes, totalizing 403.2 hours. To calculate the ACI, the Fast Fourier Transform-FFT of 512 points was used (frequency bin: 86Hz; temporal step: 0.01s). A one-second grouping value was used, in order to obtain one ACI value at every second for every frequency bin, successively averaged over the length of the recording (three minutes). Sounds concentrated below 1550 Hz were measured by summing PSD values in the relative frequency bins (expressed in $V^2 \text{ Hz}^{-1}$). ACI values (from 1550 to 16 000 Hz) were considered as biophony, emitted by insects, birds and mammals (Figure 2). Temporal distribution of both PSD and ACI were carried out.

The data of ACI and PSD did not present normal distributions. Therefore, a log transformation was performed to remove the effects of magnitude differences between

variables, avoiding negative numbers, normalizing the data and increasing the importance of the smaller values (Manly, 1997). Subsequently, Pearson's correlations and ANOVA tests (Dunn post hoc test) were performed.

Results

The soundscape of the study area was dominated by biophony and anthropogenic noise. Biophony was emitted by 12 potential insect species, 21 of bird taxa, one marmoset species (*Callithrix penicillata*) and three potential species of bats (Tables 1 and 2). The main noise sources affecting the area came from a small airport, vehicular traffic, and from the nearby university (Table 3). Some of the noises identified were: helicopters, airplanes, sirens, horns, motorcycles, sports games, lawnmowers and people's conversations.

Biophony. ACI was significantly higher at the border than at the centre of the forest ($F = 83.6$, $DF = 1$, $MS = 3.86$, $P < 0.01$; Figure 3). No significant difference was found between the months sampled ($F = 1708$, $DF = 2$, $MS = 0.145$, $P = 0.18$).

Biophony vs noise. The border of the forest fragment presented both higher noise values (i.e. PSD) and greater biophony (i.e. ACI) in relation to the centre. The ACI and PSD values presented a medium strength positive correlation, demonstrating that the higher the noise, the greater the biophony ($r = 0.56$; $N = 96$, $P < 0.01$; Figure 5).

Potential species richness. Acoustic diversity of sound types was found to be higher at sampling points in the centre of the forest fragment (Table 2).

Noise - Equivalent levels (Leq). As expected, noise levels were higher on the border (Leq max 70 dB (Z)) than in the central area (Leq max 64.1 dB (Z); Table 3).

Noise - Power Spectral Density (PSD). Accordingly, PSD values at the border were significantly higher than in the centre of the forest fragment ($F = 85.67$, $DF = 1$, $MS = 0.657$, $P < 0.01$; Figure 5). PSD varied between months both in the centre and in the border, being significantly lower in July ($F = 5.94$, $DF = 2$, $MS = 0.07$, $P < 0.05$).

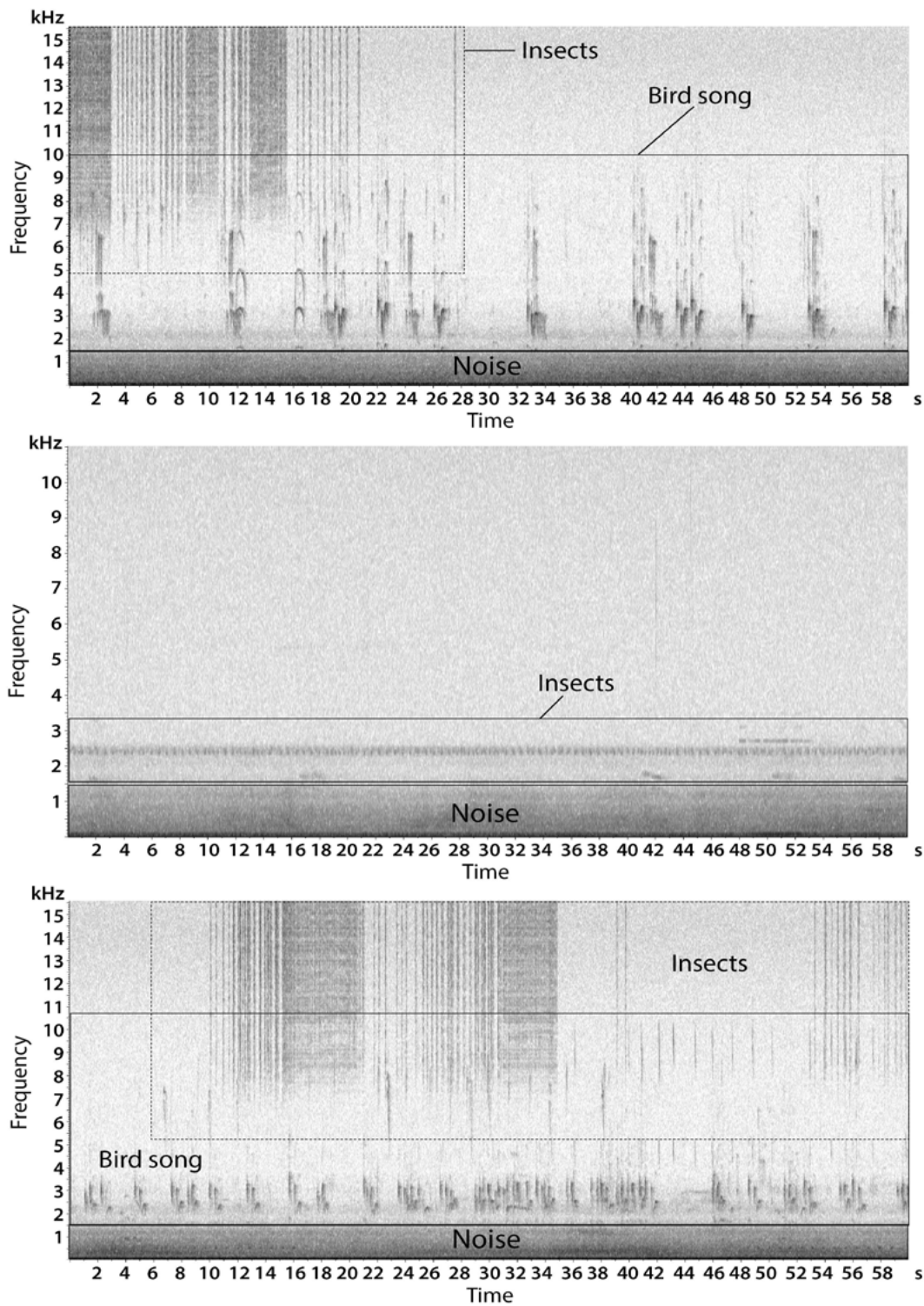


Figure 2. Spectrograms of the soundscape recorded at the border of the Pontifical Catholic University forest fragment, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil.. Frequencies below 1550 Hz are filled by noise and biophony (insects, and bird songs) was concentrated between 1550 to 16000 Hz.

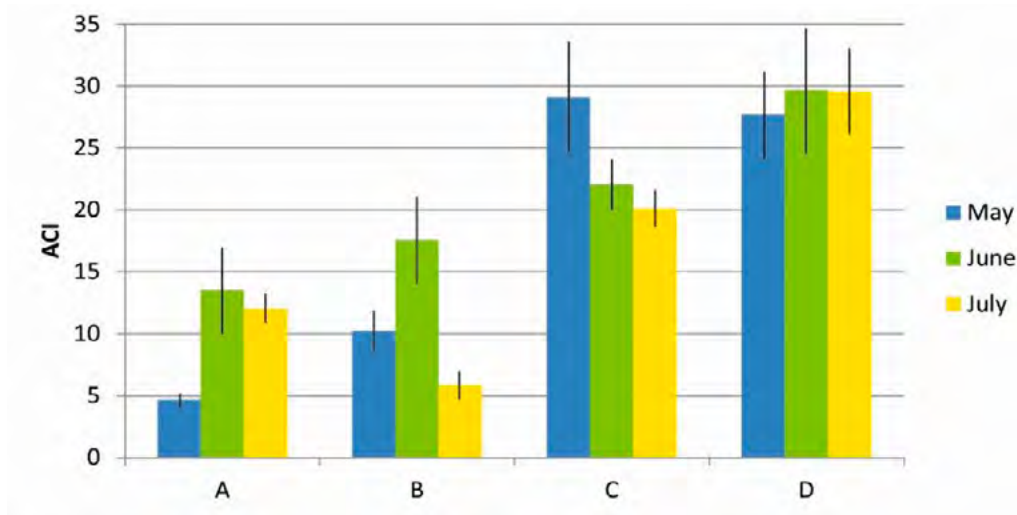


Figure 3. Biophony values (Acoustic Complexity Index-ACI) in the centre (A and B) and in the border (C and D) of the Pontifical Catholic University forest, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil.

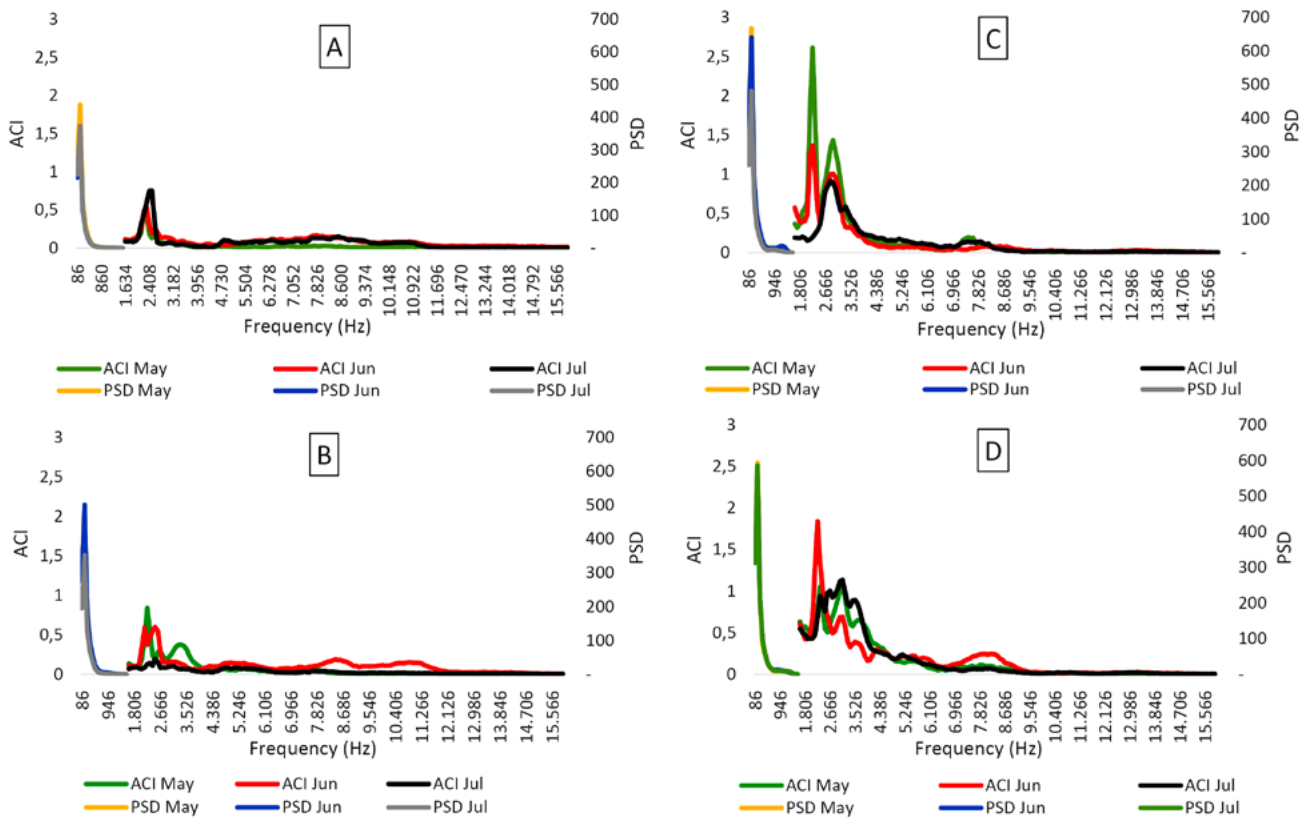


Figure 4. Biophony (ACI) and noise (PSD) values distributed across frequency bands for the sites in the centre (A and B) and border (C and D) of the Pontifical Catholic University forest, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil.

Table 1. Potential number of species at border and centre sites of an urban tropical forest fragment in Belo Horizonte, Minas Gerais, Southeast Brazil.

Taxonomic group	Border	Centre	Species in common	Species detected only at the border	Species detected only in the centre
Insects	8	12	5	3	7
Birds	14	21	10	4	11
Bats	3	3	3	-	-
Primates	1	1	1	-	-

Table 2. Bird species recorded by passive acoustic monitoring at an urban forest fragment in Minas Gerais, Southeast Brazil. NI, unidentified species.

Bird species	Border	Centre
<i>Columba livia</i>	X	X
<i>Elaenia</i> sp.		X
<i>Hemithraupis ruficapilla</i>		X
<i>Herpsilochmus atricapillus</i>		X
<i>Passer domesticus</i>	X	X
<i>Patagioenas picazuro</i>		X
<i>Pitangus sulphuratus</i>	X	X
<i>Saltator similis</i>		X
<i>Sicalis flaveola</i>	X	X
<i>Tangara cayana</i>	X	X
<i>Tolmomyias sulphurescens</i>	X	X
<i>Turdus leucomelas</i>	X	X
<i>Turdus</i> sp.	X	X
Thraupidae 1	X	X
Thraupidae 2	X	X
Thraupidae 3		X
Thraupidae 4	X	X
NI 1	X	X
NI 2	X	X
NI 3		X
NI 4	X	X

Table 3. Mean noise (sound pressure) level at the border and the centre of an urban tropical forest fragment in Belo Horizonte, Minas Gerais, Southeast Brazil.

Site	Leq dB(Z)	Leq max dB(Z)	Leq min dB(Z)
Border	65.4	70.0	54.7
Centre	59.6	64.1	52.7

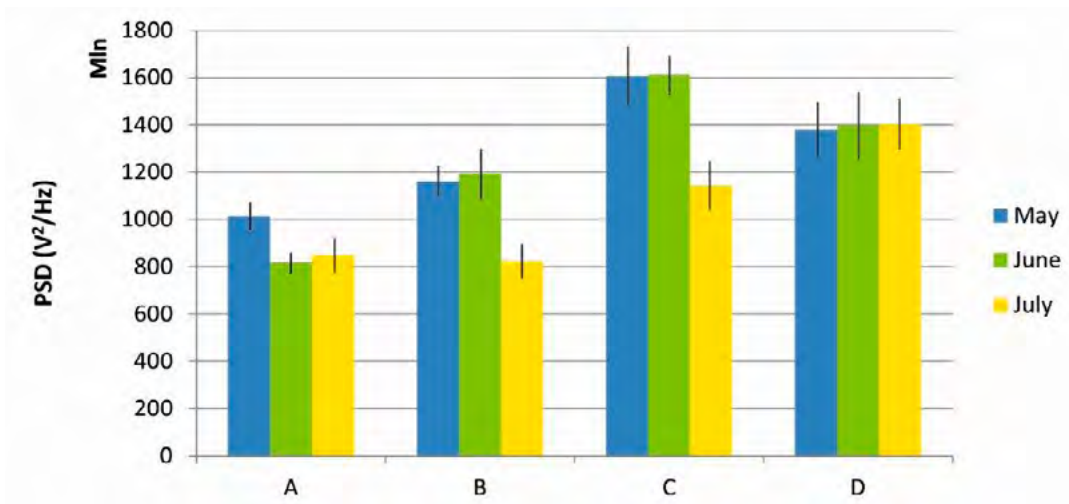


Figure 5. Noise values (Power spectral density-PSD) in the centre (A and B) and in the border (C and D) of the Pontifical Catholic University forest fragment, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil.

Discussion

Our findings can be interpreted as changes in the acoustic behaviour of species due to noise, but they could also be the result of species segregation by degree of vocal plasticity (i.e. ability to adapt) or even of differences in composition of communities. Our results showed that background noise is almost 6 dB (Leq) higher at the border points. In acoustics, an increase of 3 dB doubles the sound intensity (Rossing, 2007). Higher noise levels at the border of the forest were expected due to the vicinity of sound sources, such as streets and buildings. Other studies have obtained similar results in Southeast Brazil, recording higher noise values on the border of an urban park (Duarte *et al.*, 2011) and in an Atlantic forest fragment (Duarte *et al.*, 2015; 2017). This result may be due to many factors, for example, higher abundance of individuals at the border, or an attempt by animals to use compensatory mechanisms to communicate in noisy areas.

Since we found a higher number of sound types in the centre of the forest, which suggests higher species richness, it is likely that the animal community at the border has changed its vocal behaviour by increasing amplitude, and/or the calling rate and duration of their calls as a form of adaptation to compensate for the noise. Studies with birds and mammals have shown that animals are able to increase the amplitude of their vocalizations in noisy areas; this is known as the Lombard Effect (Cynx *et al.*, 1998; Brumm *et al.*, 2004; Brumm & Slater, 2006). Our previous study on the effects of mining truck traffic on cricket calling activity showed that species in noisy sites emit calls with higher average power, an indicator of sound intensity levels (Duarte *et al.*, 2019).

Since the ACI uses the variation of amplitude in each frequency band to calculate biophony, the increase in the amplitude of vocalizations can generate higher values of this index (Zhao *et al.* 2019). Other types of noise compensatory mechanisms such as repetition of

notes, syllables, increased call rate might also influence the values of the ACI (Brumm *et al.*, 2004; Sun & Narins, 2005). Other studies have found animals exhibiting greater acoustic activity in noisier areas. Pieretti & Farina (2013) showed that both ACI values and noise were significantly higher with increasing proximity to a road, suggesting a more active singing/vocalising community in those sites where noise was more intense. Duarte *et al.*, (2015) also found higher ACI values throughout the day in a noisy area, despite having less species compared to a silent area, indicating the possible use of compensatory mechanisms to communicate in presence of noise.

The direct energetic cost of vocal behaviour includes the energy required to produce the sound as well as the energy lost by not feeding during the time spent in vocalizations (Deecke *et al.*, 2005). However, the indirect costs of acoustic communication include the possibility of passing information to unwanted receivers, such as competitors (Hammond & Bailey 2003), predators (Hosken *et al.*, 1994; Mougeot & Bretagnolle, 2000) and parasites (Muller & Robert, 2002). A study found that an urban bird can vocalize up to 70 dB in response to varying noise levels (Díaz *et al.*, 2011). However, vocal activity declined sharply above the threshold of 70 dB, which suggests that this strategy is costly for birds. This study further suggests that bird populations in noisy environments, such as cities, may face a greater challenge for survival compared to those in quiet areas, even for species that can mitigate the interference of urban noise in their acoustic communication (Díaz *et al.*, 2011). Thus, in our study it is possible that animals were spending excessive energy in their communication.

Pieretti & Farina (2013) consider the possibility of birds remaining segregated between noisy and silent areas based on their vocal plasticity and on the ability to increase their song production. Thus, individuals genetically predisposed to produce intense vocalization behaviour can tolerate anthropogenic noise and live in noisy places, while others that are more sensitive to noise prefer to live in quieter areas. It might be possible that the animals that vocalized on the border of our study site were more noise tolerant and thus continued vocalizing, despite high levels of anthropogenic noise. However, it is also possible that the higher biophony at the border was related to a difference in animal community compositions between the border and the centre of the forest. Greater species richness singing at the border would also be responsible for a greater acoustic activity at the border. However, we found higher diversity of

sound types in the centre of the forest, where biophony was lower. Similar results were found close to an open-cast mine in Brazil (Duarte *et al.*, 2015). Studies on the edge effect in a community of birds indicate that there is a tendency for lower species richness and density at the edges of forests (Kroodsma, 1982; Laurance, 2004). Perillo *et al.*, (2017) found lower bird species richness in areas with higher noise levels in urban green areas in Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil. These evidences do not support the hypothesis that higher levels of biophony in our border sites might be linked to higher species richness or abundance.

In our study, we registered lower noise levels in July compared to other months. Indeed, this month corresponds to the university's major vacation period, with less students attending the nearby sport centre and, consequently, less noise produced by cars and buses, whistles, sport noises and people talking. Contrarily, biophony values did not vary over the three months of data collection. Since the data were collected during three months of the same season (dry), we did not expect variation in acoustic activity of the animals during the months studied.

Our findings showed that the impact of noise on the fauna can be acoustically monitored by measuring altered biophonic activity. Our results show how the relation between biophony, soniferous species richness, and anthropogenic noise is complex, mainly at a local scale. We suggest the use of ecoacoustics for future studies since it can be useful for interpreting anthropogenic disturbances and help the development of adequate urban management and conservation strategies.

Acknowledgements

We are grateful to Marina Scarpelli and Miguel Cançado for their help during data acquisition. We thank also the anonymous referees for their comments and suggestions on this manuscript. The authors would like to thank the Brazilian Council for Scientific and Technological Development (CNPq) for their continuing support. RJY was financially supported by CNPq and the Minas Gerais Research Foundation (FAPEMIG-PPM). S.G.S was supported by a FAPEMIG postgraduate scholarship and M.H.L.D was supported by the Brazilian Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel (CAPES-PNPD20131384) during this research. This study was funded competitively by FAPEMIG from a financial donation made by VALE.

References

- Barber, J. R., Crooks, K. R. & Fristrup, K. M. (2009). The costs of chronic noise exposure for terrestrial organisms. *Trends in Ecology and Evolution*, 25, 180-189. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2009.08.002>
- Berger-Tal, O., Wong, B.B.M, Candolin, U. & Barber J. (2019). What evidence exists on the effects of anthropogenic noise on acoustic communication in animals? A systematic map protocol. *Environmental Evidence*, 8, 18-25. <https://doi.org/10.1186/s13750-019-0165-3>
- Bobryk, W.C., Rega, C.C., Bardhan, S., Farina, A., He, H.S. & Jose, S. (2015). Utility of soundscape assessment for understanding conservation benefits of temperate agroforestry systems. *Agroforest Systems*, 6, 997-1008.
- Bonier, F., Martin, P.R. & Sheldon, K.S. (2007). Sex-specific consequences of life in the city. *Behavioral Ecology*, 18, 121-129. <https://doi.org/10.1093/beheco/arl050>
- Brumm, H., Voss, K., Kollmer, I. & Todt, D. (2004). Acoustic communication in noise: regulation of call characteristics in a New World monkey. *Journal of Experimental Biology*, 207, 443-448. <https://doi.org/10.1242/jeb.00768>
- Brumm, H. (2006). Signaling through acoustic windows: nightingales avoid interspecific competition by short-term adjustment of song timing. *Journal of Comparative Physiology*, 12, 1279-1285. <https://doi.org/10.1007/s00359-006-0158-x>
- Brumm, H. & Slater, P.J.B. (2006). Animals can vary signal amplitude with receiver distance: evidence from zebra finch song. *Animal Behaviour*, 71, 699-705. <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2006.01.020>
- Brumm, H. & Zollinger, S., A. (2011). The evolution of the Lombard effect: 100 years of psychoacoustic research. *Behaviour*, 148, 1173-1198. <https://doi.org/10.1163/000579511X605759>
- Cynx, J., Lewis, R., Tavel, B. & Tse, H. (1998). Amplitude regulation of vocalizations in noise by a songbird *Taeniopygia guttata*. *Animal Behaviour*, 56, 107-113. <https://doi.org/10.1006/anbe.1998.0746>
- Deecke, V. B., Ford, J. K. B. & Slater, P. J. B. (2005). The vocal behaviour of mammal-eating killer whales: communicating with costly calls. *Animal Behaviour*, 69, 395-405. <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2004.04.014>
- Díaz, M.; Parra, A. & Gallardo C. (2011). Serins respond to anthropogenic noise by increasing vocal activity. *Behavioral Ecology*, 22, 332-336. <https://doi.org/10.1093/beheco/arq210>
- Duarte, M. H. L., Vecchi, M. A., Hirsch A. & Young R. J. (2011). Noisy human neighbours affect where urban monkeys live. *Biology Letters*, 7, 840-842. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2011.0529>
- Duarte, M.H.L., Kaizer, M.C., Young, R.J., Rodrigues M. & Sousa-Lima, R.S. (2017). Mining noise affects loud call structures and emission patterns of wild black-fronted titi monkeys. *Primates*, 59, 89-97. <https://doi.org/10.1007/s10329-017-0629-4>
- Duarte, M.H.L., Sousa-Lima, R.S, Young, R.J. Farina, A., Vasconcelos, M., Rodrigues, M. & Pieretti, N. (2015). The impact of noise from open-cast mining on Atlantic forest biophony. *Biological Conservation*, 191, 623-631. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2015.08.006>
- Duarte, M.H.L., Caliari, E.P., Scarpelli, M.D., Lobregat, G.O., Young, R.J., & Sousa-Lima, R.S. (2019). Effects of mining truck traffic on cricket calling activity. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 146, 656-664. <https://doi.org/10.1121/1.5119125>
- Farina, A., Pieretti, N. & Piccioli, L. (2011a). The soundscape methodology for long-term bird monitoring: A Mediterranean Europe case-study. *Ecological Informatics*, 6, 354-363. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2011.07.004>
- Farina, A., Lattanzi, E., Malavasi, R., Pieretti, N. & Piccioli, L. (2011b). Avian soundscapes and cognitive landscapes: theory, application and ecological perspectives. *Landscape Ecology*, 26, 1257-1267. <https://doi.org/10.1007/s10980-011-9617-z>
- Hammond, T. J. & Bailey, W. J. (2003). Eavesdropping and defensive auditory masking in an Australian bushcricket, *Caecidia* (Phaneropterinae: Tettigoniidae: Orthoptera). *Animal Behaviour*, 140, 79-95. <https://doi.org/10.1163/156853903763999917>
- Hosken, D. J., Bailey, W. J., Oshea, J. E. & Roberts, J. D. (1994). Localization of insect calls by the bat *Nyctophilus geoffroyi* (Chiroptera, Vespertilionidae): a laboratory study. *Australian Journal of Zoology*, 42, 177-184.
- Kroodsma, R.L. (1982). Edge effect on breeding forest birds along a power-line corridor. *Journal of Applied Ecology*, 19, 361-370.
- Laurance, S.G., Stouffer, P.C. & Laurance, W.F. (2004). Effects of road clearings on movement patterns of understory rainforest birds in central Amazonia. *Conservation Biology*, 18, 1099-1109.
- Manly, B. F. (1997). *Randomization, Bootstrap, and Monte Carlo Methods in Biology*. London, UK: Chapman and Hall. 480pp.

- Mougeot, F. & Bretagnolle, V. (2000). Predation as a cost of sexual communication in nocturnal seabirds: an experimental approach using acoustic signals. *Animal Behaviour*, 60, 647-656.
<https://doi.org/10.1006/anbe.2000.1491>
- Muller, P., & Robert, D. (2002). Death comes suddenly to the unprepared: singing crickets, call fragmentation, and parasitoid flies. *Behavioral Ecology*, 13, 598-606.
<https://doi.org/10.1093/beheco/13.5.598>
- Nemeth, E., and Brumm, H. (2009). Blackbirds sing higher-pitched songs in cities: adaptation to habitat acoustics or side-effect of urbanization? *Animal Behaviour*, 78, 637-641.
<https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2009.06.016>
- Perillo, A., Mazzoni, L.G., Passos, L.F., Goulart, V. D. L. R., Duca, C. & Young, R.J. (2017). Anthropogenic noise reduces bird species richness and diversity in urban parks, *Ibis*, 159, 638-646.
<https://doi.org/10.1111/ibi.12481>
- Pieretti, N., Farina, A. & Morri, D. (2011). A new methodology to infer the singing activity of an avian community: The Acoustic Complexity Index (ACI). *Ecological Indicators*, 11, 868-873.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2010.11.005>
- Pieretti, N. & Farina, A. (2013). Application of a recently introduced index for acoustic complexity to an avian soundscape with traffic noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 134, 891.
<https://doi.org/10.1121/1.4807812>
- Pieretti, N., Duarte, M.H.L., Sousa-Lima, R.S., Rodrigues, M., Young, R.J. & Farina, A. (2015). Determining temporal sampling schemes for passive acoustic studies in different tropical ecosystems. *Tropical Conservation Science*, 8, 215-234.
<https://doi.org/10.1177/194008291500800117>
- Pijanowski, B. C., Villanueva-Rivera, L. J., Dumyahn, S. L., Farina, A., Krause, B. L., Napoletano, B. M., Gage, S. H. & Pieretti, N. (2011). Soundscape Ecology: The science of sound in the landscape. *Bioscience*, 61, 203-216.
<https://doi.org/10.1525/bio.2011.61.3.6>
- Rossing, T.D. (2007). *Springer Handbook of Acoustics*. New York: Springer-Verlag New York Inc. 1182 pp.
<https://doi.org/10.1007/978-0-387-30425-0>
- Santos, S.G., Duarte, M.H.L., Sousa-Lima, R.S. & Young, R.J. (2017). Comparing contact calling between black tufted-ear marmosets (*Callithrix penicillata*) in a noisy urban environment and in a quiet forest. *International Journal of Primatology*, 38, 1130-1137.
<https://doi.org/10.1007/s10764-017-0002-x>
- Schafer, R. M. (1977). *The Tuning of the World*. Knopf. Michigan University.
- Sjölander, K. & Beskow, J. (2000). Wavesurfer: an open source speech tool. *Interspeech*, 464-467.
- Slabbekoorn, H. & Peet, M. (2003). Birds sing at a higher pitch in urban noise. *Nature*, 424, 267.
<https://doi.org/10.1038/424267a>
- Slabbekoorn, H. & Ripmeester, E. A. (2008). Birdsong and anthropogenic noise: implications and applications for conservation. *Molecular Ecology*, 17, 72-83.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2007.03487.x>
- Sueur, J. & Farina, A. (2015). Ecoacoustics: the ecological investigation and interpretation of environmental sound. *Biosemiotics*, 8, 493-502.
<https://doi.org/10.1007/s12304-015-9248-x>
- Sun, J. W. C. & Narins, P. M. (2005). Anthropogenic sounds differentially affect amphibian call rate. *Biological Conservation*, 121, 419-427.
<https://doi.org/10.1016/j.biocon.2004.05.017>
- Teixeira, B., Hirsch, A. Goulart, V. D. L. R., Passos, L., Teixeira, C.P. James, P. & Young, R.J. (2015). Good neighbours: distribution of black-tufted marmoset (*Callithrix penicillata*) in an urban environment. *Wildlife Research*, 42, 579-589.
<https://doi.org/10.1071/WR14148>
- Tolentino, V. C. D. M, Baesse, C. Q. & Melo, C. D. (2018). Dominant frequency of songs in tropical bird species is higher in sites with high noise pollution. *Environmental Pollution*, 235, 983-992.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.01.045>
- Vasconcelos, M. F., Mazzoni, L. G., Perillo, A.; Guerra, T., Morais, R., Garzon, B., Santos, J. E., Guimarães, L. S. L., Oliveira, Almeida, T., Peixoto, H. J. C., Dutra, E. C., Pedroso, L. F., Valério, F. A., Petrocchi, D., Santos, L. P. S. Dias, J. E. M., Morais, S. A., Garcia, F. I. A., Benfica, C. E. R. T. & Ribeiro, B. P. (2013). Long-term avifaunal survey in an urban ecosystem from southeastern Brazil, with comments on range extensions, new and disappearing species. *Papéis Avulsos de Zoologia da Universidade de São Paulo*, 53, 327-344.
<https://doi.org/10.1590/S0031-10492013002500001>
- Warren, P. S., Katti, M., Ermann, M. & Brazel, A. J. (2006). Urban bioacoustics: it's not just noise. *Animal Behaviour*, 71, 491-502.
<https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2005.07.014>
- Zhao, Z., Xu, Z. Yong, Bellisario, K., Zeng, R. Wen, Li, N., Zhou, W. Yang, & Pijanowski, B. C. (2019). How well do acoustic indices measure biodiversity? Computational experiments to determine effect of sound unit shape, vocalization intensity, and frequency of vocalization occurrence on performance of acoustic indices. *Ecological Indicators*, 107.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105588>

Sara Gonçalves Santos

Pontifical Catholic University of Minas Gerais

Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil

sharada_bh@hotmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-9916-9938>

Nadia Pieretti

Polytechnic University of Marche

Ancona, Italy

nadia.pieretti@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-1701-9368>

Robert John Young

University of Salford, Manchester

United Kingdom

r.j.young@salford.ac.uk

<https://orcid.org/0000-0002-8407-2348>

Marina Duarte

Pontifical Catholic University of Minas Gerais,

Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil

r.j.young@salford.ac.uk

<https://orcid.org/0000-0002-7799-8791>

Biophony in a noisy tropical urban forest fragment

Citación del artículo: Gonçalves-Santos, S. Pieretti, N., Young, R.J. & Duarte, M. (2021). Biophony in a noisy tropical urban forest fragment. *Biota Colombiana*, 22(1), 96-107.









<https://doi.org/10.21068/c2021.v22n01a06>

Received: April 4, 2020

Accepted: November 9, 2020

Bioacoustic characterization of mating calls of a freshwater fish (*Prochilodus magdalenae*) for passive acoustic monitoring

Caracterización bioacústica de las llamadas de apareamiento de un pez de agua dulce (*Prochilodus magdalenae*) para monitoreo acústico pasivo

Sebastián Muñoz-Duque  , Silvia López -Casas  , Héctor Rivera -Gutiérrez  , Luz Jiménez-Segura  

Abstract

Fish produce sounds that are usually species-specific and associated with particular behaviors and contexts. Acoustic characterization enables the use of sounds as natural acoustic labels for species identification. Males of *Prochilodus magdalenae* produce mating sounds. We characterized these sounds and tested their use in natural habitats, to use passive acoustic monitoring for spawning ground identification. We identified two types of acoustic signals: simple pulses and pulse trains. Simple pulses were 13.7 ms long, with peak frequency of 365 Hz, whereas pulse train were 2.3 s long, had peak frequency of 399 Hz, 48.6 pulses and its pulses lasted 12.2 ms, with interpulse interval of 49.0 ms long and 22.3 Hz pulse rate. We did not detect spawning in absence of male calls nor differences in male sounds at different female densities. We found differences in train duration, pulse rate, and pulse duration in trains, according to the fish's source sites, but these sites were not well discriminated based on bioacoustical variables. In rivers, we located two *P. magdalenae* spawning grounds and recognized calls from another fish species (*Megaleporinus muyscorum*). We did not find a significant relationship between fish size and call peak frequency for *P. magdalenae*.

Keywords. Bocachico. Potamodromous fish. Soniferous fish. Spawning grounds.

Resumen

Los peces producen sonidos que generalmente están asociados con comportamientos y contextos particulares y son especie-específicos. Su caracterización permite usarlos como etiquetas acústicas naturales para identificar especies. Los machos de *Prochilodus magdalenae* emiten sonidos de apareamiento. Caracterizamos estas señales acústicas y probamos su uso en hábitats naturales, para utilizar el monitoreo acústico pasivo para la identificación de zonas de desove. Identificamos dos tipos de señales acústicas: pulsos simples y trenes de pulsos. Los pulsos simples tuvieron una duración de 13.7 ms y frecuencia pico de 365 Hz, mientras que los trenes de pulsos duraron 2.3 s, frecuencia pico de 399 Hz, 48.6 pulsos por tren, pulsos de 12.2 ms, intervalo interpulso de 49.0 ms y tasa de pulsos de 22.3 Hz. No detectamos desove en ausencia de sonidos de machos ni diferencias acústicas entre machos en parejas o en grupos de hembras. Dependiendo del origen de los machos, la duración del tren, frecuencia del pulso y duración del pulso en los trenes difirieron, pero los sitios no fueron bien discriminados basados en las variables bioacústicas. En ríos localizamos dos zonas de desove de *P. magdalenae* y pudimos distinguir sus sonidos respecto a los del pez *Megaleporinus muyscorum*. No encontramos una relación significativa entre el tamaño y la frecuencia pico para *P. magdalenae*.

Palabras clave. Bocachico. Peces potamódromos. Peces que producen sonidos. Zonas de desove.

Introduction

More than 700 species of fish around the world are known to produce sounds (Kaatz, 2002), of which at least 80 are freshwater fishes (Greenhalgh *et al.*, 2020). However, this number is probably higher and it is estimated that a third of the total living fish species have the ability to emit this type of signal (Ladich & Bass, 2011). The sounds produced are generally species-specific and are associated with particular behaviors and contexts, including those related to reproductive displays (Amorim *et al.*, 2015). Fish are the vertebrates that have evolved the largest diversity of sound-producing mechanisms, and these mechanisms are generally classified into two large groups: those based on rubbing of bony structures against each other and those based on the vibration of the swim bladder through specialized muscles (Ladich & Fine, 2006).

The characterization of acoustic signals has been carried out mainly for marine fish, but it has also been used for freshwater fish (Borie *et al.*, 2014; Godinho *et al.*, 2017; Greenhalgh *et al.*, 2020). This characterization allows the use of sounds as natural acoustic labels for species identification, and can be made *ex situ*, or *in situ*. The *ex situ* approach has been widely used and validated (Rountree *et al.*, 2006), as confined conditions allow better noise control, individual isolation of fish and more specificity in sound analysis.

A possible application of sound characterization in fish is location of natural spawning grounds through identification of acoustic signals associated with mating in natural conditions, by applying passive acoustic monitoring (PAM). Loss of these spawning grounds could lead to a lack of recruitment of new individuals in populations, so location of the areas used for spawning is important information for conservation and management of any migratory fish that spawns in rivers. (Godinho *et al.*, 2017). . Hydropower development can lead to the loss of spawning grounds of migratory fish (Filho & Schulz, 2004), and in the case of Colombia, this development has been focused in Andean rivers, particularly in the Magdalena basin (Operman *et al.*, 2015).

One species that is known to produce sounds associated with mating is the *bocachico*, *Prochilodus magdalenae*, a potamodromous freshwater migratory fish endemic to Colombia, distributed in all the lower areas of the Magdalena, Sinú and Atrato River basins, but reaching up to 1500 m. a.s.l. during its potamodromous upstream migrations in the Cauca River basin (Mojica *et al.*, 2012).

P. magdalenae is the main species of Colombia's inland fisheries (Barreto & Mosquera, 2001), but currently it faces various anthropogenic threats jeopardizing its persistence in natural environments (Mojica *et al.*, 2012).

Species of *Prochilodus* have been documented to produce sounds in the reproductive season, by the contraction of the first three or four intercostal muscles around the swim bladder, characterized by being hypertrophied and presenting an intensive red color (Harder, 1975; Godinho *et al.*, 2017). Although mating calls by *Prochilodus magdalenae* males have been noted for many decades, their calling has not been characterized. To determine if PAM could be used as a method to locate spawning grounds over a long river reach for this species, we recorded and acoustically characterized male calls at fish hatchery stations located in three river systems; determined the importance of calls for spawning; tested if males call differentially if they were in groups, or just with a female; tested if males from different origins call distinctively; sampled for spawning calls of *P. magdalenae* at three river systems, and determined if it was possible to distinguish their calls from other sounds or fish calls recorded simultaneously in rivers.

Materials and methods

Bioacoustic characterization of fish calls in captivity.

To record the calls, in June, August, and October 2018 we visited three fish stocking hatcheries in the Cauca, Sinú, and Magdalena Rivers, in Colombia. We recorded 47 sexually mature male and 75 female individuals of *P. magdalenae* from natural populations (born in rivers and kept in the fish stations), in two categories: couples (one male with one female in one pond at a time) and group sets (one male with two or three females in one pond at a time). We recorded 16 couples from the Cauca River at the Centro Acuicola Piscícola Santa Cruz S.A.S, department of Antioquia; 19 males with 47 females (3 couples and 16 group sets) from the Sinú River, at the Centro de Investigaciones Piscícolas de la Universidad de Córdoba, department of Córdoba; and 12 couples from the Magdalena River at the Centro Piscícola San Silvestre S.A., department of Santander.

Each audio recording set consisted of a Song Meter SM4 bioacoustic recorder (Wildlife Acoustics), a HTI-96-Min Exportable hydrophone (High Tech Inc.) and a SM3 / SM4 H-1 inlet adapter ref 1094101 (Wildlife Acoustics). For each recording, we located a hydrophone at the middle of the pond, approximately 20 cm below water

surface, and for every couple or group of *P. magdalenae* individuals. Recording was of 1 hour long, corresponding to half an hour before and half an hour after the fish estimated spawning time, according to the endocrine manipulation protocol used at each fish farm to induce fish spawning, because gravid females of *Prochilodus magdalenae* do not spontaneously spawn in captivity (Atencio, 2001). For each male individual we registered date and place of the recording, standard fish length (cm) for males, and water temperature (°C), measured with a YSI 550A equipment (YSI Inc.). After each recording, we checked for the presence of eggs with hand sieves to determine whether females spawned or not.

Prochilontids are known to emit low-frequency sounds; however, since we had no specific reference for *Prochilodus magdalenae* sound frequency, the sounds were digitized at a sampling rate of 12 000 Hz, to avoid possible information loss. All sound files were visualized and analyzed using oscillograms, spectrograms, and the pulse analysis tools of Avisoft SASLab Pro version software (v.5.2.07). We used a bandwidth of 235 Hz and a fast Fourier transformation (FFT) of 256 samples, frequency resolution of 47 Hz and a time overlap of 50 %. The sounds produced by *Prochilodus* were categorized into two types, using the definitions of Smith *et al.*, (2018): simple pulses (or also called “isolated pulses”) and pulse trains (a series of at least two repetitive and stereotyped simple pulses), easily recognizable, considering the structuring of these sounds in other species of the genus. The simple pulses were recognized by their waveform in the oscillograms, also visible in pulses that were part of trains (Figure 1). Pulses were defined as those that had duration of less than 25 ms and were detected using the peak search with hysteresis method, that is based on a relative peak detection algorithm that identifies local peaks in the envelope signal. A peak is recognized when its peak amplitude exceeds the minimum amplitude that precedes this peak by a predefined factor, and is certainly useful for analyzing signals that could be influenced by reverberation (<http://www.avisoft.com/SASLabPro.pdf>). We analyzed the total length of all recordings.

The bioacoustic variables we measured for simple pulses were: i) total number of simple pulses (count); ii) simple pulse duration (ms), as the time from the first upward to the last downward deflection of the pulse); iii) simple pulse peak frequency (Hz), as the frequency with the highest amplitude, also called dominant frequency. For pulse trains, the variables measured were: i) total number of trains (count); ii) total number of pulses

in a train (count); iii) train duration (s) as the time between the start of the first pulse and the end of the last pulse in a train; iv) duration of pulses in train (ms), having the same definition as simple pulse duration; v) interpulse interval (the time from the end of one pulse to the beginning of the subsequent); vi) pulse rate (Hz) as the number of pulses occurring in a train of pulses, divided by the duration of that train (s) (Luczkovich *et al.*, 2008); and vii) train peak frequency (Hz) as the mean peak frequency of all pulses within a train, according to literature (Colleye & Parmentier, 2012; Schärer *et al.*, 2014; Smith *et al.*, 2018). All these variables were measured for each individual male fish. We also included a power spectrum for a pulse train referenced to the root mean square (RMS) amplitude (3 dB below the peak amplitude) and also compared our results to those published for other species of *Prochilodus*.

The number of pulses and trains per individual were used for statistical analyses, following Smith *et al.* (2018) and Fine & Parmentier (2015), while for the remaining bioacoustic variables we estimated the mean values per individual, and with this data we elaborated a general reference table of bioacoustic characteristics of *P. magdalenae* calls, presenting mean or median values of the bioacoustical variables. Descriptive statistics was applied to all the data corresponding to each variable, as well as for checking the normality of all data and evaluating whether they met the variance homogeneity criterion, thus deciding whether to use parametric or non-parametric tests. The Shapiro-Wilk test ($p < 0.05$) was used to inspect normality and the Levene test ($p < 0.05$) was used for homogeneity of variance.

The importance of calls for spawning was determined by comparing the percentage of spawning occurrences in presence or absence of male calls. Statistical analyses were performed to test significant differences ($p < 0.05$) in the bioacoustic variables between i) the individuals arrays, if the sound record corresponded to a couple (male accompanied by a single female) or to a “group” (if a male was recorded accompanied by more than one female); to test these differences we used Mann-Whitney U test or the T-Student’s test, depending to normality and homogeneity of variance; ii) the place of origin of the individuals (if their origin was the Cauca, Sinú or Magdalena River): to test these differences we used Kruskal-Wallis test, ANOVA or Welch test depending on the case, and in case of significant differences ($p < 0.05$), we applied a *post-hoc* test (Dunn’s or Tukey’s tests) to identify such differences. A linear discriminant analysis for *P. magdalenae* males and their bioacoustical

variables was applied to evaluate differences between river basins; for this analysis, we used the Paleontological Statistical Software PAST (v 4.03). We carried out Pearson's correlation analyses to evaluate the strength of relationship between fish size (as standard length) and dominant frequency for simple pulses and pulse trains, and to evaluate temperature values in respect to each of the bioacoustical variables.

River Sampling. In April 2019, during the first fish spawning season of the year, we made 7 hours of audio recordings at 13 places recognized by artisanal fishers as historical sites for reproduction of *P. magdalenae* and other soniferous native fish species: eight sites in the Magdalena River, four sites in the Nechí River and one site in the Cauca River (Figure 2). We reached sampling sites by boat and geo-referenced them with a Garmin eTrex 20x GPS; the obtained coordinates were imported into ArcMap 10.2.2 to construct the location map of the sites where recordings were performed.

While making our recordings, the boat was moored and its motor was turned off. Recording length at each site was variable, depending on the distance. Due to security issues, all recordings were performed during daytime. We used the same methods of sound analysis as described for audio recordings of fish in captivity; however, since *Prochilodus magdalenae* makes "choruses" calls in nature, the analyses were focused on the sounds of interest

detected at each sampling site, and not by individual fish. We applied, when possible, descriptive statistics (counts, central tendency and variability measurements) to the same bioacoustical variables as described for fish in captivity, and the results were compared to the general reference table elaborated with the bioacoustical data of captive fish. We also used the *P. magdalenae* bioacoustics reference table obtained with captive fish to help distinguish *P. magdalenae* calls from other fish acoustic signals recorded in the rivers at same time.

Animal welfare. The use and handling of specimens in this study followed the guidelines for institutional and national animal welfare and management; the survival of the specimens was not compromised, nor was any individual slaughtered.

Results

Bioacoustic characterization of calls of fish in captivity. We identified 1523 acoustic signals produced by 27 *P. magdalenae* males in 47 hours of recording in the three fish hatcheries: 1312 signals were isolated pulses and 211 were pulse trains. The mean standard length for specimens was 24.1 ± 4.3 cm. We could hear calls several meters away from the fishpond, showing that this species can make strong acoustic signals. Samples of these sounds are available in scientific archive collections (see supplementary material for details).

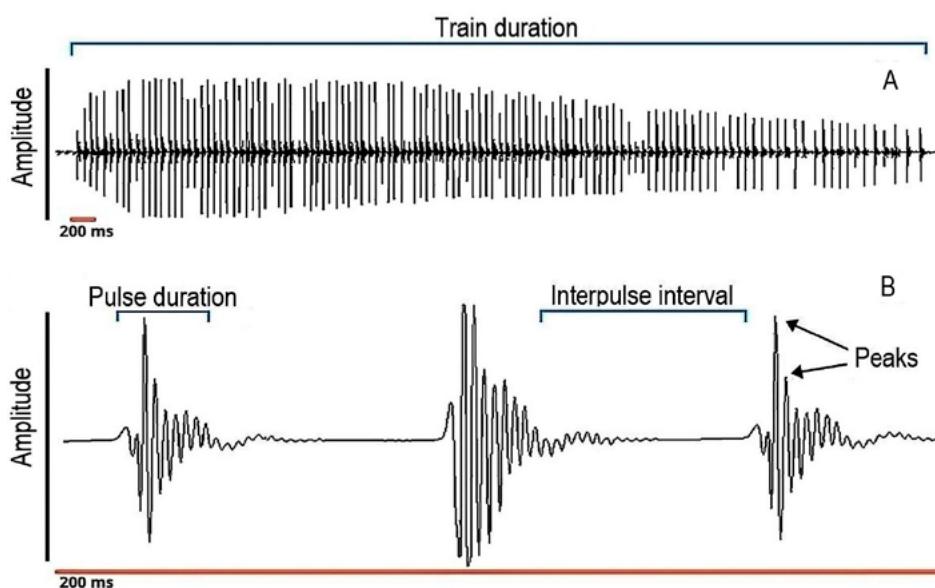


Figure 1. Oscillogram of a pulse train, showing how train duration, pulse duration and interpulse interval were measured, and how peaks per pulse were counted. A, a complete train of pulses; B, magnification of the train representing 200 ms.

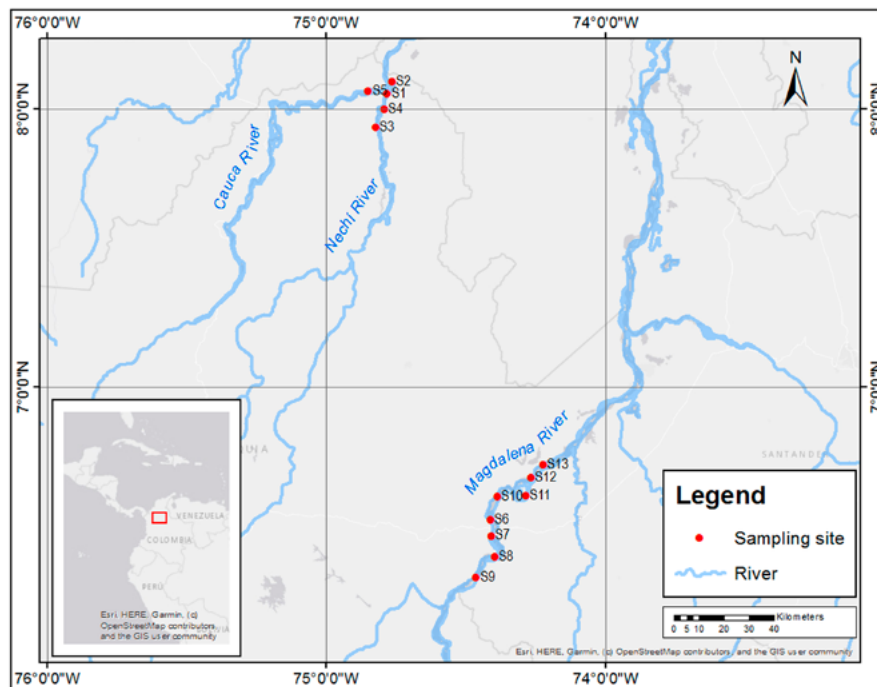


Figure 2. Sampling sites for audio recordings of *Prochilodus magdalena* in the Nechí (S1-S4), Cauca (S5) and Magdalena (S6-S13) Rivers, in northern Colombia.

Considering all the individuals that made sounds, we found that simple pulse (Shapiro-Wilk, $p < 0.01$, $W = 0.52$) and train counts (Shapiro-Wilk test, $p = 0.04$, $W = 0.90$) were highly variable and did not follow a normal distribution, whereas for all other variables normality was met (Shapiro-Wilk test, $p > 0.05$) (Table 1). *P. magdalena* calls presented short pulse duration and low peak frequency for both simple pulses and pulse trains. Another characteristic of trains is that the interpulse interval duration is almost four times longer than duration of those simple pulses that constitutes trains with relative low variation, as well as low variation in the pulse rate of trains; on the other hand, pulse duration in trains is more variable. Train duration mean value was 2.3 s and the longest individual train signal we registered was 7.3 s in duration.

The waveforms of pulses were characterized by having two dominant peaks followed by several peaks whose amplitude gradually decreases in a damped oscillation pattern as shown in Figure 3-A. We found that trains were simple, characterized by a sequence of many similar pulses (Figure 3-A, B). In power spectrum the highest peak was at around 400 Hz and there was a second wider peak at around 2 to 3 kHz; then power dropped, presenting a gradual decrease as frequency values increased (Figure 3-C).

Table 1. Reference values for the bioacoustic variables in simple pulses ($n = 27$) and pulse trains ($n = 20$) of *Prochilodus magdalena* kept in captivity in Colombia. Values correspond to the mean and the standard deviation ($\bar{x} \pm sd$), except for simple pulse and train counts, for which the median is presented followed by quartiles one and three: Me (Q1; Q3).

Variable	Value
Simple pulse count (n)	7.0 (2; 45)
Simple pulse duration (ms)	13.7 ± 4.0
Simple pulse peak frequency (Hz)	365 ± 102
Train count (n)	8.5 (3; 20)
Simple pulse count in train (n)	48.6 ± 28.5
Train duration (s)	2.3 ± 1.2
Pulse duration in train (ms)	12.2 ± 6.0
Interpulse interval (ms)	49.0 ± 7.0
Pulse rate (Hz)	22.3 ± 1.5
Train peak frequency (Hz)	399 ± 144

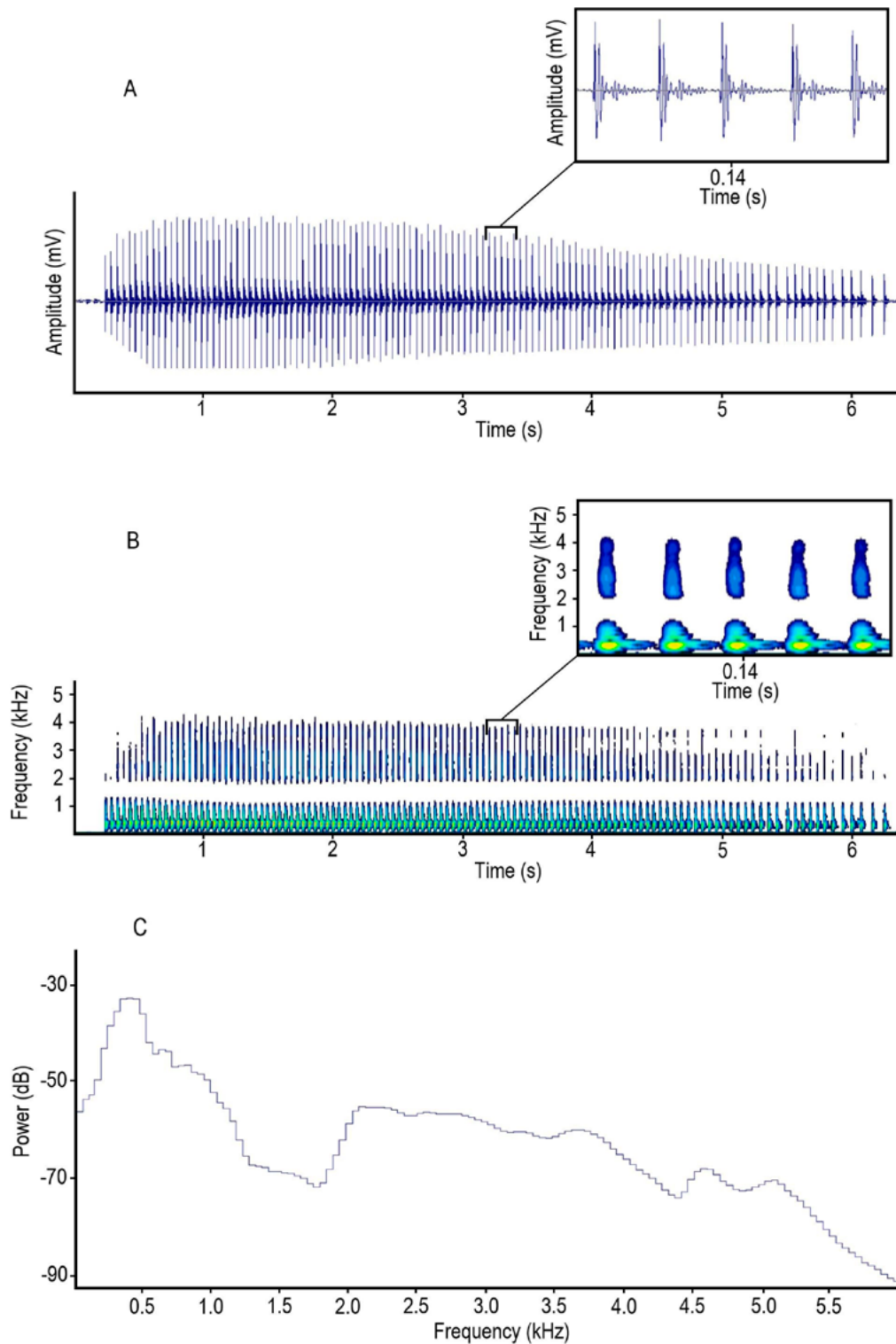


Figure 3. A, oscillogram, B, spectrogram and C, power spectrum of a pulse train emitted by *Prochilodus magdaleneae* in Colombia. Yellowish areas in the magnified spectrogram section represent the highest amplitude levels in pulses.

No differences were detected in the bioacoustic characteristics of simple pulses between individuals of different rivers (Table 3), but there were some significant differences between individuals from different rivers in the duration and pulse rate of trains, as well as in the duration of train pulses. The duration of trains between individuals from the Sinú and Magdalena rivers was different, being longer for individuals of the Magdalena River. Fish from the Cauca River presented the highest pulse rate and the shortest duration of pulses in a train (Table 3). Water temperature in fishponds had a mean value of 28.9 ± 1.6 °C ($n=27$), and there were significant differences among the fish farms ($p<0.05$, $F=12.06$), being highest at the Cauca river fish farm.

The river of origin of *P. magdalenae* males was not well discriminated by bioacoustical variables for both simple pulses and pulse trains, as there is high overlapping among groups. For simple pulses (Figure 4-A), the Axis 1 eigenvalue was 0.401 and explained 97.56 % of data and Axis 2 eigenvalue was 0.010 (2.44 %); for pulse

trains (Figure 4-B) the Axis 1 eigenvalue was 2.622 and explained 70.25 % of the data and Axis 2 eigenvalue was 1.110 (29.75 %). Total number of simple pulses and trains were not included in this analysis (not normally distributed variables).

We found no significant linear relationship (Pearson's correlation analysis, $p>0.05$) between *P. magdalenae* standard length and dominant frequency for both trains and single pulses. The dominant frequency was not related to fish size. In the same way, we found no significant correlation of any bioacoustical variable with temperature; although, the correlation between temperature and pulse duration in trains had the most relevant coefficient among all variables, it was still weak ($R=-0.350$), and not significant ($p=0.13$).

There was no occurrence of egg releases in the fishponds when no male sound was detected. Additionally, when only simple pulses were recorded, spawning happened in 51.9 % of ponds, and raised to 85.7 % when trains of pulses were registered.

Table 2. Bioacoustic variables of simple pulses and pulse trains of *Prochilodus magdalenae* males in couples and groups in Colombian hatcheries. Values correspond to the mean and the standard deviation ($\bar{x} \pm sd$), except for simple pulse and train counts, for which the median is presented followed by quartiles one and three: Me (Q1; Q3). The means or medians that share the same superscript letter were not significantly different. Mann-Whitney U test $\alpha=0.05$ and Student's T test $\alpha=0.05$.

	Level		Statistics
	Pair	Group	
Simple pulse variables	(n)=23	(n)=4	
Simple pulse count (n)	7.0 (2.5; 37.0) ^a	19.5 (1.0; 99.0) ^a	W=43 ; p=0.863
Simple pulse duration (ms)	14.0 ± 4.0 ^a	11.00 ± 2.1 ^a	T=-1.076 ; p=0.293
Simple pulse peak frequency (Hz)	379 ± 103 ^a	296 ± 69 ^a	T=-1.529 ; p=0.140
Pulse train variables	(n)=16	(n)=4	
Train count (n)	11.50 (4.5; 19.3) ^a	2.0 (1; 5.8) ^a	W=13 ; p=0.079
Simple pulse count in train (n)	53.3 ± 28.7 ^a	29.6 ± 20.5 ^a	T=-1.541 ; p=0.141
Train duration (s)	2.5 ± 1.2 ^a	1.3 ± 0.9 ^a	T=-1.777 ; p=0.092
Pulse duration in train (ms)	11.0 ± 6.7 ^a	15.0 ± 3.6 ^a	T=1.012 ; p=0.325
Interpulse interval (ms)	50.0 ± 7.0 ^a	49.0 ± 9.0 ^a	T=-0.2456 ; p=0.809
Pulse rate (Hz)	22.4 ± 1.6 ^a	21.7 ± 1.6 ^a	T=-0.685 ; p=0.504
Train peak frequency (Hz)	420 ± 141 ^a	313 ± 136 ^a	T=-1.366 ; p=0.189

Table 3. Bioacoustic variables of simple pulses and pulse trains of *Prochilodus magdalenae* in Colombia, and water temperature at fish farms by river of origin of males. Values correspond to the mean and the standard deviation ($\bar{x} \pm sd$), except for simple pulse and train counts, for which the median is presented followed by quartiles one and three: Me (Q; Q3). The means or medians that share the same superscript letter were not significantly different. ANOVA: $\alpha=0.05$, Kruskal-Wallis test: $\alpha=0.05$, Tukey test: $\alpha=0.05$.

	Level			Statistics
	Sinú	Magdalena	Cauca	
Simple pulse variables	(n)=7	(n)=8	(n)=12	
Simple pulse count (n)	4.0 (1.0; 51.0) ^a	24.0 (9.5; 102.3) ^a	4.0 (2.0; 12.0) ^a	$X^2=2.989$; $p=0.224$
Simple pulse duration (ms)	12.0 ± 2.0^a	14.0 ± 4.0^a	15.0 ± 5.0^a	$F=2.115$; $p=0.144$
Simple pulse peak frequency (Hz)	316 ± 80^a	341 ± 56^a	424 ± 124^a	$F=3.069$; $p=0.067$
Pulses train variables	(n)=6	(n)=6	(n)=8	
Train count (n)	2.5 (1.3; 6.7) ^a	7.5 (3.5; 12.3) ^a	19.0(6.8; 20.8) ^a	$X^2=5.679$; $p=0.058$
Simple pulse count in train (n)	26.9 ± 19.8^a	61.1 ± 36.9^a	55.3 ± 18.8^a	$F=3.113$; $p=0.070$
Train duration (s)	1.3 ± 0.9^a	3.1 ± 1.3^b	2.4 ± 0.8^{ab}	$F=4.917$; $p=0.021$
Pulse duration in train (ms)	16.7 ± 5.3^a	14.7 ± 4.9^a	6.8 ± 3.9^b	$F=8.762$; $p=0.002$
Interpulse interval (ms)	48.6 ± 7.9^a	55.8 ± 7.0^a	46.0 ± 5.8^a	$F=2.759$; $p=0.095$
Pulse rate (Hz)	21.6 ± 0.8^a	21.0 ± 0.7^{ac}	23.5 ± 1.2^b	$F=1.403$; $p=0.278$
Train peak frequency (Hz)	327 ± 159^a	356 ± 49^a	485 ± 147^a	$F=2.7168$; $p=0.118$
Physicochemical variable	(n)=7	(n)=8	(n)=12	
Temperature (°C)	27.4 ± 0.3^a	28.2 ± 0.2^a	30.4 ± 1.2^b	$F=12.06$; $p=0.00055$

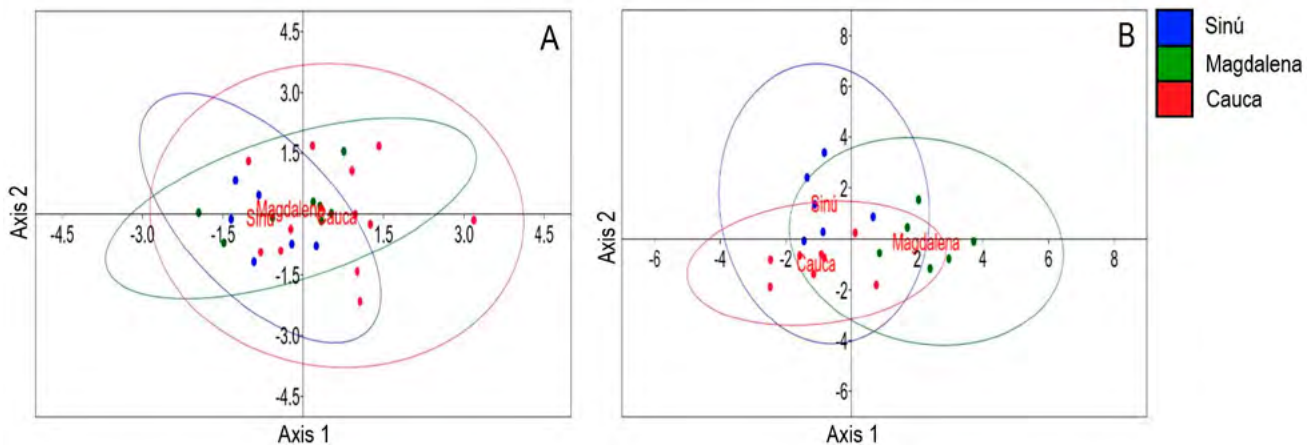


Figure 4. Linear discriminant analysis scores and 95 % confidence ellipses for *Prochilodus magdalenae* males and their bioacoustical variables, to evaluate differences between river origin of individuals. A, simple pulses (n=27) and B, pulse trains (n=20).

River Sampling. We did not detect soniferous activity in the Nechí and Cauca rivers, while in the Magdalena River we identified soniferous activity at two sites: site S10, with 18 *P. magdalenae* calls, and site S6, with 6 calls; water temperatures were 25.2 and 26.41°C, respectively, for each site. These records consisted of multiple pulse trains emitted synchronically or “choruses”, that lasted from 12.8 s to 382.6 s (6.4 minutes), with a median duration of 29.6 s and quartiles Q1=18.8 s and Q2=53.6 s. Since *P. magdalenae* congregates for spawning, many males usually produce sounds simultaneously near each other, resulting in a cacophony. This made sound analysis very difficult and we could only analyze bioacoustically three good quality fragments in which there was no call overlap (at the beginning or end of choruses). We identified these calls as fragments of trains. We did not detect simple pulse signals in the recordings.

The mean peak train frequency values and mean pulse duration in train fragments, as well as its standard deviations, had values similar to what was found for trains in captive fish. However, the interpulse interval was shorter in the records of fish in rivers, reflecting a higher pulse rate than for fish in captivity. Bioacoustic variable values for both captive and fish are shown in Table 1 and Table 4. At sampling site S6 we also detected 11 conspicuous train signals different from those of *P. magdalenae*. Although we did not have a bioacoustical reference to match the characteristics of those signals, they were strong enough to be heard above water, and were identified by traditional fishers as belonging to *Megaleporinus muyscorum*, locally known as *comelón* or *moino*. Table 4 shows values for the bioacoustical variables of this species.

Table 4. Values of bioacoustic variables of *Prochilodus magdalenae* train fragments (n=3) and *Megaleporinus muyscorum* trains (n=11) in the Magdalena River, Colombia. Values correspond to the mean value and the standard deviation ($\bar{x} \pm \text{sd}$).

Variable	<i>P. magdalenae</i> (Train fragment)	<i>M. muyscorum</i> (Train)
Simple pulse count (n)	9.7 ± 3.8	6.4 ± 2.8
Duration (s)	0.2 ± 0.1	0.7 ± 0.4
Pulse duration (ms)	16.0 ± 0.01	13.9 ± 0.001
Interpulse interval (ms)	10.0 ± 0.002	111.0 ± 0.02
Pulse rate (Hz)	45.2 ± 2.8	9.5 ± 1.3
Peak frequency (Hz)	373 ± 20	607 ± 61

Discussion

The mating calls of individuals of *P. magdalenae* kept at fish hatcheries were similar to vocalizations emitted by other species of *Prochilodus* (Godinho *et al.*, 2017; Smith *et al.*, 2018). They are also common to many fish species that produce sounds through vibratory muscles acting on the swim bladder, indicating that it is a conserved character related to this mechanism of sound production in fish (Fine & Parmentier, 2015).

The pulse trains of *P. magdalenae* are similar to those of *P. argenteus*, *P. costatus* and *P. lineatus* (see also Smith *et al.*, 2018 for comparisons). There is a rapid raising of signal amplitude at the beginning of trains, reaching the maximum amplitude, and then there is a general gradual decrease in amplitude until the train ends. The most distinctive species is *P. costatus*, in which the decrease in amplitude after reaching maximum is more marked.

In all these species the shape of the pulses, including number of peaks per pulse, varied considerably by train; however, each pulse generally started with two dominant peaks, followed by a few subsequent peaks that gradually decrease in amplitude (Figure 3A; Smith *et al.*, 2018). Moreover, power spectrum for trains of *P. magdalenae* share similarities with those described for *P. argenteus*, *P. costatus* and *P. lineatus*, –a characteristic gradual decrease in power as frequency values increased, and power of the calls was below 1 kHz, with peaks usually below 500 Hz (Smith *et al.*, 2018).

Simple pulses of *P. magdalenae* are shorter than those of *P. costatus* and *P. argenteus*, but longer than those reported for *P. lineatus* (Smith *et al.*, 2018; Figure 5-A). However, there are overlaps between the pulse duration of these species, considering the intraspecific signal variation (standard deviations), indicating that this bioacoustic feature did not have a high degree of interspecific differentiation. The peak frequency of simple pulses in *P. magdalenae* was lower than in *P. lineatus*, but higher than in *P. argenteus* and *P. costatus* (Figure 5-B); *P. argenteus*, *P. costatus* and *P. lineatus* have clearly different peak frequency values and no overlaps between them, indicating that this variable is specific for these species when compared to each other, while for *P. magdalenae*, the results suggest that it has a wider spectrum of peak frequencies when emitting this type of acoustic signals.

The highest train peak frequency value was reported for *P. lineatus*, followed by *P. magdalenae*, while *P. argenteus* and *P. costatus* presented similar peak

frequencies (Figure 5-C). On the other hand, the trains of *P. magdalenae* are the shortest of all species, whereas the other three species have similar train duration (Figure 5-D), despite the fact that *P. argenteus* and *P. costatus* are sympatric in most of their distribution range and they are sympatric with *P. lineatus* in rivers in which they have been introduced (Smith *et al.*, 2018). In general, the four compared species emitted trains with relatively similar pulse duration. *P. argenteus* emitted the longest pulses, while *P. costatus* the shortest and *P. magdalenae* presented the greatest variation, compared to the three other species (Figure 5-E).

The fact that there were no significant differences between males that were in couples or in groups for any of the bioacoustic variables measured, for both simple pulses and pulse trains, suggests that these characteristics of male calls in this species are not influenced by the density of females during the reproductive event (Table 2). However, since the groups

had a small sample size (n=4) these results must be taken with care.

The low-frequency sounds of these four *Prochilodus* species is typical in fish acoustic signaling associated to mating behavior (Amorim *et al.*, 2015). Sound production in all these species is in the form of a series of pulses, which is dependent upon sonic muscles associated to the swim bladder, showing in general similar characteristics of the waveform for both trains and simple pulses and also similar characteristics in power spectrum. However, there can be enough differences to discriminate species at a bioacoustical base, as shown by Smith *et al.* (2018) for the prochilodontids they studied. The most distinctive bioacoustical feature of *P. magdalenae* was the shorter trains of pulses. Train duration, however, may not encode species-specific or even individual-specific information, but it might instead reflect individual motivational information (Smith *et al.* 2018).

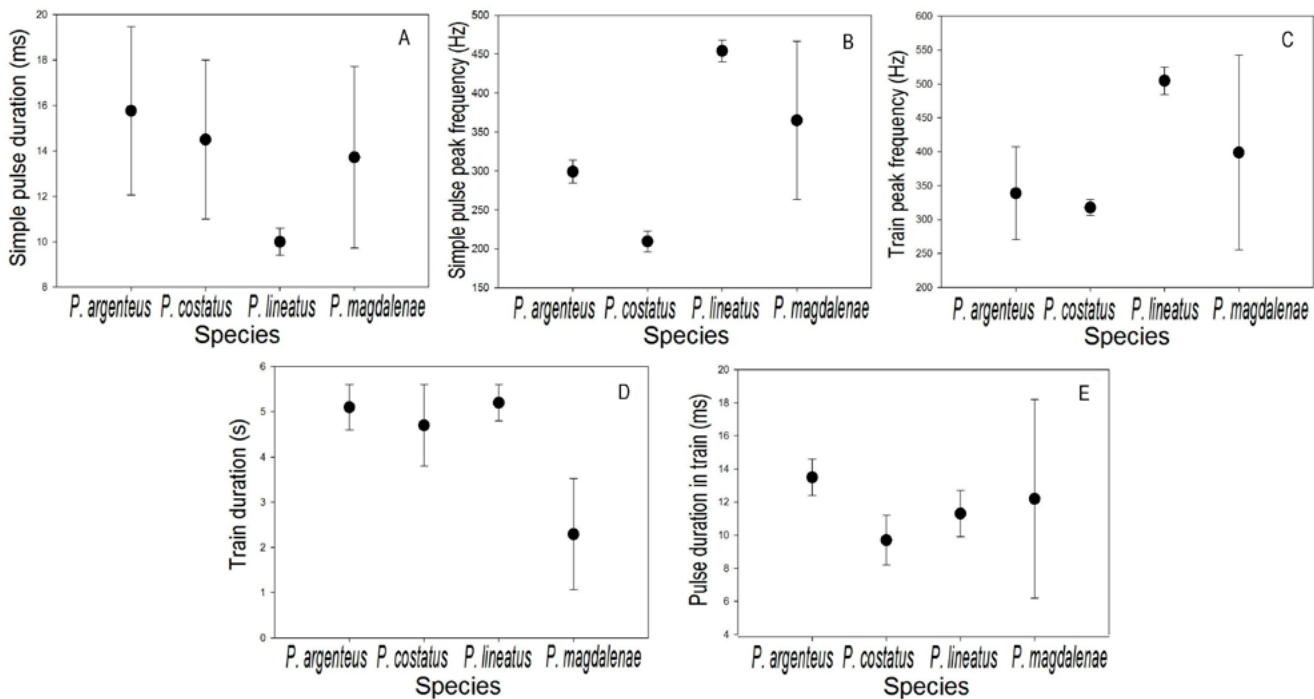


Figure 5. Reference values (● =mean; ± = standard deviation) of the bioacoustic variables of *Prochilodus magdalenae* (n=27 for simple pulse variables and n=20 for pulse train variables) at 27.4-30.4°C, compared with data data available for *P. argenteus* (n=3) at 28-30 °C, *P. costatus* (n=3) at 28-30 °C, and *P. lineatus* (n=3) at 27 °C (Smith *et al.*, 2018). A, simple pulse duration; B, simple pulse peak frequency; C, train peak frequency; D, train duration; E, pulse duration in train.

The discriminant analysis results suggest that for *P. magdalenae*, calls are similar among different areas of the distribution range of this species, when considering all the bioacoustical variables used; simple pulse duration and peak frequency of pulses and trains of *P. magdalenae* were highly conserved acoustic characteristics, as they did not show differences in relation to grouping (social context) or provenance. Pulse trains, on the other hand, were different among origin rivers specifically in terms of train duration, pulse duration in train and pulse rate. Variation in acoustic signals at geographical level can be an adaptive response to the different acoustic characteristics of the environment in which they live.

Bioacoustical geographic differences can also be related to physiological responses to the immediate environment, such as water temperature, which may impact metabolism and muscle activation that affect the bioacoustic characteristics of sounds (Köhler *et al.*, 2017). Considering that most fish (including *P. magdalenae*) are poikilothermic ectotherms, they lack physiological adaptations to thermoregulate, so water temperature is one of the most important extrinsic factors related to the muscular performance of these organisms. The work done by a muscle decreases significantly with decreasing temperature, while the speed and power increases with increasing temperature (James, 2013). Therefore, temperature differences in water can affect the rate of contraction of the intercostal muscles that produce trains of pulses. This could explain the shorter pulse duration and higher pulse rate of the captive fish in the Cauca River, and the shorter trains of captive fish of the Sinú River, as, on average, temperature at the Sinú was 3°C below that at the Cauca. However, the effect of temperature on sound duration in fish is complex (Ladich & Maiditsch, 2020); thus, for example, interpulse duration in *P. magdalenae* for individuals in rivers was shorter, although water temperature was lower than that of fish farms.

Larger individuals of fish usually produce lower frequency calls (Connaughton *et al.*, 2000). However, frequency values that vary little in relation to size have been reported for some species (Fine, 1978), and this is probably also the case for *Prochilodus* (Smith *et al.*, 2018). Fish species that produce sounds based on a high-speed muscle mechanism (as in *Prochilodus*), have minimal changes in peak frequency with respect to changes in size of individuals, because the frequency is dependent on the rate of muscle contraction and not so much on the size of the swim bladder (Parmentier & Fine, 2016).

The male calling behavior is a fundamental aspect that could trigger spawning in *P. magdalenae*. The relationship between sound production by males (especially trains) and spawning events by females provides key data that helps explain the functional meaning of these calls and their importance in the reproductive behavior of *P. magdalenae*. A role of male calls in spawning has been also found in other *Prochilodus* species (Godinho *et al.*, 2017), and Fontenele (1953) noticed males calling while mating. However, since there were several males observed in that study, it is not certain if calling was only from the males engaged in mating. Playback experiments could be considered to clarify specifically the communicative component of the acoustic signal in *P. magdalenae*, with respect to other signals that might be related to reproduction, such as physical contact and possible visual cues between individuals.

Conclusions

PAM can be done to locate spawning grounds of *P. magdalenae* over a long river reach. This kind of monitoring can be a very potent capture-independent tool for studying this species, presenting new opportunities for developing more integral conservation strategies.

Peak frequency, and pulse duration can be used to identify *P. magdalenae* in natural environments. Additionally, by comparing interpulse interval, pulse rate and duration of the trains it is also possible to differentiate *P. magdalenae* from other species, such as *M. muyscorum*.

Other Colombian fish species, such as *Curimata mivartii*, *Plagioscion magdalenae*, *Brycon moorei*, *Pseudoplatystoma magdaleniatum*, which, according to artisanal fishers, produce sounds, could be studied with PAM. These species are also highly important for Colombians fisheries, so knowing them in greater detail will provide more elements for better management and conservation.

Through PAM, it will also be possible to study the migratory events of soniferous fish as well as the behaviors associated with the emission of acoustic signals. Therefore, more research at the captive level is required to systematically study these bioacoustic aspects. The knowledge obtained about the sounds of fish will allow automating the detection of species for multiple purposes in natural water bodies.

The audio files uploaded to the ML and IAvH-CSA sound collections can be used for different research

purposes and for divulgation-educational programs, increasing in this way the knowledge and awareness about these species, apportioning new tools for studying and protecting them. This approach is applicable for other soniferous fish species reported in Colombia, yet to be bioacoustically characterized.

Acknowledgements

We thank Fundación Mario Santo Domingo and KOSE Grant for The Nature Conservancy Scientists for funding this project, as well to Universidad de Antioquia and its Ichthyology Group – GIUA, for making possible the development of the project. We also thank Piscícola San Silvestre S.A., Centro Acuícola y Piscícola Santa Cruz S.A.S and Centro de Investigaciones Piscícolas de la Universidad de Córdoba, for providing facilities and fish to record *P. magdalenae* calls in captivity. We appreciate all the help from the artisanal fishers in river recordings, and we are also thankful to Alexandre L. Godinho for his opportune help and recommendations. We thank the Colección de Sonidos Ambientales del Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt and to the Macaulay Library of Cornell Lab of Ornithology, for archiving the audio files we prepared.

References

Atencio, V. (2001). Producción de alevinos de especies nativas. *Revista Medicina Veterinaria y Zootecnia Córdoba*, 6(1), 9-14.
<https://doi.org/10.21897/rmvz.1060>

Amorim, M., Clara, P., Vasconcelos, R. O. & Fonseca, P. J. (2015). Fish Sounds and Mate Choice. *Sound communication in fishes*, (4), 1-33.
<https://doi.org/10.1007/978-3-7091-1846-7>

Barreto, C. G., & Mosquera, B. J. (2001). *Boletín estadístico pesquero Colombiano*. Bogotá D.C.: SEPEC.

Borie, A., Mok, H. K., Chao, N. L., & Fine, M. L. (2014). Spatiotemporal variability and sound characterization in silver croaker *Plagioscion squamosissimus* (Sciaenidae) in the central Amazon. *PLoS ONE*, 9(8), e99326
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0099326>

Colleye, O. & Parmentier, E. (2012). Overview on the diversity of sounds produced by clownfishes (Pomacentridae): Importance of acoustic signals in their peculiar way of life. *PLoS ONE*, 7(11).
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0049179>

Connaughton, M.A., Taylor, M.H. & Fine, M.L. (2000). Effects of fish size and temperature on weakfish disturbance calls: implications for the mechanism of sound generation. *Journal of Experimental Biology*, 203(Pt 9), 1503-1512.

Filho, E. Z., & Schulz, U. (2004). Migratory fishes of the Uruguay River. In A. Carolsfeld, J., Harvey, B., Ross, C., Baer (Ed.). *Migratory Fishes of South America: Biology, Fisheries and Conservation Status* (pp. 157-194). World Bank.
<https://doi.org/10.1596/1-5525-0114-0>

Fine, M.L. (1978) Seasonal and geographical variation of the mating call of the oyster toadfish *Opsanus tau* L. *Oecologia*, 36(1), 45-57.
<https://doi.org/10.1007/BF00344570>

Fine, M. L. & Parmentier, E. (2015). Mechanisms of fish sound production. In F. Ladich (Ed.), *Sound Communication in Fishes*. Vol. 4. Pp. 77-126. New York: Springer

Fontenele, O. (1953) Contribuição para o conhecimento da biologia da curimata pacu, *Prochilodus argenteus* Spix in Spix, Agassiz (Pisces: Characidae, Prochilodinae). *Revista Brasileira de Biología*, 13, 87-102

Godinho, A. L., Silva, C. C. F. & Kynard, B. (2017). Spawning calls by zulega, *Prochilodus argenteus*, a Brazilian riverine fish. *Environmental Biology of Fishes*, 100(5), 519-533.
<https://doi.org/10.1007/s10641-017-0582-5>

Greenhalgh, J. A., Genner, M. J., Jones, G. & Desjonquères, C. (2020). The role of freshwater bioacoustics in ecological research. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 7(3), e1416.
<https://doi.org/10.1002/wat2.1416>

Harder, W. (1975). Anatomy of fishes, (part I and part II). E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchh., Stuttgart, West Germany: 612 pp.

James, R. S. (2013). A review of the thermal sensitivity of the mechanics of vertebrate skeletal muscle. *Journal of Comparative Physiology B: Biochemical, Systemic, and Environmental Physiology*, 183(6), 723-733.
<https://doi.org/10.1007/s00360-013-0748-1>

Kaatz, I. M. (2002). Multiple sound-producing mechanisms in teleost fishes and hypotheses regarding their behavioural significance. *Bioacoustics*, 12(2-3), 230-233.
<https://doi.org/10.1080/09524622.2002.9753705>

Köhler, J., Jansen, M., Rodríguez, A., Kok, P. J. R., Toledo, L. F., Emmrich, M., ... Vences, M. (2017). The use of bioacoustics in anuran taxonomy: Theory, terminology, methods and recommendations for best practice. *Zootaxa*, 4251(1), 1-124.
<https://doi.org/10.11646/zootaxa.4251.1.1>

- Ladich, F. & Bass, A. H. (2011). Vocal Behavior of Fishes : Anatomy and Physiology. In *Encyclopedia of Fish Physiology: From Genome to Environment*, 1 321-329.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-1237-4553-8.00018-6>
- Ladich F. & Fine, M. L. (2006). Sound-generating mechanisms in fishes: a unique diversity in vertebrates. In Ladich, F., Collin, S.P., Moller P., Kapoor, B.G. (Eds). *Communication in Fishes, vol 1*. Pp 3-34. Enfield: Science Publishers.
- Ladich F. & Maiditsch, I. P. (2020). Temperature affects sound production in fish with two sets of sonic organs: The Pictus cat. *Comparative Biochemistry and Physiology -Part A : Molecular and Integrative Physiology*, 240, 110589.
<https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2019.110589>
- Luczkovich, J. J., Pullinger, R. C., Johnson, S. E. & Sprague, M. W. (2008). Identifying sciaenid critical spawning habitats by the use of passive acoustics. *Transactions of the American Fisheries Society*, 137(2), 576-605.
- Mojica, J. I., Usma, J. U. E., Álvarez-León, R. & Lasso, C. A. (2012). *Libro rojo de peces dulceacuícolas de Colombia*. Bogotá D.C.: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia, WWF Colombia & Universidad de Manizales. 319 pp
- Operman, J., Grill, G. & J. Hartmann. (2015) The Power of Rivers: Finding Balance Between Energy and Conservation in Hydropower Development. (Report). Washington, D.C. The Nature Conservancy: 50 pp.
- Parmentier E., Fine M. L. (2016) Fish sound production: insights. In: Suthers, R. A., Fitch, W.T, Fay, R.R., Popper, A.N. (Eds) *Vertebrate Sound Production and Acoustic Communication*. Pp 19-49. Basel: Springer.
- Rountree, R. A., Gilmore, R. G., Goudey, C. A., Hawkins, A. D., Luczkovich, J. J. & Mann, D. A. (2006). Listening to fish: Applications of passive acoustics to fisheries science. *Fisheries*, 31(9), 433-446.
[https://doi.org/10.1577/1548-8446\(2006\)31\[433:LT-F\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8446(2006)31[433:LT-F]2.0.CO;2)
- Schärer, M. T., Nemeth, M. I., Rowell, T. J. & Appeldoorn, R. S. (2014). Sounds associated with the reproductive behavior of the black grouper (*Mycteroperca bonaci*). *Marine Biology*, 161(1), 141-147.
<https://doi.org/10.1007/s00227-013-2324-3>
- Smith, M. E., Weller, K. K., Kynard, B., Sato, Y. & Godinho, A. L. (2018). Mating calls of three prochilodontid fish species from Brazil. *Environmental Biology of Fishes*, 101(2), 327-339.
<https://doi.org/10.1007/s10641-017-0701-3>

Supplementary material

Audio file storage. Samples of the original recordings used in this study were archived at the Cornell Lab of Ornithology's Macaulay Library (ML) and at the Colección de Sonidos Ambientales del Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH-CSA), Colombia.

Sebastián Eduardo Muñoz Duque

Universidad de Antioquia

Medellín, Colombia

sebasemd@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-2593-4291>

Silvia López Casas

The Nature Conservancy

Bogotá, Colombia

silvilopezcasas@yahoo.com

<https://orcid.org/0000-0003-3329-4976>

Héctor Rivera Gutiérrez

Universidad de Antioquia

Medellín, Colombia

fabio.rivera@udea.edu.co

<https://orcid.org/0000-0001-6025-3470>

Luz Fernanda Jiménez Segura

Universidad de Antioquia

Medellín, Colombia

luz.jimenez@udea.edu.co

<https://orcid.org/0000-0003-0784-0355>

Bioacoustic characterization of mating calls of a freshwater fish (*Prochilodus magdalenae*) for passive acoustic monitoring

Citación del artículo: Muñoz-Duque, S.E., López-Casas, S., Rivera-Gutiérrez, H. & Jiménez-Segura, L.F. (2021). Bioacoustic characterization of mating calls of a freshwater fish (*Prochilodus magdalenae*) for passive acoustic monitoring. *Biota Colombiana*, 22(1), 108-121.

<https://doi.org/10.21068/c2021.v22n01a07>

Received: May 28, 2020

Accepted: November 15, 2020

Advertisement call of a population of the nurse frog *Leucostethus fraterdanieli* (Anura: Dendrobatidae), with notes on its natural history

Canto de advertencia de una población de la rana nodriza *Leucostethus fraterdanieli* (Anura: Dendrobatidae), con notas sobre su historia natural

Julián A. Rojas-Morales  , Enrique La Marca  , Héctor E. Ramírez-Chaves  

Abstract

We describe the advertisement call of seven males and observations on the natural history related to the parental attention by males, of a population of nurse frogs attributed to the *Leucostethus fraterdanieli* complex from the Central Cordillera in the Department of Caldas, Colombia. The advertisement call consists of a long sequence of repeated ($\bar{x} = 143 \text{ notes} \cdot \text{min}^{-1}$) pulsed notes, which have an average duration of $79 \pm 17 \text{ ms}$ (range 63-122 ms), separated by time intervals between 187-413 ms ($289 \pm 67 \text{ ms}$). The dominant frequency values are in the range between 3209-3520 Hz. Our results suggest differences in temporal and spectral parameters between the population studied and other populations assigned to *L. fraterdanieli*, *L. brachistriatus*, and the recently described *L. jota*.

Key words. Amphibia. Andes. Bioacoustics. Caldas. Colombian Central Cordillera. Male brooding behavior. Phytotelmata.

Resumen

Describimos el canto de advertencia de una población atribuida a *Leucostethus fraterdanieli* de los Andes centrales de Colombia, basados en el análisis temporal y espectral del canto de siete machos, y aportamos observaciones de historia natural asociadas al cuidado parental de los machos. El canto de advertencia consiste en una larga secuencia de notas pulsadas repetidas ($\bar{x} = 143 \text{ notes} \cdot \text{min}^{-1}$), las cuales tienen una duración promedio de $79 \pm 17 \text{ ms}$ (rango 63-122 ms), separadas por intervalos de tiempo de entre 187-413 ms ($289 \pm 67 \text{ ms}$). Los valores de frecuencia dominante registrados están en el rango entre 3209-3520 Hz. Nuestros resultados sugieren diferencias en parámetros temporales y espectrales entre la población estudiada y otras poblaciones asignadas a *L. fraterdanieli*, *L. brachistriatus*, y la especie recientemente descrita *L. jota*.

Palabras clave. Amphibia. Andes. Atención de nidadas. Bioacústica. Caldas. Cordillera Central de Colombia. Fitotelmata.

Introduction

Bioacoustics provide an useful instrument in taxonomy and systematics for Neotropical anuran species (Toledo *et al.*, 2015; Köhler *et al.*, 2017), particularly for poison frogs (Dendrobatoidea) (Lötters *et al.*, 1999; 2007; Brown *et al.*, 2008a; Twomey & Brown, 2008; Brown *et al.*, 2011), with newly described taxa usually including detailed call descriptions (e.g. Myers *et al.*, 1998; Brown *et al.*, 2008a; Márquez *et al.*, 2017). For closely related but taxonomically uncertain species, bioacoustic information is also relevant, since call parameters can show differences that morphology does not (Angulo & Reichle, 2008; Castroviejo-Fisher *et al.*, 2008; Padial *et al.*, 2008; Pritti *et al.*, 2016). Also, natural history traits related to microhabitat selection for breeding and parental care have shown interesting differences in systematics and evolutionary terms between closed aposematic resembling dendrobatids (e.g. Brown *et al.*, 2008b, c). However, knowledge about the ecology and natural history for non-aposematic dendrobatid frogs is still scarce, and the lack of such information has limited systematic proposals for the evaluation of morphological, genetic and bioacoustic characters.

Within the Dendrobatidae, the genus *Leucostethus* comprises at least six species (*L. argyrogaster*, *L. brachistriatus*, *L. fraterdanieli*, *L. fugax*, *L. jota* and *L. ramirezi*) of South American endemic nurse frogs, with the highest diversity in the Northern Andes of Colombia (Grant *et al.*, 2017; Frost, 2020), and with suspected cryptic diversity. For example, Grant *et al.* (2017) found five clades that seem to represent different species within the *fraterdanieli* complex. Among them, there was a clade distributed along the Cauca river valley and the adjacent flanks of the Central and Western Cordilleras of Colombia, from Popayán (Department of Cauca) to Filandia (Department of Quindío), that they assigned to *C. brachistriatus* (Rivero & Serna, 1986). As pointed out by Grant & Castro (1998), the extensive within- and among-population morphological variation in *L. fraterdanieli* (previously included in the genus *Colostethus* and transferred to *Leucostethus* by Marín *et al.*, 2018), suggests a complex of closely resembling species, corroborated by different authors (Grant *et al.*, 2006, 2017; Santos *et al.*, 2009; Marín *et al.*, 2018). Therefore, hereafter we will refer to our study species as *L. fraterdanieli* complex.

The *Leucostethus fraterdanieli* complex (Silverstone, 1971) comprises a group of small nurse frogs (Dendrobatidae: Colosthetinae) endemic of the sub-Andean and Andean forests in the Central and Western cordilleras

of Colombia, in an elevational range between 1100 and 2500 m a.s.l. (Silverstone, 1971; Rivero & Serna, 1995; Grant & Castro, 1998; Acosta-Galvis, 2000; Bernal *et al.*, 2005; Bernal & Lynch, 2008; Castro-Herrera & Vargas-Salinas, 2008; Sánchez, 2013; Rojas-Morales *et al.*, 2014; Guevara-Molina *et al.*, 2017). Bernal & Lynch (2008) indicated a record at 650 m of elevation, but that appears unlikely to us, as deduced from their data table (see Appendix 1 in Bernal & Lynch, 2008).

The *Leucostethus fraterdanieli* complex includes diurnal-terrestrial frogs that are active near creeks and streams inside primary and secondary forests, even in forest fragments of less than 1 ha, surrounded by urban and rural areas (Guevara-Molina *et al.*, 2017). Although some behavioral aspects such as anurophagy (e.g. consumption of *Pristimantis achatinus*) have been reported (Cárdenas-Ortega & Herrera-Lopera, 2016), other traits of their natural history, such as microhabitat use and reproductive behavior, are still unknown. In this study, we describe the advertisement call of a population assigned to the *L. fraterdanieli* complex, based on individuals from an urban locality in the Department of Caldas, Central Cordillera of Colombia. In addition, we provide information on natural history, such as calling and oviposition site, and egg-attendance and embryo transport behavior displayed by males.

Materials and methods

Study site. Call recordings were made at the Botanical Garden of the University of Caldas, Municipality of Manizales, Department of Caldas, Colombia (05°3'26.68"N, 75°29'45.28"W, WGS84, 1960 m a.s.l.), which is a forested area in the central-southern part of Manizales, containing a representation of different types of vegetation, such as native secondary forest, coniferous forest (mainly consisting of *Pinus patula*), and crop areas for agricultural experimentation. The vegetation and environmental conditions in this area correspond to the moist lower montane forest (or bmh-MB) in Holdridge (1982) life zone system, with an annual rainfall average of 2600 mm, increasing in March-May and September-November (Corpocaldas, 2012). Annually, the warmest months are May and July with average temperatures of 24 °C, while the coldest month is September with an average of 11.4 °C (Corpocaldas, 2012). Native flora from the forests where *L. fraterdanieli* complex has been recorded, include cedro negro (*Juglans neotropica*, Juglandaceae), encenillo (*Weinmannia pubescens*, W. elliptica, Cunoniaceae), yarumo blanco (*Cecropia telealba*,

Urticaceae), dulomoco (*Saurauia cuatrecasana*, Actinidaceae), drago (*Croton magdalenensis*, Euphorbiaceae), nigüito (*Miconia poecilantha*, *M. theaezans*, Melastomataceae), wax palm (*Ceroxylon quindiuense*, Arecaceae), among many others (Vargas, 2002).

Call analysis. The advertisement call of seven individuals of the *L. fraterdanieli* complex is described based on recordings made by the first author on 12 May 2012 between 14:33-17:32 h. For the description, 84 calls in total (12 calls for each male), randomly selected from one minute of recording for each individual were analyzed. Males were recorded at 50-70 cm average distance with a Sennheiser® ME64 cardioid unidirectional microphone, adapted to a Marantz® PMD620 digital recorder. Temperature (Table 1) was registered at the time of each recording, with an Extech® EA25 infrared thermometer, and male's snout-to-vent length (SVL) was measured with a 0.01 mm Mitutoyo® MI-500-171-30B precision's caliper (Table 1). Because the individuals of *L. fraterdanieli* complex have shown an aggregate local distribution, the recordings were taken at least 5-20 m apart for each male, to avoid pseudoreplication. No voucher specimens were collected in this study; however, 13 vouchers from this locality are housed at the herpetological collection of the Museo de Historia Natural, Universidad de Caldas (MHN-UCa 416-418, 447-452, 831-834). We followed Wells (2007), Toledo *et al.* (2015) and Köhler *et al.* (2017) for the description of the temporal and spectral parameters of the calls. Recordings were digitized and analyzed with the software RAVEN © Pro 1.4 (Bioacoustics Research Program 2011) at a resolution of 16 bits and 44.1 kHz sampling rate. Oscillograms and spectrograms were analyzed with a FFT (Fast Fourier Transformation) of 512 points and Hann algorithm. Description of the call parameters are presented as mean \pm standard deviation (range). During the course of other research (2010-2012), the first author gathered additional information on microhabitat and specific observations on the behavior and activity of wild individuals in areas close to that of this study (municipalities of Neira and Villamaría, Department of Caldas).

Results

Advertisement call. Males of the *L. fraterdanieli* complex recorded in the study area called synchronically, overlapping during this activity. When a male began to emit advertisement calls, almost immediately neighbouring individuals also started to vocalize, forming a

chorus audible at great distance (> 30 m). The advertisement call of *L. fraterdanieli* complex consisted of one note emitted in fast succession, with a mean call rate of 143 notes.min⁻¹ (range 93-168; Table 1; Figure 1), each sounding like a 'peep' to the human ear. The notes had an average duration of 79 \pm 17 ms (63-122 ms) and were separated by inter-note intervals of 289 \pm 67 ms (187-413 ms). The dominant frequency of the call was 3338.75 \pm 99.99 Hz (3209-3520 Hz); the minimum frequency 2812.5 \pm 74.34 Hz (2692-2899 Hz) and the maximum frequency 3881.91 \pm 69.91 Hz (3830-4037 Hz). All recorded males presented harmonic bands in their calls, but there were differences in the number of bands registered for each male (see Table 1). Harmonic 1 ranged from 4850 to 5487 Hz, harmonic 2 from 6315 to 7350 Hz, harmonic 3 from 7971 to 9317 Hz, harmonic 4 from 9736 to 10 973 Hz, harmonic 5 from 11 387 to 11 932 Hz. The harmonic 6 (13 173-13 459 Hz), harmonic 7 (14 795-15 114 Hz), and harmonic 8 (18 327-18 614 Hz) were present only in male 01. Notes were typically pulsed (2-11 pulses.note; Figure 2), although a small fraction of the notes did not have pulses. Pulses have a duration of 4 \pm 0.5 ms (2-7 ms). Table 1 summarizes the acoustic attributes of the analyzed individuals.

Natural history observations. At the study site (Figure 3A), *Leucostethus fraterdanieli* complex is the most abundant diurnal amphibian species in the local assemblage. In a small area of 25 m² in which two of the sound tracks were recorded, twelve individuals were counted calling hidden under the leaf litter of white yarumo trees (*Cecropia telealba*) and bamboos (*Guadua angustifolia*) (Figure 3B). In this site, on February 9, 2012, a male attending a clutch was found placed on a dry bromeliad leaf (*Aechmea* sp.) at 1.25 m above the ground, and approximately 40 m away from the nearest water body (Figure 4A). The male (SVL 23.7 mm) was in close contact with the egg mass performing a 'brooding behavior' *sensu* Vockenhuber *et al.* (2008) (Figure 4B). The sex of the individual was determined based in the black spots in the throat and the swollen third finger, which are characteristics in adult males (Grant & Castro 1998). The egg-clutch contained 17 eggs in developmental stage 17 *sensu* Gosner (1960) (Figure 4C). Both the male and the egg-clutch were monitored between 07:00-18:00 h, time during which the male remained attending eggs while staying on top of them. For other forested sites sampled near the cities of Manizales, Villamaría, and Neira, Department of Caldas, we observed that adults of the *L. fraterdanieli* complex were usually located at a distance (> 50 m) from water bodies during the day, with

Table 1. Temporal and spectral traits of the advertisement call of seven males of the *Leucostethus fraterdanieli* complex from Manizales, Caldas, Colombia. Snout-vent-length (SVL) of males and environmental temperature (°C) are given. Values correspond to the mean ± standard deviation (range).

Parameter	Number of male						
	01	02	03	04	05	06	07
Snouth vent-length (mm)	23.37	22.7	21.8	22.2	22.95	21.5	22.25
Temperature (°C)	27	27	28	28	26	21	21
Call rate (calls.min ⁻¹)	93	168	147	135	143	165	153
Note duration (ms)	66 ± 27 (58-106)	79 ± 17 (63-122)	105 ± 18 (48-134)	71 ± 19 (23-97)	71 ± 19 (66-87)	67 ± 18 (59-93)	69 ± 15 (43-92)
Number of pulses/note	7.33 ± 3.214 (5-11)	8 ± 5.932 (2-15)	6.905 ± 2.165 (2-10)	5.25 ± 2.121 (2-9)	6.703 ± 3.114 (2-12)	6.956 ± 3.117 (2-14)	6.202 ± 3.117 (2-9)
Pulse duration (ms)	5 ± 3 (2-7)	4 ± 1 (4-7)	4 ± 2 (4-6)	4 ± 2 (4-6)	5 ± 1 (4-6)	5 ± 2 (3-6)	4 ± 2 (3-5)
Inter-note intervals (s)	0.633 ± 0.072 (0.466-0.765)	0.289 ± 0.067 (0.187-0.413)	0.425 ± 0.097 (0.274-0.613)	0.424 ± 0.07 (0.35-0.572)	0.476 ± 0.085 (0.28-0.586)	0.421 ± 0.068 (0.367-0.585)	0.423 ± 0.068 (0.327-0.497)
Fundamental frequency (Hz)	2530.58 ± 86.84 (2386-2673)	2648.66 ± 184.37 (2381-2899)	2736.5 ± 148.59 (2482-2959)	2812.5 ± 74.34 (2692-2899)	2652.5 ± 91.22 (2390-2906)	2850.6 ± 85.413 (2460-2880)	2768 ± 75.35 (2560-2760)
Dominant frequency (Hz)	3135.41 ± 59.516 (3055-3245)	3355.75 ± 12047 (3209-3623)	3320 ± 45.857 (3245-3375)	3338.75 ± 99.991 (3209-3520)	3355 ± 54.2 (3209-3623)	3320 ± 43.31 (3200-3495)	3320 ± 45.671 (3220-3530)
Maximum frequency (Hz)	3684.25 ± 66.566 (3627-3830)	4080.41 ± 142.79 (3934-4348)	3961.5 ± 95.545 (3818-4105)	3881.91 ± 61.914 (3830-4037)	3955 ± 65.63 (3818-4037)	3930 ± 61.321 (3846-4055)	3870 ± 95.23 (3810-3970)
Harmonic 1 (Hz)	4924.08 ± 86.593 (4865-5155)	5262.75 ± 164.14 (5073-5487)	5003.58 ± 75.675 (4868-5155)	4917 ± 70.116 (4865-5073)	4975 ± 86.58 (4860-5120)	5025 ± 73.21 (4920-5145)	4910 ± 68.23 (4850-5140)
2	6640.58 ± 98.74 (6522-6873)	7099.58 ± 251.43 (6729-7350)	6650 ± 74.385 (6491-6777)	6513.16 ± 93.113 (6315-6625)	6555 ± 72.38 (6507-6642)	6560 ± 95.354 (6495-6615)	6570 ± 78.134 (6315-6615)
3	8300.75 ± 107.933 (8209-8495)	8807.83 ± 375.79 (8385-9317)	8320.5 ± 156.71 (8018-8591)	8178.16 ± 108.102 (7971-8385)	8343 ± 123.64 (8260-8535)	8290 ± 103.22 (8135-8350)	8307 ± 106.432 (8270-8345)
4	10 010.66 ± 136.71 (9736-10 214)	10 593 ± 313.01 (10 145-10 973)	9998.91 ± 116.06 (9832-10 214)	9851.91 ± 115.5 (9627-10 042)	9960 ± 116.01 (9832-10 060)	10 050 ± 132.05 (9809-10 150)	9950 ± 125.34 (9854-10 050)
5	11 654 ± 101.842 (11 550-11 932)			11 508.08 ± 59.651 (11 387-11 594)			
6	13 281.75 ± 68.038 (13 173-13 459)						
7	14 967 ± 78.165 (14 795-15 114)						
8	18 422.75 ± 107.899 (18 327-18 614)						

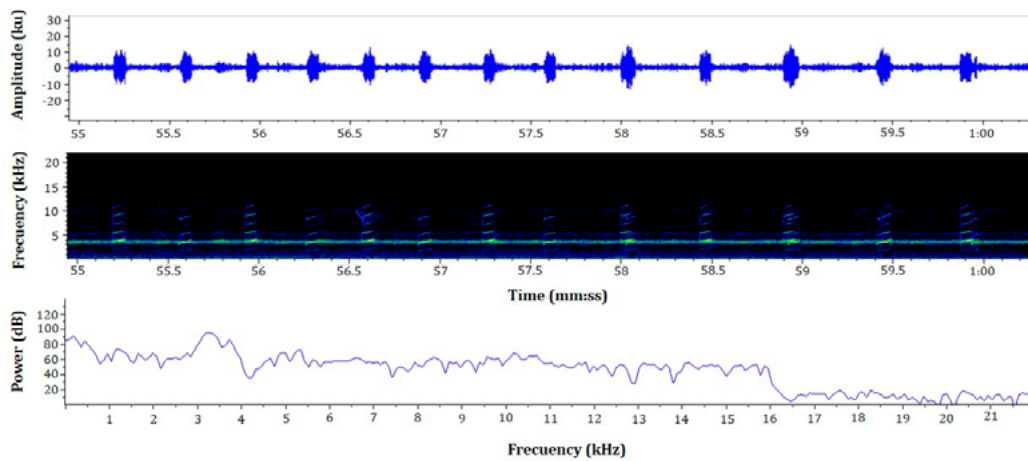


Figure 1. Oscillogram, spectrogram, and power spectrum of the advertisement call of *Leucostethus fraterdanieli* (male 02 in Table 1, SVL 22.7 mm), from Manizales, Caldas, Colombia. Visualization of five seconds of recording; temperature 27 °C.

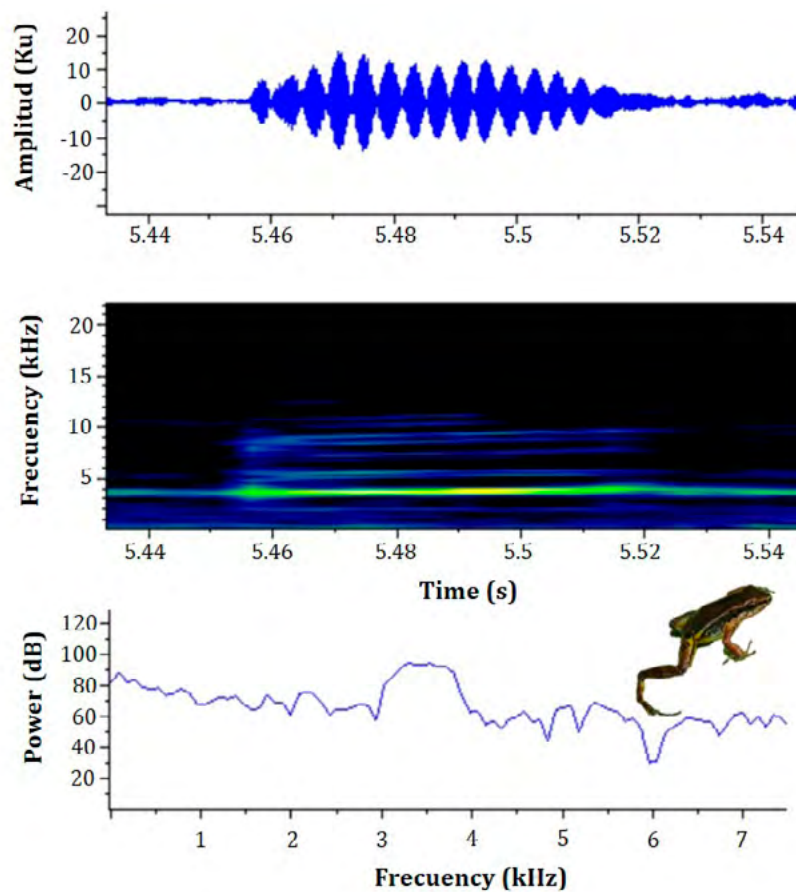


Figure 2. Oscillogram, spectrogram, and power spectrum of a pulsed note of an adult individual (male 06 in Table 1, SVL 21.5 mm) of the *Leucostethus fraterdanieli* complex from Manizales, Caldas, Colombia. Temperature, 21 °C.

a calling activity from early morning (06:30-07:00 h) to the late afternoon (18:00-18:30 h). In contrast, we observed at night that parental males frequented leaf litter or rocks at the edge of small streams, carrying up to 15 larvae on their backs (N = 4, range 12-15 larvae; [Figure 3C](#)). Tadpoles aggregated at the edges of small streams and creeks (0.4-3.5 m width), with abundant sand and rocky soil ([Figure 3D](#)).

Discussion

Since anuran acoustic signals are species-specific and play a critical role in species recognition and mate choice ([Wells, 2007](#)), advertisement call analysis is a powerful tool to recognize distinct species. The advertisement call of the population of the *L. fraterdanieli* complex described here can be characterized as a long train of

repeated ‘peep’ notes, with a maximum frequency up to 4000 Hz. In general terms, this call seems to be similar to that ‘chirp call’ type defined by [Lötters *et al.* \(2003\)](#). The call here described is similar in general patterns to that described by [Grant & Castro \(1998\)](#) as the advertisement call of *L. brachistriatus* (as *C. fraterdanieli*), based on two males collected within a cloud forest in the western slopes of the Cordillera Occidental, Department of Valle del Cauca. The call was described like a single note repeated up to 300 times, with frequencies between 3156-3250 Hz and harmonics occurring at 4800-6400 Hz (Individual 1), and 3593-3656 Hz and harmonics in the bands of 5500-7400 Hz (Individual 2; [Grant & Castro, 1998](#)). However, there is a difference in the note duration. For the population of the Western Cordillera, notes ranged between 38-49 ms ([Grant & Castro, 1998](#)), while for the population that we analyzed in the Central Andes, note duration was between 63-122 ms.



Figure 3. A, habitat of *Leucostethus fraterdanieli* complex at the Botanical Garden of the Universidad de Caldas, Manizales, Colombia, 2150 m a.s.l.; B, calling male concealed in a caulinar fallen leaf of bamboo (*Guadua angustifolia*) at this site; C, male carrying tadpoles on dorsum, before depositing them in a body of water, from the Chisperos creek, located near Manizales; D, tadpole at a margin of the Chisperos creek. Photographs by J. A. Rojas-Morales.

Recently, [Marín *et al.* \(2018\)](#) presented a bioacoustic comparison between *L. fraterdanieli* and *L. jota* from the Central Cordillera, in Antioquia. The call described for *L. fraterdanieli* includes values between 3100-3500 Hz, a rate of 98 ± 12.5 calls.min⁻¹, with a call duration of 0.09 ± 0.03 s and intervals between calls 0.55 ± 0.16 s. These results are quite different in temporal traits from those of *L. fraterdanieli* complex from Manizales (call rate 98 vs 143 calls.min⁻¹). Compared to *L. jota*, the advertisement call of the population of *L. fraterdanieli* complex presented here shows major differences in temporal parameters. A higher call duration (0.14 vs. 0.079 s), lower call rate (21.8 vs. 143 calls.min⁻¹), and higher call interval (2.55 vs. 0.289 s) differentiates *L. jota* from *L. fraterdanieli* complex from Manizales. [Guevara-Molina *et al.* \(2017\)](#) presented information on the biology of *L. fraterdanieli* (*L. brachistriatus sensu Grant et al., 2017*), including an oscillogram and spectrogram of a call from the Department of Quindío, in the central Andes, but no additional details were provided.

Our results show that the advertisement call of the population of *L. fraterdanieli* complex from Manizales is quite different from other known *Leucostethus*

(formerly within *Colostethus*) from the Upper Cauca river valley and the Central Cordillera ([Grant & Castro, 1998](#); [Marín *et al.*, 2018](#)). However, individuals from Manizales are morphologically indistinguishable from *L. fraterdanieli sensu stricto* (fide [Grant *et al.*, 2017](#)). An integrative approach, including a molecular analysis and a study of larval morphology, is badly needed to assess the taxonomic status of this and other populations under the name of *L. fraterdanieli* in the Colombian Andes.

Life history data for Colostethinae frogs are limited ([Wells, 1980](#); [Coloma, 1995](#); [Duellman 2004](#)). Oviposition sites recorded in these frogs include shadow locations in mosses and under stones ([Coloma, 1995](#)). Parental care of the embryos and eggs are carried out by males; however, in species such as *Colostethus panamensis*, *C. pratti* and *C. argyrogaster*, the female is in charge of this function ([Wells, 1980](#); [Duellman, 2004](#)). Despite this, microhabitat for oviposition is unknown for a large proportion of *Colostethus* and *Leucostethus* species. For *L. fraterdanieli* complex from Manizales, we observed one oviposition site located on a dead leaf of a terrestrial bromeliad ([Figure 4A](#)).

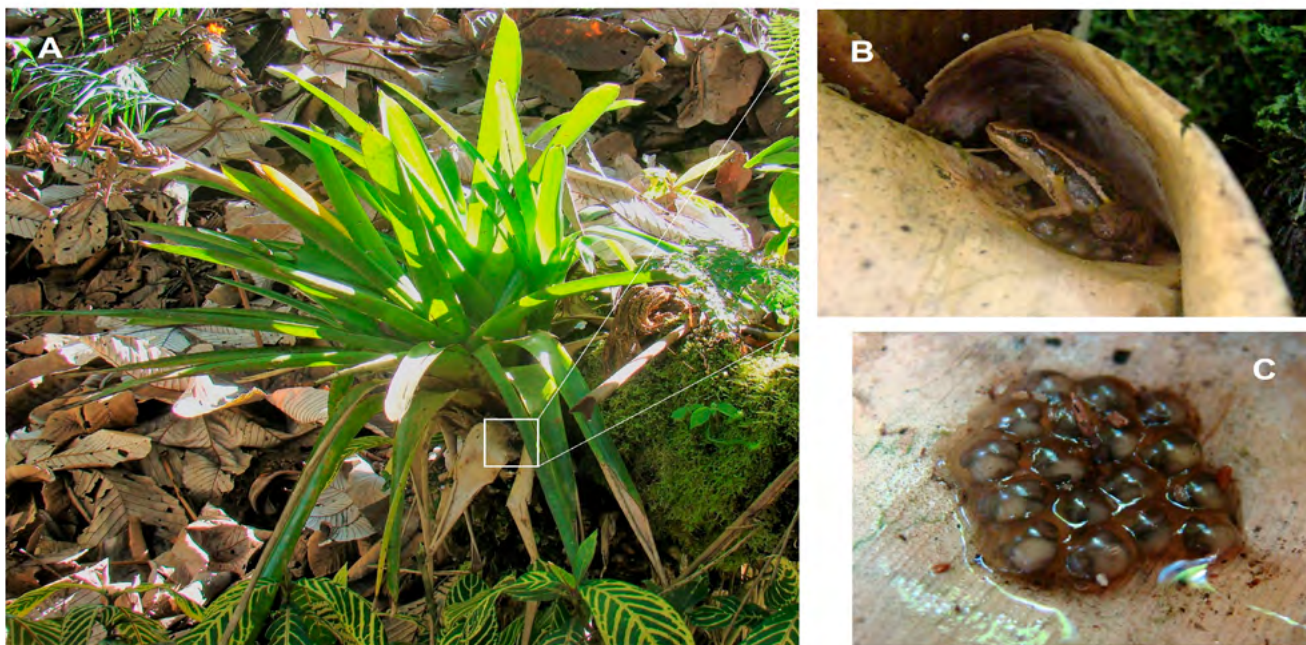


Figure 4. Oviposition site of individual of the *Leucostethus fraterdanieli* complex in the Botanical Garden of the Universidad de Caldas, Manizales, Colombia, 2150 m a.s.l. A, terrestrial bromeliad (*Aechmea* sp.) used as oviposition site; B, detail of the leaf where a male (SVL 23.7 mm) is attending a clutch in ventral brooding-behavior; C, egg-clutch with 17 embryos. Photographs by J. A. Rojas-Morales.

To our knowledge, this is the first reference for an oviposition site in *Leucostethus*. We also observed males performing parental care –i. e., egg-brooding– of an egg-clutch, and transporting larvae to the water, which show the role of males in the parental care of embryos until they continue their aquatic phase. However, reproductive activity and behavior patterns may vary from one population to another and from year to year (Wells, 1980); for that reason, is important to monitor this population over several years, in order to obtain data on territorial behavior, courtship, amplexus, and parental care of the eggs and embryos. The distinctive call, its preference for forested habitats and its abundance predicted through the calls, make this species a good model for bioacoustic monitoring to detect population trends in these Andean highly transformed ecosystems.

Acknowledgments

JAR is deeply grateful to Paul D. Gutiérrez for the loan of the recording equipment, and to José Humberto Gallego for the permit access at the Botanical Garden of the Universidad de Caldas. We are grateful to Moisés Escalona, Estefany Cano and two anonymous reviewers for their helpful comments on the manuscript.

References

- Acosta-Galvis, A. R. (2000). Ranas, salamandras y caecilias (Tetrapoda: Amphibia) de Colombia. *Biota Colombiana*, 1, 289-319.
- Angulo, A. & Reichle, S. (2008). Acoustic signals, species diagnosis, and species concepts: the case of a new cryptic species of *Leptodactylus* (Amphibia, Anura, Leptodactylidae) from the Chapare region, Bolivia. *Zoological Journal of the Linnean Society*, 152, 59-77. <https://doi.org/10.1111/j.1096-3642.2007.00338.x>
- Bernal, M. H. & Lynch, J. D. (2008). Review and analysis of altitudinal distribution of the Andean anurans in Colombia. *Zootaxa*, 1826, 1-25. <https://doi.org/10.11646/zootaxa.1826.1.1>
- Bernal, M. H., Páez, C. A. & Vejarano, M. A. (2005). Composición y distribución de los anfibios de la cuenca del río Coello (Tolima), Colombia. *Actualidades Biológicas*, 27, 87-92.
- Bioacoustics Research Program. (2011). Raven Pro: Interactive sound analysis software (Version 1.4) [Computer software]. Ithaca, NY: The Cornell Lab of Ornithology. Available from: <http://www.birds.cornell.edu/raven>.
- Brown, J. L., Twomey, E., Pepper, M. & Rodríguez, M. S. (2008a). Revision of the *Ranitomeya fantastica* species complex with description of two new species from Central Peru (Anura: Dendrobatidae). *Zootaxa*, 1823, 1-24. <https://doi.org/10.11646/zootaxa.1823.1.1>
- Brown, J. L., Morales, V. & Summers, K. (2008b). Divergence in parental care, habitat selection and larval life history between two species of Peruvian poison frogs: an experimental analysis. *Journal of Evolutionary Biology*, 21, 1534-1543. <https://doi.org/10.1111/j.1420-9101.2008.01609.x>
- Brown, J. L., Twomey, E., Morales, V. & Summers, K. (2008c). Phytotelm size in relation to parental care and mating strategies in two species of Peruvian poison frogs. *Behaviour*, 145, 1139-1165. <https://doi.org/10.1163/156853908785387647>
- Brown, J. L., Twomey, E., Amézquita, A., De Souza, M., Caldwell, J. P., Lötters, S., Von May, R., Melo-Sampaio, P. R., Mejía-Vargas, D., Pérez-Peña, P., Pepper, M., Poelman, E. H., Sánchez-Rodríguez, M. & Summers, K. (2011). A taxonomic revision of the Neotropical poison frog genus *Ranitomeya* (Amphibia: Dendrobatidae). *Zootaxa*, 3083, 1-120. <https://doi.org/10.11646/zootaxa.3083.1.1>
- Cárdenas-Ortega, S. & Herrera-Lopera, M. (2016). *Colostethus fraterdanieli* (Santa Rita Rocket frog, Rana Cohete). Anurophagy. *Herpetological Review*, 47(3), 438.
- Castro-Herrera, F. & Vargas-Salinas, F. (2008). Anfibios y reptiles en el departamento del Valle del Cauca, Colombia. *Biota Colombiana*, 9, 251-277.
- Castroviejo-Fisher, S., Señaris, J. C., Ayarzagüena, J. & Vilá, C. (2008). Resurrection of *Hyalinobatrachium orocostale* and notes on the *Hyalinobatrachium orientale* species complex (Anura: Centrolenidae). *Herpetologica*, 64, 472-484. <https://doi.org/10.1655/07-049R2.1>
- Coloma, L. A. (1995). Ecuadorian frogs of the genus *Colostethus* (Anura: Dendrobatidae). *The University of Kansas Natural History Museum Miscellaneous Publications*, 87, 1-72. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.16171>
- Corpocaldas (Corporación Autónoma Regional del Caldas). (2012). *Agenda para la gestión ambiental del municipio de Manizales, departamento de Caldas*. Manizales, Colombia: Corpocaldas, Fundación Biodiversa, Alcaldía de Manizales. 114 pp.
- Duellman, W. E. (2004). Frogs of the genus *Colostethus* (Anura; Dendrobatidae) in the Andes of northern Perú. *Scientific Papers Natural History Museum The University of Kansas*, 35, 1-49. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.8467>

- Frost, D. R. (2020). Amphibian Species of the World: an Online Reference. Version 6.0 (*Date of access*). Electronic Database accessible at <http://research.amnh.org/herpetology/amphibia/index.html>. American Museum of Natural History, New York, USA. Downloaded on 05 April 2020.
- Gosner, K. L. (1960). A simplified table for staging anuran embryos and larvae with notes on identification. *Herpetologica*, 16, 183-190.
- Grant, T. & Castro, F. (1998). The cloud forest *Colostethus* (Anura, Dendrobatidae) of a region of the Cordillera Occidental of Colombia. *Journal of Herpetology*, 32, 378-392.
<https://doi.org/10.2307/1565452>
- Grant, T., Frost, D. R., Caldwell, J. P., Gagliardo, R., Haddad, C. F. B., Kok, P. J. R., Means, D. B., Noonan, B. P., Schargel, W. E. & Wheeler, W. C. (2006). Phylogenetic systematics of dart-poison frogs and their relatives (Amphibia: Athesphatanura: Dendrobatidae). *Bulletin of the American Museum of Natural History*, 229, 1-262.
[https://doi.org/10.1206/0003-0090\(2006\)299\[1:PSO-DFA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1206/0003-0090(2006)299[1:PSO-DFA]2.0.CO;2)
- Grant, T., Rada, M., Anganoy-Criollo, M., Batista, A., Dias, P. H., Jeckel, A. M., Machado, D. J. M. & Rueda-Almonacid, J. V. (2017). Phylogenetic systematics of dart-poison frogs and their relatives revisited (Anura: Dendrobatoidea). *South American Journal of Herpetology*, 12, 1-90.
<https://doi.org/10.2994/SAJH-D-17-00017.1>
- Guevara-Molina, S. C., Benítez-Cubillos, L. & Londoño-Guarnizo, C. A. (2017). *Colostethus fraterdanieli*. *Catálogo de Anfibios y Reptiles de Colombia*, 3(2), 14-19.
- Holdridge, L. R. (1982). *Ecología basada en zonas de vida*. San José, Costa Rica: IICA. 215 pp.
- IUCN SSC Amphibian Specialist Group. (2017). *Colostethus fraterdanieli*. The IUCN Red List of Threatened Species 2017: e.T55083A85893631.
<https://doi.org/10.2305/IUCN.UK.2017-3.RLTS.T55083A85893631.en>
- Köhler, J., Jansen, M., Rodríguez, A., Kok, P. J., Toledo, L. F., Emmrich, M., Glaw, F., Haddad, C. F. B., Mark-Oliver, R. & Vences, M. (2017). The use of bioacoustics in anuran taxonomy: theory, terminology, methods and recommendations for best practice. *Zootaxa*, 4251, 1-124.
<https://doi.org/10.11646/zootaxa.4251.1.1>
- Lötters, S., Glaw, F., Köhler, J. & Castro, F. (1999). On the geographic variation of the advertisement call of *Dendrobates histrionicus* Berthold, 1845 and related forms from northwestern South America (Anura: Dendrobatidae). *Herpetozoa*, 12, 23-38.
- Lötters, S., Reichle, S. & Jungfer, K. H. (2003). Advertisement calls of Neotropical poison frogs (Amphibia: Dendrobatidae) of the genera *Colostethus*, *Dendrobates* and *Epipedobates*, with notes on dendrobatid call classification. *Journal of Natural History*, 37, 1899-1911.
<https://doi.org/10.1080/00222930110089157>
- Lötters, S., Jungfer, K. H., Henkel, F. W. & Schmidt, W. (2007). *Poison Frogs. Biology, Species & Captive Care*. Frankfurt am Main. Ed. Chimaira. 668 pp.
- Marín, C. M., Molina-Zuluaga, C., Restrepo, A., Cano, E. & Daza, J. M. (2018). A new species of *Leucostethus* (Anura: Dendrobatidae) from the Eastern versant of the Central Cordillera of Colombia and the phylogenetic status of *Colostethus fraterdanieli*. *Zootaxa*, 4461, 359-380.
<https://doi.org/10.11646/zootaxa.4464.3.3>
- Márquez, R., Mejía-Vargas, D., Palacios-Rodríguez, P., Ramírez-Castañeda, V. & Amézquita, A. (2017). A new species of *Andinobates* (Anura: Dendrobatidae) from the Urabá region of Colombia. *Zootaxa*, 4290, 531-546.
<https://doi.org/10.11646/zootaxa.4290.3.7>
- Myers, C. W., Rodríguez, L. O. & Icochea, J. I. (1998). *Epipedobates simulans*, a new cryptic species of poison frog from southeastern Peru, with notes on *E. macero* and *E. petersi* (Dendrobatidae). *American Museum Novitates*, 3238, 1-20.
- Padial, J. M., Köhler, J., Muñoz, A. & De La Riva, I. (2008). Assessing the taxonomic status of Tropical frogs through bioacoustics: geographical variation in the advertisement calls in the *Eleutherodactylus discoidalis* species group (Anura). *Zoological Journal of the Linnean Society*, 152, 353-365.
<https://doi.org/10.1111/j.1096-3642.2007.00341.x>
- Pritti, H., Roshmi, R. S., Ramya, B., Sudhira, G., Aravind, N. A. & Gururaja, K. V. (2016). Integrative taxonomic approach for describing a new cryptic species of Bush Frog (*Raorchestes*: Anura: Rhacophoridae) from the Western Ghats, India. *PLOS ONE*, 11(3), e0149382
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0149382>
- Rivero, J. A. & Serna, M. A. (1986). Dos nuevas especies de *Colostethus* (Amphibia, Dendrobatidae). *Caldasia*, 15, 525-531.
- Rivero, J. A. & Serna, M. A. (1995). Nuevos *Colostethus* (Amphibia, Dendrobatidae) del departamento de Antioquia, Colombia, con la descripción del renacuajo de *Colostethus fraterdanieli*. *Revista de Ecología Latinoamericana*, 2, 45-58.
- Rojas-Morales, J. A., Arias-Monsalve, H. F. & González-Durán, G. A. (2014). Anfibios y reptiles de la región centro-sur del departamento de Caldas, Colombia. *Biota Colombiana*, 15(1), 73-93.

- Sánchez, D. A. (2013). Larval morphology of Dart-Poison Frogs (Anura: Dendrobatoidea: Aromobatidae and Dendrobatidae). *Zootaxa*, 3637, 569-591.
<https://doi.org/10.11646/zootaxa.3637.5.5>
- Santos, J. C., Coloma, L. A., Summers, K., Caldwell, J. P., Ree, R. & Cannatella, D. C. (2009). Amazonian amphibian diversity is primarily derived from late Miocene Andean lineages. *Plos Biology*, 7.3: e1000056
<https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1000056>
- Silverstone, P. A. (1971). Status of certain frogs of the genus *Colostethus*, with descriptions of new species. *Contributions in Science. Natural History Museum of Los Angeles County*, 215, 1-8.
- Silverstone, P. A. (1975). Two new species of *Colostethus* (Amphibia: Anura: Dendrobatidae) from Colombia. *Contributions in Science. Natural History Museum of Los Angeles County*, 268, 1-10.
- Toledo, L. F., Martins, I. A., Bruschi, D. P., Passos, M. A., Alexandre, C. & Haddad, C. F. (2015). The anuran calling repertoire in the light of social context. *Acta Ethologica*, 18, 87-99.
<https://doi.org/10.1007/s10211-014-0194-4>
- Twomey, E. & Brown, J. L. (2008). A partial revision of the *Ameerega hahneli* complex (Anura: Dendrobatidae) and a new cryptic species from the East-Andean versant of Central Peru. *Zootaxa*, 1757, 49-65.
<https://doi.org/10.11646/zootaxa.1757.1.3>
- Vargas, W. G. (2002). *Plantas de las montañas del Quindío y los Andes centrales de Colombia*. Manizales, Colombia: Universidad de Caldas. 812 pp.
- Vockenhuber, E. A., Hödl, W. & Karpfen, U. (2008). Reproductive behaviour of the glass frog *Hyalinobatrachium valerioi* (Anura: Centrolenidae) at the tropical stream Quebrada Negra (La Gamba, Costa Rica). *Stapfia*, 88, 335-348.
- Wells, K. D. (1980). Behavioral ecology and social organization of a dendrobatid frog (*Colostethus inguinalis*). *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 6, 199-209.
<https://doi.org/10.1007/BF00569201>
- Wells, K. D. (2007). *The Ecology and Behavior of Amphibians*. The University of Chicago Press, Chicago, 1148 pp.
<https://doi.org/10.7208/chicago/9780226893334.001.0001>

Julián A. Rojas-Morales

Corporación Universitaria Santa Rosa de Cabal (UNISARC)

Santa Rosa de Cabal, Colombia

julian.herpetologia@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-3312-8022>

Enrique La Marca

Universidad de Los Andes

Mérida, Venezuela

enrique.lamarca@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-6508-3375>

Héctor E. Ramírez-Chaves

Museo de Historia Natural, Universidad de Caldas

Manizales, Colombia

hector.ramirez@ucaldas.edu.co

<https://orcid.org/0000-0002-2454-9482>

**Advertisement call of a population of the nurse frog
Leucostethus fraterdanieli (Anura: Dendrobatidae),
with notes on its natural history**

Citación del artículo: Rojas-Morales, J.A., La Marca, E. & Ramírez-Chaves, H.E. (2021). Advertisement call of a population of the nurse frog *Leucostethus fraterdanieli* (Anura: Dendrobatidae), with notes on its natural history. *Biota Colombiana*, 22(1), 122-132.

<https://doi.org/10.21068/c2021.v22n01a08>

Received: May 8, 2020

Accepted: November 9, 2020

Vocalizaciones asociadas al comportamiento colonial de *Cacicus chrysonotus leucoramphus* (Icteridae) en Colombia

Associated vocalizations to colonial behaviour of *Cacicus chrysonotus leucoramphus* (Icteridae) in Colombia

David Alejandro Guaitarilla  , Juan Pablo Ortiz-Pérez  , Jhon Jairo Calderón-Leytón  , Miguel A. Gómez-Martínez  , Carlos Mauricio Trujillo-Torres  , Ronald A. Fernández-Gómez  

Resumen

Con el objetivo de evaluar la asociación entre las vocalizaciones y los comportamientos del cacique montano norteño (*Cacicus chrysonotus leucoramphus*), se tomaron registros acústicos y conductuales de la especie en cuatro localidades de los Andes de Nariño, en el sur de Colombia. Se registraron seis tipos de vocalizaciones asociadas a por lo menos una de las tres categorías conductuales identificadas (vigilancia, alerta y defensa territorial), y una vocalización registrada en un único evento de cortejo. Vocalizaciones con valores más altos de ancho de banda y modulación de frecuencia resultaron asociadas a defensa territorial, mientras que vocalizaciones con valores bajos de ancho de banda y poca modulación cumplieron funciones de vigilancia y alerta. Los resultados indican similitudes en el comportamiento vocal y social con respecto a estudios en otras especies como *Cacicus cela* y *C. haemorrhous*. *C. c. leucoramphus* utiliza vocalizaciones específicas en un determinado contexto conductual, pudiendo algunas de ellas ser reutilizadas en varios comportamientos. Este estudio describe por primera vez el contexto social en el que se asocian las vocalizaciones y conductas en esta especie.

Palabras clave. Avifauna. Bioacústica. Canto. Colonialidad. Comportamiento social.

Abstract

In order to assess the association between the vocalizations and the displayed behaviors of the Golden-shouldered Mountain Cacique (*Cacicus chrysonotus leucoramphus*), we sampled both acoustic and behavioral features at three sites in the Andes of Nariño, southern Colombia. We obtained seven vocalization types, six of them associated with at least one of the three identified behavioral categories (vigilance, alertness, and territorial defense), and one linked with a courtship exhibition. Vocalizations with higher values of bandwidth and frequency modulations were associated with territorial behavior, whereas those with lower values of bandwidth and few frequency modulations were associated with vigilance and alert. Results showed similarities in the acoustic structure of vocalizations and the related social context with other species as the *C. cela* and *C. haemorrhous*. *C. c. leucoramphus* uses specific types of vocalizations in a particular social context, with some vocalizations used in different behaviors. This study describes for the first time the social context in which vocalizations are associated with their behaviors.

Keywords. Birds. Bioacoustics. Coloniality. Social behavior. Song.

Introducción

La organización grupal es una característica del comportamiento social animal que ha evolucionado sobre las bases de conductas colectivas en las especies (Rubenstein & Alcock, 2018). Se ha demostrado que los animales que presentan este tipo de organización tienen mayor eficiencia en la búsqueda de alimento, cuidado de crías, dominancia de territorios más amplios y en la vigilancia (Alcock, 2001; Santos & Macedo, 2011; Beauchamp, 2015; Wittwer et al., 2017; Boucherie et al., 2019). Sin embargo, las conductas territoriales entre machos para el apareamiento, las disputas por espacios y recursos alimenticios, y la competencia entre hembras por sitios de nidificación, son algunas de las evidencias de los costos de la vida en grupo (Alcock, 2001; Schradin et al., 2010; Rubenstein & Alcock, 2018).

La colonialidad, como un sistema de organización de grupo, está influenciada exclusivamente por factores sociales (Gross & Macmillan, 1981) y ha sido documentada en insectos, peces, reptiles, mamíferos y aves (Alexander, 1974; Rolland et al., 1998). La dinámica de la convivencia bajo un sistema colonial determina la existencia de una estructura jerárquica de dominancia, con individuos ocupando posiciones de privilegio con roles reproductivos, e individuos subordinados con labores de protección y mantenimiento de la colonia (Alcock, 2001; Jungwirth, et al., 2015). Este sistema produce el despliegue de conductas sociales como la defensa colectiva ante depredadores (Robinson, 1997; Beauchamp, 2015; Jungwirth, et al., 2015), o la competencia intraespecífica por recursos y apareamiento (Koenig et al., 1995; Price et al., 2006; Duijns & Piersma, 2014; Miles & Fuxjager, 2018; Boucherie et al., 2019), las cuales se transmiten entre individuos dentro de un sistema de comunicación (Bradbury & Vehrencamp, 2011).

En las especies que coexisten bajo este sistema, los individuos usan señales para identificarse entre sí y coordinar tareas (Wittwer et al., 2017); estas señales pueden utilizar los medios visual, químico, táctil o acústico (Marler, 1967; Guilford & Dawkins, 1991; Carazo & Font, 2010; Bradbury & Vehrencamp, 2011). Dentro de los distintos medios de comunicación, el acústico es uno de los más empleados, identificándose diferentes tipos de señales: neonatales, que mantienen la interacción entre la cría y sus progenitores; integrativas de cohesión grupal; señales de competencia, que demarcan territorialidad y jerarquía social; y señales sexuales, que se emiten para el cortejo (Tirado et al., 2004).

En las aves, el medio acústico representa el método de comunicación más utilizado dentro del contexto social (Ladich & Winkler, 2017).

Las vocalizaciones en las aves presentan estructuras acústicas variadas y funciones específicas (Catchpole & Slater, 2008). Por ejemplo, algunas aves como la viuda senegalesa (*Vidua chalybeata*), el zanate caribeño (*Quiscalus lugubris*), o el cacique lomiamarillo (*Cacicus cela*), utilizan señales acústicas con propósitos específicos como la alerta grupal, la competencia intraespecífica por territorios y el cortejo (Payne, 1979; Feekes, 1982; Jaramillo & Burke, 1999). Las vocalizaciones emitidas para comunicar una determinada conducta presentan características particulares y, en algunas especies, pueden variar estructural y espectralmente, de acuerdo con el contexto (Vallet et al., 1998; Gil & Gahr, 2002; Catchpole & Slater, 2008). Payne (1979) demostró que *V. chalybeata* emite cantos de mayor duración en situaciones de persecución entre machos y cantos con modulación de frecuencia para el cortejo; por su parte, Price et al. (2006) encontraron que la oropéndola de Moctezuma (*Psarocolius montezuma*) modifica los valores mínimos de frecuencia en la que emite sus cantos territoriales para disuadir a su competencia y obtener beneficios reproductivos, lo cual indica que las características de las vocalizaciones pueden variar en función de las interacciones u organización social en las que se desarrollan algunas especies. Cuanto más complejo es el sistema de organización grupal, mayor variedad de señales y funciones dentro de las interacciones sociales presenta su sistema de comunicación asociado (Freeberg et al., 2012; Leighton, 2017; Wittwer et al., 2017; Miles & Fuxjager, 2018).

Diferentes especies del género *Cacicus* han evidenciado organización colonial; tal es el caso de *C. cela* (Feekes, 1982; Robinson, 1985a; Trainer, 1987; Thieltges et al., 2014), el cacique lomirrojo (*C. haemorrhous*; Thieltges et al., 2014) y el cacique de yelmo (*C. oseryi*; Leak & Robinson, 1989). En *C. cela*, se ha reportado una organización colonial con nidos densamente agregados a nivel del dosel del bosque (Feekes, 1982; Thieltges et al., 2014), encontrándose desde 10 hasta 100 nidos activos aproximadamente por cada árbol (Robinson, 1986); este mismo patrón de distribución de los nidos también se ha reportado en colonias de *C. haemorrhous* (Thieltges et al., 2014). Estas especies se caracterizan por tener cantos variados como producto de procesos evolutivos ligados a la selección sexual de los machos, mostrando repertorios amplios y versátiles (Price & Lanyon, 2004).

Las vocalizaciones en estas especies varían tanto estructuralmente como en términos espectro-temporales, que abarcan, cambios anuales, cambios entre períodos de reproducción o incluso cambios dentro de una misma temporada reproductiva (Thieltges et al., 2014).

En el presente estudio se describen aspectos del comportamiento colonial y de las vocalizaciones del cacique montano norteño (*Cacicus chrysonotus leucoramphus*), una especie de hábitos coloniales de la cual existen vacíos de información en lo referente a su comportamiento social y vocal. Para esta especie, se ha documentado que anida en colonias pequeñas, (i.e., de tres a seis nidos en un árbol); en cuanto a sus vocalizaciones se ha reportado que produce al menos tres tipos de llamados, con repeticiones de notas y varios armónicos (Fraga, 2020). En este estudio se evaluó la asociación existente entre las vocalizaciones que emiten los machos y los comportamientos que exhiben dentro de su contexto social. Para conseguir este objetivo, se realizó una descripción de su comportamiento vocal y social exhibido dentro de la colonia y se evaluó estadísticamente la asociación entre tipos de vocalizaciones y conductas observadas.

Materiales y métodos

Área de estudio. El estudio se realizó en la laguna de La Cocha (Nariño, Colombia), un lago tropical de alta montaña que hace parte del humedal de importancia internacional Ramsar Laguna de La Cocha y que está asociado a ecosistemas de bosque montano (López-Martínez y Madroñero-Palacios, 2015). Las colonias de observación se ubicaron en las localidades de El Motilón (1°7'1.42"N, 77°10'29.344"O), El Romerillo (1°5'6.71"N, 77°10'29.347"O), Santa Rosa (1°7'25.663"N, 77°7'10.211"O) y Santa Teresita (1°5'2.749"N, 77°7'13.634"O), entre 2800 y 3200 m s.n.m. (Figura 1).

Especie de estudio. El cacique montano, *Cacicus chrysonotus*, es una especie de bosque montano húmedo y bosque de niebla, que se distribuye ampliamente a lo largo de la zona andina, desde Venezuela hasta Bolivia, entre 2000 y 3600 m s. n. m. La subespecie, *C. chrysonotus leucoramphus* presenta principalmente una coloración negra, con las plumas de la espalda baja y las coberteras supracaudales amarillas, y tiene un parche amarillo en las alas. Los machos adultos presentan un mayor tamaño que el de las hembras, y tienen el iris de color azul, que lo diferencia de los individuos juveniles, que tienen

el iris de color marrón oscuro. Su período reproductivo abarca desde febrero hasta julio (Fraga, 2020).

Fase de campo. Se realizaron un total de 12 salidas entre septiembre y diciembre de 2018, en las que se monitorearon 11 machos adultos en cuatro colonias de anidación. Cada colonia fue monitoreada durante su fase de actividad durante una jornada continua de 12 horas, desde las 05:00 hasta las 17:00 h, para un total de esfuerzo de muestreo de 144 horas. Durante el monitoreo se realizaron grabaciones acústicas y registros conductuales sobre individuos machos adultos.

Registro conductual y acústico. El método de muestreo fue tipo barrido (scan), evaluando el grupo completo en intervalos de diez minutos, durante los cuales se registró el comportamiento de cada individuo en ese instante, complementado con muestreo de tipo focal en el que se las observaciones se enfocaron en un solo individuo (Martin & Bateson, 2007). Las observaciones realizadas se complementaron con registro fotográfico y de video, utilizando una cámara Nikon D3400 con lente 18-55 mm VR (Vibration Reduction). De igual manera, se realizaron registros acústicos, empleando dos grabadoras portátiles ROLAND R26, con micrófonos condensadores unidireccionales RODE NTG2 a una frecuencia de muestreo de 44.1 kHz, en formato WAV de 32-bits (Budney & Grotke 2013; Price et al., 2004). Las grabaciones fueron limitadas a un intervalo de hasta 5 minutos en paralelo con la toma de datos de las conductas. En total se obtuvieron 221 vocalizaciones de 11 machos adultos. La descripción de las conductas se realizó con base en literatura referente al comportamiento animal (Stutchbury & Morton, 2001; Beauchamp, 2015; Rubenstein & Alcock, 2018) y en investigaciones del comportamiento colonial de *C. cela* (Feekes, 1982; Robinson, 1985b; Trainer, 1987; Robinson, 1997) y de *C. haemorrhous* (Thieltges et al., 2013).

Análisis de vocalizaciones. Las grabaciones se examinaron usando el software Raven Pro v1.5 (Bioacoustics Research Program, 2011; ventana: Hann, tamaño de DFT: 1024 puntos, superposición: 90 %). Mediante inspección visual se seleccionaron las grabaciones de mejor calidad y se determinaron tipos de vocalizaciones. Se midieron aquellas vocalizaciones con al menos cuatro notas emitidas de forma continua (i.e., tiempo entre notas no debe ser mayor a 0.3 segundos), con una diferencia de tiempo entre cada vocalización al menos tres veces mayor con respecto a la diferencia de tiempo entre cada nota (Feekes, 1982). Se midieron siete variables temporales y espectrales (Figura 2):

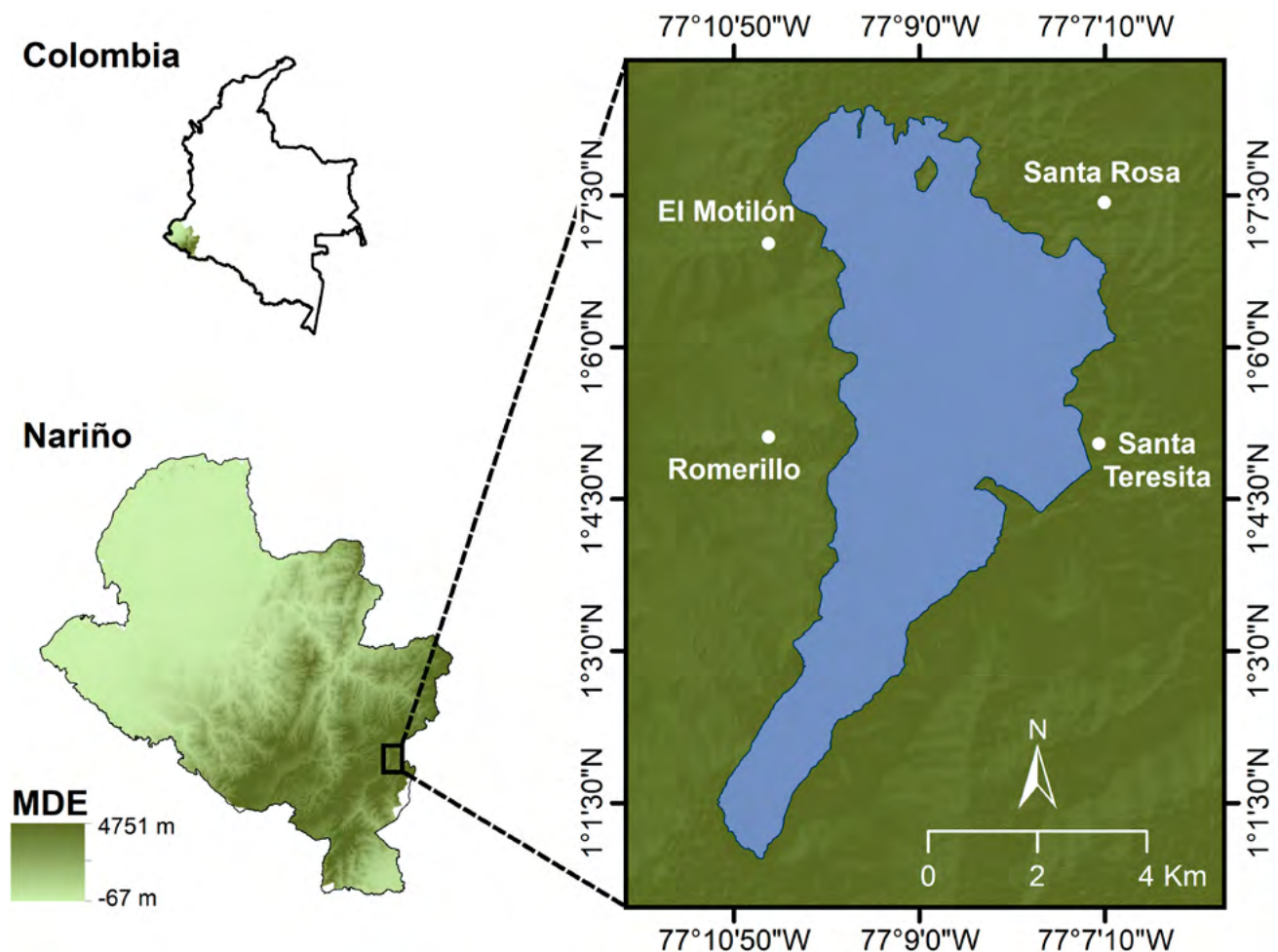


Figura 1. Ubicación geográfica de las cuatro colonias estudiadas de *Cacicus chrysonotus leucoramphus* en el área del humedal Ramsar Laguna de La Cocha, Nariño, Colombia, mostrando el modelo digital de elevación (MDE).

Figure 1. Geographic location for studied colonies of *Cacicus chrysonotus leucoramphus* in the Laguna de La Cocha Ramsar site, Nariño, Colombia, showing the digital elevation model (MDE).

(1) número de notas (número de notas que componen cada vocalización medida), (2) duración de la vocalización en segundos (el intervalo entre el inicio de la primera nota y la nota final), (3) frecuencia baja en Hz (la posición de la frecuencia más baja en el espectro), (4) frecuencia alta en Hz (la posición de la frecuencia más alta en el espectro), (5) ancho de banda de frecuencia al 90 % en Hz (la diferencia entre estas mediciones donde se encuentra el 90 % de la potencia de la señal), (6) frecuencia pico en Hz (la frecuencia con mayor potencia en relación con otras frecuencias dentro de la vocalización), y (7) frecuencia pico más baja en Hz (el mínimo valor de frecuencia en donde se encuentra la mayor

potencia de la señal); la medición de variaciones en este parámetro ha sido importante en investigaciones de disputas territoriales y atracción de hembras en la oropéndola de, *Psarocolius montezuma* (Price *et al.*, 2006; Miles & Fuxjager, 2018). Las mediciones de las variables espectrales se hicieron considerando un umbral de 20 decibelios (Figura 2A) del pico de mayor energía de la señal en un espectro de poder; mediante este método, la selección no se basa en una inspección visual del espectrograma que podría estar sesgada ante la presencia de componentes de baja frecuencia, sino que se puede obtener una medida estandarizada (Podós, 1997; Ríos-Chelén *et al.*, 2017).

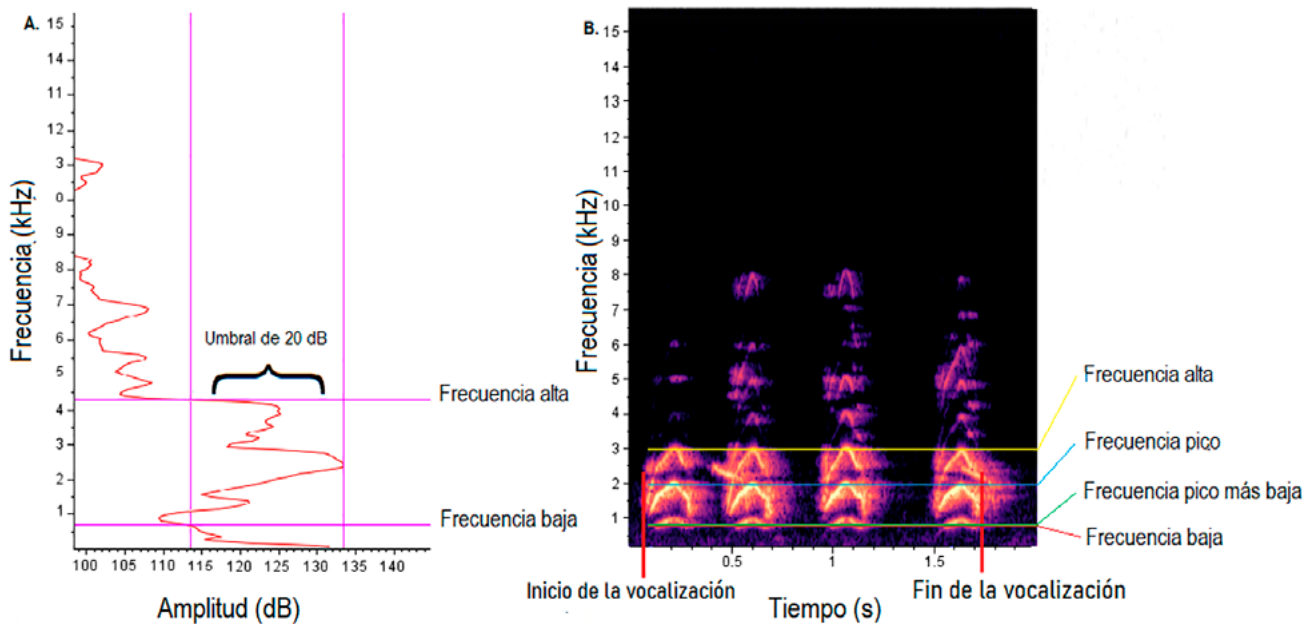


Figura 2. Representación gráfica de las medidas obtenidas de las vocalizaciones de *Cacicus chrysonotus leucoramphus* en Nariño, Colombia. A, Estandarización del umbral de medición sobre el espectro de poder; B, Espectrograma.

Figure 2. Graphic representation of the acoustic measurements for the vocalizations of *Cacicus chrysonotus leucoramphus* in Nariño, Colombia. A, Power spectrum, showing the threshold used. B, Spectrogram.

Análisis estadístico. Se realizó un análisis descriptivo con el promedio y la desviación estándar de cada variable acústica de las vocalizaciones registradas. Posteriormente, se realizó una prueba de Chi-cuadrado con tablas de contingencia para determinar la asociación que existe entre los tipos de vocalización y las categorías de comportamiento. Esta prueba fue complementada mediante la prueba *d* de Cohen para el tamaño del efecto (Cohen, 1988), la cual permitió identificar entre qué tipos de vocalizaciones y comportamientos existe la asociación encontrada. Se utilizó $\alpha = 0.5$. Las pruebas estadísticas fueron realizadas en el software Statgraphics v16 (Statgraphics Centurion, 2009).

Resultados

Generalidades de las colonias de *C. chrysonotus leucoramphus*. Las colonias se conformaron por tres a cinco nidos construidos en un único árbol. La construcción de los nidos, la alimentación y el cuidado de las crías es llevada a cabo exclusivamente por las hembras, mientras que los machos se mantienen vigilando el área de nidificación, utilizando principalmente los

“sitios de preferencia” (*i.e.*, perchas cercanas a los nidos, las cuales son disputadas constantemente por los machos de la colonia).

Descripción de conductas. Se registraron un total de cuatro conductas, que se catalogaron como vigilancia, alerta, defensa territorial y cortejo; las primeras tres se registraron en todas las colonias, mientras que el evento de cortejo se registró una única vez en la colonia de Santa Teresita (Figura 3; individuos en <https://youtu.be/B8r0nt4kE0s>).

Vigilancia. Durante la exhibición de esta conducta se pudo evidenciar que los machos permanecieron en posición vertical con las alas ligeramente hacia adelante, descubriendo el plumaje amarillo de su dorso, mientras observaban a su alrededor. Se registró esta conducta en dos situaciones: (i) sobre los nidos, en eventos de construcción o alimentación de las crías, ejecutados por las hembras. Los machos se ubican en perchas cercanas a los nidos o en los denominados “sitios de preferencia”; (ii) vigilancia de algún determinado sitio de forrajeo apartado de la colonia. Estas labores fueron efectuadas por un miembro “centinela” o entre varios individuos.

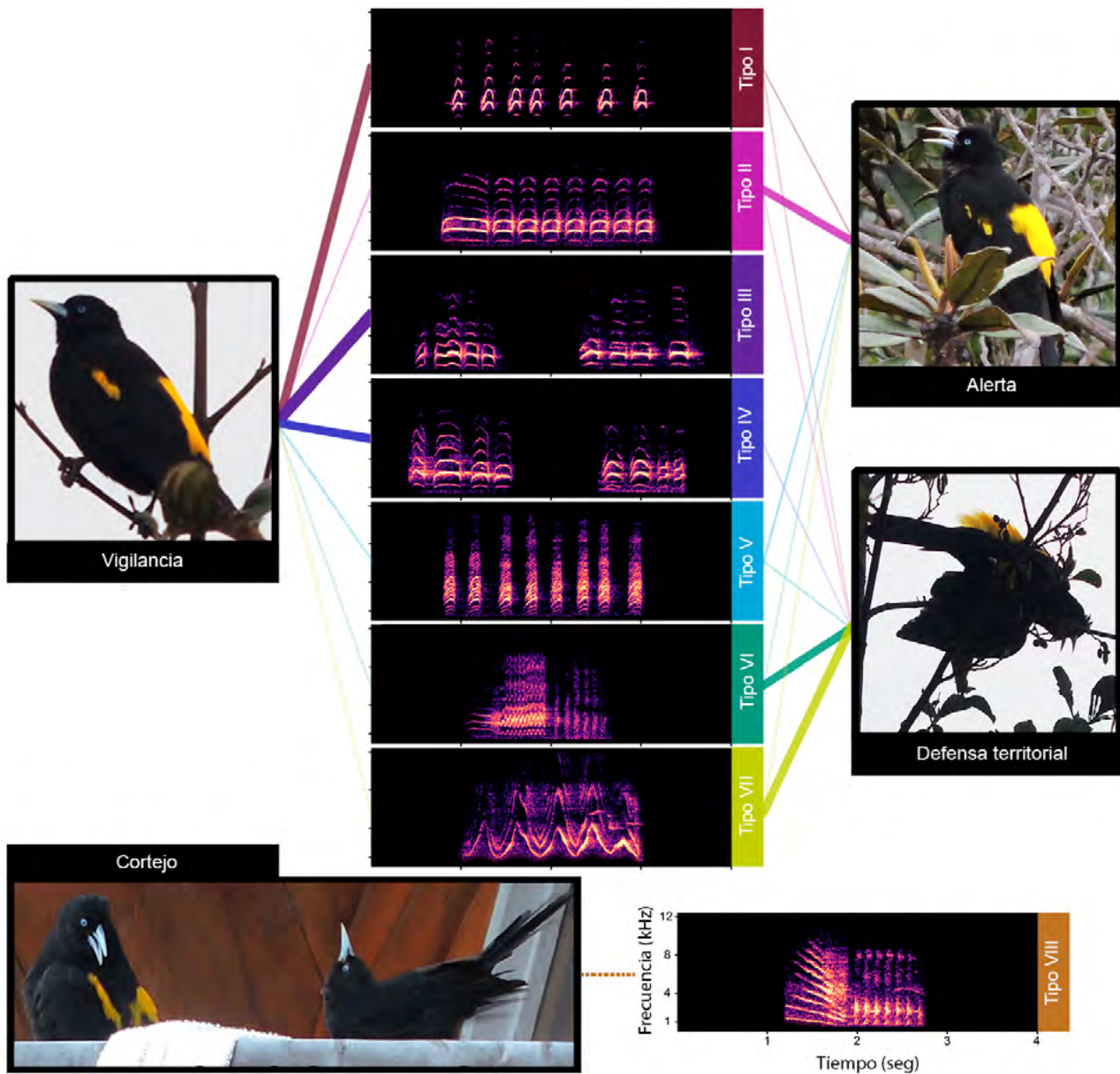


Figura 3. Diagrama representativo de la asociación entre vocalizaciones y conductas de *Cacicus chrysonotus leucoramphus*, en Nariño, Colombia. Las líneas representan la asociación, y barras más gruesas indican asociaciones mayores al 50 %. Se representan cuatro conductas: vigilancia, alerta, defensa territorial con postura de inclinación total, cortejo, con hembra exhibiendo posición solicitante. Se muestran representaciones espectrales de los siete tipos de vocalizaciones identificadas. Para las vocalizaciones Tipo III y Tipo IV se presentan sus dos variaciones. La vocalización Tipo VIII fue realizada durante el evento de cortejo observado (ejemplo en <https://xeno-canto.org/set/5930>; <https://youtu.be/B8rOnt4kE0s>).

Figure 3. Diagram illustrating the association between vocalizations and behaviour in *Cacicus chrysonotus leucoramphus*, in Nariño, Colombia. Line thickness represents the association, thick lines showing association larger than 50 %. Four behaviors are showed: vigilance, alertness, territorial defense, and courtship. Spectrograms for seven vocalizations are showed. Variation of Type III and Type IV is represented in each spectrogram. Type VIII was performed during courtship (examples in <https://xeno-canto.org/set/5930>; <https://youtu.be/B8rOnt4kE0s>).

Alerta. Esta conducta fue observada ante la presencia de potenciales intrusos (e.g., perros, seres humanos), o depredadores (e.g., garcita del ganado, *Bubulcus ibis*). Esta conducta estuvo acompañada de vocalizaciones realizadas repetidamente por el individuo “centinela” o por todos los miembros del grupo, los cuales cesaron cuando la amenaza potencial se retiró. No se advirtieron comportamientos de escape aéreo o de escondite ya que no se registraron ataques directos a los nidos (Figura 3).

Defensa territorial. En esta conducta los machos interactuaron para ocupar los lugares de preferencia en el árbol donde se ubica la colonia y para mantener su espacio individual durante la alimentación. Esta conducta se realizó mediante el despliegue horizontal, con un grado de inclinación corporal total o moderado, enervando las plumas de su dorso, cabeza y coberteras supracaudales a la par que realiza aleteos visibles para amenazar al macho rival (Figura 3). Dentro de los episodios de exhibición de esta conducta fue posible registrar un evento de enfrentamiento entre los individuos de la misma colonia en la localidad El Romerillo. Adicionalmente, no se registró ningún evento de defensa territorial ante la presencia de especies como la mirla común (*Turdus fuscater*) o la pava andina (*Penelope montagnii*), especies con las cuales comparte sitios de forrajeo.

Cortejo. Se registró un único evento, en una zona alejada de los nidos, utilizando como escenario la parte alta de una vivienda humana. Durante este evento de cortejo, el macho adoptó una posición inclinada hacia adelante, moviendo su plumaje dorsal y realizando leves aleteos, aproximándose a la hembra mediante pequeños saltos acompañados de vocalizaciones. La hembra respondió adoptando una posición solicitante (Figura 3).

Descripción de las vocalizaciones. Las vocalizaciones de *C. chrysonotus leucoramphus* son variables, con elementos tonales y atonales, formados principalmente por notas fuertes y repetitivas y con varios armónicos. Presentan un número variable de notas (desde 4 hasta más de 15) vocalizadas ininterrumpidamente, incorporando a su exhibición algunos sonidos del ambiente o de otros animales, mediante imitación. Emiten trinos estructuralmente complejos, con notas de rápida modulación de frecuencia (entre 495.4 y 7500 Hz), una duración entre los 0.5 y 5 segundos y, ocasionalmente, con la presencia de chasquidos al final de la vocalización. En total se identificaron siete tipos de vocalizaciones diferentes y una vocalización registrada en el único evento de cortejo observado (Figura 3; ejemplo en <https://xeno-canto.org/set/5930>).

Tabla 1. Valores promedio y desviación estándar de las variables acústicas para cada tipo de vocalización de *Cacicus chrysonotus leucoramphus* en Nariño, Colombia. Los parámetros temporales se presentan en segundos y los espectrales en hercios.

Table 1. Mean and standard deviation of acoustic measurement for each vocalization of *Cacicus chrysonotus leucoramphus* in Nariño, Colombia. Temporal parameters are showed as seconds and spectral parameters are showed as frequency in hertz.

Tipo de vocalización	Número de notas	Duración	Frecuencia baja	Frecuencia alta	Ancho de banda 90 %	Frecuencia pico	Frecuencia pico más baja
I	5.0±1.1	1.5±0.6	1176.9±70.9	3881.5±145.0	1610.7±126.4	2473.7±112.7	1332.6±114.5
II	6.4±2.6	1.9±0.7	1748.9±282.0	3898.8±256.7	1467.5±134.0	2529.7±177.6	1984.6±227.8
III	4.0±0.8	1.1±0.2	1177.8±128.3	3467.7±200.1	768.02±128.4	2241.8±218.4	1549.3±80.5
IV	4.2±0.4	1.1±0.1	1209.1±72.8	3882.0±113.8	737.8±82.72	2393.7±175.6	1850.5±72.0
V	7.2±3.6	2.3±1.3	1799.3±246.9	4467.6±457.0	2099.6±543.4	2542.8±366.4	1694.0±261.0
VI	15.1±6.9	1.0±0.6	954.7±91.0	6574.2±281.4	4347.6±399.3	3399.7±342.7	1242.4±144.0
VII	3.5±1.5	1.8±1.0	939.9±56.5	7624.7±189.5	1760.3±772.7	2691.5±257.6	1524.3±104.3
VIII ^a	15	1.6	494.6	8387.2	6115.4	2153.3	516.8

^aSe presentan los valores de la medición de la única vocalización tipo VIII, registrada en Santa Teresita

La vocalización Tipo I se propone como la principal, debido a que fue mayormente emitida en proporción al resto de vocalizaciones; los tipos III y IV presentaron dos formas estructurales que se diferenciaron entre sí por la forma y distancia entre notas. Los tipos VI y VII presentaron los valores más bajos con respecto a frecuencia baja y los más altos para frecuencia alta. En las

vocalizaciones tipo II y IV se registraron los valores más altos en frecuencia pico más baja (Tabla 1).

Asociación de vocalizaciones y conductas. Los resultados de la prueba de chi-cuadrado (Tabla 2) demostraron una asociación entre las vocalizaciones y los comportamientos registrados ($\chi^2_{12} = 98.5$, $n = 224$, $p < 0.05$; Figura 3).

Tabla 2. Chi-cuadrado para las frecuencias de ocurrencia de cada tipo de vocalización frente a tipo de comportamiento de *Cacicus chrysonotus leucoramphus* en Nariño, Colombia. El primer número de cada celda representa el conteo de vocalizaciones registradas en cada comportamiento, el segundo número de cada celda muestra el porcentaje de frecuencia de cada vocalización relativo al comportamiento en el que aparece.

Table 2. Contingency table for occurrence of each type of vocalization in each behavior of *Cacicus chrysonotus leucoramphus* in Nariño, Colombia. Number of vocalizations and percentage is showed.

Comportamiento	Vocalización						
	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV	Tipo V	Tipo VI	Tipo VII
Alerta	11	40	0	0	8	4	4
	26.20 %	51.9 %	0.00 %	0.00 %	32.00 %	11.1 %	23.5 %
Defensa territorial	10	4	0	2	8	27	10
	23.8 %	5.2 %	0.00 %	14.30 %	32.00 %	75.00 %	58.8 %
Vigilancia	21	33	13	12	9	5	3
	50.00 %	42.7 %	100.00 %	85.7 %	36.00 %	13.9 %	17.6 %

Tabla 3. Tamaño del efecto (d de Cohen) de las frecuencias de las vocalizaciones de *Cacicus chrysonotus leucoramphus* en Nariño, Colombia, respecto a sus comportamientos. Los valores fueron a aproximados a dos decimales. Para $d < 0.2$ las diferencias son irrelevantes; si $0.2 \leq d < 0.5$, las diferencias son bajas; si $0.5 \leq d < 0.8$, las diferencias son moderadas; si $d \geq 0.8$, las diferencias son altas (Cohen, 1988).

Table 3. Effect size (Cohen's d) for the occurrence of vocalization of *Cacicus chrysonotus leucoramphus* in Nariño, Colombia, in each behavior. When $d < 0.2$ the differences are irrelevant; if $0.2 \leq d < 0.5$, they are small; if $0.5 \leq d < 0.8$, they are medium, and if $d \geq 0.8$, they are large (Cohen, 1988).

Tipo de vocalización	Territorialidad y Alerta	Territorialidad y Vigilancia	Vigilancia y Alerta
I	0.05	0.63	0.58
II	2.64	2.06	0.6
III	-	-	-
IV	-	2.67	-
V	0	0.17	0.17
VI	3.59	3.47	0.12
VII	1.34	1.53	0.19

Con base en los resultados del análisis para el tamaño del efecto con la prueba *d* de Cohen (Tabla 3), se estableció que para el tipo I existen diferencias moderadas entre las frecuencias de emisión en vigilancia con respecto a territorialidad y alerta (*i.e.*, asociado a vigilancia). El tipo II obtuvo diferencias altas entre las asociaciones para los tres comportamientos; con base en los resultados de la prueba de chi-cuadrado fue asociado principalmente a alerta (52.95 %) y vigilancia (42.86 %). El tipo III obtuvo el 100 % de sus registros en vigilancia, por lo cual fue asociado únicamente a esta conducta. En el tipo IV se registró una diferencia alta entre defensa territorial y vigilancia, resultando asociado únicamente a vigilancia (85.71 % en la prueba de chi-cuadrado). El tipo V evidenció baja asociación con las conductas (*i.e.*, no superó el 50% de ocurrencias en ninguna conducta), mostrando diferencias irrelevantes según la prueba *d* de Cohen). El tipo VI obtuvo diferencias altas entre defensa territorial (75 % en la prueba de chi-cuadrado) con alerta y vigilancia; de forma similar ocurrió con el tipo VII, con su frecuencia de emisión en defensa territorial (58.82 %). De esta manera, ambas vocalizaciones (VI y VII) fueron asociados a esta conducta (Figura 3, Tabla A1).

Discusión

Comportamiento colonial de *Cacicus chrysonotus leucoramphus*. La organización colonial de *C. chrysonotus leucoramphus* registrada en este estudio se ha reportado en otras especies del género, como *C. cela* (Feekes, 1982; Robinson, 1985a, b; Trainer, 1989; Thieltges et al., 2014), *C. haemorrhous* (Thieltges et al., 2014) y *C. oseryi* (Leak & Robinson, 1989). Esta organización de tipo colonial está basada sobre un conjunto de relaciones de dominancia, donde se presentan despliegues de agresividad entre machos para ocupar los sitios de preferencia. Adicionalmente, los eventos de vigilancia fueron efectuados cooperativamente por varios machos o por un único individuo centinela en cada una de las colonias. Consistentemente con nuestro estudio, Robinson (1997) describió este comportamiento en *C. cela*, registrando conductas de vigilancia grupal con defensa de los sitios de nidificación, ante la presencia de algún depredador, utilizando vocalizaciones de alerta y ataques dirigidos. Feekes (1982), Robinson (1985b) y Trainer (1987) reportaron que las agresiones intraespecíficas entre machos de *C. cela* se producen para ocupar los sitios de preferencia y poder realizar las exhibiciones de cortejo dirigidas a las hembras, así como para defender espacios individuales de forrajeo. En este contexto, se

producen eventos de lucha cuando la exhibición de la defensa territorial mediante el despliegue horizontal no es suficiente para disuadir al posible competidor (Feekes, 1982). Por otro lado, la construcción de los nidos por parte de las hembras, con los machos al margen del cuidado parental, se ha documentado en especies de los géneros *Cacicus*, *Psarocolius*, *Sturnella* y algunas especies de *Icterus* (Fraga, 2008). Estas evidencias en el comportamiento de *C. chrysonotus leucoramphus* y la presencia de una mayor proporción de hembras que machos en cada colonia, sugiere que la especie tiene un sistema de reproducción de poliginia. Hasta el momento, este sistema de apareamiento se ha reportado dentro de la familia Icteridae en todas las especies de oropéndolas (*Psarocolius*), y en el grupo de los caciques (*Cacicus*) únicamente para *C. cela*, *C. haemorrhous* y *C. oseryi* (Price et al., 2007; Price & Whalen, 2009; Fraga, 2008). Por esta razón es necesario todavía evaluar los sistemas reproductivos y su papel en el comportamiento social en *C. chrysonotus leucoramphus*. Esta estructura colonial demuestra la organización jerárquica que se presenta en aquellas especies que viven en grupos, donde cada miembro cumple un rol en específico (Jungwirth et al., 2015; Rubenstein & Alcock, 2018).

Comportamiento vocal de *Cacicus chrysonotus leucoramphus*. En este estudio, se registraron siete tipos de señales acústicas emitidas por machos de *C. chrysonotus leucoramphus* las cuales presentaron diferencias estructurales y auditivas entre sí. Trainer (1989) reportó en *C. cela* de cinco a ocho tipos de cantos compartidos entre colonias, mientras que Wiley (1976) encontró en el zanate común (*Quiscalus quiscula*) seis tipos de cantos distintos, uno de los cuales era exclusivo de las hembras. Estructuralmente, los tipos III y IV de *C. chrysonotus leucoramphus* presentan cuatro notas; ocasionalmente los machos pueden emitirlos con cinco notas y también pueden omitir la primera o la última nota. Esta estructura es similar al canto principal, *cela song*, descrito por Feekes (1982) en *C. cela*, el cual tiene por lo general cuatro notas y puede ser vocalizado sin la última de ellas; así mismo, hay similitudes estructurales con los cantos cortos descritos por Thieltges et al., (2013) en *C. haemorrhous*. La capacidad de imitación de sonidos también fue reportada en *C. cela* (Feekes, 1982).

Asociación de las vocalizaciones de *Cacicus chrysonotus leucoramphus* en el contexto social Las vocalizaciones tipo I, III, IV, VI y VII están relacionadas específicamente con al menos una de las conductas observadas; sin embargo, la tipo I fue utilizada en variedad de contextos (percha, búsqueda grupal de

alimentación). Lo mismo sucede con respecto a la tipo V, a cual evidenció estadísticamente una asociación irrelevante con los comportamientos descritos, pero fue utilizada de forma consistente a lo largo de muestreos en escenarios de desplazamiento aéreo de los individuos, búsqueda de alimentación o percha. De manera adicional, se registró que las hembras pueden emitir este tipo de vocalización ocasionalmente. Esto sugiere la necesidad de asignar categorías más específicas a los comportamientos ya identificados, para poder evaluar a futuro la funcionalidad de estas vocalizaciones. Por su parte, la tipo II demostró tener más de una función, ya que fue asociada a vigilancia y alerta. En *C. cela* se han reportado al menos tres tipos de vocalizaciones asociadas a interacciones entre machos (Trainer, 1987). Esto puede explicarse por la reducción del costo energético de producción de las señales para transmitir el mensaje, lo cual puede conducir a una mejor comunicación entre los individuos (Partan & Marler, 2005; Bradbury & Vehrencamp, 2011; Webster et al., 2018). En este aspecto, *C. chrysonotus leucoramphus* podría optimizar su mecanismo de comunicación reutilizando la señal usada durante la vigilancia en situaciones de alerta (e.g., la presencia de un depredador). En este caso, la disminución en la producción de señales acústicas debe traerle beneficios, tanto al emisor como al receptor del mensaje (Searcy & Nowicki, 2005; Webster et al., 2018). Esto estaría indicando una relación secuencial entre estos dos tipos de comportamiento (Trainer, 1988), siendo posible predecir el despliegue de una conducta de alerta posterior al estado en vigilancia, si se detecta la presencia de un organismo intruso, y reanudar la vigilancia sin cambiar el tipo de vocalización, cuando el individuo ajeno se retira, indicando que, si bien el peligro ha pasado, deben mantenerse atentos ante una nueva amenaza.

Las vocalizaciones tipo VI y tipo VII de *Cacicus chrysonotus leucoramphus* fueron asociadas a defensa territorial. Estas señales acústicas presentan valores altos en ancho de banda y se componen de notas con modulación de frecuencia. Payne (1979) encontró cuatro vocalizaciones distintas asociadas a conductas territoriales en *Vidua chalybeata*, con características espectrales similares a lo encontrado en *C. chrysonotus leucoramphus*. Una de estas vocalizaciones presenta fuerte modulación de frecuencia y las otras tres tienen, al menos, un componente de trino con modulación de frecuencia. En *V. chalybeata* se categorizaron las conductas agresivas en vuelos de persecución entre machos y llegada a la percha de canto después de un evento de persecución; los cuatro tipos de canto resultaron asociados a una de estas dos categorías.

Lo anterior puede sentar un precedente para discriminar de forma más precisa la función de las vocalizaciones tipo VI y VII de *C. chrysonotus leucoramphus*, categorizando su defensa territorial en conductas más específicas. Por su parte, Feekes (1982) identificó dos grupos de cantos en *C. cela*, el mencionado *cela song*, que fue vocalizado principalmente por machos cerca a los sitios de construcción de nidos o después de eventos de escape durante los cuales todos los machos de la colonia vocalizan este tipo de canto. Esto significa que el *cela song* puede tener funciones de alerta y vigilancia, similar a como ocurre con las vocalizaciones tipo I, II, III y IV en *C. chrysonotus leucoramphus*. El otro grupo de cantos identificado por Feekes (1982) se denomina *harsh song*, y fue asociado a conductas agonísticas entre machos y también para el cortejo, vocalizados con la exhibición del despliegue horizontal con tres distintos grados de inclinación corporal, siendo el tercer grado de inclinación el que denota la mayor agresividad. En *C. chrysonotus leucoramphus*, las vocalizaciones tipo VI y VII, asociadas a defensa territorial, más la única vocalización registrada en el cortejo, fueron emitidas exhibiendo el despliegue horizontal, de igual forma que *C. cela*.

Las vocalizaciones de *C. chrysonotus leucoramphus* con estructuras más complejas y en un rango de frecuencias superior con relación al resto de sus vocalizaciones, fueron utilizadas para la defensa territorial. Varios estudios han reportado que las vocalizaciones territoriales tienen implicaciones en el contexto reproductivo (Price et al., 2006; Greig et al., 2013; Miles & Fuxjager, 2018); el canto en los machos ha evolucionado bajo procesos de selección sexual, privilegiando aquellos rasgos capaces de imponerse para disuadir la competencia e incrementar sus posibilidades de apareamiento (Catchpole, 1982; Price & Whalen, 2009). Por esta razón, es necesario investigar sobre el papel de las vocalizaciones de defensa territorial de *C. chrysonotus leucoramphus* en contextos reproductivos, y prestar atención a la vocalización registrada durante el cortejo, la cual posee elementos complejos y es estructuralmente similar a las señales de amenaza entre machos. Sin embargo, el despliegue de movimientos corporales y gesticulaciones complementan la exhibición vocal, aumentando el éxito dentro de las disputas entre machos y la competencia por el apareamiento (Price et al., 2006; Miles & Fuxjager, 2018). Debido a lo anterior, el despliegue horizontal es otro aspecto importante de la competencia agonística en *C. chrysonotus leucoramphus* y complementa sus vocalizaciones de defensa territorial.

Conclusión

La evidencia obtenida indica que *C. chrysonotus leucoramphus* utiliza diferentes tipos de señales acústicas dentro de los diferentes contextos de su comportamiento social. Las vocalizaciones emitidas están asociadas a alguna conducta específica, soportando la idea de que una señal puede ser utilizada en más de un contexto conductual, posiblemente para reducir el costo energético de producción y optimizar su sistema de comunicación. Los resultados obtenidos amplían el conocimiento de la comunicación animal en escenarios sociales complejos, como la organización colonial.

Agradecimientos

Agradecemos a las comunidades locales y familias propietarias de la red de reservas de la Laguna de la Cocha por las facilidades brindadas en campo y a quienes motivamos para seguir aunando esfuerzos en pro de la conservación de esta región. Al Grupo de Investigación en Ecología Evolutiva (GIEE) de la Universidad de Nariño por el apoyo con equipos y logística para la realización de esta investigación. A Michelle García Arroyo por su apoyo en la elaboración del mapa. A Byron Fernández y Ahmed Bello por la revisión de algunos textos y comentarios para mejorar el manuscrito. DAG y JPOP agradecen a Arsenio Hidalgo, Johana Arévalo, Milena Villarreal, Tatyana Ruano, María José Sevilla y Lucero Legarda por su apoyo y asesoría en el desarrollo de la investigación. Agradecemos el financiamiento recibido mediante el concurso de trabajos de grado de la Vicerrectoría de Investigaciones Postgrados y Relaciones Internacionales (VIPRI) de la Universidad de Nariño. RAFG agradece al posgrado en Neuroetología de la Universidad Veracruzana y al programa de becas del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (Beca Doctoral No. 337259/CONACyT) por el soporte dado durante el desarrollo y escritura de este documento.

Referencias

- Alcock, J. (2001). *Animal Behavior: An Evolutionary Approach*. Sunderland, U. S.: Sinauer Associates.
- Alexander, R. D. (1974). The Evolution of social behavior. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 5, 325-383.
<https://doi.org/10.1146/annurev.es.05.110174.001545>.
- Bioacoustics Research Program. (2011). Raven Pro: interactive sound analysis software. Version 1.5. [Ithaca (NY)]: The Cornell Lab of Ornithology.
- Beauchamp, G. (2015). *Animal Vigilance: Monitoring Predators and Competitors*. New York, U.S.: Academic Press.
- Boucherie, P. H., Loretto, M., Massen, J. J. M., & Bugnyar, T. (2019). What constitutes “social complexity” and “social intelligence” in birds? Lessons from ravens. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 73, (12), 2-14.
<https://doi.org/10.1007/s00265-018-2607-2>
- Bradbury, J.W. & Vehrencamp, S. L. (2011). *Principles of Animal Communication*. Sunderland, U. S.: Sinauer Associates.
- Budney, G. & Grotke, R. (2013). *Techniques for audio recording vocalizations of tropical birds*. New York, U. S.: Library of Natural Sounds, Cornell Laboratory of Ornithology.
- Carazo, P. & Font, E. (2010). Putting information back into biological communication. *Journal of Evolutionary Biology*, 23, 661-669.
<https://doi.org/10.1111/j.1420-9101.2010.01944.x>
- Catchpole, C. K. (1982). The evolution of bird sounds in relation to mating and spacing behavior. En: Kroodsma D. K. & Miller, E. H., (eds.). *Acoustic Communication in Birds*. New York, U. S.: Academic Press.
- Catchpole, C. K. & Slater, P. J. B. (2008). *Bird Song: Biological Themes and Variations*. New York, U. S.: Cambridge University Press.
- Cohen, J. (1988). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*. Hillsdale, U. S.: Lawrence Erlbaum Associates.
- Duijns, S. & Piersma, T. (2014). Interference competition in a sexually dimorphic shorebird: prey behaviour explains intraspecific competition. *Animal Behaviour*, 92, 195-201.
<https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2014.04.007>
- Feekes F. (1982). Song mimesis within colonies of *Cacicus c. cela* (Icteridae, Aves). A colonial password?. *Zeitschrift für Tierpsychologie*, 58, 119-152.
<https://doi.org/10.1111/j.1439-0310.1982.tb00312.x>
- Fraga, R. M. (2008). Phylogeny and behavioral evolution in the family Icteridae. *Ornitología Neotropical*, 19, 61-71.
- Fraga, R. (2020). Mountain Cacique (*Cacicus chrysonotus*), version 1.0. In *Birds of the World* (S. M. Billerman, B. K. Keeney, P. G. Rodewald, and T. S. Schulenberg, Editors). Cornell Lab of Ornithology, Ithaca, NY, USA.
<https://doi.org/10.2173/bow.moucac1.01>


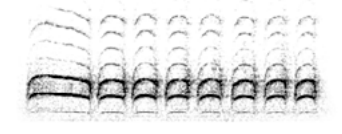

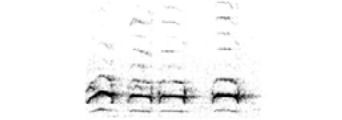
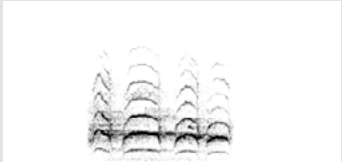
- Freeberg, T.M., Dunbar, R.I., & Ord, T.J., (2012). Social complexity as a proximate and ultimate factor in communicative complexity. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 367, 1785-1801. <https://doi.org/10.1098/rstb.2011.0213>
- Gil, D. & Gahr, M. (2002). The honesty of bird song: multiple constraints for multiple traits. *Trends in Ecology and Evolution*, 17, 133-141. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(02\)02410-2](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(02)02410-2).
- Greig, E. I., Price, J. J., & Pruett-Jones, S. (2013). Song evolution in Maluridae: influences of natural and sexual selection on acoustic structure. *Emu-Austral Ornithology*, 113(3), 270-281. <https://doi.org/10.1071/MU12078>
- Gross, M. R. & MacMillan, A. M. (1981). Predation and the evolution of colonial nesting in bluegill sunfish (*Lepomis macrochirus*). *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 8,163-174. <https://doi.org/10.1007/BF00299826>
- Guilford, T. & Dawkins, M. S. (1991). Receiver psychology and the evolution of animal signals. *Animal Behaviour*, 42, 1-14. [https://doi.org/10.1016/S0003-3472\(05\)80600-1](https://doi.org/10.1016/S0003-3472(05)80600-1)
- Jaramillo, A. & Burke, P. (1999). *New World Blackbirds: The Icterids*. Princeton, U. S.: Princeton University Press.
- Jungwirth, A., Josi, D., Walker, J., & Taborsky, M. (2015). Benefits of coloniality: communal defence saves anti-predator effort in cooperative breeders. *Functional Ecology*, 29(9), 1218-1224. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12430>
- Koenig, W. D., Mumme, R. L., Stanback, M. T. & Pitelka, F. A. (1995) Patterns and consequences of egg destruction among joint-nesting acorn woodpeckers. *Animal Behaviour*, 50, 607-621. [http://doi.org/10.1016/0003-3472\(95\)80123-5](http://doi.org/10.1016/0003-3472(95)80123-5).
- Ladich, F., & Winkler, H. (2017). Acoustic communication in terrestrial and aquatic vertebrates. *Journal of Experimental Biology*, 220(13), 2306-2317. <https://doi.org/10.1242/jeb.132944>
- Leak, J., & Robinson, S. K. (1989). Notes on the social behavior and mating system of the Casqued Oropendola. *The Wilson Bulletin*, 101, 134-137.
- Leighton, G. M. (2017). Cooperative breeding influences the number and type of vocalizations in avian lineages. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 284(1868), 20171508. <https://doi.org/10.1098/rspb.2017.1508>
- López-Martínez, M. L. & Madroñero-Palacios, S. M. (2015). Estado trófico de un lago tropical de alta montaña: caso laguna de La Cocha. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 25, 21-42. <http://doi.org/10.18359/rcin.1430>
- Marler, P. (1967) Animal communication signals: We are beginning to understand how the structure of animal signals relates to the function they serve. *Science*, 157, 769-774. <https://doi.org/10.1126/science.157.3790.769>
- Martin, P. & Bateson, P. (2007). *Measuring Behaviour: An introductory Guide*. Cambridge, U. K.: Cambridge University Press.
- Miles, M. C., & Fuxjager, M. J. (2018). Animal choreography of song and dance: a case study in the Montezuma Oropendola, *Psarocolius montezuma*. *Animal behaviour*, 140, 99-107. <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2018.04.006>
- Partan, S. R., & Marler, P. (2005). Issues in the classification of multimodal communication signals. *The American Naturalist*, 166(2), 231-245. <https://doi.org/10.1086/431246>
- Payne, R. B. (1979). Song structure, behaviour, and sequence of song types in a population of village indigobirds, *Vidua chalybeata*. *Animal Behaviour*, 27, 997-1013. [https://doi.org/10.1016/0003-3472\(79\)90047-2](https://doi.org/10.1016/0003-3472(79)90047-2)
- Podos, J. (1997). A performance constraint on the evolution of trilled vocalizations in a songbird family (Passeriformes: Emberizidae). *Evolution*, 51, 537-551. <https://doi.org/10.1111/j.1558-5646.1997.tb02441.x>
- Price, J. J. & Lanyon, S. M. (2004). Patterns of song evolution and sexual selection in the oropendolas and caciques. *Behavioral Ecology*, 15, 485-497. <https://doi.org/10.1093/beheco/arih040>
- Price, J. J., Johnson, K. P. & Clayton, D. H. (2004). The evolution of echolocation in swiftlets. *Journal of Avian Biology*, 35, 135-143. <https://doi.org/10.1111/j.0908-8857.2004.03182.x>
- Price, J. J., Earnshaw, S. M. & Webster, M. S. (2006). Montezuma oropendolas modify a component of song constrained by body size during vocal contests. *Animal Behaviour*, 71, 799-807. <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2005.05.025>
- Price, J. J., Friedman, N. R. & Omland, K. E. (2007). Song and plumage evolution in the New World orioles (*Icterus*) show similar lability and convergence in patterns. *Evolution*, 61, 850-863. <https://doi.org/10.1111/j.1558-5646.2007.00082.x>
- Price, J. J. & Whalen, L. M. (2009). Plumage evolution in the oropendolas and caciques: different divergence rates in polygynous and monogamous taxa. *Evolution*, 63, 2985-2998. <https://doi.org/10.1111/j.1558-5646.2009.00765.x>
- Ríos-Chelén, A. A., McDonald, A. N., Berger, A., Perry, A. C., Krakauer, A. H. & Patricelli, G. L. (2017). Do birds vocalize at higher pitch in noise, or is it a

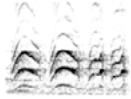
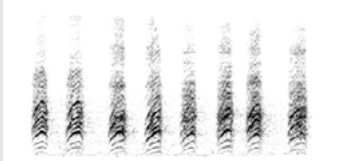
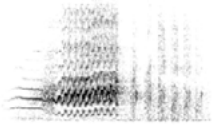
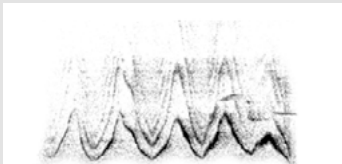
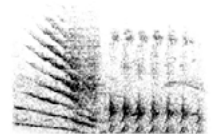
- matter of measurement?. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 71, 29.
<https://doi.org/10.1007/s00265-016-2243-7>
- Robinson, S. K. (1985a). Fighting and assessment in the Yellow-rumped Cacique (*Cacicus cela*). *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 8, 39-44.
<http://doi.org/10.1007/BF00299236>
- Robinson, S. K. (1985b). Coloniality in the yellow-rumped Cacique (*Cacicus cela*) as a defense against nest predators. *The Auk*, 102, 506-519.
<https://doi.org/10.1093/auk/102.3.506>
- Robinson, S. K. (1986). Benefits, costs, and determinants of dominance in a polygynous oriole. *Animal Behaviour*, 34, 241-255.
[https://doi.org/10.1016/0003-3472\(86\)90029-1](https://doi.org/10.1016/0003-3472(86)90029-1)
- Robinson, S. K. (1997). Birds of a Peruvian oxbow lake: populations, resources, predation, and social behavior. *Ornithological Monographs*, 48, 613-639.
<https://doi.org/10.2307/40157558>
- Rolland, C., Danchin, E. & de Fraipont, M. (1998). The evolution of coloniality in birds in relation to food, habitat, predation, and life-history traits: a comparative analysis. *The American naturalist*, 151, 514-29.
<https://doi.org/10.1086/286137>
- Rubenstein, D. R & Alcock, J. (2018). *Animal behavior*. Sunderland, M.A. Sinauer Associates.
- Santos, E. S. & Macedo, R. H. (2011). Load lightening in southern lapwings: group-living mothers lay smaller eggs than pair-living mothers. *Ethology*, 117(6), 547-555.
<https://doi.org/10.1111/j.1439-0310.2011.01905.x>
- Schradin, C., König, B., & Pillay, N. (2010). Reproductive competition favours solitary living while ecological constraints impose group-living in African striped mice. *Journal of Animal Ecology*, 79(3), 515-521.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2656.2009.01651.x>
- Searcy W. A. & Nowicky, S. (2005). *The Evolution of Animal Communication Reliability and Deception in Signaling Systems*. Princeton, U. S.: Princeton University Press.
- Statgraphics Centurion, X. V. I. (2009). Statpoint technologies. *INC. version*, 16, 17.
- Stutchbury, B. J. & Morton, E. S. (2001). *Behavioral Ecology of Tropical Birds*. San Diego, U. S.: Academic Press.
- Thieltges, H., Henry, L., Biquand, V., Du Bosq, S., Hervé, M., Hausberger, M. & Deleporte, P. (2013). Dialects in short songs of two species of colonial caciques (*Cacicus*). En: Thieltges, H. (2013). *Distribution spatiale, stabilité et perception des dialectes chez deux espèces d'oiseaux guyanais (Cacicus cela et Cacicus haemorrhous)* (Tesis doctoral). Université Rennes, Rennes, Francia.
- Thieltges, H., Henry, L. Biquand, V. & Deleporte, P. (2014). Short-term variations of dialects in short songs of two species of colonial caciques (*Cacicus*) *Acta Acustica United with Acustica*, 100, 759-766.
<http://doi.org/10.3813/AAA.918755>
- Tirado, E. A., Collado- Corona, M. A., & Morales- Martínez, J. J. (2004). Comunicación y comportamiento auditivo obtenidos por medio de los potenciales evocados auditivos en mamíferos, aves, anfibios y reptiles. *Cirugía y Cirujanos*, 72, 309-315. Recuperado de: <https://www.medigraphic.com/>
- Trainer, J. M. (1987). Behavioral associations of song types during aggressive interactions among male yellow-rumped Caciques. *The Condor*, 89, 731-738.
<https://doi.org/10.2307/1368519>
- Trainer, J. M. (1988). Singing organization during aggressive interactions among male Yellow-Rumped Caciques. *The Condor*, 90, 681.
<https://doi.org/10.2307/1368358>
- Trainer, J. M. (1989). Cultural evolution in song dialects of Yellow-rumped Caciques in Panama. *Ethology*, 80, 190-204.
<http://doi.org/10.1111/j.1439-0310.1989.tb00739.x>
- Vallet, E., Beme, I. & Kreutzer, M. (1998). Two-note syllables in canary songs elicit high levels of sexual display. *Animal Behaviour*, 55, 291-297.
<https://doi.org/10.1006/anbe.1997.0631>
- Webster, M. S., Ligon, R. A., & Leighton, G. M. (2018). Social costs are an underappreciated force for honest signalling in animal aggregations. *Animal Behaviour*, 143, 167-176.
<https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2017.12.006>
- Wiley, R. H. (1976). Communication and spatial relationships in a colony of common grackles. *Animal Behaviour*, 24, 570-584.
[https://doi.org/10.1016/S0003-3472\(76\)80070-X](https://doi.org/10.1016/S0003-3472(76)80070-X)
- Wittwer, B., Hefetz, A., Simon, T., Murphy, L. E., Elgar, M. A., Pierce, N. E., & Kocher, S. D. (2017). Solitary bees reduce investment in communication compared with their social relatives. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(25), 6569-6574.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1620780114>

Anexos.

Tabla A1. Descripción de características acústicas de los tipos de vocalizaciones en *Cacicus chrysonotus leucoramphus* en Nariño, Colombia, y contexto conductual asociado.

Table A1. Description of acoustic parameters for each type of vocalizations of *Cacicus chrysonotus leucoramphus* in Nariño, Colombia, and behaviour context associated.

Forma espectral	Características	Conducta asociada	Comportamiento individuo	Comportamiento colonia
Tipo I 	Vocalización principal de la especie. Frecuencia baja 1-1.9 (kHz). Frecuencia alta 3-4 (kHz). De 4 a más de 10 notas por vocalización. Duración 0.9-5 s.	Vigilancia	Se ubica en perchas en el área de nidificación o fuera de ella, en sitios de alimentación; con postura vertical	Vigilancia colectiva
Tipo II 	Compuesto de una nota introductoria larga y una segunda nota más corta que puede repetirse numerosas veces. Frecuencias bajas 1.2-2.3 (kHz). Frecuencias altas 3.5-4.6 (kHz). De 4 a más de 12 notas. Duración 0.8-5 s.	Vigilancia Alerta	Se ubica en perchas en las partes más altas de los árboles, en postura vertical. Las vocalizaciones de alerta son mucho más sonoras	Los miembros del grupo se activan mediante la emisión de la vocalización o el abandono del lugar
Tipo III forma A 	Compuesto de 4 notas. Frecuencia baja 1.1-1.2 (kHz). Frecuencia alta 3.2-3.3 kHz. Duración 0.8-1 s.	Vigilancia	Vocalización en solitario, ubicado en zonas despejadas de los árboles, preferiblemente en la copa. Secuencias muy extensas, de hasta 10 minutos	El resto de individuos realizan otras actividades, apartados del emisor o fuera del área observable.
Tipo III Forma B 	Compuesto de 4 notas. Frecuencia baja 1-1.5 (kHz). Frecuencia alta 3.4-3.9 kHz. Duración 1-1.6 s. Se diferencia de la forma (A) por la forma de la segunda nota y la distancia entre la tercera y la cuarta nota	Vigilancia	Emisión de la vocalización en solitario. Ubicado en zonas despejadas de los árboles, preferiblemente en la copa. Secuencias muy extensas, de hasta 10 minutos	El resto de individuos realizan otras actividades, apartados del emisor o fuera del área observable.
Tipo IV Forma A 	Compuesto de 4 notas, ocasionalmente de 5. Frecuencia baja 1.2-1.3 (kHz). Frecuencia alta 4-4.1 (kHz). Duración 11.3 s.	Vigilancia	Emisión en solitario, ubicado en zonas despejadas de los árboles, preferiblemente en la copa. Secuencias muy extensas, de hasta 10 minutos.	El resto de individuos realizan otras actividades, apartados del emisor o fuera del área observable.

Forma espectral	Características	Conducta asociada	Comportamiento individuo	Comportamiento colonia
Tipo IV Forma B 	Compuesto por 4 notas, ocasionalmente de 5. Frecuencia baja 1.1-1.3 (kHz). Frecuencia alta 3.6-4 (kHz). Duración 1-1.2 s. Se diferencia con la forma (A) en que las notas 3 y 4 son más cortas	Vigilancia	Emisión solitaria, ubicado en zonas despejadas de los árboles, preferiblemente en la copa. Secuencias muy extensas, de hasta 10 minutos.	El resto de individuos realizan otras actividades, apartados del emisor o fuera del área observable.
Tipo V 	Formado por una sucesión de una nota simple repetida 4-15 veces. Frecuencia baja 0.8-2.1 (kHz). Frecuencia alta 3.1-6 (kHz). Duración 0.9-6 s. Presenta armónicos difusos	Baja asociación a las conductas descritas	Emitido en eventos de alimentación, percha y movilización en la colonia. Ocasionalmente vocalizado por las hembras.	Respuesta al emisor mediante vocalizaciones o la movilización.
Tipo VI 	Formado por tres secciones: introducción, sucesión rápida de notas con modulación de las frecuencias y conjunto de chasquidos, que en ocasiones son omitidos. Frecuencia baja 0.7-1.1 (kHz). Frecuencia alta 6-7 (kHz). Número de notas por encima de las 15 y duración 0.4-2.7 s.	Defensa territorial	Vocalización dirigida. El macho emisor realiza el despliegue horizontal con dos niveles de inclinación corporal: total y moderado, defendiendo sitios de alimentación y ubicaciones de preferencia.	El macho receptor responde mediante otra vocalización del mismo tipo o el abandono del lugar. Rara vez se producen eventos de lucha.
Tipo VII 	Compuesto por una sucesión de notas de forma similar, con modulación de frecuencia, con mayor energía en la frecuencia fundamental. Frecuencia baja 0.8-1 (kHz) y frecuencia alta 7.2-7.8 (kHz). 4-6 notas, con una duración de 0.7-4 s.	Defensa territorial	Vocalización dirigida. El macho emisor realiza el despliegue horizontal. Preferiblemente el despliegue moderado. Defendiendo sitios propios de alimentación o ubicaciones de preferencia. Indicador de un nivel de agresividad más bajo.	El macho receptor responde emitiendo otras vocalizaciones.
Tipo VIII 	Formado por tres secciones: una introducción, una sucesión rápida de notas con modulación de las frecuencias y un conjunto de chasquidos.	Cortejo	Vocalización dirigida. El macho realiza despliegue horizontal con pequeños saltos.	La hembra adopta la posición solicitante.

David Alejandro Guaitarilla

Universidad de Nariño

Pasto, Colombia

davalegu@gmail.com<https://orcid.org/0000-0003-4746-5043>**Juan Pablo Ortiz-Pérez**

Universidad de Nariño

Pasto, Colombia

jp032095@gmail.com<https://orcid.org/0000-0001-6396-610X>**Jhon Jairo Calderón-Leytón**

Universidad de Nariño

Pasto, Colombia

jjcalderl@gmail.com<https://orcid.org/0000-0001-7128-8310>**Miguel A. Gómez-Martínez**

Universidad Veracruzana

Xalapa-Enríquez, México

gomez.miguelangel86@gmail.com<https://orcid.org/0000-0001-6637-2040>**Carlos Mauricio Trujillo-Torres**

Universidad de Nariño

Pasto, Colombia

cmtrujillo86@gmail.com<https://orcid.org/0000-0002-4915-1833>**Ronald A. Fernández-Gómez**

Universidad de Nariño

Pasto, Colombia

ronfernandezg@gmail.com<https://orcid.org/0000-0001-5049-6348>

Vocalizaciones asociadas al comportamiento colonial de *Cacicus chrysonotus leucoramphus* (Icteridae) en Colombia

Citación del artículo: Guaitarilla, D.A., Ortiz-Pérez, J.P., Calderón-Leytón, J.J., Gómez-Martínez, M.A., Trujillo-Torres, C.M. & Fernández-Gómez, R.A. (2021). Vocalizaciones asociadas al comportamiento colonial de *Cacicus chrysonotus leucoramphus* (Icteridae) en Colombia. *Biota Colombiana*, 22(1), 133-148.

<https://doi.org/10.21068/c2021.v22n01a09>

Recepción: 1 de mayo 2020

Aprobación: 9 de noviembre 2020

Detección automatizada de cantos de aves continúa siendo un desafío: el caso de warbleR y *Megascops centralis* (búho del Chocó)

Automated detection of bird songs continues to be a challenge: the case of warbleR and *Megascops centralis* (Chocó owl)

Laura Andrea Hoyos Cardona  , Juan Sebastián Ulloa  , Juan Luis Parra Vergara  

Resumen

El monitoreo acústico permite evaluar cambios espacio-temporales en poblaciones animales. Sin embargo, analizar grandes volúmenes de información es desafiante. Se evaluó el desempeño de una técnica de detección (función autodetec del paquete warbleR de R) para identificar vocalizaciones de *Megascops centralis*, utilizando 6877 grabaciones de un minuto provenientes de grabadoras ubicadas en 21 sitios alrededor del embalse Jaguas, Andes de Antioquia, Colombia. Las vocalizaciones se anotaron manualmente y se seleccionaron dos sitios (597 grabaciones) con el mayor número de registros (49 y 34) para la evaluación del algoritmo. La función fue utilizada con audios a dos tasas de muestreo (44 100 Hz y 22 050 Hz) y tres umbrales de amplitud (5, 10 y 20). Se evaluó el desempeño de la función en términos de su sensibilidad y especificidad, y se estimó la probabilidad de detección de una vocalización según su calidad. La sensibilidad y especificidad presentaron gran variación (0-0.48 y 0.5-0.98 respectivamente). La probabilidad de detección de una señal aumentó con su calidad (mala: 0.12, media: 0.27 y buena: 0.64). El monitoreo acústico tiene gran potencial, y parte de su éxito depende de herramientas de reconocimiento automático, de acceso abierto y fácil implementación. Este desarrollo puede acelerarse fortaleciendo nuestras colecciones sonoras.

Palabras clave. Autodetec. Bioacústica. Detección automática. Monitoreo. WarbleR.

Abstract

Acoustic monitoring allows the evaluation of spatio-temporal changes in animal populations. However, analyzing large volumes of information is challenging. We evaluate the performance of a detection technique (autodetec function of the R warbleR package) to identify vocalizations of *Megascops centralis*, using 6877 one-minute recordings from 21 sites in the vicinity of the Jaguas dam, Andes of Antioquia Colombia., All vocalizations were manually annotated and two sites (597 recordings) with the highest number of records (49 and 34) were selected to evaluate the algorithm. The function was implemented with audios at two sampling rates (44 100 Hz and 22 050 Hz) and three amplitude thresholds (5, 10, and 20). We assessed the performance of this function in terms of its sensitivity and specificity, and we estimate the probability of detection of a signal according to its quality. Sensitivity and specificity showed great variation (0-0.48 and 0.5-0.98 respectively) and the probability of detection of a signal increased with its quality (poor: 0.12, medium: 0.27 and high: 0.64). Acoustic monitoring has an enormous potential, and its success depends, in part, on the availability of automatic recognition tools, that are open access and can be easily implemented. This development can be achieved by strengthening acoustic collections.

Keywords. Autodetec. Bioacoustics. Automatic detection. Monitoring. WarbleR.

Introducción

Hoy en día es clara la importancia de las herramientas bioacústicas para identificar las especies presentes en un lugar a partir de sus cantos. Sin embargo, por mucho tiempo se enfatizaron otras técnicas de muestreo, como el avistamiento directo y el uso de redes de niebla (Ralph *et al.*, 1993). Los equipos portátiles que facilitan la grabación en campo de los sonidos de las aves se desarrollaron durante gran parte del siglo XX, pero fue solo en 1956 cuando se estableció la biblioteca de sonidos de Cornell Macaulay (originalmente Library of Natural Sounds), considerada la primera colección bioacústica del mundo (Ranft, 2004). Uno de los personajes clave en este cambio de mentalidad fue el ornitólogo Ted Parker III, quien demostró que era posible registrar en siete días, por medio de herramientas acústicas, el 85 % de las especies de aves que originalmente fueron identificadas luego de 36 000 horas de muestreo con redes de niebla en una localidad en la Amazonia boliviana (Parker, 1991). La propuesta de Parker, junto con el aumento en volumen y disponibilidad de cantos, continúan generando un cambio en la manera como monitoreamos las poblaciones de aves.

Actualmente, las técnicas para el registro y análisis de señales acústicas se han popularizado y permiten optimizar la colecta de información de comunidades de aves, logrando registrar especies raras, evasivas y difíciles de detectar (Goyette *et al.*, 2011). La utilidad de estas técnicas se hace aún más evidente bajo condiciones en las que nuestra vista pierde agudeza, como sucede en la noche. Las especies nocturnas suelen ser crípticas, evasivas y activas en tiempos en los que usualmente es desafiante estar en campo (Goyette *et al.*, 2011), dificultando el registro, seguimiento y comprensión de estas. Por ello, se han desarrollado métodos que implican el reconocimiento de la actividad acústica para el monitoreo de estas especies por medio de sensores acústicos programables (König *et al.*, 2008).

Los sensores acústicos son dispositivos que permiten registrar automáticamente el ambiente sonoro de un lugar. El uso de estos dispositivos permite maximizar la cantidad de información acústica obtenida, mientras se minimizan los esfuerzos del personal en campo. Diversos estudios han demostrado que los sensores acústicos permiten monitorear de manera detallada patrones de actividad, y demuestran la eficiencia de estas técnicas en condiciones de campo, evitando además, la intervención de los investigadores al emplear herramientas como playback y puntos de conteo (Byrnes, 2013; Ferraz

et al., 2010; Sberze *et al.*, 2010). De esta forma, se posibilita el monitoreo de las especies de una manera fidedigna, pues se espera registrar el comportamiento sin que se incurra en la perturbación de este (Deichmann *et al.*, 2018).

Aunque los sensores acústicos han facilitado la recolección de datos, el análisis del gran volumen de información generado continúa siendo un desafío para la implementación de esta técnica (Blumstein *et al.*, 2011). Idealmente, esta información debe ser procesada manualmente con el fin de identificar posibles falencias (por ejemplo, mal funcionamiento de la grabadora) y generar una base de datos anotada (quién o qué genera sonido en algún momento particular) que pueda ser utilizada en múltiples contextos. Es posible que, en la actualidad, este sea el mayor cuello de botella en el campo del monitoreo bioacústico. Históricamente, la depuración ha sido realizada por personas que tienen un gran interés o la responsabilidad de analizar sus datos; no obstante, el conocimiento de cualquier persona es limitado y cada vez son menos los interesados y capacitados para cumplir con esta tarea. De manera simultánea y con el fin de alivianar la carga para las personas, se han perpetrado diversos esfuerzos alrededor del mundo por automatizar los procesos de detección y clasificación de señales acústicas (Aide *et al.*, 2013; Ovaskainen *et al.*, 2018; Sethi *et al.*, 2020). Entre estos esfuerzos podemos encontrar varios programas informáticos como ARBIMON-II (Sieve Analytics, 2015), AviaNZ (Marsland *et al.*, 2019), monitoR (Katz *et al.*, 2016) y warbleR (Araya-Salas & Smith-Vidaurre, 2018).

Estos programas presentan ventajas y desventajas asociadas, por ejemplo, a sus costos económicos (p. ej. procesar un minuto de audio en ARBIMON-II tiene un precio de 0.06 USD), así como restricciones geográficas (p. ej., AviaNZ funciona para aves en Nueva Zelanda). Es por ello por lo que se hace necesario identificar algoritmos o programas que tengan un desempeño aceptable bajo las condiciones particulares de cada investigación y que los esfuerzos sean dirigidos hacia el libre acceso. La evaluación de estos algoritmos cobra importancia y es fundamental para el continuo mejoramiento de las técnicas. Sobre todo para especies crípticas y de hábitos nocturnos, para las cuales la opción más eficaz de monitoreo es a través de sus vocalizaciones.

Los búhos hacen parte de este grupo de especies y varios trabajos han demostrado la utilidad de monitoreos acústicos sobre ellos (Byrnes, 2013; Goyette *et al.*, 2011). De manera general, la mayoría de las vocalizaciones de

los búhos se caracterizan por ser sencillas, de corta duración, y de baja frecuencia (< 3000Hz; Claudino *et al.*, 2018; Dantas *et al.*, 2016; Goyette *et al.*, 2011; Krabbe, 2017; Nagy & Rockwell, 2012; Sberze *et al.*, 2010). La mayoría de búhos son nocturnos o crepusculares y, por lo tanto, sus ambientes acústicos tienen características diferentes a las encontradas durante el día (Almeira & Guecha, 2019). Debido a la naturaleza de estos cantos y a sus ambientes acústicos, esperamos que este tipo de vocalizaciones sea relativamente fácil de identificar de manera automatizada, excepto en condiciones de baja relación señal-ruido, por ejemplo, cuando existe mucho ruido a frecuencias bajas, o cuando el emisor se encuentra distante de la grabadora. Si bien existen esfuerzos en el neotrópico que buscan entender patrones ecológicos de poblaciones de aves nocturnas por medio de la bioacústica (p. ej., Baldo & Mennill, 2011; Goyette *et al.*, 2011; Sberze *et al.*, 2010), y algunos esfuerzos para evaluar la eficiencia de diferentes algoritmos en la detección de señales acústicas (Heinicke *et al.*, 2015; Kalan *et al.*, 2015; Keen *et al.*, 2017; Ulloa *et al.*, 2016), no se conocen estudios que evalúen metodologías para sistematizar, por medio de algoritmos, la revisión de grabaciones obtenidas durante la noche en el Neotrópico. Bajo el contexto anterior, planteamos como principal objetivo de este trabajo, evaluar el desempeño de la función “autodetect” del paquete warbleR en la detección de cantos de un búho nocturno (*Megascops centralis*) en grabaciones realizadas en la zona de amortiguamiento del embalse de Jaguas, en el oriente del departamento de Antioquia, en el noroeste de Colombia. Este es un algoritmo de detección que exige pocos parámetros y por lo tanto es de fácil implementación, requiriendo poco conocimiento del lenguaje de R para su ejecución. Es, además, un algoritmo de libre acceso. Nuestra hipótesis fue que, dada la sencillez de los cantos de esta especie, el algoritmo tendría un buen desempeño en general, excepto cuando la calidad de las señales fuese mala (debido a ruido en el ambiente o a distancia del emisor). Para esto, evaluamos el desempeño del algoritmo de detección variando la tasa de muestreo, el umbral de amplitud y la calidad (relación señal-ruido) de las vocalizaciones.

Materiales y métodos

Área de estudio. Este estudio se llevó a cabo en el área de amortiguamiento de la hidroeléctrica Jaguas, propiedad de ISAGEN, localizada en la vertiente oriental de la cordillera Central de los Andes de Colombia, en jurisdicción de los municipios de San Rafael, Alejandría,

Santo Domingo y San Roque, en el departamento de Antioquia (Figura 1). La zona de amortiguamiento del embalse cuenta con ~2 600 hectáreas de ecosistemas forestales entre 1250 y 1330 m s.n.m. La formación vegetal en la zona corresponde a bosque muy húmedo premontano (bmh-PM), con una temperatura entre 18 y 24 °C y un promedio anual de lluvia de 2 000 a 4 000 mm. Dentro del área de estudio, fueron ubicadas 21 grabadoras automatizadas, de las cuales seleccionamos dos para su posterior procesamiento.

Grabadoras. Se emplearon grabadoras Song Meter 4 (SM4-Wildlife Acoustics) localizadas en 21 sitios alrededor del área de mitigación de la represa Jaguas (una grabadora por sitio). Estas grabadoras fueron configuradas a una tasa de muestreo de 44 100 Hz y una profundidad de 16 bits, para grabar 1 minuto cada 15 minutos en estéreo entre las 19:00 y las 5:45, durante el periodo entre el 10 de marzo y el 17 de junio de 2018. Para la evaluación, se seleccionaron dos grabadoras (G13 y G29), teniendo en cuenta la cantidad de los registros (Tabla 1).

Pre-procesamiento. Por medio del programa RavenPro 1.5 (Bioacoustics Research Program, 2011), se revisaron 6877 archivos de audio provenientes de las 21 grabadoras (Tabla 1). La revisión fue realizada por una sola persona (LAHC) quien etiquetaba manualmente las señales que se encontraran entre los 0 Hz y los 3000 Hz, identificando las que correspondieran a la especie de interés, *M. centralis*. Las grabadoras ubicadas en los sitios G13, G29 y G25 fueron las que más grabaciones de la especie registraron, con 49, 34 y 21 archivos, respectivamente (Tabla 1). Para evaluar el clasificador/detector, se seleccionaron dos grabadoras: la que registró un mayor número de señales de *M. centralis* (G13) y la que tuvo el mayor número de señales de buena calidad (G29; ver adelante).

Con el fin de caracterizar cualitativamente la calidad de la señal en términos de la relación señal-ruido, clasificamos los audios con detección manual positiva en tres categorías, con base en cómo se percibía la señal al momento de la revisión. Las categorías utilizadas fueron: (1) buena, señales claramente visibles en el espectrograma y perfectamente diferenciables en el espectro de potencia; (2) media, señales que podían verse en el espectrograma y cuyo pico en el espectro de potencia era apreciable pero no perfectamente diferenciable; y (3) mala, señales visibles en el espectrograma, pero casi inexistentes en el espectro de potencia (Figura 2).

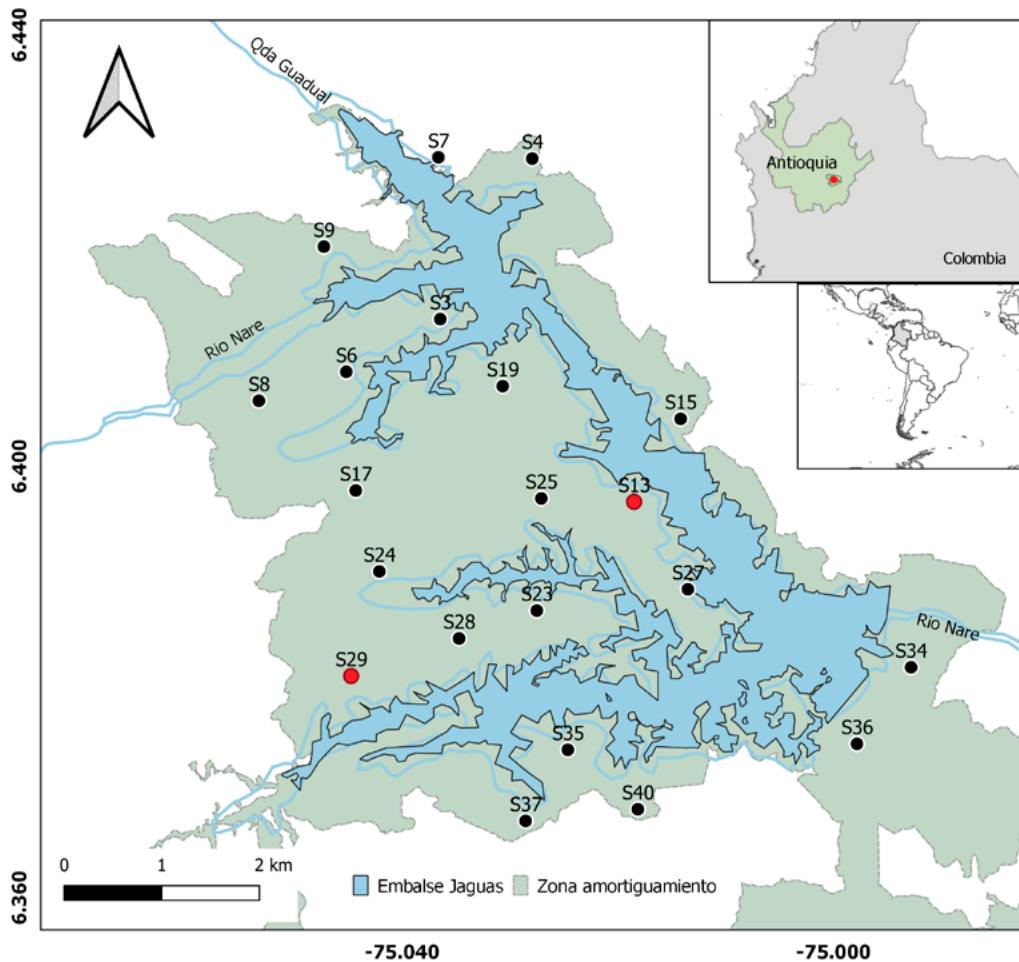


Figura 1. Disposición de las 21 grabadoras usadas para identificar las vocalizaciones de *Megascops centralis* alrededor del embalse Jaguas, Andes de Antioquia, Colombia. En rojo, las grabadoras seleccionadas para la evaluación de la función autodetec.

Figure 1. Arrangement of the 21 recorders used to identify vocalizations of *Megascops centralis*, around the Jaguas dam, Andes of Antioquia Colombia. Recorders Selected to evaluate the autotect function are shown in red.

Selección de parámetros para el algoritmo. Teniendo en cuenta que el canto de los búhos está determinado genéticamente (König *et al.*, 2008) y que no se observó gran variación en las características espectrales de los cantos identificados, se eligieron cinco grabaciones y de ellas se eligieron cinco vocalizaciones con calidades entre medias y buenas. Se procedió a cuantificar la frecuencia mínima, frecuencia máxima, duración mínima y duración máxima del canto con el programa Raven Pro 1.5 (Bioacoustics Program, 2011). Para estas variables, se obtuvieron promedios, valores mínimos y máximos. Estos valores fueron utilizados como punto de partida para definir los parámetros con los que se trabajaría el algoritmo. Se realizaron ensayos de prueba

y error con el algoritmo, en los que se incluían cinco archivos de audio con señales de la especie y cinco archivos sin ellas, buscando ajustar los parámetros para una correcta identificación de la especie en el conjunto de prueba. Una vez se detectaron la mayoría de las señales, se estableció el valor final de cada uno de los parámetros para la realización de las pruebas de desempeño del algoritmo. El algoritmo evaluado cumple con las características de detector sencillo y corresponde a la función autotectec del paquete WarbleR (Araya-Salas & Smith-Vidaurre, 2018), del software de libre acceso R, que busca señales de interés a partir de características predefinidas por los usuarios, relacionados con la duración, la banda de frecuencia de los cantos y la amplitud.

Tabla 1. Número total de grabaciones de 1 minuto por sitio de muestreo, fechas de actividad de cada grabadora y número de registros de *Megascops centralis* por sitio, en los alrededores del embalse Jaguas, Andes de Antioquia, Colombia.

Table 1. Total number of 1-minute recordings per site, their corresponding recording dates and the records of *Megascops centralis* in each site, around the Jaguas dam, Andes of Antioquia Colombia.

Grabadora	Num archivos	Fecha inicio	Fecha Final	Num registros
G03	276	11-may	18-may	0
G04	205	11-may	18-may	0
G06	459	18-may	27-may	3
G07	322	10-may	18-may	0
G08	322	10-may	18-may	0
G09	460	19-may	28-may	0
G13	321	28-may	4-jun	49
G15	456	19-may	27-may	6
G17	433	19-may	27-may	6
G19	456	19-may	28-may	0
G23	277	29-may	4-jun	7
G24	276	29-may	4-jun	0
G25	322	4-jun	11-jun	21
G27	322	28-may	4-jun	0
G28	276	5-jun	11-jun	5
G29	276	5-jun	11-jun	34
G34	324	18-jun	25-jun	0
G35	322	4-jun	11-jun	0
G36	277	12-jun	18-jun	0
G37	278	5-jun	11-jun	2
G40	217	12-jun	18-jun	1

Análisis estadísticos. El desempeño del modelo se determinó mediante matrices de confusión (presencia o ausencia de vocalización observada versus identificado por el modelo) para cada archivo de 1 minuto de grabación. Si el algoritmo predecía presencia del canto de la especie en un archivo de audio donde había al menos una vocalización de la especie, esto se registraba como un verdadero positivo. Es decir, que solo evaluamos el desempeño del algoritmo en términos de presencia/ausencia por archivo y no de la cantidad

absoluta de vocalizaciones en cada grabación. Los valores de sensibilidad, definida como la capacidad del algoritmo para detectar las señales de interés cuando realmente están presentes (verdaderos positivos) y la especificidad, definida como la capacidad del algoritmo para indicar la ausencia de las señales de interés cuando realmente no están (verdaderos negativos), se obtuvieron a partir de la matriz de confusión para cada parametrización del modelo, mediante el paquete *caret* (Kuhn, 2011) de R.

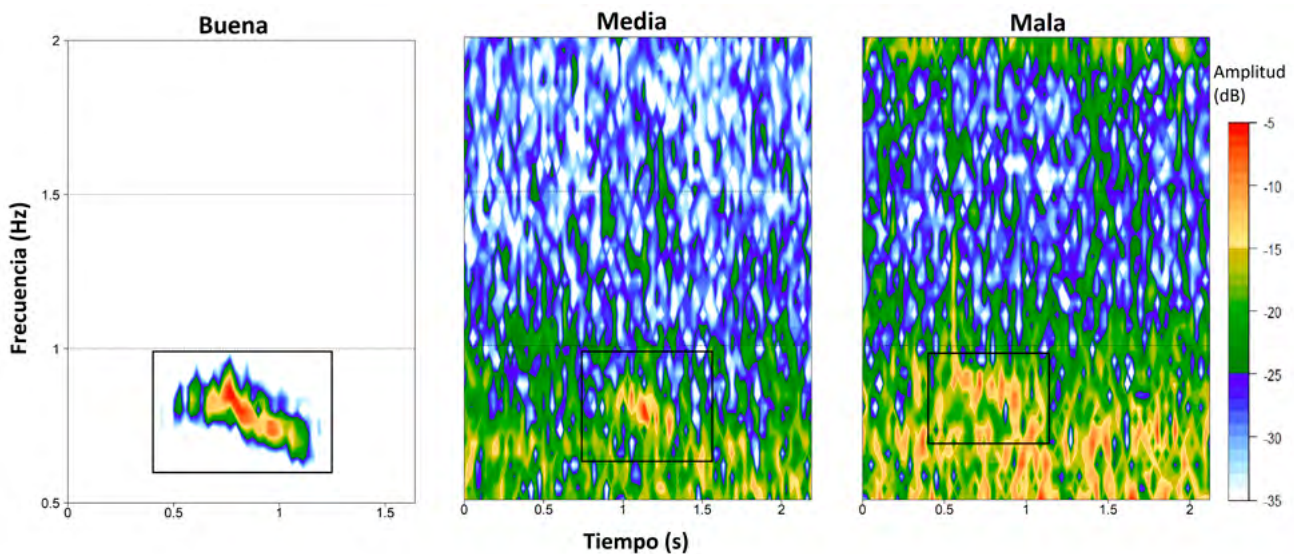


Figura 2. Ejemplos de vocalizaciones de *Megascops centralis* alrededor del embalse Jaguas, Andes de Antioquia, Colombia, correspondientes a cada una de las categorías de calidad identificadas, realizados en la banda de 0.5-2 kHz. El recuadro negro indica la ubicación de la vocalización y los colores representan la amplitud de la señal. Para la generación de los espectrogramas se empleó un tamaño de ventana (wl) de 1200 y un traslape (ovlp) del 5 %. Estas señales fueron obtenidas de los dos sitios elegidos para la evaluación: G29 (calidad buena y media) y G13 (mala calidad).

Figure 2. Examples of vocalizations of *Megascops centralis* around the Jaguas dam, Andes of Antioquia Colombia, corresponding to each of the signal quality categories in the 0.5-2 kHz band. The black box indicates the location of the vocalization and the colors represent the amplitude of the signal. For the generation of the spectrograms, a window size (wl) of 1200 and an overlap (ovlp) of 5% were used. These signals were obtained from the two chosen sites for evaluation: G29 (good and medium quality) and G13 (bad quality).

Además de la caracterización espectral del canto que se pretende identificar, el modelo requiere un parámetro relacionado con el umbral de amplitud que permite diferenciar el ruido de las verdaderas señales de interés (umbral de amplitud). Se evaluó la eficiencia del algoritmo, bajo todas las posibles combinaciones de los siguientes parámetros: umbrales de 5 %, 10 % y 20 %, y tasas de muestreo de 44 100 Hz (original, de ahora en adelante 44 kHz) y 22 050 Hz (de ahora en adelante, 22 kHz). Resultados preliminares evidenciaron que, en un número considerable de ocasiones, la función detectó un alto número de cantos dentro de un archivo (i.e., más de 10), lo cual nunca fue registrado durante la revisión manual en las grabaciones (máximo cuatro señales por audio). Por lo tanto, decidimos introducir como postprocesamiento de las detecciones, un nuevo parámetro: *Th_seleccion*, el cual establece el número de selecciones por archivo de audio a partir del cual se consideraría el archivo como positivo o negativo para la evaluación del desempeño. Por ejemplo, para un umbral de selecciones de 30, si la función registró 30 o más

cantos de *M. centralis* en una grabación, se interpreta como un negativo. Si para el mismo valor del umbral de selecciones, un audio contiene 25 vocalizaciones según la función autodetec, entonces se interpreta como un positivo. Se evaluaron todos los posibles valores (0-57 de este parámetro en los diferentes experimentos).

De esta manera se identificaron los modelos con mejor desempeño bajo cada criterio, buscando (1) los valores de los parámetros que igualaran –o minimizaran la diferencia entre– los valores de sensibilidad y especificidad y, (2) los valores de los parámetros que maximizaran el valor de la suma de ambos criterios.

Por último, se evaluó si la probabilidad de que el modelo acertara en la identificación de un canto variaba en función de la calidad de la señal (buena, media y mala), mediante un modelo lineal mixto generalizado donde la variable respuesta fue acierto o desacierto (binaria), la variable predictora fue la calidad de las señales, incluyendo como variables aleatorias los parámetros de

frecuencia de muestreo y el umbral de amplitud. El modelo fue implementado con la función `glmer` mediante el paquete `lme4` de R (Bates et al., 2020), utilizando la función de enlace binomial-logit.

Resultados

De los 21 sitios de muestreo, *M. centralis* fue encontrado en 10 (Tabla 1). En total, se encontraron 134 archivos con vocalizaciones de la especie de interés (1.94 % de las 6877).

De la totalidad de audios de *M. centralis* (134), 16 fueron clasificados de buena calidad, 29 de calidad media y 89 de mala calidad. La grabadora G29 incluyó un mayor número de vocalizaciones de buena calidad (10 buenas, 11 medias y 13 malas) con respecto a la grabadora G13 (0 buenas, 4 medias y 45 malas).

La banda de frecuencia del canto de *M. centralis* estuvo entre 540.9 Hz y 1030.4 Hz y la duración de los cantos evaluados osciló entre los 0.568s y 1.021s (Tabla 2). Los parámetros elegidos para la evaluación del algoritmo sobre la totalidad de los audios se encuentran en la última fila de la Tabla 2.

La función autodetec retorna una tabla con el número de selecciones encontradas por el detector en cada archivo. El número de selecciones en los archivos evaluados varió entre 0 y 57. En la gran mayoría de archivos, la

función autodetec identificó menos de 10 selecciones, dependiendo de la parametrización escogida (Figura 3).

El desempeño de la función autodetec en la identificación de la presencia de cantos de *M. centralis* fue altamente variable en función de la parametrización del modelo (Tasa de muestreo, umbral de amplitud y `Th_seleccion`). En general, la sensibilidad (capacidad para detectar la presencia de cantos en un audio) disminuyó con un aumento del umbral de amplitud empleado en la función (Figura 4). Este patrón no se cumple a 22 kHz en G29, donde se aprecia un aumento de la sensibilidad entre 5 % (promedio 0.45 ± 0.05) y 10 % (promedio 0.58 ± 0.07) y una drástica caída al emplear un umbral de amplitud del 20 % (promedio 0.1 ± 0.01). El valor máximo de sensibilidad alcanzado al usar las grabaciones del G29 está sobre 0.8, mientras que la sensibilidad máxima en el G13 es aproximadamente 0.3 (Figura 4). Por el contrario, la especificidad (capacidad de detectar ausencia de cantos en un audio cuando realmente no hay) aumentó con la tasa de muestreo y con el umbral de amplitud (Figura 4). La variación observada dentro de las cajas, en las gráficas de especificidad y sensibilidad (Figura 4) se debe al parámetro `Th_seleccion`.

Es claro que, para todos los experimentos realizados, la sensibilidad –mejor capacidad de identificar un canto de *M. centralis*– aumenta al ser más permisivos con el número de selecciones a partir del cual se considera el audio como negativo (un aumento en el valor de `Th_seleccion`), mientras que la especificidad disminuye (Figura 5).

Tabla 2. Valores mínimos, máximos y promedio de frecuencia mínima (Hz), frecuencia máxima (Hz) y duración de los cantos(s) de *M. centralis*, alrededor del embalse Jaguas, Andes de Antioquia, Colombia. La última fila de la tabla muestra los parámetros seleccionados para implementar la función autodetec que requiere especificar una duración mínima y una duración máxima. Las duraciones elegidas se muestran en la misma celda como min-max(min-max).

Table 2. Minimum, maximum and average values of minimum frequency (Hz), maximum frequency (Hz) and signal duration (s) of *M. centralis*' vocalizations around the Jaguas dam, Andes of Antioquia Colombia. The last row of the table includes the parameter values selected to implement the autodetec function. The function requires specifying a minimum duration and a maximum duration, the chosen durations are shown in the same cell as min-max

	Frec min (Hz)	Frec max (Hz)	Duración (s)
Mínima (medida)	540.9	894	0.568
Máxima (medida)	765	1030.4	1.021
Promedio	627.38 (+/-17.5)	966.17 (+/- 45.7)	0.8661 (+/-0.1)
Parámetros elegidos	560	1040	0.4-1.3

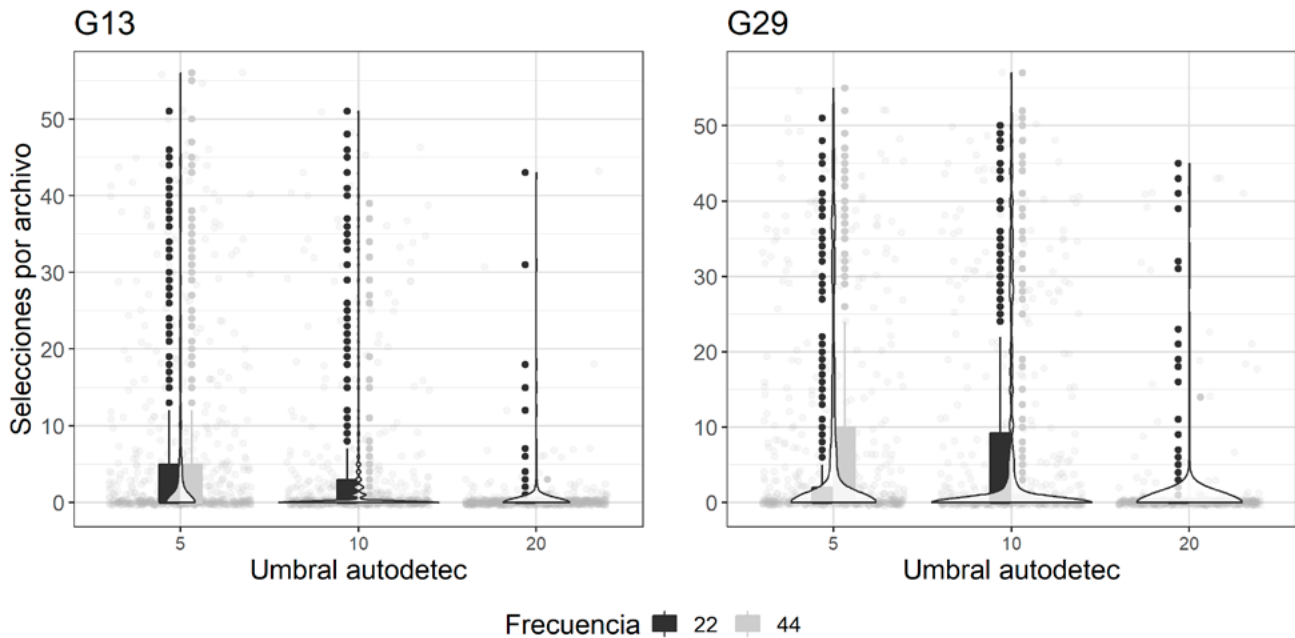


Figura 3. Número de selecciones generadas por autodetec en cada uno de los experimentos realizados para las dos grabadoras G13 y G29, usadas para identificar las vocalizaciones de *Megascops centralis* alrededor del embalse Jaguas, Andes de Antioquia, Colombia. En el eje X se observan los umbrales de amplitud utilizados en la función, y en el eje Y el número de selecciones por archivo. Los puntos grises claros en el fondo representan el número de selecciones en cada audio, las barras corresponden al inter cuartil de los datos (percentil 25-75), las líneas incluyen el máximo para cada frecuencia evaluada (negras a 22 kHz y grises a 44 kHz) y sus respectivos valores atípicos. La trama de violín representa la densidad de los datos a lo largo del eje Y.

Figure 3. Number of selections generated by autodetec in each of the experiments carried out for the two recorders, G13 and G29 used to identify vocalizations of *Megascops centralis*, around the Jaguas dam, Andes of Antioquia Colombia. The X-axis shows the amplitude thresholds used in the function and the Y-axis shows the number of selections in each file. Light gray points in the background represent the number of selections for each audio, bars correspond to the interquartile range (25-75 percentile) for each frequency evaluated (black at 22 kHz and gray at 44kHz) and their respective outliers. Violin plots represent the density of the data along the Y axis.

Es posible observar que, para las evaluaciones de la grabadora G13, las líneas de sensibilidad y especificidad no llegan a cruzarse, mientras que en los experimentos realizados con los audios de la grabadora G29 vemos un cruce de las líneas en umbrales (de amplitud) de 5 % y 10 %.

De igual manera, al juntar los datos obtenidos de ambas grabadoras, observamos que las curvas no llegan a cruzarse y que la mejor combinación de parámetros resulta de una tasa de muestreo de 44 kHz, un umbral de ruido del 5 %, y el mínimo valor del Th_seleccion –umbral de selección– (Figura 5). Adicionalmente, al aumentar el parámetro del umbral de amplitud en la función autodetec hay una tendencia

del algoritmo a identificar un menor número de cantos por audio.

Los resultados del modelo lineal generalizado mixto muestran que la probabilidad de acierto del algoritmo de autodetec se ve significativamente afectada por la calidad de la señal. El modelo que incluye la calidad como factor fijo es superior al modelo nulo donde solo se incluyen los factores aleatorios (diferencia en AIC ~ 54.4). La probabilidad de acierto estimada para audios donde las vocalizaciones son de buena calidad es 0.64, mientras que para aquellos de intermedia o mala calidad es de 0.27 y 0.12 respectivamente. El modelo completo tiene un R^2 de 0.48, mientras que el R^2 marginal (solo con respecto a los factores fijos) fue de 0.12.

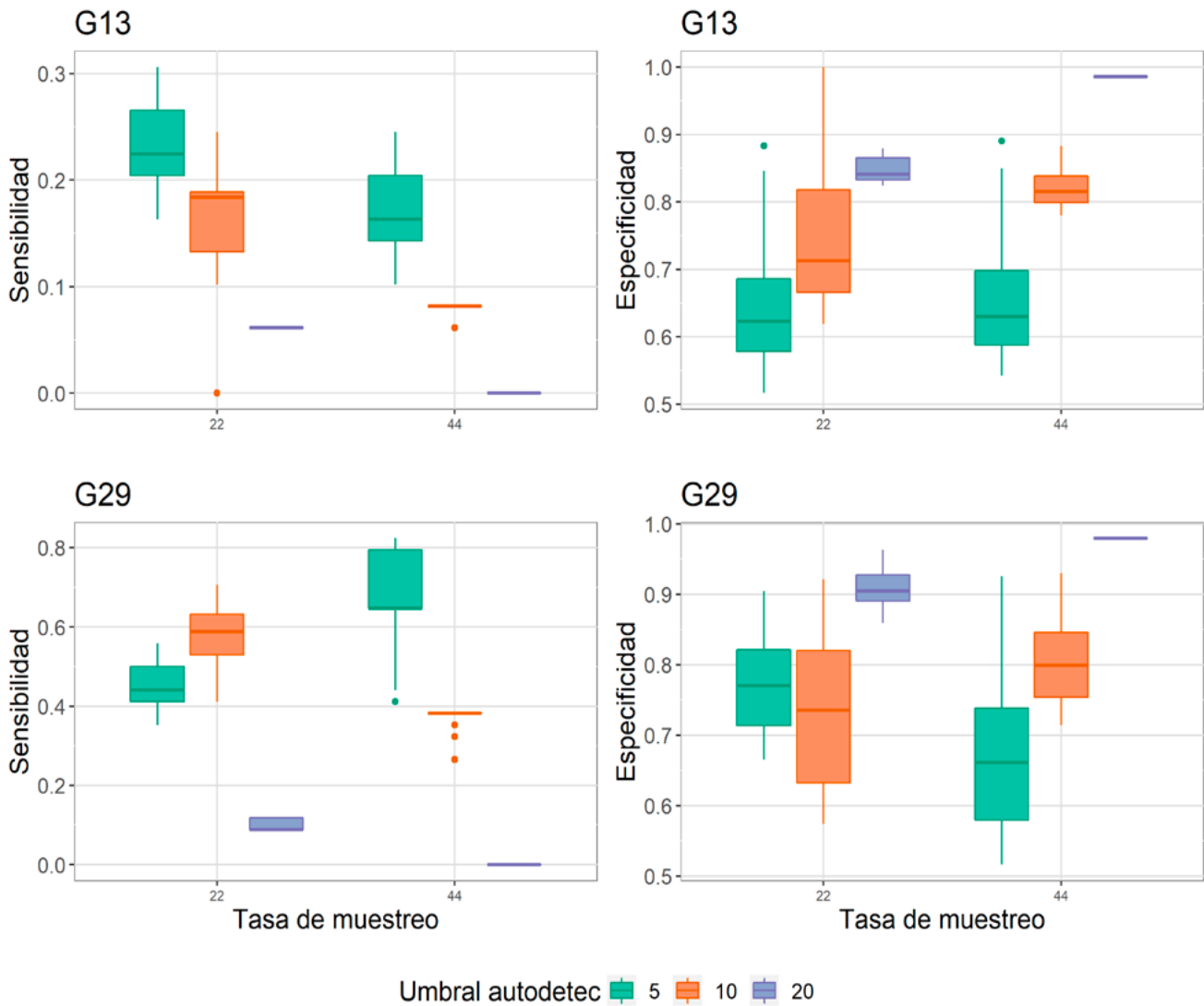


Figura 4. Sensibilidad y especificidad del algoritmo autodetec para identificar presencia y ausencia de vocalizaciones de *Megascops centralis* en los audios de las grabadoras de los sitios seleccionados (G13 y G29) alrededor del embalse Jaguas, Andes de Antioquia, Colombia. La variación en la especificidad y sensibilidad para cada combinación única de parámetros se debe al parámetro Th_seleccion.

Figure 4. Sensitivity and specificity of the autodetec function to identify presence and absence of *Megascops centralis* vocalizations in the recordings from the selected sites (G13 and G29) around the Jaguas dam, Andes of Antioquia Colombia. The specificity and sensitivity variation in each unique combination of parameters is generated from the Th_selection parameter.

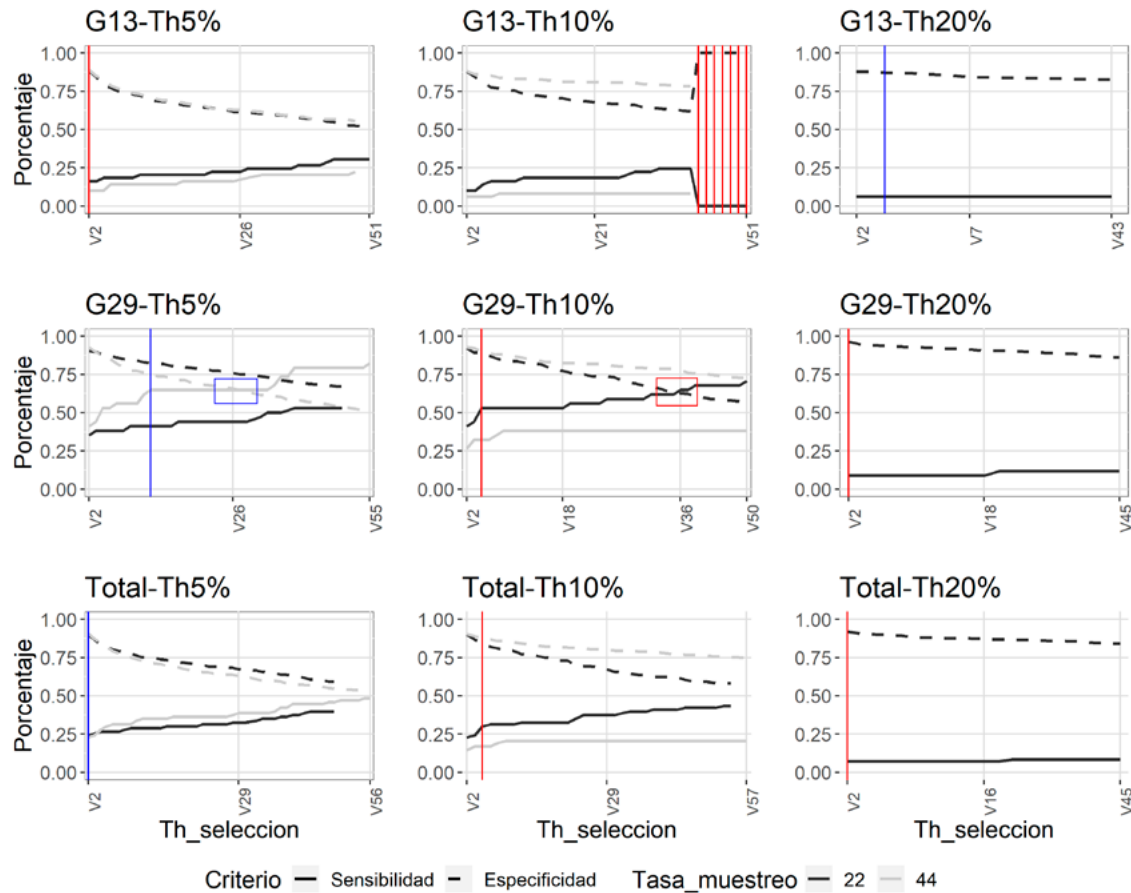


Figura 5. Desempeño de la función autotetec, en términos de sensibilidad y especificidad, bajo diferentes parámetros y con diferentes umbrales de la selección ($Th_{seleccion}$) para identificar vocalizaciones de *Megascops centralis* en los audios de las grabadoras de los sitios seleccionados (G13 y G29), alrededor del embalse Jaguas, Andes de Antioquia, Colombia. La línea gris corresponde a las pruebas realizadas a una frecuencia de 44 kHz, y la negra a frecuencias de 22 kHz. Las líneas punteadas muestran el comportamiento del criterio especificidad y en líneas continuas el comportamiento del criterio de sensibilidad. Las líneas verticales indican la combinación de parámetros que maximiza, por suma, el desempeño de la función. En rojo (G13-Th5 %, G13-Th10 %, G29-Th10 %, G29-Th20 %, Total-TH10 % y Total-Th20 %) se indican aquellas combinaciones de parámetros en las que el desempeño del modelo se maximiza a 22 kHz y en azul (G13-Th20 %, G29-Th5 % y Total-Th5 %) a 44 kHz. Los cuadros en las pruebas de G29 (Th5 % y Th10 %) señalan los puntos de cruce de las líneas de los parámetros (donde la sensibilidad y especificidad se igualan). La figura incluye la evaluación del algoritmo al emplear los audios de cada punto por separado (G13, G29) y al unir los audios de cada sitio (Total).

Figure 5. Performance of the autotetec function, in terms of sensitivity and specificity, under different parameters and different selection thresholds ($Th_{seleccion}$) to identify *Megascops centralis* vocalizations in the recordings from the selected sites (G13 and G29) around the Jaguas dam, Andes of Antioquia Colombia. The gray line corresponds to tests carried out at a sample rate of 44 kHz, and the black line to 22 kHz. Dotted lines show the behavior of the specificity criterion, while solid lines show the behavior of the sensitivity. The vertical lines indicate the combination of parameters that maximizes, by sum, the performance of the function. The color red (G13-Th5 %, G13-Th10 %, G29-Th10 %, G29-Th20 %, Total-TH10 %, and Total-Th20 %) indicate parameters' combination in which the performance of the model is maximized when the sample rate was 22 kHz, and in blue (G13-Th20 %, G29-Th5 %, and Total-Th5 %) when sample rate was 44 kHz. The boxes in the G29 tests (Th5 % and Th10 %) show the crossing points of the parameter lines (where the sensitivity and specificity are equal). The figure includes the evaluation of the algorithm when using the audios of each point separately (G13, G29) and when joining the audios of each site (Total).

Discusión

Los resultados de nuestro trabajo indican que (1) *M. centralis* es una especie difícil de registrar: solo 1.94 % del total de audios incluyeron cantos de esta especie; (2) el algoritmo autodetect del paquete warbleR es de fácil implementación y su desempeño depende de la tasa de muestreo, el umbral de ruido, y la calidad de los cantos en las grabaciones. Este algoritmo tiene un muy buen potencial para la detección automatizada de cantos sencillos, pero requiere de buena calidad de los cantos en sus grabaciones.

De las 6877 grabaciones revisadas, la especie solo fue registrada en 134 grabaciones y en solo 10 de los 21 sitios muestreados, lo que puede dar indicios de que es una especie poco común y difícil de detectar; sin embargo, poco se conoce sobre las variables que pueden estar afectando su ocupación y detectabilidad. Dado que el tiempo de muestreo de las grabadoras fue corto (mayo-junio), dudamos que la heterogeneidad entre grabadoras pueda confundirse con estacionalidad en la actividad vocal de *M. centralis*. Se cree que los patrones de actividad de este género pueden estar ligados a los ciclos lunares (Rosado-Hidalgo, 2018), y es posible que el periodo de muestreo no haya coincidido con el pico de actividad vocal de la especie, que se espera sea durante periodos de luna llena; sin embargo esta hipótesis se encuentra en evaluación. Los datos generados durante este estudio pueden ser utilizados para entender si la ocupación y la detección de esta especie están relacionadas con covariables ambientales (Campos-Cerqueira & Aide, 2016), lo cual sería de gran interés, ya que se trata de una especie recientemente separada de *M. guatemalae* (SACC, 2018), con una distribución aparentemente fragmentada. Las herramientas bioacústicas como la presentada en este trabajo cobran particular importancia para el estudio de estas especies crípticas.

Uno de los insumos principales para establecer límites taxonómicos en búhos son sus vocalizaciones, y una buena caracterización de sus vocalizaciones es, por lo tanto, esencial (Dantas *et al.*, 2016; Krabbe, 2017). Para *M. centralis*, Krabbe (2017) encontró que los cantos oscilaban entre 687 y 920 Hz y que la duración era de entre 0.7s y 1.6s. Los resultados obtenidos en el presente estudio indican un rango mayor de frecuencia (540.9Hz-1030.4 Hz) y un rango de duración menor (0.6-1.02 s). La diferencia en la frecuencia de los cantos puede deberse a que los audios analizados por Krabbe (2017) corresponden a cantos registrados en diferentes localidades de Suramérica, o puede también sugerir que existe cierta estructura

poblacional al interior de esta especie. Las diferencias existentes en las duraciones de los cantos pueden deberse a la calidad de las señales, puesto que, por efectos de atenuación y dispersión, las componentes de la señal con menos energía tienden a enmascarse con el ruido de fondo, perdiendo definición en la delimitación de sus características temporales (Marten *et al.*, 1977).

El algoritmo presentó un desempeño variable y relacionado, en parte, con la calidad de los cantos en las grabaciones. Este algoritmo fue originalmente diseñado e implementado sobre grabaciones direccionales de *Phaetornis longirostris* obtenidas de xeno-canto (Araza-Salas & Smith-Vidaurre, 2017), lo que implica niveles de ruido mucho menores y señales con una alta calidad. En nuestras condiciones –micrófonos omnidireccionales, ruido ambiental y distancias variables del emisor a la grabadora–, el algoritmo pudo alcanzar especificidades y sensibilidades altas, pero solo con un alto contenido de grabaciones con vocalizaciones de alta calidad. Como es frecuente, existe un compromiso entre la capacidad de identificar presencias y la capacidad de identificar ausencias: cuando el algoritmo logra detectar un alto número de audios con cantos (alta sensibilidad), presenta un alto número de falsos positivos (baja especificidad), y viceversa. Aunque resultados de altas especificidades (capacidad de detectar ausencia de cantos en un audio cuando realmente no hay) pueden ser útiles, por ejemplo, para descartar archivos que no contengan audios y disminuir el número de grabaciones que escuchar, requieren sensibilidades (capacidad de detectar presencia de cantos en un audio cuando realmente los hay) medias o buenas que permitan realizar un filtro efectivo. Otros trabajos en los que se han utilizado algoritmos para la detección automatizada de cantos de aves también han reportado resultados con un alto número de falsos positivos (Bardeli *et al.*, 2010), mientras que otros han encontrado resultados de puntajes de AUC entre 70% y 90% (Stowell *et al.*, 2019). Estos resultados son esperanzadores, pero usualmente se refieren a metodologías más avanzadas, como redes neuronales convencionales (CNN), que no cuentan con una interfaz de usuario, lo que requeriría un entendimiento más avanzado de los lenguajes de programación empleados. Los resultados de autodetect pueden ser poco esperanzadores para el tipo de grabaciones de campo omnidireccionales y sugieren el uso de herramientas más complejas con el fin de obtener mejores resultados.

Obtener un balance entre la sensibilidad y especificidad de un detector es ideal, aunque no resulta sencillo. En nuestros resultados, solo pudimos evidenciar

un balance en la grabadora del sitio G29, donde se encontraban el mayor número de audios con alta calidad (cruces de las líneas de sensibilidad y especificidad, [Figura 5](#)). Para esta grabadora se pudieron obtener dos equilibrios, el primero a 44 kHz con un umbral de amplitud del 5 %, con una sensibilidad de 0.74 y una especificidad de 0.6, y el segundo a 22 kHz, umbral de amplitud de 10 %, con una sensibilidad de 0.58 y una especificidad de 0.74. Ambos resultados se obtienen al ubicar el umbral de selección ($Th_{seleccion}$) en 36 y 26 respectivamente (aceptando hasta 36 o 26 señales en un audio, como positivo). El resultado obtenido para los datos de G29 se vuelve interesante cuando se considera el Teorema de Nyquist-Shannon ([Nyquist, 1928](#)) que indica que para recuperar una señal por medio de un espectrograma, debe grabarse al doble de la frecuencia en la que ésta se produce. Dado que *M. centralis* vocaliza alrededor de los 1000 Hz, con una tasa de muestreo de alrededor de 2000 Hz sería suficiente para obtener la información requerida. Sería de pensar, entonces, que tasas de muestreo de 22 kHz y 44 kHz no deberían mostrar resultados diferentes; sin embargo, nuestros resultados sugieren que la manera como funciona el detector de esta función puede verse afectado por valores de la tasa de muestreo mucho más alta.

El alto número de selecciones de cantos en archivos donde no había ningún canto o sonido parecido fue un resultado inesperado, para el cual aún no tenemos una clara explicación. Muchas de estas instancias y las selecciones generadas por el algoritmo no aparentaban estar relacionadas con presencia de otras señales que pudieran considerarse falsos positivos, ni con ruido ambiental. Debido a esto, creemos que la introducción del umbral de selecciones ($Th_{seleccion}$), como medida de post-procesamiento, puede ser una buena aproximación para filtrar estos audios que presentan un número alto de selecciones sin razón aparente. De una u otra manera, si se buscaran señales similares a las de *M. centralis*, con condiciones que sugieran señales de calidades medias y buenas, es recomendable emplear una tasa de muestreo de 22 kHz, un umbral de amplitud de 10 % y considerar un archivo de audio como positivo al presentar un máximo de 26 detecciones. Esto considerando que, aunque no fue evaluado, durante la realización de las pruebas se evidenció un menor tiempo de procesamiento para los archivos con una tasa de muestreo de 22 kHz.

En resumen, es claro que existe una relación directa entre la calidad de la señal y el desempeño de autodetec,

lo cual es de esperar en este tipo de algoritmos. Lo complicado es saber si la causa de la baja calidad de la señal se debe a interferencia por ruido ambiental, o a lejanía del emisor. Si la causa de la mala calidad es la lejanía del emisor, puede que las inferencias que se realicen sean consistentes con el hecho de que el organismo de interés no se encuentra dentro del rango de operación de la grabadora. Si la causa es interferencia por ruido, el problema al interpretar el audio como una ausencia se haría evidente. Es por ello que el criterio de inclusión de las señales debería darse, en parte, por la distancia a la que los emisores se encuentren de las unidades de recepción y por ello, se hacen necesarios estudios que calculen la relación entre dichas distancias y las amplitudes registradas ([Darras *et al.*, 2018](#)), en especial, bajo las diferentes condiciones que ofrece el Neotrópico.

Conclusiones

Nuestros resultados sugieren que el desempeño de este algoritmo no es recomendable bajo las condiciones acústicas que implican sensores remotos, asociadas a la naturaleza del canto de una especie como *M. centralis*, que se caracteriza por sus bajas frecuencias, viéndose altamente afectado por el ruido. Sin embargo, es de esperarse que algoritmos sencillos, como el evaluado en este estudio, presenten mejores resultados en señales de otra naturaleza, como murciélagos, donde la relación señal-ruido sea mejor. Es probable que aproximaciones desde técnicas de aprendizaje de máquina o inteligencia artificial permitan obtener mejores resultados para escenarios como el presentado. No obstante, implicando un conocimiento detallado del algoritmo que se emplee. Una vez más, hacemos énfasis en la necesidad de contar con un conjunto de datos anotado y lo suficientemente grande, que permita realizar las respectivas evaluaciones

Agradecimientos

Agradecemos al Grupo Herpetológico de Antioquia de la Universidad de Antioquia (GHA) por la proporción de los datos empleados, que fueron obtenidos gracias al convenio Universidad de Antioquia- ISAGEN, y al Grupo de Ecología y Evolución de Vertebrados de la Universidad de Antioquia (GEEV), por las licencias y el recurso humano proporcionados.

Referencias

- Aide, T. M., Corrada-Bravo, C., Campos-Cerqueira, M., Milan, C., Vega, G., & Alvarez, R. (2013). Real-time bioacoustics monitoring and automated species identification. *PeerJ*, 2013(1), 1-19.
<https://doi.org/10.7717/peerj.103>
- Almeira, J., & Guecha, S. (2019). Dominant power spectrums as a tool to establish an ecoacoustic baseline in a premontane moist forest. *Landscape and Ecological Engineering*, 15(1), 121-130.
<https://doi.org/10.1007/s11355-018-0355-0>
- Analytics, S. (2015). Arbimon II: Bio-acoustics analysis platform. Retrieved from <https://arbimon.sieve-analytics.com/>
- Araya-Salas, M., & Smith-Vidaurre, G. (2017). warbleR: an R package to streamline analysis of animal acoustic signals. *Methods in Ecology and Evolution*, 8(2), 184-191.
<https://doi.org/10.1111/2041-210X.12624>
- Araya-Salas, M., & Smith-Vidaurre, G. (2018). Package "warbleR."
- Baldo, S., & Mennill, D. J. (2011). Vocal behavior of Great Curassows, a vulnerable Neotropical bird. *Journal of Field Ornithology*, 82(3), 249-258.
<https://doi.org/10.1111/j.1557-9263.2011.00328.x>
- Bardeli, R., Wolff, D., Kurth, F., Koch, M., Tauchert, K. H., & Frommolt, K. H. (2010). Detecting bird sounds in a complex acoustic environment and application to bioacoustic monitoring. *Pattern Recognition Letters*, 31(12), 1524-1534.
<https://doi.org/10.1016/j.patrec.2009.09.014>
- Bates, D., Maechler, M., Bolker, B., Walker, S., Rhrhristensen Bojesen, R. H., Singmann, H., ... Scheipl, F. (2020). Package "lme4." R topics documented.
- Blumstein, D. T., Mennill, D. J., Clemens, P., Girod, L., Yao, K., Patricelli, G., ... Hanser, S. (2011). Acoustic monitoring in terrestrial environments using microphone arrays: applications, technological considerations and prospectus. *Journal of Applied Ecology*, 48(3), 758-767.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2011.01993.x>
- Byrnes, R. M. (2013). Assessing bioacoustic techniques for inventory and monitoring of forest owls in the Central Sierra Nevada, California. (Tesis). Humboldt State University, Science department. 50 pp.
- Campos-Cerqueira, M., & Aide, T. M. (2016). Improving distribution data of threatened species by combining acoustic monitoring and occupancy modelling. *Methods in Ecology and Evolution*, 7(11), 1340-1348.
<https://doi.org/10.1111/2041-210X.12599>
- Claudino, R. M., Carlos, M.-J. J., & Antonini, Y. (2018). Owl assemblages in fragments of atlantic forest in Brazil. *Ornitología Neotropical*, (29), 281-288.
- Dantas, S. M., Weckstein, J. D., Bates, J. M., Krabbe, N. K., Cadena, C. D., Robbins, M. B., ... Aleixo, A. (2016). Molecular systematics of the new world screech-owls (Megascops: Aves, Strigidae): Biogeographic and taxonomic implications. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 94, 626-634.
<https://doi.org/10.1016/j.ympev.2015.09.025>
- Darras, K., Furnas, B., Fitriawan, I., Mulyani, Y., & Tschardtke, T. (2018). Estimating bird detection distances in sound recordings for standardizing detection ranges and distance sampling. *Methods in Ecology and Evolution*, 9(9), 1928-1938.
<https://doi.org/10.1111/2041-210X.13031>
- Deichmann, J. L., Acevedo-Charry, O., Barclay, L., Burivalova, Z., Campos-Cerqueira, M., d'Horta, F., Game, E. T., Gottesman, B. L., Hart, P. J., Kalan, A. K., Linke, S., Nascimento, L. Do, Pijanowski, B., Staatterman, E., & Mitchell Aide, T. (2018). It's time to listen: there is much to be learned from the sounds of tropical ecosystems. *Biotropica*, 50(5), 713-718.
<https://doi.org/10.1111/btp.12593>
- Ferraz, G., Sberze, M., & Cohn-Haft, M. (2010). Using occupancy estimates to fine-tune conservation concerns. *Animal Conservation*, 13(1), 19-20.
<https://doi.org/10.1111/j.1469-1795.2010.00350.x>
- Goyette, J. L., Howe, R. W., Wolf, A. T., & Robinson, W. D. (2011). Detecting tropical nocturnal birds using automated audio recordings. *Journal of Field Ornithology*, 82(3), 279-287.
<https://doi.org/10.1111/j.1557-9263.2011.00331.x>
- Heinicke, S., Kalan, A. K., Wagner, O. J. J., Mundry, R., Lukashevich, H., & Kühl, H. S. (2015). Assessing the performance of a semi-automated acoustic monitoring system for primates. *Methods in Ecology and Evolution*, 6(7), 753-763.
<https://doi.org/10.1111/2041-210X.12384>
- Kalan, A. K., Mundry, R., Wagner, O. J. J., Heinicke, S., Boesch, C., & Kühl, H. S. (2015). Towards the automated detection and occupancy estimation of primates using passive acoustic monitoring. *Ecological Indicators*, 54, 217-226.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.02.023>
- Katz, J., Hafner, S. D., & Donovan, T. (2016). Tools for automated acoustic monitoring within the R package monitoR. *Bioacoustics*, 25(2), 197-210.
- Keen, S. C., Shiu, Y., Wrege, P. H., & Rowland, E. D. (2017). Automated detection of low-frequency rum-

- bles of forest elephants: A critical tool for their conservation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 141(4), 2715-2726.
<https://doi.org/10.1121/1.4979476>
- König, C., Weick, F., & Jan-Hendrik, B. (2008). *Owls of the World*. Helm Identification guides. London. 528 pp.
- Krabbe, N. K. (2017). A new species of *Megascops* (strigidae) from the Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia, with notes on voices of new world screech-owls. *Ornitologia Colombiana*, 2017(16).
- Kuhn, M. (2011). *The caret Package* (pp. 1-27). Retrieved from <http://cran.r-project.org/web/packages/caret/vignettes/caretTrain.pdf%0Apapers2://publication/uuid/D8CA271E-F548-44F3-B081-B129A8765F04>
- Marsland, S., Priyadarshani, N., Juodakis, J., & Castro, I. (2019). AviaNZ: A future-proofed program for annotation and recognition of animal sounds in long-time field recordings. *Methods in Ecology and Evolution*, 10(8), 1189-1195.
<https://doi.org/10.1111/2041-210X.13213>
- Marten, K., Quine, D., & Marler, P. (1977). Sound transmission and its significance for animal vocalization—II. Tropical forest habitats. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 2(3), 291-302.
<https://doi.org/10.1007/BF00299741>
- Nagy, C. M., & Rockwell, R. F. (2012). Identification of individual Eastern Screech-Owls *Megascops asio* via vocalization analysis. *Bioacoustics—the International Journal of Animal Sound and Its Recording*, 21(2), 127-140.
<https://doi.org/10.1080/09524622.2011.651829>
- Nyquist, H. (1928). Certain topics in telegraph transmission theory. *Transaction American Institute of Electrical Engineers*, 614-644.
- Ovaskainen, O., Moliterno de Camargo, U., & Somervuo, P. (2018). Animal Sound Identifier (ASI): software for automated identification of vocal animals. *Ecology Letters*, 21(8), 1244-1254.
<https://doi.org/10.1111/ele.13092>
- Parker, T. (1991). On the use of tape recorders in avifaunal surveys. *The Auk: Ornithological Advances*, 108(02), 443-444.
- Program B. R. (2011). *Raven Pro: Interactive sound analysis software* (1.5). The Cornell Lab of Ornithology.
<http://ravensoundssoftware.com/software/raven-pro/>
- Ralph, C. J., Geupel, G. R., Pyle, P., Martin, T. E., & DeSante, D. F. (1993). *Handbook of Field Methods for Monitoring Landbirds*. Pacific Southwest Research Station, Albany, California.
- Ranft, R. (2004). Natural sound archives: Past, present and future. *Anais da Academia Brasileira de Ciencias*, 76(2), 455-465.
<https://doi.org/10.1590/S0001-37652004000200041>
- Rosado-Hidalgo, S. (2018). *To sing or not to sing: Effects of the moon cycles on the vocal activity of American owls*. [Pontificia Universidad Javeriana].
<https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/35421?locale-attribute=frSACC>,
- SACC. (2018). Proposal (771) to South American Classification Committee Break up *Megascops guatemalae* into several species (II). Retrieved April 18, 2020, from <http://www.museum.lsu.edu/~Remsen/SACCprop771.htm>
- Sberze, M., Cohn-Haft, M., & Ferraz, G. (2010). Old growth and secondary forest site occupancy by nocturnal birds in a neotropical landscape. *Animal Conservation*, 13(1), 3-11.
<https://doi.org/10.1111/j.1469-1795.2009.00312.x>
- Sethi, S. S., Ewers, R. M., Jones, N. S., Signorelli, A., Pincinali, L., & Orme, C. D. L. (2020). SAFE Acoustics: An open-source, real-time eco-acoustic monitoring network in the tropical rainforests of Borneo. *Methods in Ecology and Evolution*, 2020(February), 1-4.
<https://doi.org/10.1111/2041-210X.13438>
- Stowell, D., Wood, M. D., Pamuła, H., Stylianou, Y., & Glotin, H. (2019). Automatic acoustic detection of birds through deep learning: The first bird audio detection challenge. *Methods in Ecology and Evolution*, 10(3), 368-380.
<https://doi.org/10.1111/2041-210X.13103>
- Ulloa, J. S., Gasc, A., Gaucher, P., Aubin, T., Réjou-Méchain, M., & Sueur, J. (2016). Screening large audio datasets to determine the time and space distribution of Screaming Piha birds in a tropical forest. *Ecological Informatics*, 31, 91-99.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2015.11.012>

Laura Andrea Hoyos Cardona

Universidad de Antioquia

Medellín, Colombia

lauraa.hoyos@udea.edu.co

<https://orcid.org/0000-0003-2089-215X>

Juan Sebastián Ulloa

Instituto de Investigación de Recursos Biológicos

Alexander von Humboldt

Bogotá, Colombia

julloa@humboldt.org.co

<https://orcid.org/0000-0001-5666-6942>

Juan Luis Parra Vergara

Universidad de Antioquia

Medellín, Colombia

juanl.parra@udea.edu.co

<https://orcid.org/0000-0002-5689-1872>

Detección automatizada de cantos de aves continúa siendo un desafío: el caso de warbleR y *Megascops centralis* (búho del Chocó)

Citación del artículo: Hoyos-Cardona, L.A., Ulloa, J.S. & Parra-Vergara, J.L. (2021). Detección automatizada de cantos de aves continúa siendo un desafío: el caso de warbleR y *Megascops centralis* (búho del Chocó). *Biota Colombiana*, 22(1), 149-163.

<https://doi.org/10.21068/c2021.v22n01a10>

Recibido: 30 de mayo 2020

Aceptado: 9 de noviembre 2020

Murciélagos insectívoros aéreos en un paisaje ganadero del piedemonte llanero colombiano

Aerial insectivorous bats in a cattle ranching landscape in the Colombian foothills

Orlando Fabián Hernández Leal  , Francisco Sánchez  , Diego J. Lizcano  

Resumen

La ganadería en el piedemonte llanero colombiano está ampliamente distribuida y se desconoce su impacto sobre los murciélagos insectívoros aéreos. Monitoreamos métodos acústicos pasivos a estos murciélagos en un sistema silvopastoril (SSP) plantado con *Mimosa trianae*, un sistema ganadero convencional dominado por pasto (SC) y un bosque (B) en el piedemonte llanero colombiano. La composición de especies del B se diferenció de las otras coberturas, mientras que no hubo diferencias entre SC y SSP. Hubo mayor riqueza en el SC que en las otras coberturas, mientras que no hubo diferencias entre el B y el SSP. *Myotis nigricans*, *Peropteryx macrotis*, *Saccopteryx leptura*, *Molossus cf. rufus*, *Eptesicus I* y *Cormura brevirostris* tuvieron la mayor actividad en el paisaje, y su uso del espacio dependió de la cobertura. La mayoría de las especies usaron el SC que las otras coberturas. En conclusión, la heterogeneidad espacial asociada al paisaje ganadero estudiado tiene efectos tanto en la estructura del ensamble como en las respuestas de las especies que lo conforman.

Palabras clave. Agroecosistemas. Bioacústica. Chiroptera. Orinoquia. Sistema silvopastoril.

Abstract

Cattle ranching is widely spread in the foothills of the Eastern Cordillera of Colombia, and its impact on aerial insectivorous bats is unknown. We used passive-acoustic monitoring of these bats in a silvopastoral system (SSP) planted with *Mimosa trianae*, a conventional livestock system dominated by pasture (SC) and a forest (B) in the Eastern Cordillera foothill of Colombia. Species composition of B differed from SC and SSP, whereas there were no differences between SC and SSP. Species richness was higher in the SC than in the other land covers, whereas there were no differences between B and SSP. *Myotis nigricans*, *Peropteryx macrotis*, *Saccopteryx leptura*, *Molossus cf. rufus*, *Eptesicus I* and *Cormura brevirostris* had the highest activity in the landscape, and their habitat use depended on land cover. Most bat species used SC more than the other land covers. We found that the spatial heterogeneity associated with the studied cattle ranching landscape affects both the structure of the bat ensemble and the responses of its species.

Key words. Agroecosystems, Bioacustics, Chiroptera, Habitat use, Orinoquia, Silvopastoral.

Introducción

La ganadería es una de las principales actividades causantes de la transformación del paisaje en el planeta (Ramankutty *et al.*, 2006), y se estima que aproximadamente un tercio de la superficie terrestre del planeta está destinada para la ganadería y la agricultura (Ellis *et al.*, 2010). En Colombia la situación es similar, y se ha estimado que un 30 % del territorio está dedicado a la ganadería, aproximadamente 34 millones de hectáreas, y más del 77 % de esa área sufre algún grado de erosión (IDEAM & UDCA, 2015). Así, la expansión ganadera genera una transformación de las coberturas naturales, incrementa la presión sobre los recursos naturales y tiene un efecto negativo sobre la biodiversidad (Alkemade *et al.*, 2013; Dettenmaier *et al.*, 2017). La ganadería está entre las primeras causas de pérdida de biodiversidad en Colombia, y en el piedemonte llanero amenaza los ecosistemas de bosque (Romero *et al.*, 2008; Etter *et al.*, 2017). Por todo lo anterior, se ha resaltado la necesidad de estrategias para conservar la alta diversidad del país, aun en esos ambientes altamente perturbados (Moreno *et al.*, 2018).

Para contrarrestar los efectos negativos de la ganadería convencional, extensiva y basada principalmente en el uso de pastos exóticos, se ha sugerido el uso de los sistemas silvopastoriles, SSP (Calle *et al.*, 2012), que integran el uso de árboles o arbustos con pastos para el ganado (Murgueitio *et al.*, 2013). En comparación con los sistemas convencionales de ganadería, la cobertura heterogénea de los SSP puede facilitar la recuperación y mejoramiento de suelos, al mejorar el flujo de nutrientes y los ciclos locales del agua, (Alonso, 2011; Naranjo *et al.*, 2012). En términos de los efectos sobre la biodiversidad, los arbustos y cercas vivas de los SSP pueden funcionar como corredores que favorecen la presencia de especies de murciélagos, aves, escarabajos, mariposas y fauna del subsuelo (Harvey *et al.*, 2005; Mahecha, 2002).

En Colombia, los estudios sobre murciélagos en áreas ganaderas se han realizado en el Caribe, y se ha encontrado una mayor diversidad de Phyllostomidae en los SSP que en los sistemas convencionales (Ballesteros, 2015). También, una especie de murciélago frugívoro ha mostrado mejor condición corporal en los SSP que en sistemas convencionales, y algunas especies pueden acumular metales pesados producto de la adición de agroquímicos a los SSP (Chacón-Pacheco & Ballesteros-Correa, 2019; Racero-Casarrubia *et al.*, 2017). Así, es limitada la información sobre murciélagos insectívoros aéreos, *i. e.*, que se alimentan de insectos en el aire (Wilson, 1979).

Algunos murciélagos insectívoros aéreos toleran ambientes altamente modificados y allí ayudan a conservar funciones ecosistémicas e incluso pueden prestar servicios ecosistémicos al controlar insectos que afectan negativamente los sistemas de producción (Boyles *et al.*, 2011; Cleveland *et al.*, 2006). Entre las herramientas para permitir que los murciélagos insectívoros persistan en ambientes rurales se encuentra el manejo de áreas arboladas (Guldin *et al.*, 2007). Esto se debe a que las zonas arboladas naturales en paisajes altamente modificados por los humanos pueden afectar el uso del espacio de los murciélagos insectívoros aéreos, dado que pueden servir como refugio, fuentes de alimento o como corredores de tránsito (Barclay & Kurta, 2007; Grindal & Brigham, 1999). Además, en ambientes altamente intervenidos, los murciélagos hacen uso diferencial del espacio, según las coberturas presentes, ya que estas pueden afectar la disponibilidad de presas y las oportunidades de forrajeo (Avila-Flores & Fenton, 2005; Jung & Kalko, 2010). Así en diferentes localidades del neotrópico, se ha encontrado que cambios en el paisaje producto de la actividad agropecuaria pueden afectar el uso del espacio por los murciélagos insectívoros aéreos (Estrada *et al.*, 2006; Williams-Guillén & Perfecto, 2011).

Las comunidades de murciélagos en la base de los Andes orientales de Colombia se caracterizan por tener un rico ensamble de especies insectívoras aéreas (Ramírez-chaves *et al.*, 2013; Sánchez, 2017); ensamble (Ramírez & Gutiérrez-Fonseca, 2016) corresponde a un grupo filogenéticamente relacionado, *i. e.*, Chiroptera, que explota un recurso similar, *i. e.*, insectos aéreos. Entender cómo los ensambles de murciélagos insectívoros aéreos responden a las prácticas ganaderas puede servir para adoptar estrategias de manejo que reduzcan el impacto de esta actividad económica. Por ello, estudiamos un ensamble de murciélagos insectívoros aéreos en el piedemonte llanero colombiano, comparando un sistema ganadero convencional (SC), *i. e.*, pastizal, un sistema silvopastoril (SSP) dominado por *Mimosa trianae*, y un remanente de bosque nativo. Nuestra primera hipótesis es que la riqueza y composición de especies de murciélagos insectívoros difieren entre las coberturas. Esto se debería a que el incremento en la densidad de obstáculos asociados a la cantidad de árboles presenta para los murciélagos problemas mecánicos por la necesidad de maniobrar, y problemas de percepción por la necesidad de detectar y evitar los obstáculos (Fenton, 1990). En consecuencia, la densidad de obstáculos en un ambiente se relaciona con la variación en la morfología de las alas y de las señales de ecolocalización usadas por murciélagos insectívoros, ocupando diferentes espacios

(Aldridge & Rautenbach, 1987; Thies *et al.*, 1998). Nuestra segunda hipótesis es que los murciélagos insectívoros aéreos hacen un uso diferencial de las coberturas. Esto debido a las razones explicadas anteriormente, y porque en México se encontró una mayor actividad de murciélagos en fragmentos de bosques que en pastizales (Estrada *et al.*, 2004), mientras que en Estados Unidos se halló una relación positiva entre la actividad y la distancia entre árboles (Gerth & Chelsvig, 2008).

Materiales y métodos

Área de estudio. El piedemonte llanero colombiano es una subregión de la Orinoquia que se ubica en la base de la Cordillera Oriental de los Andes (Rangel-Ch. *et al.*, 2011) y ha sido intensamente transformada por la actividad humana. Realizamos este estudio en la Finca La Rosania, ubicada en el municipio de San Luis de Cubarral, departamento del Meta (3° 49' 25.84''N 73° 50' 2.87'' W, 623 m s.n.m, Figura 1). El municipio tiene una precipitación anual de 2000-4000 mm y una temperatura anual de 20-27 °C (Callejas Ávila, 2017; González Rey, 2017). A lo largo del año la precipitación presenta un régimen unimodal biestacional, con bajas precipitaciones entre diciembre y febrero, y altas precipitaciones entre marzo y noviembre (Datos IDEAM de 10 años, estación: 32060030).

La ganadería y la producción de leche son las principales actividades productivas de la finca. En el momento del estudio, los pastizales eran dominados por el género *Brachiaria*, cubrían aproximadamente 32.5 ha, y tenían árboles dispersos con alturas menores a 7 m. El SSP estaba conformado por árboles de falso yopo *Mimosa trianae*, tenía un área de 1.23 ha, una edad de siembra de 2 a 3 años, y los árboles estaban sembrados cada 5 metros y tenían hasta 5 m de altura. Los pastos en el SSP eran del género *Brachiaria*, y allí se removían las ramas secas del suelo, para que no interfirieran el desplazamiento del ganado. El bosque de piedemonte de la finca tenía un área de 106.7 ha, con un estrato arbóreo de 12-25 m de altura, un estrato de arbolitos de 5-12 m de altura y un estrato arbustivo de 1.5-5 m de altura, según la descripción de Rangel & Velásquez (1997).

Muestreo acústico. Realizamos en 2017 un muestreo estratificado, con nueve noches en febrero (baja precipitación), diez noches en junio, cuatro noches en octubre y una noche en noviembre (alta precipitación). En total, obtuvimos 24 noches efectivas de grabación (288 horas), *i. e.*, 8 noches efectivas y 96 horas por cobertura. Usamos

un detector ultrasónico SM4BAT FS con un micrófono externo SMM-U1 (Wildlife Acoustics® Maynard, MA, USA). El detector se instaló en seis sitios de grabación por cada cobertura. En cada punto de muestreo ubicamos el detector con el micrófono a 3 m sobre el nivel del suelo, en un ángulo de 45° respecto a la superficie del suelo y apuntando hacia el interior de la cobertura, desde las 18:00 h hasta las 06:00 h del día siguiente. Configuramos el detector para registrar frecuencias entre 16 y 120 kHz, con una tasa de muestreo de 256 kHz, una ganancia de 12 dB y una longitud máxima de archivo de grabación de 15 segundos. El detector estuvo activo todo el tiempo de instalación, pero solo grabó cuando registró señales emitidas en el rango de frecuencias programado. Los archivos se guardaron en formato WAV sin compresión.

Dado que no existen librerías de referencia para la Orinoquia colombiana, realizamos identificaciones manuales siguiendo claves acústicas y literatura (Jung *et al.*, 2014; Arias-Aguilar *et al.*, 2018; López-Baucells *et al.*, 2016; Zamora-Gutiérrez *et al.*, 2016; Zurc *et al.*, 2017) y comparando los siguientes parámetros: forma del pulso de ecolocalización, alternancia, frecuencia inicial, final, máxima, mínima, de máxima energía, amplitud, duración e intervalo entre pulsos. Analizamos las grabaciones en el programa BatSound-Sound Analysis V.4.2., y para las mediciones usamos el programa Raven Pro V.1.6 (The Cornell Lab of Ornithology). En ambos programas usamos una transformada rápida de Fourier ("fast Fourier transform") de 512 muestras con una ventana tipo Hamming. Dado que la configuración visual del programa afecta la percepción de los pulsos de ecolocalización, usamos los mismos valores en los parámetros para todas las grabaciones analizadas: 1500 ms por imagen, threshold = 10, amplitud de contraste = 3, en BatSound; ajuste de brillo = 63, ajuste de contraste = 67 y overlap = 95% en Raven Pro. Los pulsos de ecolocalización no asignados a una especie se registraron como sonotipos, *i. e.*, un grupo de sonidos con las mismas características y que asumimos correspondían a la misma especie (Bader *et al.*, 2015). Los registros con baja intensidad o con pulsos muy tenues (< 45 dB) se clasificaron como "no identificados".

Los murciélagos insectívoros aéreos emiten señales de ecolocalización que pueden ser agrupadas en tres fases: búsqueda, aproximación y terminal (Schnitzler & Kalko, 2001). La emisión de fases de búsqueda representa el desplazamiento o la búsqueda de presas, las fases de aproximación representan la detección de los objetos o presas, y la fase terminal ("feeding buzz")

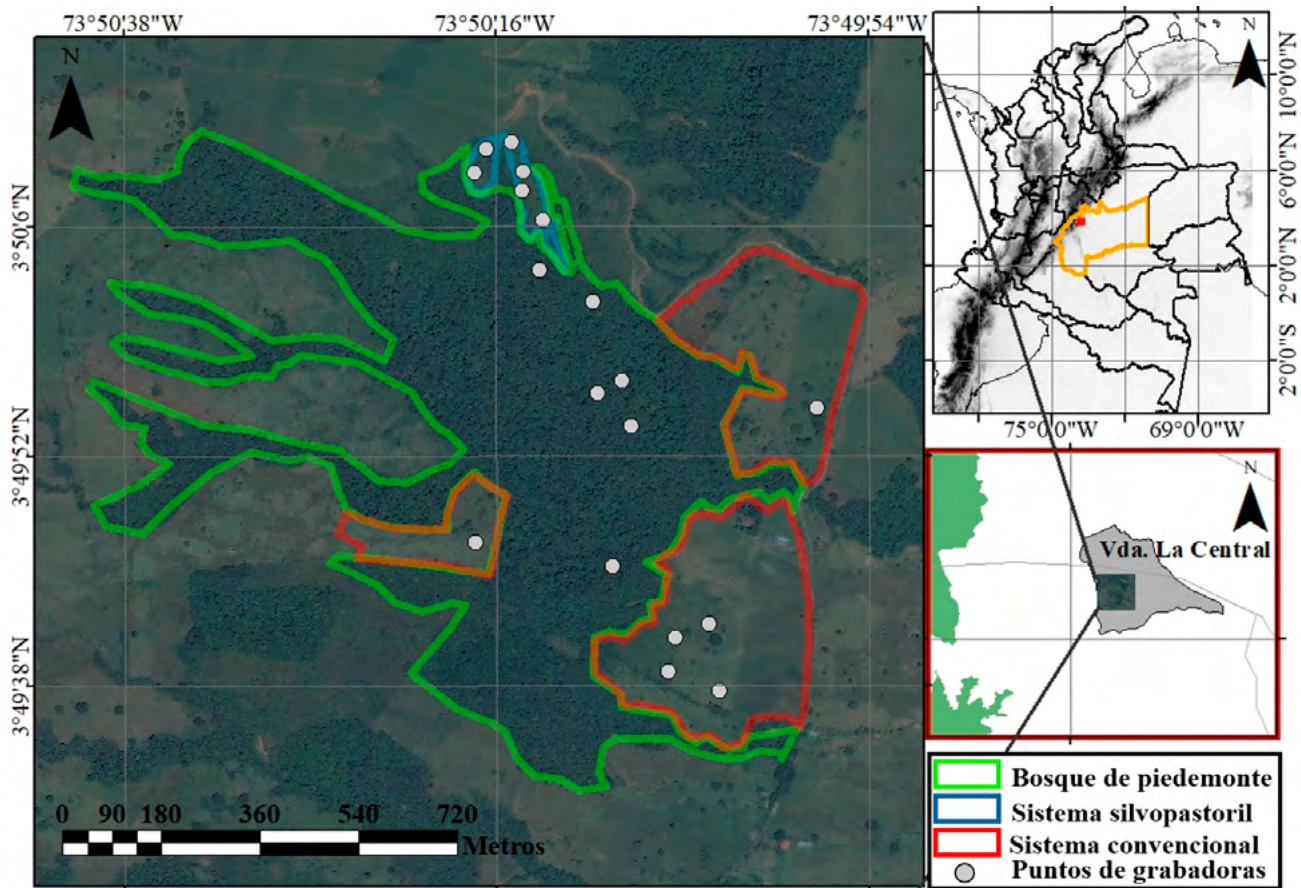


Figura 1. Ubicación del detector (puntos blancos) para el muestreo acústico de la actividad de murciélagos insectívoros aéreos en tres coberturas de un paisaje ganadero del municipio de Cubarral, departamento del Meta, Colombia.

Figure 1. Location of the detector (white dots) for the acoustic sampling of the activity of aerial insectivorous bats in three land covers of a livestock landscape in Cubarral, Meta, Colombia.

indica intentos de los murciélagos para capturar presas. Por ello, evaluamos el uso de las coberturas contando el número de fases de búsqueda y las fases terminales de cada especie por noche, como un indicador de la actividad del murciélagos en cada cobertura (Sánchez, 2011).

Análisis estadísticos. Para soportar las identificaciones asignadas, realizamos análisis de función discriminante (DFA) (Parsons & Jones, 2000) por cada familia, con base en diez grabaciones de cada identificación y medimos tres pulsos por secuencia, de los cuales se extrajeron los parámetros antes mencionados (Anexo 1). Medimos el total de archivos para las identificaciones que no superaron las diez grabaciones y seleccionamos grabaciones de las diferentes coberturas. También medimos los pulsos bajos, medios y altos para las especies

que presentan alternancia en los pulsos de ecolocalización. De acuerdo a lo sugerido por López-Baucells *et al.*, (2016), agrupamos en *Eptesicus* I las posibles especies de este género.

Para determinar la variación de la composición de murciélagos entre las coberturas e identificar, las especies y los sonotipos causantes de la variación, usamos un análisis de similitud ANOSIM, con 9999 permutaciones y un análisis SIMPER (Clarke, 1993). Estos análisis se realizaron en el programa Past V.3. También construimos curvas de acumulación de especies con la función "specaccum" del paquete "vegan", para evaluar posibles diferencias en la riqueza de especies entre coberturas, en el programa R versión 3.4 (Oksanen *et al.*, 2019; R Core Team, 2019).

Evaluamos el uso de coberturas de los murciélagos insectívoros con un modelo lineal generalizado (GLM) con una distribución de Poisson (Sheskin, 2004; Zar, 2010). Usamos esta opción, dada la naturaleza de conteo de los datos. En el modelo se incluyó el número de fases de búsqueda de todas especies registradas como variable dependiente, mientras que el tipo de cobertura y el mes entraron como variables independientes. También, realizamos el mismo GLM usando como variable dependiente el número de fases terminales de todas las especies registradas. Para detectar diferencias entre coberturas y meses, realizamos contrastes con un ajuste de Bonferroni (Sheskin, 2004). Debido a la cercanía entre los sitios de muestreo, aplicamos la prueba de autocorrelación espacial con el índice de Moran, usando una matriz de pesos con las distancias entre los cinco vecinos más cercanos. El análisis se realizó con la función "moran.test" del paquete "spdep" de R, usando los cinco vecinos más cercanos de cada punto de muestreo (Bivand & Wong, 2013; R Core Team, 2019). Evaluamos, además, el uso del espacio para las especies con mayor número de fases de búsqueda y terminales, *i. e.*, especies con más de 150 fases de búsqueda en todo el muestreo. Para ello, realizamos un GLM con una distribución de Poisson con la misma estructura del análisis general del uso de coberturas.

Resultados

Análisis del ensamblaje. En total analizamos 10 845 archivos de audio, correspondientes a 28.8 GB de información, y con 6387 archivos con pulsos de ecolocalización de murciélagos. Encontramos 23 sonotipos representadas en cuatro familias. Además, siete identificaciones a nivel de sonotipo y algunos registros de baja intensidad, que no pudieron ser identificados (Anexo 2). Para la familia Molossidae, identificamos seis sonotipos, dos a nivel de familia, dos a nivel de género y dos a nivel de especie. Para Emballonuridae, identificamos un sonotipo a nivel de género y cinco a nivel de especie. Para la familia Vespertilionidae, identificamos seis sonotipos, dos a nivel de familia, dos a nivel de género y dos a nivel de especie. Para Thyropteridae, identificamos un sonotipo a nivel de género. En el SC, registramos 23 especies, de las cuales 14 fueron exclusivas de esa cobertura, mientras que en el B hubo 12 especies, seis exclusivas allí. Para el SSP registramos 15 especies, todas compartidas con el B o el SC. En consecuencia, la composición de murciélagos de acuerdo con el ANOSIM varió significativamente entre las coberturas ($R = 0.234$, $p < 0.01$). La composición del B fue significativamente diferente a

la de las otras dos coberturas (B vs. SC: $p < 0.001$; B vs. SSP: $p = 0.042$), mientras que esto no ocurrió entre el SSP y el SC ($p = 0.058$). El SIMPER indicó que entre el B y el SC hubo una disimilitud del 74.9 %, entre el B y el SSP, del 72.7 % y entre el SSP y el SC, del 52.7 %. Las especies que aportaron en mayor proporción a la disimilitud entre las coberturas fueron: *Eptesicus I*, *Myotis nigricans*, *Molossus cf. rufus*, *Peropteryx macrotis*, *Cormura brevirostris*, *Saccopteryx leptura* (Anexo 3). Por otra parte, la riqueza de especies fue mayor en el SC que en las otras coberturas, mientras que no hubo diferencias entre el B y el SSP (Figura 2).

Análisis general del uso de las coberturas. No hubo efecto de la cercanía de los sitios de grabación en la frecuencia de las fases de búsqueda y terminales (desviación estándar [*d.e.*] = -0.253; $p = 0.600$; *d.e.* = -0.338; $p = 0.368$, respectivamente). Por ello no se incluyó este factor en los análisis subsecuentes. La frecuencia de fases de búsqueda y terminales fue afectada por el tipo de cobertura (*g.l* = 2; *d.e.* = 999.683; $p < 0.001$; *g.l* = 2; *d.e.* = 73.480; $p < 0.001$, respectivamente) (Figura 3), siendo más usado el SC ($\bar{x} = 395.9$ fases de búsqueda; $\bar{x} = 376$ fases terminales), seguido del SSP ($\bar{x} = 232.7$ fases de búsqueda; $\bar{x} = 30.1$ fases terminales) y el B ($\bar{x} = 139.2$ fases de búsqueda; $\bar{x} = 15.7$ fases terminales). También, la frecuencia de las fases de búsqueda y terminales dependió de los meses (*g.l* = 3; *d.e.* = 275.196; $p < 0.001$; *g.l* = 3; *d.e.* = 231.158; $p < 0.001$, respectivamente) (Figura 3), siendo mayores los valores en junio ($\bar{x} = 294.7$ fases de búsqueda; $\bar{x} = 52.2$ fases terminales), seguidos de octubre ($\bar{x} = 219.0$ fases de búsqueda; $\bar{x} = 22.9$ fases terminales) y por último los de febrero ($\bar{x} = 198.8$ fases de búsqueda; $\bar{x} = 15.0$ fases terminales).

Uso de las coberturas por especie. Todas las especies examinadas, dos de la familia Vespertilionidae (*Eptesicus I*, *M. nigricans*), tres Emballonuridae (*P. macrotis*, *S. leptura* y *C. brevirostris*), y un Molossidae (*M. cf. rufus*), presentaron diferencias significativas en el uso de las tres coberturas, en términos del número de fases de búsqueda y terminales (en todos los MLG's $p < 0.01$). En todos los casos fue mayor el uso del SC, seguido por el SSP y por el B (Figura 4), excepto para *S. leptura*. Para este embalonúrido, de acuerdo con las fases de búsqueda, el uso fue SSP>SC=B, mientras que, según las fases terminales, fue SSP>SC>B. Por otra parte, el mes de muestreo también tuvo un efecto significativo sobre el número de fases de búsqueda y fases terminales en las seis especies (en todos los MLG's $p < 0.05$; Figura 4), con excepción del número de fases terminales de *M. nigricans* (*g.l* = 3; *d.e.* = 7.332; $p > 0.05$) (Anexo 4).

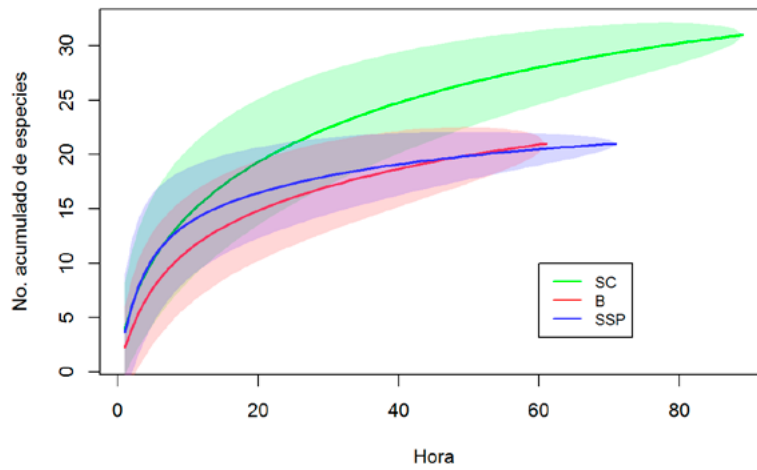


Figura 2. Curvas de acumulación de especies de murciélagos insectívoros aéreos de tres tipos de coberturas en un paisaje ganadero en Cubarral, Meta, Colombia. Las horas de grabación se usaron como unidades de muestreo. La línea continua representa la riqueza estimada para cada cobertura y el espacio sombreado de cada línea corresponde al intervalo de confianza del 95 %.

Figure 2. Species-accumulation curves of aerial insectivorous bats recorded in three types of land cover in a cattle ranching landscape in Cubarral, Meta, Colombia. Recording hours were used as sampling units. The solid line represents the estimated richness for each cover and the shaded area corresponds to the 95 % confidence interval.

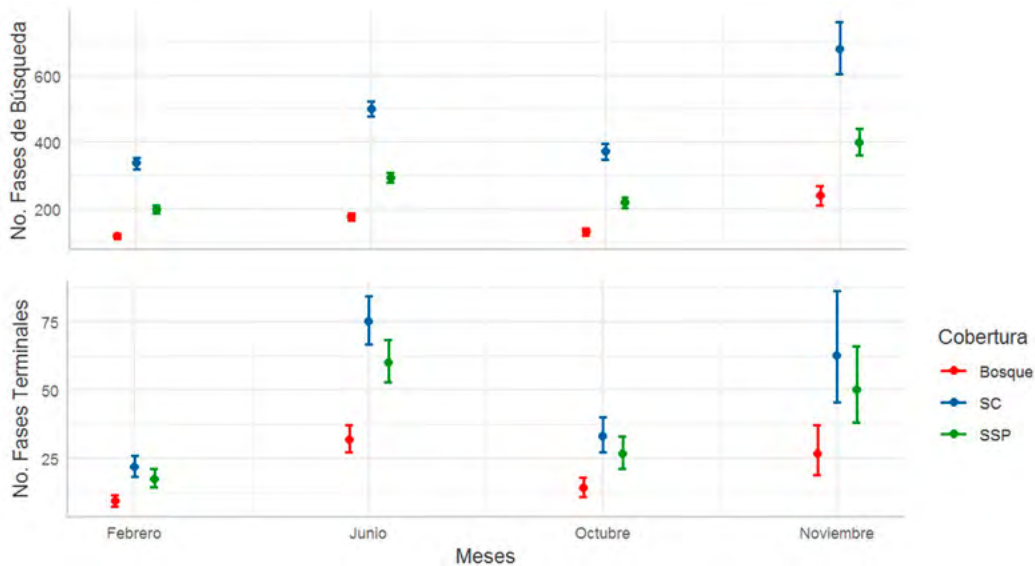


Figura 3. Uso de coberturas en los meses de muestreo por los murciélagos insectívoros aéreos en un paisaje ganadero en Cubarral, Meta, Colombia. El uso se midió en número de fases de búsqueda por noche (panel superior). Los círculos son promedios y los bigotes, una desviación estándar.

Figure 3. Use of land covers types by aerial insectivorous bats on the sampling months in a cattle ranching landscape in Cubarral, Meta, Colombia. Land cover use was measured as number of search phases per night (upper panel). Circles are averages and whiskers are one standard deviation.

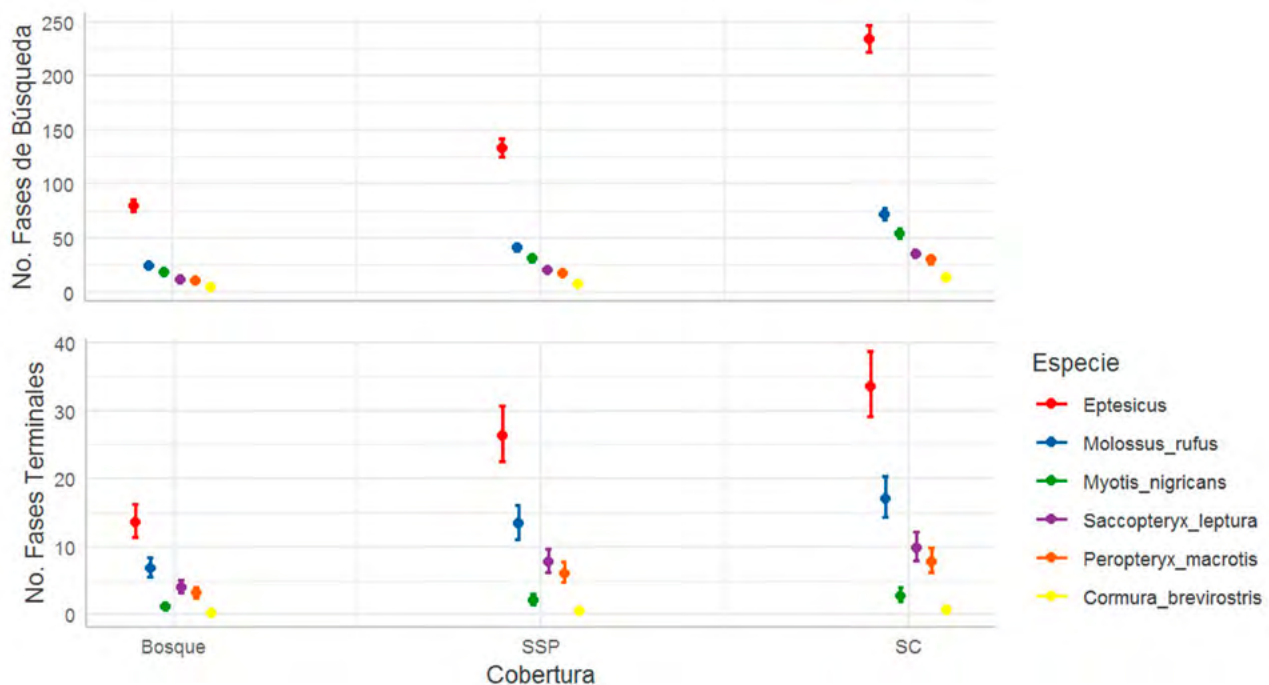


Figura 4. Uso de coberturas por seis especies de murciélagos insectívoros aéreos en un paisaje ganadero en Cubarral, Meta, Colombia. El uso se midió según el número de fases de búsqueda (panel superior), y terminales (panel inferior), por noche. Los círculos son promedios y los bigotes, una desviación estándar.

Figure 4. Use of land cover type by six aerial insectivorous bats species in a cattle ranching landscape. Use was measured in number of search phases (upper panel) and feeding buzzes (lower panel) per night. Circles are averages and whiskers are one standard deviation.

Discusión

Análisis del ensamble. De acuerdo a lo esperado, encontramos diferencias en la composición y riqueza de especies entre las coberturas del paisaje ganadero. La composición encontrada en el bosque, fue significativamente diferente a la encontrada en el SSP, pero no detectamos diferencias entre esta última cobertura y el sistema convencional. Así, en términos de composición el SSP es más parecido a un SC que al bosque. Nuestros resultados del SIMPER, que evalúan la disimilaridad teniendo en cuenta la representación de cada especie por cobertura (Mumby, 2001), también indican que las especies con mayor número de registros son las que aportan más a la diferenciación entre las coberturas. La mayoría de esas especies tienen marcadas diferencias en el uso de cada cobertura, lo que explica la diferenciación. Además, la riqueza en el SC, fue seguida por la del SSP y la del bosque. Así, los árboles espaciados y su bajo porte, ~5 m, en el SSP, permiten que especies de espacios abiertos usen esta cobertura. Por otra

parte, la densidad de obstáculos y altura de los árboles en el bosque actúan como un filtro para algunas especies de murciélagos insectívoros aéreos, es decir que hay un efecto de la estructura de la vegetación sobre el ensamblaje de murciélagos insectívoros (Jung *et al.*, 2012; Marques *et al.*, 2016). En otras palabras, estos resultados concuerdan con el hecho que hay murciélagos insectívoros aéreos que prefieren el interior del bosque, y otros que prefieren los espacios abiertos (Jung *et al.*, 2012; Schnitzler & Kalko, 2001), pero a nivel de composición no hay una clara diferencia en la cobertura con una densidad de obstáculos intermedia, *i. e.*, el SSP. A nivel de riqueza, el SSP no se diferenció del B, esta variable fue mayor en el SC lo que contrasta con la literatura que documenta la relación positiva entre la complejidad de la estructura vegetal y la riqueza de especies (August, 1983). Así, nuestros resultados indican que la disminución del área boscosa producto de la expansión de los SC en la zona de estudio ha tenido un efecto negativo sobre las especies propias del bosque. Inventarios de murciélagos del piedemonte de

la Cordillera Oriental sugieren que estos ensamblajes son ricos en murciélagos insectívoros (Ramírez-Chaves *et al.*, 2013; Sánchez, 2017), lo que es confirmado por nuestros resultados. Probablemente esta riqueza, que implica redundancias ecológicas (Walker, 1992), permite que haya especies que hoy, después de la intensa perturbación, puedan ocupar los ambientes abiertos creados por la ganadería.

Por otra parte, otro factor que puede influir en los resultados obtenidos está relacionado con el método de muestreo. La naturaleza abierta del SC permite que el micrófono capte señales sin interferencias a mayor distancia, debido a que hay una menor atenuación de los llamados en ambientes con ramas y vegetación (Kraker-Castañeda *et al.*, 2013). Adicionalmente, la imposibilidad logística para ubicar el micrófono a más de tres metros del suelo dentro del sotobosque probablemente no permitió capturar las señales que emiten los murciélagos insectívoros que vuelan por encima del dosel. Sin embargo, en otras áreas del neotrópico, y usando métodos acústicos, se ha podido establecer que los murciélagos insectívoros usan en mayor proporción los fragmentos de bosque que las áreas abiertas, por lo que estas herramientas parecen ser adecuadas para evaluar efectos como los presentados aquí (Estrada *et al.*, 2004; Kraker-Castañeda *et al.*, 2013).

Por otra parte, el uso de detectores ultrasónicos ha permitido ampliar considerablemente los inventarios de murciélagos neotropicales (Azofeifa *et al.*, 2019; Ochoa *et al.*, 2000; Zamora-Gutierrez *et al.*, 2016). El listado de murciélagos insectívoros aéreos presentado en este trabajo es el primero obtenido por métodos acústicos para la Orinoquia, y sugiere la presencia de dos nuevos registros para la región: *C. greenhalli* y *P. nasutus* (Ramírez-Chaves *et al.*, 2016; Solari *et al.*, 2013). Se requieren exploraciones adicionales, con obtención de llamadas de referencia, y capturas con redes de dosel para confirmar estos hallazgos.

Uso de las coberturas. Los murciélagos insectívoros aéreos hicieron un uso diferencial de las coberturas evaluadas. El SC fue la cobertura con mayor uso, seguida del SSP y finalmente el bosque. Estos resultados concuerdan con otros estudios en áreas altamente perturbadas, en las que se ha registrado que la actividad general es afectada por la composición del paisaje (Gerth & Chelsvig, 2008). Sin embargo, nuestros resultados contrastan con un estudio en México en el que los murciélagos insectívoros usaron más los fragmentos de bosque que las áreas abiertas (Estrada *et al.*, 2004). En

otro ejemplo de México, los murciélagos insectívoros no tuvieron diferencias en el uso de bosques y pastizales (Kraker-Castañeda *et al.*, 2013). Así, en el futuro sería recomendable comparar diferentes sitios con SC, SSP y bosques para confirmar si el efecto reconocido en este trabajo corresponde a un patrón, o es una excepción asociada a las particularidades del sitio de estudio.

Detectamos un efecto asociado a los meses de muestreo sobre el total de fases de búsqueda y terminales, pero no encontramos una conexión con la estacionalidad de la lluvia en la región, excepto que el mes con menor actividad fue el periodo seco. Otros estudios también reportan un efecto de la temporalidad en el uso de hábitat de los murciélagos insectívoros y se ha argumentado que el efecto es explicado por el régimen de lluvias y su relación con la disponibilidad de insectos (Barros *et al.*, 2014; Williams-Guillén & Perfecto, 2011). Por lo tanto, estudios de mayor duración con una mejor representación de cada fase del ciclo hidrológico, y con mediciones de la abundancia de insectos en la zona, pueden ayudar a explicar mejor la variación temporal que detectamos.

Uso de las coberturas por especie. Las seis especies analizadas usaron de manera diferencial las tres coberturas. A excepción de *S. leptura* que, en términos de fases terminales, prefirió usar el SSP sobre el SC y el bosque, el uso de las otras cinco especies fue SC > SSP > Bosque. El uso de hábitat en los murciélagos insectívoros se relaciona con características particulares en la movilidad y las características de los pulsos de ecolocalización (Bader *et al.*, 2015; Schnitzler & Kalko, 2001). Así, cada especie de murciélago tiene un hábitat en el cual se desempeña mejor (Kalko *et al.*, 2008; Marinello & Bernard, 2014), y se pueden reconocer murciélagos adaptados a bosques y otros murciélagos adaptados a espacios abiertos, y cada uno de ellos usa en mayor proporción las coberturas que más le conviene (Estrada-Villegas *et al.*, 2010; Estrada *et al.*, 2004; Jung & Kalko, 2010).

Para la familia Vespertilionidae, las especies con mayor actividad en el paisaje ganadero fueron *Eptesicus* I y *M. nigricans*. A diferencia de las demás especies neotropicales del género *Myotis*, *M. nigricans* prefiere los ambientes abiertos (Fenton & Bogdanowicz, 2002; Siemer *et al.*, 2001), lo que concuerda con nuestros resultados. Por otra parte, se ha indicado que las especies del género *Eptesicus* tienden a tener una carga alar baja, una relación de aspecto media y modulaciones en las frecuencias emitidas, que les permite tener una alta maniobrabilidad, un vuelo suave y reconocer obstáculos de manera eficiente (Bader *et al.*, 2015; Norberg & Rayner, 1987).

Estas características son apropiadas para espacios de borde o cerrados, lo que contrasta con lo encontrado en este estudio. Así, nuestros resultados probablemente son una evidencia de la versatilidad de los *Eptesicus*. La captura de especímenes de este género en el área de estudio debe permitir una descripción más detallada de sus características y así ayudar a resolver estas dudas.

En general, los Emballonuridae neotropicales son capaces de detectar presas en el borde y claros de los bosques (Jung *et al.*, 2014; Schnitzler & Kalko, 2001). Sin embargo, *P. macrotis* tiene una carga alar media y una relación de aspecto alta, que le permite volar rápido y aprovechar espacios abiertos (Estrada-Villegas *et al.*, 2010; Marinello & Bernard, 2014; Marques *et al.*, 2016) lo que concuerda con nuestros resultados. Las especies *S. leptura* y *C. brevirostris* tienen una carga alar baja y una relación de aspecto alta, que les permite tener una alta maniobrabilidad a vuelos relativamente rápidos y aprovechar los bordes de los bosques y los claros (Bader *et al.*, 2015; Kalko *et al.*, 2008; Marques *et al.*, 2016). A pesar de esto *C. brevirostris* usó con mayor frecuencia las zonas abiertas, mientras que *S. leptura* usó más el SSP. Esto podría relacionarse con el hecho de que *C. brevirostris* (machos 7.9 g; hembras 10.15 g) es más grande que *S. leptura* (machos 4.4 g; hembras 5.7 g) (Eisenberg, 1989). Adicionalmente, es interesante que en el ensamble la única que parece preferir el SSP sea *S. leptura*, y en el futuro debería evaluarse si esto facilita su coexistencia con las otras especies.

El único Molossidae analizado fue *M. cf. rufus*. *Molossus rufus* tiene una relación de aspecto y carga alar media, pulsos de ecolocalización largos y con baja frecuencia, y en algunos casos con alternancia, que les permite volar rápidamente y ser eficientes en capturar presas en zonas semi-abiertas (Bader *et al.*, 2015; Marques *et al.*, 2016). Esto concuerda con el bajo registro de actividad de este murciélago en el bosque.

De acuerdo a lo discutido, con base en la morfología alar y en las señales de ecolocalización, varias de las especies de murciélagos insectívoros registrados deberían ser capaces de explotar de manera eficiente el SSP, pero su actividad se concentra principalmente en el SC. En el momento, solo podemos especular, pero las zonas de SSP y bosque tienen no solo más obstáculos, sino tal vez más sitios de percha para depredadores como búhos y halcones que cazan al atardecer o en la noche. Así, estudios futuros deberían explorar en conjunto el uso del espacio por depredadores de murciélagos que podrían explicar el mayor uso de las áreas abiertas

En conclusión, la heterogeneidad espacial del paisaje ganadero estudiado afectó la estructura del ensamble de murciélagos insectívoros aéreos, así como el uso de hábitat de algunas especies. Nuestros resultados resaltan la utilidad de los métodos bioacústicos para reconocer los efectos de los cambios a nivel de paisaje tanto sobre el ensamble, como sobre las respuestas de las especies que lo conforman. En la medida en que la industria agropecuaria sea más productiva y sostenible, el uso de técnicas de monitoreo acústico estandarizado podrá ser usado en áreas más extensas para proveer indicadores del impacto y de la sostenibilidad de la industria agrícola (Doohan *et al.*, 2019).

Agradecimientos

Agradecemos a Humberto Castro de La Rosania, por permitir el acceso a su finca y su apoyo durante el trabajo de campo. A Gabriela Moreno, por el apoyo en campo. A Jefferson Sánchez, Daniela Martínez, Angélica Yantén y Carmen Rocha, por la asesoría en las identificaciones acústicas y los comentarios de forma en el documento. Tres evaluadores anónimos hicieron importantes comentarios que ayudaron a mejorar sustancialmente la calidad y estructura del documento. Este estudio fue financiado por el proyecto Ganadería Colombiana Sostenible en alianza entre el Fondo para el Medio Ambiente Global (GEF), el gobierno del Reino Unido (UK), la Federación Colombiana de Ganaderos (FEDEGAN), The Nature Conservancy (TNC), la Fundación Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria (CIPAV) y el Fondo para la Acción Ambiental (FA), bajo la supervisión del Banco Mundial.

Referencias

- Aldridge, H. D. J. N. & Rautenbach, I. L. (1987). Morphology, echolocation and resource partitioning in insectivorous bats. *Journal of Animal Ecology*, 56(3), 763-778.
<https://doi.org/10.1644/11-MAMM-A-331.1>
- Alkemade, R., Reid, R. S., van den Berg, M., de Leeuw, J. & Jeuken, M. (2013). Assessing the impacts of livestock production on biodiversity in rangeland ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(52), 20900-20905.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1011013108>

- Alonso, J. (2011). Los sistemas silvopastoriles y su contribución al medio ambiente. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 45(2), 107-115.
- Arias-Aguilar, A., Hintze, F., Aguiar, L. M. S., Rufay, V., Bernard, E. & Pereira, M. J. R. (2018). Who's calling? Acoustic identification of Brazilian bats. *Mammal Research* 63(3), 231-253.
<https://doi.org/10.1007/s13364-018-0367-z>
- Armenteras, D., Rodríguez, N., Retana, J. & Morales, M. (2011). Understanding deforestation in montane and lowland forests of the Colombian Andes. *Regional Environmental Change*, 11(3), 693-705.
<https://doi.org/10.1007/s10113-010-0200-y>
- August, P. V. (1983). The role of habitat complexity and heterogeneity in structuring tropical mammal communities. *Ecological Society of America*, 64(6), 1495-1507.
- Avila-Flores, R. & Fenton, M. B. (2005). Use of spatial features by foraging insectivorous bats in a large urban landscape. *Journal of Mammalogy*, 86(6), 1193-1204.
<https://doi.org/10.1644/04-MAMM-A-085R1.1>
- Azofeifa, Y., Estrada-Villegas, S., Mavárez, J. & Nassar, J. M. (2019). Activity of aerial insectivorous bats in two rice fields in the northwestern Llanos of Venezuela. *Acta Chiropterologica*, 21(1), 149-163.
<https://doi.org/10.3161/15081109acc2019.21.1.012>
- Bader, E., Jung, K., Kalko, E. K. V., Page, R. A., Rodríguez, R., & Sattler, T. (2015). Mobility explains the response of aerial insectivorous bats to anthropogenic habitat change in the Neotropics. *Biological Conservation*, 186, 97-106.
<https://doi.org/10.1016/j.biocon.2015.02.028>
- Ballesteros, J. (2015). *Efecto del Manejo Silvopastoril y Convencional de Ganadería Extensiva Sobre el Ensamblaje de Murciélagos Asociados a Fragmentos de Bosque Seco Tropical en Córdoba, Colombia*. (Trabajo de grado). Bogotá D.C.: Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ciencias. 220 pp.
- Barclay, R., & Kurta, A. (2007). Ecology and behavior of bats roosting in tree cavities and under bark. En Lacking, E.M., Hayes, J. & Kurta, A. (Eds.), *Bats in forests: conservation and management*. Pp. 17-59. Baltimore.: The Johns Hopkins University Press.
- Barros, M. A. S., Pessoa, D. M. A. & Rui, A. M. (2014). Habitat use and seasonal activity of insectivorous bats (Mammalia: Chiroptera) in the grasslands of southern Brazil. *Zoologia*, 31(2), 153-161.
<https://doi.org/10.1590/S1984-46702014000200006>
- Bivand, R. S. & Wong, D. W. S. (2013). Comparing implementations of global and local indicators of spatial association of spatial association. *Test*, 27(3), 716-748.
<https://doi.org/10.1007/s11749-018-0599-x>
- Boyles, J. G., Cryan, P. M., McCracken, G. F. & Kunz, T. K. (2011). Economic importance of bats in agriculture.pdf. *Science*, 332(April), 41-42.
<https://doi.org/10.1126/science.1201366>
- Calle, Z., Murgueitio, E. & Chará, J. (2012). Integrating forestry, sustainable cattle-ranching and landscape restoration. *Unasylva* 239, 63(1), 31-40.
- Callejas Ávila, Y. A. (2017). Evaluación morfológica del caño Quebradón como aporte al ordenamiento ambiental del municipio de Cubarral, Meta. (Trabajo de grado). Bogotá D.C.: Universidad Santo Tomás, Facultad de Ciencias y Tecnologías.
- Cárdenas, G. (1999). Comparación de la composición y estructura de la avifauna en diferentes sistemas de producción. Trabajo presentado Seminario Internacional sobre sistemas agropecuarios sostenibles. Cali, Colombia.
- Chacón-Pacheco, J. & Ballesteros-Correa, J. (2019). Mejor condición corporal de *Artibeus lituratus* en sistemas silvopastoriles que en sistemas convencionales de ganadería en Córdoba, Colombia. *Oecologia Australis*.23(3), 589-605.
<https://doi.org/10.4257/oeco.2019.2303.16>
- Clarke, K. R. (1993). Non-parametric multivariate analyses of changes in community structure. *Australian Journal of Ecology*, 18(1), 117-143.
<https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.1993.tb00438.x>
- Cleveland, C. J., Betke, M., Federico, P., Frank, J. D., Hallam, T. G., Horn, J., López, J. D., McCracken, G. F., Medellín, R. A., Moreno-aldez, A., Sansone, C. G., Westbrook, J. K. & Kunz, T. H. (2006). Economic value of the pest control service provided by Brazilian free-tailed bats in south-central Texas. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 4(5), 238-243.
[https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2006\)004\[0238:EVOTPC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2006)004[0238:EVOTPC]2.0.CO;2)
- Dettenmaier, S. J., Messmer, T. A., Hovick, T. J. & Dahlgren, D. K. (2017). Effects of livestock grazing on rangeland biodiversity: A meta-analysis of grouse populations. *Ecology and Evolution*, 7(19), 7620-7627.
<https://doi.org/10.1002/ece3.3287>
- Dias, L. E., Franco, A. A., Campello, E., De Faria, S. M. & Da Silva, E. M. (1995). Leguminosas forestales: aspectos relacionados con su nutrición y uso en la recuperación de suelos degradados. *Bosque*, 16(1), 121-127.
- Doohan, B., Fuller, S., Parson, S. & Peterson, E. (2019). The sound of management: Acoustic monitoring for agricultural industries. *Ecological Indicators*, 96, 739-746.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.09.029>

- Eisenberg, J. (1989). *Mammals of the Neotropics: The northern Neotropics*. Chicago.: The Chicago Press. 449 pp.
- Ellis, E. C., Goldewijk, K. K., Siebert, S., Lightman, D. & Ramankutty, N. (2010). Anthropogenic transformation of the biomes, 1700 to 2000. *Global Ecology and Biogeography*, 19(5), 589-606.
<https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00540.x>
- Estrada-Villegas, S., Meyer, C. F. J. & Kalko, E. K. V. (2010). Effects of tropical forest fragmentation on aerial insectivorous bats in a land-bridge island system. *Biological Conservation*, 143(3), 597-608.
<https://doi.org/10.1016/j.biocon.2009.11.009>
- Estrada, A., Jiménez, C., Rivera, A. & Fuentes, E. (2004). General bat activity measured with an ultrasound detector in a fragmented tropical landscape in Los Tuxtlas, Mexico. *Animal Biodiversity and Conservation*, 27(2), 5-13.
- Estrada, C. G., Damon, A., Hernández, C. S., Pinto, L. S. & Núñez, G. I. (2006). Bat diversity in montane rainforest and shaded coffee under different management regimes in southeastern Chiapas, Mexico. *Biological Conservation*, 132(3), 351-361.
<https://doi.org/10.1016/j.biocon.2006.04.027>
- Etter, A., Andrade, A., Saavedra, K., Amaya, P., Arevalo, P. & Cortés, J. (2017). *Lista roja de ecosistemas de Colombia (Vers. 2.0)*. Bogotá D.C. 6 pp. Pontificia Universidad Javeriana.
- Fao & LEAD. (2006). Livestock's long shadow: environmental issues and options. En Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., Rosales, M. & de Hann, C. (Eds.), *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. Roma: FAO.
<https://doi.org/10.1007/s10666-008-9149-3>
- Fenton, M. (1990). The foraging behaviour and ecology of animal-eating bats. *Canadian Journal of Zoology*, 68, 411-422.
- Fenton, M. B. & Bogdanowicz, W. (2002). Relationships between external morphology and foraging behaviour: Bats in the genus *Myotis*. *Canadian Journal of Zoology*, 80(6), 1004-1013.
<https://doi.org/10.1139/z02-083>
- Gerth, S. & Chelvig, J. (2008). Bat activity in an urban landscape: patterns at the landscape and microhabitat scale. En Marzluff, J., Shulenberg, E., Endlicher, W., Alberti, M., Bradley, G. & Ryan C. (Eds.), *Urban Ecology*. Pp: 437-453. Springer Science+Business Media.
- González Rey, I. C. (2017). *Caracterización socioeconómica de la población del municipio de Cubarral*. (Tesis de grado). Villavicencio: Universidad de los Llanos, Facultad de Ciencias Económicas, Escuela de Economía y Finanzas. 84 pp.
- Grindal, S. & Brigham, R. (1999). Impacts of forest harvesting on habitat use by foraging insectivorous bats at different spatial scales. *Ecoscience*, 6(1), 25-34.
<https://doi.org/10.1080/11956860.1999.11952206>
- Guldin, J., Emmingham, W., Carter, S. & Saugey, D. (2007). Silvicultural practices and management of habitat for bats. En M. Lacki, J. Hayes, & A. Kurta (Eds.), *Bats in forests: conservation and management*. Pp. 177-205. Baltimore.: The Johns Hopkins University Press.
- Harvey, C. A., Villanueva, C., Villacís, J., Chacón, M., Muñoz, D., López, M., Ibrahim, M., Gómez, R., Taylor, R., Martínez, J., Navas, A., Sáenz, J., Sánchez, D., Medina, A., Vilchez, S., Hernández, B., Pérez, A., Ruiz, F., López, F., ... Sinclair, F. L. (2005). Contribution of live fences to the ecological integrity of agricultural landscapes. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 111(1-4), 200-230.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.06.011>
- IDEAM, & UDCA. (2015). *Síntesis del estudio nacional de la degradación de suelos por erosión en Colombia* (p. 62). IDEAM-MADS.
- Jung, K., Kaiser, S., Böhm, S., Nieschulze, J. & Kalko, E. K. V. (2012). Moving in three dimensions: effects of structural complexity on occurrence and activity of insectivorous bats in managed forest stands. *Journal of Applied Ecology*, 49(2), 523-531.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2012.02116.x>
- Jung, K. & Kalko, E. K. (2010). Where forest meets urbanization: foraging plasticity of aerial insectivorous bats in an anthropogenically altered environment. *Journal of Mammalogy*, 91, 144-153.
<https://doi.org/10.1644/08-mamm-a-313r.1>
- Jung, K., Kalko, E. K. V. & Von Helvesen, O. (2007). Echolocation calls in Central American emballonurid bats: Signal design and call frequency alternation. *Journal of Zoology*, 272(2), 125-137.
<https://doi.org/10.1111/j.1469-7998.2006.00250.x>
- Jung, K., Molinari, J. & Kalko, E. K. (2014). Driving factors for the evolution of species-specific echolocation call design in new world free-tailed bats (Molossidae). *PLoS ONE*, 9(1).
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0085279>
- Kalko, E. K. V., Estrada-Villegas, S., Schmidt, M., Wegman, M. & Meyer, C. F. J. (2008). Flying high—assessing the use of the aerosphere by bats. *Integrative and Comparative Biology*, 48(1), 60-73.
<https://academic.oup.com/icb/article/48/1/60/625591>

- Kraker-Castañeda, C., Santos-Moreno, A. & García-García, J. L. (2013). Riqueza de especies y actividad relativa de murciélagos insectívoros aéreos en una selva tropical y pastizales en Oaxaca, México. *Mastozoología Neotropical/Journal of Neotropical Mammals*, 20(2), 255-267.
- López-Baucells, A., Rocha, R., Bobrowiec, P., Bernard, E., Palmeirim, J. & Meyer, C. (2016). *Field Guide to Amazonian Bats*. Manaus: INPA. 174 pp.
- Mahecha, L. (2002). El silvopastoreo: una alternativa de producción que disminuye el impacto ambiental de la ganadería bovina. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 15(2), 226-231.
- Marinello, M. M. & Bernard, E. (2014). Wing morphology of neotropical bats: A quantitative and qualitative analysis with implications for habitat use. *Canadian Journal of Zoology*, 92(2), 141-147.
<https://doi.org/10.1139/cjz-2013-0127>
- Marques, J. T., Ramos Pereira, M. J. & Palmeirim, J. M. (2016). Patterns in the use of rainforest vertical space by Neotropical aerial insectivorous bats: all the action is up in the canopy. *Ecography*, 39(5), 476-486.
<https://doi.org/10.1111/ecog.01453>
- Moreno, L., Rueda, C. & Andrade, G. (2018). *Biodiversidad 2017. Estado y tendencias de la biodiversidad continental de Colombia*. Bogotá D.C.: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. 84 pp.
- Mumby, P. J. (2001). Beta and habitat diversity in marine systems: a new approach to measurement, scaling and interpretation. *Oecologia*, 128, 274-280.
<https://doi.org/10.1007/s004420100643>
- Murgueitio, E. R., Chará, J. D., Solarte, A. J., Uribe, F., Zapata, C. & Rivera, J. E. (2013). Agroforestería pecuaria y sistemas silvopastoriles intensivos (SSPi) para la adaptación ganadera al cambio climático con sostenibilidad. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 26, 313-316.
- Naranjo, J., Cuartas, C., Murgueitio, E., Chará, J. & Barahona, R. (2012). Balance de gases de efecto invernadero en sistemas silvopastoriles intensivos con *Leucaena leucocephala* en Colombia. *Livestock Research for Rural Development*, 24(8), 12. <http://www.lrrd.org/lrrd24/8/%0Anara24150.htm>
- Norberg, U. M. & Rayner, J. M. V. (1987). Ecological morphology and flight in bats (Mammalia; Chiroptera): wing adaptations, flight performance, foraging strategy and echolocation. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences*, 316(1179), 335-427.
<https://doi.org/10.1098/rstb.1987.0030>
- Ochoa G, J., O'Farrell, M. J. & Miller, B. W. (2000). Contribution of acoustic methods to the study of insectivorous bat diversity in protected areas from northern Venezuela. *Acta Chiropterologica* 2(2), 171-183.
- Oksanen, J., Blanchet, F. G., Friendly, M., Kindt, R., Legendre, P., McGlinn, D., Minchin, P. R., O'Hara, R. B., Simpson, G. L., Solymos, P., Stevens H., M. H., Szoecs, E. & Wagner, H. (2019). *Vegan: Community Ecology Package*.
- Parsons, S., & Jones, G. (2000). Acoustic identification of twelve species of echolocating bat by discriminant function analysis and artificial neural networks. *Journal experimental Biology*, 203(17), 2641-2656.
- Pech-Canche, J. M., MacSwiney G., C. & Estrella, E. (2010). Importancia de los detectores ultrasónicos para mejorar los inventarios de murciélagos Neotropicales. *Therya*, 1(3), 221-228.
<https://doi.org/10.12933/therya-10-17>
- R Core Team. (2019). *R: The R Project for Statistical Computing*. Recuperado el 29 de mayo de 2020, de <https://www.r-project.org/>
- Racero-Casarrubia, J., Pinedo-Hernández, J., Ballesteros-Correa, J. & Marrugo-Negrete, J. (2017). Metales pesados en especies de murciélagos (Quiróptera) asociados a una finca bajo manejo silvopastoril en el departamento de Córdoba, Colombia. *Acta Zoológica Mexicana*, 33(1), 45-54.
- Ramankutty, N., Graumlich, L., Achard, F., Alves, D., Chhabra, A., DeFries, R. S., Foley, J., Geist, H., Houghton, R. A., Klein, K., Lambin, E., Millington, A., Rasmussen, K., Reid, R. S., & Turner II, B. L. (2006). Global land cover change: Recent progress, remaining challenges. En E. Lambin & H. Geist (Eds.). *Land-Use and Land-cover Change: Local Processes with Global Impacts* (Pp. 9-39). Berlin: Springer.
- Ramírez, A., Gutiérrez-Fonseca, P. E. Sobre ensamblajes y ensamblajes ecológicos-respuesta a Monge Nájera. *Revista de Biología Tropical*, 64(2), 817-819.
- Ramírez-Chaves, H. E., Noguera-Urbano, E. & Rodríguez-Posada, M. E. (2013). Mamíferos (Mammalia) del departamento de Putumayo, Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 37(143), 263-286.
- Ramírez-Chaves, H., Suárez-Castro, A. & González-Maya, J. F. (2016). Cambios recientes a la lista de los mamíferos de Colombia. *Notas Mastozoológicas*, 3(1), 120.
<https://doi.org/2382-3704>
- Rangel-Ch., J. O., Lowy-C., P. D., Aguilar-P., M., & Garzón-C., A. (2011). Tipos de vegetación en Colombia: Una aproximación al conocimiento de la termino-

- logia fitosociológica, fitoecológica y de uso común. En Rangel-Ch., J. O., Lowy-C., P. D. & M. Aguilar-P. (Eds.), *Diversidad Biótica II* (Pp. 89-207). Bogotá D.C.: Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia.
- Rangel-Ch., O. & Velásquez, A. (1997). Métodos de estudio de la vegetación. En Rangel-Ch., O., Lowey, P. & Aguilar, M. (Eds.), *Diversidad Biótica II*. 59-87 pp. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia-Instituto de Ciencias Naturales, Instituto de hidrología, Meteorología y estudios Ambientales (IDEAM)-Ministerio del Medio Ambiente, Comité de Investigaciones y Desarrollo Científico-CIN-DEC.U.N, Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
- Romero, M., Cabrera, E. & Ortiz, N. (2008). *Informe sobre el estado de la biodiversidad en Colombia 2006-2007*. Colombia: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Sánchez, F. (2011). La heterogeneidad del paisaje del borde norte de Bogotá (Colombia) afecta la actividad de los murciélagos insectívoros. *Revista U.D.C.A. Actualidad y Divulgación Científica*, 14(1), 71-80.
- Sánchez, F. (2017). Bats of Villavicencio (Meta, Colombia): Preliminary assessment of their trophic diversity and ecosystem services. *Boletín Científico del Centro de Museos*, 21(1), 96-111.
<https://doi.org/10.17151/bccm.2017.21.1.8>
- Schnitzler, H.-U. & Kalko, E. K. V. (2001). Echolocation by Insect-Eating Bats. *BioScience*, 51(7), 557-569.
[https://doi.org/0006-3568\(2001\)051\[0557:EBIEB\]2.0.CO;2](https://doi.org/0006-3568(2001)051[0557:EBIEB]2.0.CO;2)
- Sheskin, D. (2004). *Handbook of Parametric and Nonparametric Statistical Procedures* (3rd ed). New York.: Chapman & Hall/CRC. 1193 pp.
- Siemers, B., Kalko, E. & Schnitzler, H.-U. (2001). Echolocation behavior and signal plasticity in the Neotropical bat *Myotis nigricans* (Schinz, 1821) (Vespertilionidae): a convergent case with European species of *Pipistrellus*? *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 50, 317-328.
- Solari, S., Muñoz-Saba, Y., Rodríguez-Mahecha, J. V., Defler, T. R., Ramírez-Chaves, H. E. & Trujillo, F. (2013). Riqueza, endemismo y conservación de los mamíferos de Colombia. *Mastozoología Neotropical/ Journal of Neotropical Mammals*, 20(2), 301-365.
- Thies, W., Kalko, E. K. V. & Schnitzler, H.-U. (1998). The roles of echolocation and olfaction in two Neotropical fruit-eating bats, *Carollia perspicillata* and *C. castanea*, feeding on *Piper*. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 42, 397-409.
<https://doi.org/10.1007/s002650050454>
- Walker, B.H (1992). Biodiversity and ecological redundancy. *Conservation Biology*, 6(1),18-23.
- Williams-Guillén, K. & Perfecto, I. (2011). Ensemble composition and activity levels of insectivorous bats in response to management intensification in coffee agroforestry systems. *PLoS ONE*, 6(1).
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0016502>
- Wilson, D. (1979). Bat faunas: a trophic comparison. *Systematic Zoology*, 22(1), 14-29.
- Zamora-Gutiérrez, V., López-González, C., MacSwiney González, M. C., Fenton, B., Jones, G., Kalko, E. K. V., Puechmaille, S. J., Stathopoulos, V. & Jones, K. E. (2016). Acoustic identification of Mexican bats based on taxonomic and ecological constraints on call design. *Methods in Ecology and Evolution*, 7(9), 1082-1091.
<https://doi.org/10.1111/2041-210X.12556>
- Zar, J. (2010). *Biostatistical Analysis* (D. Lynch (ed.); Fifth edit. Pearson education, Inc.
- Zurc, D., Guillén-Servent, A. & Solari, S. (2017). Chillidos de ecolocación de murciélagos Emballonuridae en una sabana xerófila semiseca del Caribe colombiano. *Mastozoología Neotropical*, 24(1), 201-218.

Anexo

Anexo 1a: El 76.6 % de las identificaciones realizadas para la familia Molossidae fueron asignadas correctamente de acuerdo a los análisis discriminantes. Dos funciones discriminantes explicaron el 97.5 % de la varianza de los datos (Anexo 1b). Los parámetros acústicos con mayor peso en las dos funciones discriminantes fueron frecuencia final (Lambda de wilks = 0.006; $p < 0.001$), frecuencia de mayor energía (Lambda de wilks = 0.003; $p < 0.001$), ancho de banda (Lambda de wilks = 0.003; $p < 0.001$), intervalo de pulso (Lambda de wilks = 0.003; $p < 0.001$) y frecuencia máxima (Lambda de wilks = 0.002; $p < 0.001$) (Anexo 1c). Para la familia Emballonuridae, las funciones discriminantes asignaron correctamente el 93.2 % de las identificaciones realizadas. Dos funciones discriminantes explicaron el 99.2 % de la varianza de los datos (Anexo 1b). Los parámetros acústicos con mayor peso en las dos funciones discriminantes fueron: frecuencia de mayor energía (Lambda de wilks = 0.002; $p = 0.000$), frecuencia inicial (Lambda de wilks = 0.005; $p < 0.001$), Duración (Lambda de wilks = 0.003; $p < 0.001$), frecuencia máxima (Lambda de wilks = 0.003; $p < 0.001$), frecuencia mínima (Lambda de wilks = 0.003; $p < 0.001$) e intervalo

del pulso (Lambda de wilks = 0.002; $p < 0.001$) (Anexo 1c). Para la familia Vespertilionidae y Thyropteridae, las funciones discriminantes asignaron correctamente el 82.3 % de las identificaciones realizadas. Dos funciones discriminantes explicaron el 98.1 % de la varianza de los datos (Anexo 1b). Los parámetros acústicos con mayor peso en las dos funciones discriminantes fueron: Frecuencia inicial (Lambda de wilks = 0.006; $p < 0.001$), frecuencia final (Lambda de wilks = 0.005; $p < 0.001$), frecuencia máxima (Lambda de wilks = 0.005; $p < 0.001$), frecuencia mínima (Lambda de wilks = 0.006; $p < 0.001$), Duración (Lambda de wilks = 0.007; $p < 0.001$) e intervalo de pulso (Lambda de wilks = 0.005; $p < 0.001$) (Anexo 1c). Para los sonotipos, las funciones discriminantes asignaron correctamente el 93.3 % de las identificaciones realizadas. Dos funciones discriminantes explicaron el 95.4 % de la varianza de los datos (Anexo 1b). Los parámetros acústicos con mayor peso en las dos funciones discriminantes fueron: frecuencia máxima (Lambda de wilks = 0.002; $p < 0.001$), ancho de banda (Lambda de wilks = 0.004; $p < 0.001$), frecuencia inicial (Lambda de wilks = 0.003; $p < 0.001$), frecuencia final (Lambda de wilks = 0.002; $p < 0.001$) y duración (Lambda de wilks = 0.002; $p < 0.001$) (Anexo 1c).

Anexo 1b. Parámetros generales de las funciones discriminantes por cada familia de murciélagos registrados por métodos bioacústicos en un paisaje ganadero del piedemonte llanero colombiano. En todos los análisis discriminantes se explicó más del 90 % de la variación. Var (%) = Porcentaje de variación explicada por función discriminante. Acum (%) = Porcentaje acumulado de las funciones discriminantes.

Annex 1b. General parameters of the discriminating functions for each family of bats recorded using bioacoustic methods in a cattle ranching landscape in the Andean foothills of Colombia. In all discriminating analyzes, more than 90% of the variation was explained. Var (%) = Percentage of variation explained by discriminant function. Accum (%) = Accumulated percentage of discriminant functions

Molossidae				
f.d	Autovalor	Var (%)	Acum. (%)	Correlación canónica
1	54.8	93.7	93.7	0.991
2	2.2	3.8	97.5	0.831
Emballonuridae				
1	104.4	98.1	98.1	0.995
2	1.2	1.1	99.2	0.735
Vespertilionidae				
1	50.7	96.0	96.0	0.990
2	1.1	2.1	98.1	0.726
Sonotipos				
1	37.6	81.6	81.6	0.987
2	64.1	13.9	95.4	0.930

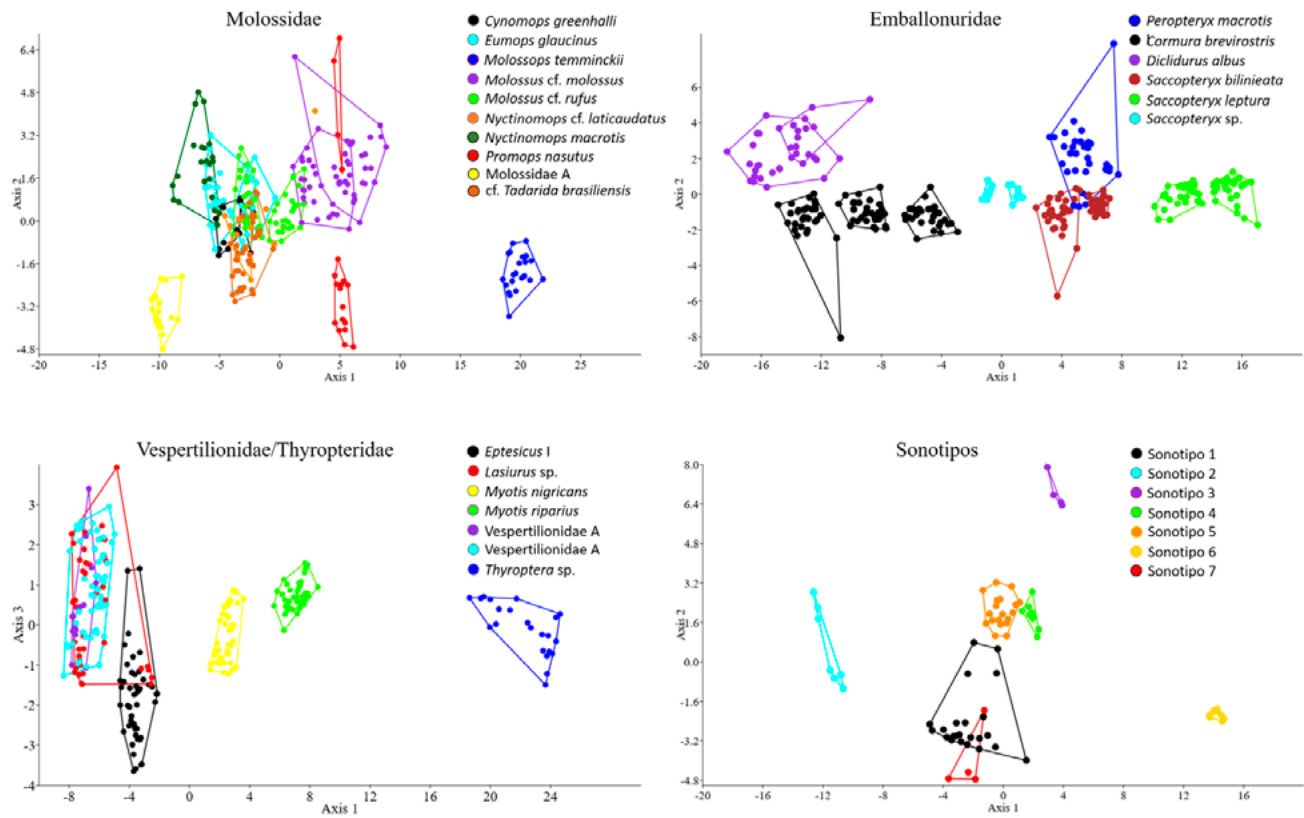
Anexo 1c. Parámetro acústicos mejor explicados en las funciones discriminates para cada familia. f.d = función discriminante.

Annex 1c. Best explained acoustic parameters in the discriminant functions for each family. f.d = discriminant function.

Molossidae		
Variable	f.d 1	f.d 2
Frecuencia final	0.960	0.121
Frecuencia Mayor energía	0.807	-0.391
Frecuencia máxima	0,646	-0.340
Ancho de banda	0.117	-0.297
Intervalo de pulso	-0.155	0.490
Emballonuridae		
Frecuencia Mayor energía	0.886	0.212
Frecuencia final	0.877	-0.464
Frecuencia máxima	0.834	0.248
Duración	-0.062	0.111
Frecuencia mínima	0.597	0.289
Intervalo de pulso	-0.095	0.120
Vespertilionidae		
Frecuencia inicial	0.903	-0.206
Frecuencia mínima	0.819	-0.086
Frecuencia máxima	0.531	-0.135
Intervalo de pulso	-0.174	0.574
Duración	-0.250	0.580
Frecuencia final	0.577	0.129
Sonotipos		
Frecuencia máxima	0.729	-0.080
Frecuencia final	0.656	-0.109
Frecuencia inicial	0.278	-0.512
Ancho de banda	0.231	0.614
Duración	-0.053	-0.214

Anexo 1c. Agrupación de las especies de acuerdo a las funciones discriminantes generadas por familia. Juntamos las familias Vespertilionidae y Thyropteridae por la similitud en los parámetros acústicos.

Annex 1c. Species grouping based on the discriminant functions generated for each family. We pooled the data from the families Vespertilionidae and Thyropteridae due to the similarity in their acoustic parameters.



Anexo 2. Número de fases de búsqueda y de fases terminales de murciélagos insectívoros aéreos registradas en tres tipos de coberturas en un paisaje ganadero en el Meta, Colombia. En negrilla las especies elegidas para analizar el uso del espacio entre las coberturas evaluadas. Bosque de piedemonte = B, sistema silvopastoril = SSP y sistema convencional = SC.

Annex 2. Number of search phases and terminal phases of aerial insectivorous bats recorded in three types of covers in a livestock landscape in Meta, Colombia. In bold the species chosen to analyze the use of the space between the evaluated covers. Piedmont forest = B, silvopastoral system = SSP and conventional system = SC.

	Especie	B	SC	SSP	Total	B	SC	SSP	Total
		Fases de búsqueda				Fases terminales			
Molossidae	<i>Cynomops greenhalli</i>		3		3				
	<i>Eumops glaucinus</i>	7	52	85	144	3	8		11
	<i>Molossops temminckii</i>		2		2				
	<i>Molossus cf. rufus</i>	55	387	521	963	1	136	50	187
	<i>Molossus cf. molossus</i>	11	86	35	132	4	2		6
	<i>Nyctinomops cf. laticaudatus</i>		1		1				
	<i>Nyctinomops macrotis</i>		3	2	5	2			2
	<i>Promops nasutus</i>		2		2				
	<i>cf. Tadarida brasiliensis</i>		11	9	20				
Molossidae A		11		11		1		1	
Vespertilionidae	<i>Eptesicus I</i>	723	1543	861	3127	137	98	132	367
	<i>Lasiurus sp.</i>		4	2	6				
	<i>Myotis nigricans</i>	104	431	187	722	3	19	8	30
	<i>Myotis riparius</i>	14		27	41			4	4
	Vespertilionidae A		2		2		1		1
	Vespertilionidae B		6	7	13		1		1
Emballonuridae	<i>Peropteryx macrotis</i>	51	283	64	398	3	74	8	85
	<i>Cormura brevirostris</i>	21	85	73	179	1		6	7
	<i>Diclidurus albus</i>		9	4	13			1	1
	<i>Saccopteryx bilineata</i>	56	2	2	60	15	3		18
	<i>Saccopteryx leptura</i>	84	87	298	469	8	13	87	108
	<i>Saccopteryx sp.</i>	2			2				
Thyropteridae	<i>Thyroptera sp.</i>	4			4				
	Sonotipo 1	1	6		7				
	Sonotipo 2	5			5				
	Sonotipo 3	2			2				
	Sonotipo 4	2			2				
	Sonotipo 5	18			18				
	Sonotipo 6		2		2				
	Sonotipo 7	2	1		3				
No. Id		23	60	22	105			2	2

Anexo 3. Porcentaje de la contribución de cada especie de murciélago insectívoro aéreo a la medida de disimilaridad de Bray-Curtis entre tres tipos de coberturas en un paisaje ganadero en el Meta, Colombia. Bosque de piedemonte = B, sistema silvopastoril = SSP y sistema convencional = SC. Cont. Corresponde al porcentaje de disimilitud contribuido por cada especie. Acu. corresponde al porcentaje de disimilitud acumulado.

Annex 3. Percentage of the contribution of each species of aerial insectivorous bat to the Bray-Curtis dissimilarity measure between three types of cover in a livestock landscape in Meta, Colombia. Piedmont forest = B, silvopastoral system = SSP and conventional system =SC. Cont. Corresponds to the percentage of dissimilarity contributed by each species. Acu. corresponds to the percentage of dissimilarity accumulated.

B vs SC			B vs SSP			SSP vs SP		
Disimilitud = 74.9%			Disimilitud = 72.7%			Disimilitud = 52.7%		
Especie	Cont. (%)	Acu. (%)	Especie	Cont. (%)	Acu. (%)	Especie	Cont. (%)	Acu. (%)
<i>Eptesicus I</i>	44.6	44.6	<i>Eptesicus I</i>	40.4	40.4	<i>Eptesicus I</i>	38.7	38.7
<i>Molossus cf. rufus</i>	16.0	60.6	<i>Molossus cf. rufus</i>	18.6	59.1	<i>Myotis nigricans</i>	14.7	53.4
<i>Myotis nigricans</i>	12.5	73.1	<i>Saccopteryx leptura</i>	11.4	70.5	<i>Molossus cf. rufus</i>	13.8	67.2
<i>Peropteryx macrotis</i>	9.6	82.7	<i>Myotis nigricans</i>	8.6	79.1	<i>Peropteryx macrotis</i>	9.6	76.8
<i>Cormura brevirostris</i>	4.3	87.1	<i>Eumops glaucinus</i>	5.2	84.2	<i>Saccopteryx leptura</i>	8.8	85.6
<i>Molossus cf. molossus</i>	2.7	89.8	<i>Peropteryx macrotis</i>	4.0	88.3	<i>Cormura brevirostris</i>	5.2	90.8
<i>Saccopteryx leptura</i>	2.6	92.3	<i>Saccopteryx bilineata</i>	3.0	91.3	<i>Eumops glaucinus</i>	3.1	93.8
<i>Eumops glaucinus</i>	2.2	94.6	<i>Cormura brevirostris</i>	2.6	93.8	<i>Molossus cf. molossus</i>	2.5	96.3
<i>Saccopteryx bilineata</i>	2.1	96.7	<i>Molossus cf. molossus</i>	1.7	95.5	<i>Myotis riparius</i>	1.0	97.3
Sonotipo 5	0.6	97.3	<i>Myotis riparius</i>	1.4	96.9	cf. <i>Tadarida brasiliensis</i>	0.6	97.8
<i>Myotis riparius</i>	0.6	97.9	Sonotipo 5	1.0	97.9	Vespertilionidae B	0.4	98.3
cf. <i>Tadarida brasiliensis</i>	0.2	98.1	Vespertilionidae B	0.5	98.3	<i>Diclidurus albus</i>	0.4	98.6
Molossidae A	0.2	98.4	cf. <i>Tadarida brasiliensis</i>	0.4	98.8	Molossidae A	0.3	98.9
<i>Diclidurus albus</i>	0.2	98.6	<i>Diclidurus albus</i>	0.3	99.1	<i>Lasiurus sp.</i>	0.2	99.1
Vespertilionidae B	0.2	98.8	<i>Thyroptera sp.</i>	0.2	99.3	Sonotipo 1	0.2	99.3
Sonotipo 1	0.2	98.9	<i>Saccopteryx sp.</i>	0.2	99.5	<i>Nyctinomops macrotis</i>	0.2	99.4
<i>Thyroptera sp.</i>	0.1	99.1	Sonotipo 2	0.2	99.6	<i>Saccopteryx bilineata</i>	0.2	99.6
Sonotipo 2	0.1	99.2	Sonotipo 7	0.1	99.7	Vespertilionidae A	0.1	99.7
<i>Lasiurus sp.</i>	0.1	99.3	<i>Lasiurus sp.</i>	0.1	99.8	Sonotipo 6	0.1	99.7
Sonotipo 7	0.1	99.4	<i>Nyctinomops macrotis</i>	0.1	99.9	<i>Promops nasutus</i>	0.1	99.8
<i>Saccopteryx sp.</i>	0.1	99.5	Sonotipo 4	0.1	99.9	Sonotipo 7	0.1	99.9
<i>Nyctinomops macrotis</i>	0.1	99.6	Sonotipo 3	0.1	100.0	<i>Cynomops greenhalli</i>	0.1	99.9
Vespertilionidae A	0.1	99.7	Sonotipo 1	0.0	100.0	<i>Molossops temminckii</i>	0.1	100.0
Sonotipo 6	0.1	99.7	Vespertilionidae A	0.0	100.0	<i>Nyctinomops cf. laticaudatus</i>	0.0	100.0
<i>Promops nasutus</i>	0.1	99.8	<i>Nyctinomops cf. laticaudatus</i>	0.0	100.0	<i>Thyroptera sp.</i>	0.0	100.0
<i>Cynomops greenhalli</i>	0.0	99.8	Sonotipo 6	0.0	100.0	Sonotipo 5	0.0	100.0
<i>Molossops temminckii</i>	0.0	99.9	<i>Cynomops greenhalli</i>	0.0	100.0	Sonotipo 4	0.0	100.0
Sonotipo 4	0.0	99.9	<i>Molossops temminckii</i>	0.0	100.0	Sonotipo 3	0.0	100.0
Sonotipo 3	0.0	100.0	<i>Promops nasutus</i>	0.0	100.0	Sonotipo 2	0.0	100.0
<i>Nyctinomops cf. laticaudatus</i>	0.0	100.0	Molossidae A	0.0	100.0	<i>Saccopteryx sp.</i>	0.0	100.0

Anexo 4. Efecto de las coberturas y los meses de muestreo en el uso de hábitat de seis especies de murciélagos insectívoros. Todas las especies hicieron un uso diferencial de las coberturas. El factor mes se agregó para controlar el efecto. *g.l* = grados de libertad. *d.e* = desviación estándar.

Annex 4. Effect of the covers and the sampling months on the habitat use of six species of insectivorous bats. All species made differential use of the covers. The month factor was added to control the effect. *g.l* = degrees of freedom. *d.e* = standard deviation.

Especie	Fase	Factores	<i>g.l</i>	<i>d.e</i>	<i>p</i>
<i>Eptesicus I</i>	F. búsqueda	Cobertura	3	24602.040	0.000
		Meses	3	58.680	0.000
	F. terminal	Cobertura	3	1323.478	0.000
		Meses	3	131.697	0.000
<i>M. nigricans</i>	F. búsqueda	Cobertura	3	3752.740	0.000
		Meses	3	268.940	0.000
	F. terminal	Cobertura	3	14.985	0.001
		Meses	3	7.333	0.063
<i>P. macrotis</i>	F. búsqueda	Cobertura	3	1725.471	0.000
		Meses	3	69.496	0.000
	F. terminal	Cobertura	3	201.359	0.000
		Meses	3	35.010	0.000
<i>S. leptura</i>	F. búsqueda	Cobertura	3	2076.397	0.000
		Meses	3	174.241	0.000
	F. terminal	Cobertura	3	259.868	0.000
		Meses	3	103.150	0.000
<i>C. brevirostris</i>	F. búsqueda	Cobertura	3	455.088	0.000
		Meses	3	95.351	0.000
	F. terminal	Cobertura	3	26.389	0.000
		Meses	3	13.156	0.000
<i>M. cf. rufus</i>	F. búsqueda	Cobertura	3	5688.115	0.000
		Meses	3	144.481	0.000
	F. terminal	Cobertura	3	623.733	0.000
		Meses	3	68.833	0.000

Orlando Fabián Hernández Leal

Universidad de los Llanos

Villavicencio, Colombia

faleal1995@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-1545-0349>

Francisco Sánchez

Universidad de los Llanos

Villavicencio, Colombia

fsanchezbarrera@unillanos.edu.co

<https://orcid.org/0000-0001-8826-5692>

Diego Lizcano

The Nature Conservancy

Bogotá, Colombia

diego.lizcano@tnc.org

<https://orcid.org/0000-0002-9648-0576>

Murciélagos insectívoros aéreos en un paisaje ganadero del piedemonte llanero colombiano

Citación del artículo: Hernández-Leal, O.F., Sánchez, F. & Lizcano, D. (2021). Murciélagos insectívoros aéreos en un paisaje ganadero del piedemonte llanero colombiano. *Biota Colombiana*, 22(1), 164-183.

<https://doi.org/10.21068/c2021.v22n01a11>

Recibido: 31 de mayo 2020

Aceptado: 17 de noviembre 2020

Descripción de las unidades fonéticas y sintaxis fonológica del repertorio vocal del tití cabeciblanco (*Saguinus oedipus*) silvestre

Description of the phonetic units and phonological syntax of vocal repertoire of wild cotton-top tamarin (*Saguinus oedipus*)

Milena Paulo-Morelo  , Pedro Sánchez-Palomino  

Resumen

Estudiamos titíes cabeciblancos (*Saguinus oedipus*, Primates: Callitrichidae) durante más de 100 horas en el municipio de Santa Catalina, Bolívar norte de Colombia. Grabamos 16 horas de sus vocalizaciones, las cuales digitalizamos a 44.1 kHz, utilizando Protools. Analizamos 2617 sonidos con Raven 1.2, con el fin de identificar las unidades fonéticas que conforman el repertorio vocal de esta especie, de acuerdo a los siguientes parámetros acústicos: duración (ms), delta de frecuencia (Hz), pico de frecuencias (Hz), frecuencia de inicio (Hz) y cantidad de armónicos de cada unidad fonética. Para describir el repertorio vocal, clasificamos los fonemas en 11 grupos, según su forma. Con el análisis de los intervalos de confianza de los parámetros acústicos, identificamos 49 sonidos diferentes. Mediante el ensamblaje de las unidades fonéticas, se identificaron 14 vocalizaciones diferentes. Los sonidos emitidos por el tití cabeciblanco fueron de corta duración (\bar{X} = 0.0215 s). La frecuencia de inicio más baja registrada fue de 322.7 Hz y la más alta de 13 956.5 Hz. El delta de frecuencias osciló entre 113.8 y 13 652.2 Hz., y el pico de frecuencias de 0 a 10 077.6 Hz. El 37.4 % de los sonidos emitidos por los titíes cabeciblancos carecen de armónicos y el 62.6 % restante presentan entre uno y doce armónicos.

Palabras clave. Comunicación vocal. Etología. Primates. Secuencia fonética. Vocalizaciones.

Abstract

We observed a population of cotton-top tamarins (*Saguinus oedipus*, Primates: Callitrichidae) in the municipality of Santa Catalina, Bolívar, northern Colombia. We observed them over 100 hours, and we recorded 16 hours of vocalizations, which were subsequently digitalized at 44.1 kHz, using Protools. We analyzed 2617 sounds with Raven 1.2, with the aim of identifying the phonetic units forming the vocal repertoire of this species, according to the following acoustic parameters: Duration (ms), change frequency (Hz), peak frequency (Hz), start frequency (Hz) and harmonics. In order to describe the vocal repertoire, the phonemes were classified into 11 groups, according to their form. The acoustic parameters were analyzed using confidence intervals, and 49 different sounds were identified. By assembling the phonetic units, 14 different vocalizations were identified. The sounds emitted by cotton-top tamarins are of short duration (\bar{X} = 0.0215 s). The lowest start frequency registered is 322.7 Hz and the highest is 13 956.5 Hz. The change in frequency ranges from 113.8 to 13 652.2 Hz. The peak frequencies range from 0 to 10 077.6 Hz. On the other hand, 37.4 % of sound lacks harmonics, and the remainder 62.6 % show between 1 and 12 harmonics.

Keywords. Ethology. Primates. Phonetic secueny. Vocalizations. Vocal communication.

Introducción

El tití cabeciblanco (*Saguinus oedipus*), una especie endémica del Caribe colombiano, fue declarada En Peligro Crítico de extinción (CR), tanto a nivel global (Savage & Causado, 2014) como a nivel nacional (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017), y se encuentra listada en el apéndice I de la CITES (Convención Internacional sobre el Comercio de Especies Amenazadas de Fauna y Flora).

Las vocalizaciones del tití cabeciblanco han sido estudiadas en cautiverio (Cleveland & Snowdon, 1982; Elowson *et al.*, 1991; Roush & Snowdon, 1999; Castro & Snowdon, 2000; Weiss & Hauser, 2002; Miller *et al.*, 2004; Miller *et al.*, 2005; Campbell & Snowdon, 2007; 2009), pero se desconocen en vida silvestre. Cleveland & Snowdon (1982) describieron el repertorio vocal de un tití cabeciblanco adulto, utilizando una colonia de animales mantenidos en cautiverio en la Universidad de Wisconsin, Madison (Estados Unidos). Describieron la secuencia de los llamados, afirmando que el repertorio vocal de esta especie está derivado de dos elementos básicos: los llamados cortos de frecuencia modulada, *chirps* (que presentan ocho variantes fonéticas) y los llamados largos de frecuencia constante, *whistles* (con cinco variantes), y la combinación secuencial de estos elementos.

Cleveland & Snowdon (1982) identificaron 38 tipos diferentes de sonidos o combinaciones de sonidos. Sin embargo, es posible que existan variaciones en las características acústicas de los llamados en vida silvestre, puesto que los animales están inmersos en un ambiente sonoro, expuestos a depredadores, y con la necesidad de coordinar actividades como la alimentación, los desplazamientos y la vigilancia. Tales factores podrían modificar la estructura y la función de los llamados. Además, es importante resaltar que en cautiverio no se dieron encuentros agresivos intergrupales por la defensa del territorio (Cleveland & Snowdon, 1982); por esta razón es probable que en vida silvestre el repertorio de vocalizaciones sea diferente al observado en cautiverio.

En este estudio, describimos las unidades fonéticas que conforman el repertorio vocal del tití cabeciblanco en vida silvestre, teniendo en cuenta sus características acústicas, duración, delta de frecuencias, frecuencia de inicio, pico de frecuencias, número de armónicos y forma de cada elemento. Posteriormente, se analizó el ensamblaje de estas unidades fonéticas en vocalizaciones, teniendo en cuenta la actividad realizada por el emisor y el contexto en el que se presentó la

vocalización. El presente estudio es el primer aporte sobre las vocalizaciones del tití cabeciblanco en vida silvestre y el primero en describir el repertorio vocal de los infantes.

Materiales y métodos

Realizamos el seguimiento, observación y grabación de dos grupos de titíes cabeciblancos silvestres, conformados en total por 15 individuos de todas las clases de edad, sexo y posición jerárquica, en un remanente de bosque seco tropical del municipio de Santa Catalina, Bolívar (10° 37' 36" N-75° 14' 50" O, 34 m s.n.m.). Los grupos empleados en este estudio se encuentran habituados a la presencia de investigadores en el área, debido a que fueron seguidos y observados diariamente por el equipo de la Fundación Proyecto Tití en sus investigaciones de campo. Realizamos las observaciones de los individuos con el método de animal focal y registro continuo (Altmann, 1974). La fase de campo fue de cuatro meses, con períodos de muestreo de quince días cada mes. Grabamos las vocalizaciones con una grabadora Sony TCM5000EV con respuesta de frecuencias de 20-20 000 Hz y frecuencia de muestreo de 44.1 KHz. Usamos 20 cassettes Quantegy cromados de 60 minutos de duración, un micrófono unidireccional Sennheiser M67 con respuesta a frecuencias entre 50 y 20 000 Hz; pantalla contra el viento Sennheiser MZW67, fuente de poder Sennheiser K6, soporte para el micrófono Audiotécnica AT8415, y cable para el micrófono. Para minimizar el ruido, por movimientos del investigador, utilizamos un soporte de madera de 1 m de largo, con un extremo puntiagudo enterrado en el suelo; y el otro extremo con una horqueta en la que se ubicó el micrófono dirigido hacia el animal focal.

Señalamos en la grabación el nombre de los individuos observados, la descripción de la vocalización, la identificación del emisor, la actividad realizada y el tipo de respuesta obtenida. Los individuos fueron previamente capturados y marcados con tinturas de colores en las partes blancas de su pelaje, para facilitar la identificación individual del emisor. Adicionalmente anotamos la hora, la fecha, las características climáticas, la presencia de grupos vecinos, el alimento consumido, el estrato del bosque y la presencia de otras especies. Grabamos siempre que se presentó un despliegue de vocalizaciones.

Digitalizamos las grabaciones utilizando Protools 5.1® en el Banco de Sonidos Animales del Instituto

Alexander von Humboldt (BSA-IAvH), hoy Colección de Sonidos Ambientales, en formato AIFF. Una vez adquiridos, analizamos los espectrogramas utilizando el software Raven Sound Analysis versión 1.2 para Windows (Frecuencia: longitud DFT = 512 muestras, ventana Hann, ancho de banda = 124 Hz, resolución = 86.1 Hz; Tiempo: resolución = 5.8 ms).

Seleccionamos segmentos sin interferencias, por ruido antrópico o natural, en los que medimos sobre la frecuencia fundamental los siguientes parámetros acústicos: 1. *Tiempo de inicio* (ms), que corresponde al punto en el eje X en el que comienza la señal acústica; 2. *Tiempo final* (ms), que corresponde al punto en el eje X en el que termina la señal acústica. 3. *Frecuencia de inicio* (Hz), que corresponde al punto en el eje Y en el que inicia la señal. 4. *Frecuencia final* (Hz), como el punto en el eje Y en el que finaliza la señal. 5. *Frecuencia mínima* (Hz), como el punto en el eje Y que corresponde a la frecuencia más baja de la señal acústica. 6. *Frecuencia máxima* (Hz), como el punto en el eje Y que corresponde a la frecuencia más alta de la señal. 7. *Número de armónicos*, como la cantidad de frecuencias por encima o múltiplos de la frecuencia fundamental.

Para analizar los sonidos emitidos por el tití cabeciblanco, a partir de las variables anteriores derivamos las siguientes variables: *Duración de la señal* (ms), obtenida como la diferencia entre el tiempo final y el tiempo de inicio; *delta de frecuencias* (Hz), como la diferencia entre la frecuencia máxima y la frecuencia mínima; y el *pico de frecuencias* (Hz), obtenido como la diferencia entre la frecuencia máxima y la frecuencia final de cada fonema.

No se alteraron las características acústicas de los sonidos, puesto que no utilizamos filtros para mejorar la calidad auditiva de las grabaciones en ninguna parte del proceso de adquisición o análisis. Identificamos cada cassette o cinta de grabación con un acrónimo que corresponde a las iniciales del colector, seguido por la fecha de grabación, según las sugerencias del BSA-IAvH, entidad que es el depositario final de las grabaciones originales.

Realizamos pruebas para comprobar los supuestos de normalidad, aleatoriedad y homocedasticidad, respectivamente, en las variables medidas a cada fonema (Sokal & Rohlf, 1995). Para determinar el número de fonemas diferentes que conforman el repertorio vocal y el número de vocalizaciones de este primate optamos por un análisis descriptivo, comparando intervalos de confianza de las medias de las variables en estudio al 95 %

de confianza, ya que son de gran utilidad porque dan estimaciones puntuales y brindan información sobre la precisión (Cumming & Finch, 2005)

Para describir el repertorio vocal, clasificamos los fonemas en 11 grupos según su forma, ocasionada por los cambios de frecuencia a lo largo del tiempo. Construimos y comparamos los intervalos de confianza al interior de cada grupo morfológico para las medias de las variables de duración, delta de frecuencias, frecuencia de inicio, pico de frecuencias y número de armónicos. Además, describimos el comportamiento de los animales al momento de emitir una vocalización específica. Los nombres dados en este estudio a algunas vocalizaciones tienen su origen en la nominación y descripción dada a las mismas por el equipo de la Fundación Proyecto Tití, en sus observaciones diarias del comportamiento de los animales.

Resultados

Observamos los titíes por más de 100 horas, en las que grabamos 16 horas de vocalizaciones. De éstas, medimos y analizamos 2617 sonidos agrupados en 107 fonemas. Por otra parte, analizamos el ensamblaje de estos fonemas en vocalizaciones, identificando 14 tipos de vocalizaciones de acuerdo con sus características auditivas, la actividad realizada y el comportamiento de los animales.

Los sonidos emitidos por el tití cabeciblanco fueron de corta duración. La duración mínima fue de 0.01 s; frente a una duración máxima de 3.438 s. Aproximadamente el 88 % de los sonidos duraron menos de 0.5 s, y cerca del 11 % de ellos tuvieron una duración de 0.5-1 s, mientras que muy pocos sonidos (1 %) presentaron una duración mayor a 1 s.

La frecuencia más baja de inicio de vocalizaciones fue 322.7 Hz y la más alta fue 13 956.5 Hz. Las frecuencias de inicio más empleadas por esta especie (34 %), se extienden en el rango 2692.31 - 3923.08 Hz. El delta de frecuencias (frecuencia máxima-frecuencia mínima) fue entre 113.8 y 13 652.2 Hz. El 58 % de los sonidos presentaron un delta de frecuencias entre 239.8 y 1461.5 Hz, mientras que solo el 1 % presentan un delta de frecuencias mayor a 10 kHz. El pico de frecuencias (diferencia entre frecuencia máxima y frecuencia final de un sonido) estuvo entre 0 y 10 077.6 Hz. Mientras que cerca del 60 % de los sonidos emitidos por esta especie tuvieron un pico de frecuencias entre 0 y 846.154 Hz.

Las medias (\bar{X}), desviaciones estándar (s) y los tamaños de muestra de cada variable analizada se presentan en la [Tabla 1](#). De otra parte, el 37.4 % de los sonidos emitidos por este primate carecen de armónicos, mientras que el 62.6 % restante tienen entre 1 y 12 armónicos.

Aunque con base en estas variables identificamos 107 fonemas, para este análisis descartamos 31 fonemas con

menos de 10 datos ya que el intervalo de confianza resultante fue demasiado amplio. Algunos fonemas son iguales entre sí y en este caso los consideramos como uno sólo. Por lo tanto, el repertorio vocal de este primate tuvo aproximadamente entre 49 y 80 unidades fonéticas, que se agruparon en 11 formas fonéticas. La descripción de los grupos fonéticos se presenta en la [Tabla 1](#) y se ilustran en la [Figura 1](#).

Tabla 1. Descripción de unidades fonéticas del repertorio vocal del tití cabeciblanco, *Saguinus oedipus*, en Santa Catalina, Bolívar, norte de Colombia.

Table 1. Description of the phonetic units of vocal repertoire of cotton-top tamarin, *Saguinus oedipus*, in Santa Catalina, Bolívar, northern Colombia.

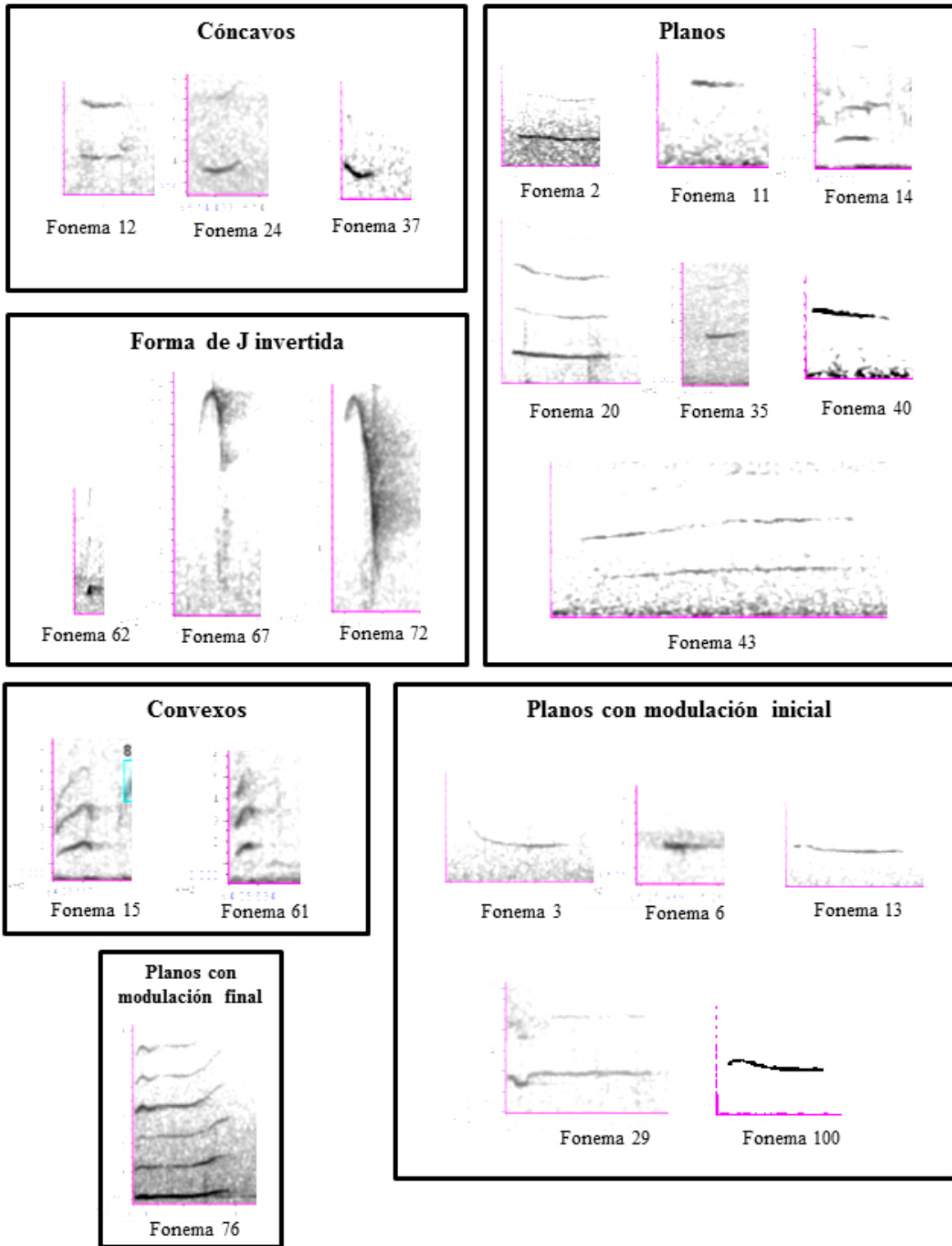
Grupo fonético	Fonemas	Descripción
Cóncavos	7*, 12, 24, 37, 38, 59.	La frecuencia máxima tiende a coincidir con la frecuencia de inicio o con la frecuencia final. Por su parte la frecuencia mínima se alcanza hacia la parte media del fonema, ocasionando una depresión. Forman parte de vocalizaciones redundantes en donde existe un estado de alerta baja, relajación y mínima amenaza, cuando es posible que el receptor o receptores se encuentren distraídos
Planos	2, 3, 11, 14, 20, 26*, 34, 35, 40, 43, 85.	Presentan valores bajos tanto de delta de frecuencias (369.9-649.1 Hz) como del pico de frecuencias (90.7-799.7 Hz), debido a que las frecuencias máxima y mínima son cercana entre sí, al igual que las frecuencias máxima y final. Estos fonemas son silbidos de duración variable, asociados con la comunicación a gran distancia.
J Invertida	56, 62, 64, 66, 67, 69*, 70, 72, 73*, 74, 75, 87, 89*, 90*, 92*, 94*, 97*, 99.	Presentan deltas de frecuencia altos (633.9-7160.4 Hz). La frecuencia máxima está cercana a la frecuencia de inicio. De igual forma, el pico de frecuencias es alto (384.5 y 7160.4 Hz) y en la mayoría de los casos la frecuencia mínima es la misma frecuencia final. Al comparar los fonemas mediante los intervalos de confianza, no encontramos diferencia entre los fonemas 62, 64, 66 y 87 ni entre los fonemas 72, 74, 89, y 99. Estos fonemas están relacionados con los estados de alerta máxima, y por esto se consideran muy importantes en los despliegues antidepredatorios y evasivos.
Convexos	8, 15, 55*, 61.	Presentan frecuencias de inicio y finales próximas entre sí, y alcanzan la frecuencia máxima hacia la parte media del fonema. Este tipo de fonemas forman parte de vocalizaciones redundantes, cuando existe un estado de alerta baja, relajación y mínima amenaza, cuando es posible que el receptor o receptores se encuentren distraídos.
Planos con modulación inicial	6, 13, 18*, 19, 29, 33*, 45, 57, 77, 84, 100.	Presentan una pequeña elevación en la frecuencia al inicio. Por esta razón, el pico de frecuencias es mayor en los fonemas planos con modulación inicial, que en los fonemas planos. No se encontraron diferencias entre los fonemas 13, 19, 45, 57 y 84, ni entre los fonemas 29 y 77. Este tipo de fonemas corresponden a silbidos de duración variable, asociados con la comunicación a gran distancia, necesarias para mantener un espacio mínimo entre los individuos, conservando la unión y la cohesión del grupo.
Planos con modulación final	58*, 76.	Plano al igual que los anteriores, pero presenta una pequeña elevación en la frecuencia máxima al final. Por esta razón, el pico de frecuencias es bajo, pues las frecuencias máximas y final son cercanas entre sí. Al igual que los fonemas anteriores, estos también son silbidos de duración variable usados en la comunicación a distancia.

Grupo fonético	Fonemas	Descripción
Ascendente	4, 5, 10, 21, 41, 42*, 65, 68*, 71*, 93*.	En éstos coinciden la frecuencia máxima y final, mientras que la frecuencia mínima y de inicio son iguales o próximas. Los intervalos de confianza indican que se trata de fonemas diferentes. No se asocian con alguna vocalización específica, y hacen parte de vocalizaciones compuestas.
Descendente	1, 9, 17*, 22, 25, 28, 30, 31, 32, 36, 39, 44, 49*, 52, 53*, 54, 60*, 86, 88, 96, 98, 101*, 102*	Es la forma fonética más común en el repertorio vocal del tití cabeciblanco. En la mayoría de los casos las frecuencias máxima y de inicio coinciden; y generalmente la frecuencia mínima coincide con la frecuencia final. Los intervalos de confianza de las variables analizadas indican que no existen diferencias entre los fonemas 9, 25, 32, 36, 39, 44, 96, 22, 86 y 98, ni entre los fonemas 28 y 52. Al igual que el grupo anterior, esta forma fonética tampoco se asocia a vocalizaciones específicas, y hacen parte de vocalizaciones compuestas
Amorfos o especiales	16*, 23, 27, 46, 47, 48*, 50*, 79, 80, 81, 82, 83*.	A este grupo no se le puede designar una forma específica, como en los casos anteriores. Debido a las características del espectro fonético, no pudimos definir de forma clara y precisa la frecuencia de inicio o el número de armónicos. En este caso, mediante intervalos de confianza comparamos la duración, el delta y el pico de frecuencias, y no encontramos diferencias entre los fonemas 23, 27, 46, 47 y 79, ni entre los fonemas 80 y 81. Corresponden a sonidos ruidosos, asociados con las vocalizaciones de dolor-susmisi3n y solicitud.
Combinaci3n de formas	51, 63*, 78, 91*, 95*.	Est3n formados por dos o m3s formas fon3ticas; por esto el an3lisis mediante intervalos de confianza de las medias de las variables no indica similitudes entre los fonemas de este grupo.
Especiales	103*, 104, 105, 106, 107.	Son emitidos por los infantes y presentan caracter3sticas morfol3gicas diferentes a los sonidos producidos por otras clases de edad (juveniles, subadultos y adultos). En 3stos la frecuencia fundamental y el segundo arm3nico se cruzan formando en algunos casos una X y en otros formas similares a los signos > y <. Los intervalos de confianza indicaron que son fonemas diferentes.

* Fonemas excluidos del an3lisis porque no tienen el tama3o m3nimo de muestra

Se analizaron 434 despliegues de vocalizaciones, a partir del inicio de la emisi3n de sonidos, la actividad realizada y el contexto general presentado. A partir de estos, se identific3 el arreglo entre fonemas que conforman una vocalizaci3n, encontrando vocalizaciones

simples y compuestas, donde las primeras se caracterizan por tener una unidad fon3tica y las segundas, por estar conformadas por al menos dos fonemas iguales o diferentes.



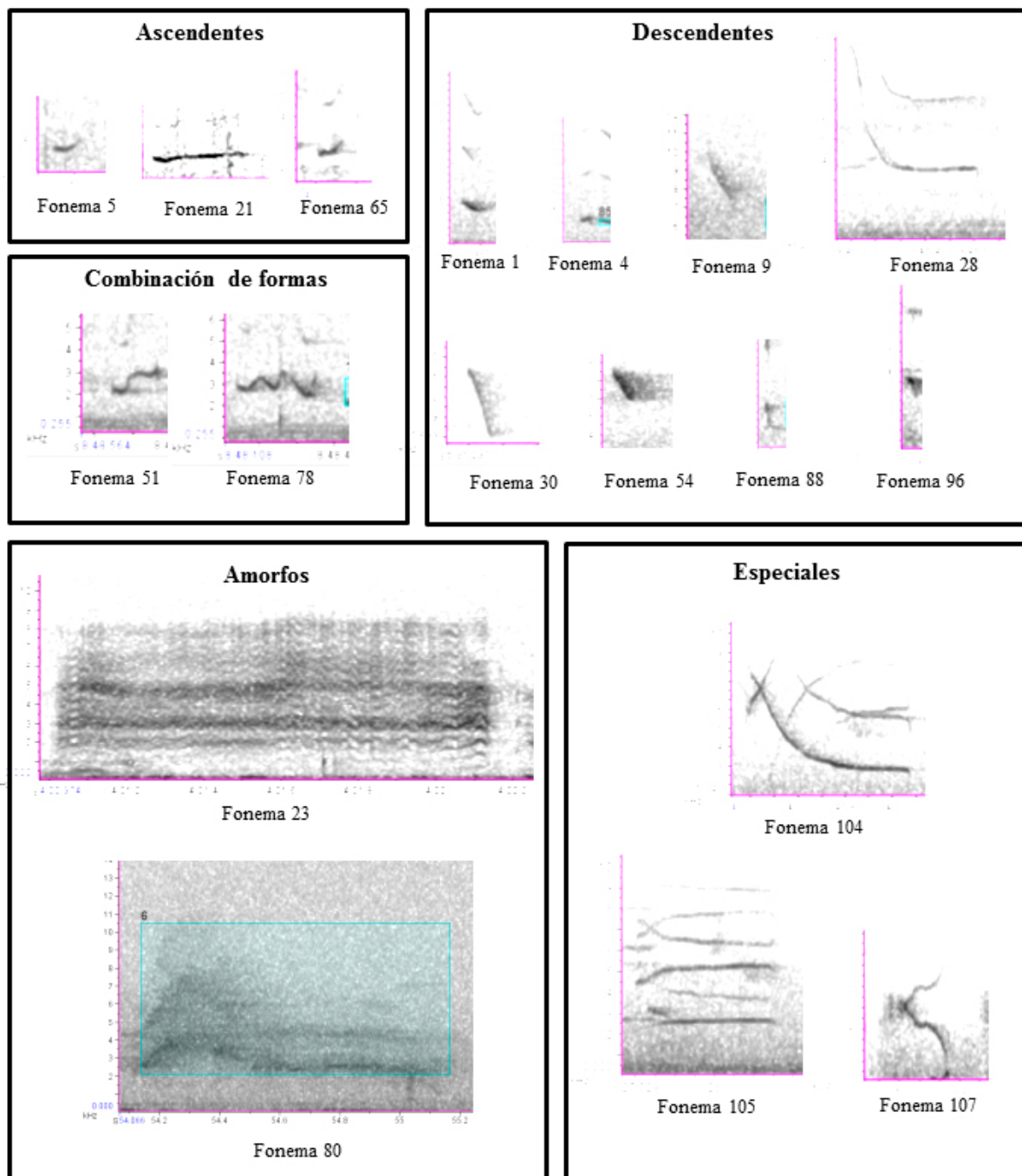


Figura 1. Grupos fonéticos del tití cabeciblanco (*Saguinus oedipus*) silvestre en el bosque seco tropical de Santa Catalina (Bolívar), Colombia, organizados según su morfología.

Figure 1. Phonetic groups of cotton-top tamarin (*Saguinus oedipus*) wild in the tropical dry forest of Santa Catalina (Bolívar), Colombia, organized according to their morphology.

Tabla 2. Descripción de las vocalizaciones del tití cabeciblanco (*Saguinus oedipus*) silvestre en el bosque seco tropical de Santa Catalina (Bolívar), Colombia.

Tabla 2. Description of vocalizations of cotton-top tamarin (*Saguinus oedipus*) wild in the tropical dry forest of Santa Catalina (Bolívar), Colombia

Vocalización	Descripción acústica	Comportamiento	Actividad /Contexto
Agresiva	Vocalización compuesta. En esta aparecen los fonemas 3, 12, 15, 27, 28, 37, 38, 39, 44, 61, 62, 64, 65, 66, 67, 70, 72, 74, 75, 76, 77, 78 y 87, los cuales corresponden principalmente a fonemas con forma de J invertida. El 64.3 % de las vocalizaciones iniciaron con el fonema 72, que a su vez se encuentra en el 78.6 % del total analizado. Por su parte el fonema 74 aparece en el 85.7 %, siendo los fonemas característicos de esta vocalización. Estos fonemas tienen picos y deltas de frecuencia muy altos y presentan entre 0 y 6 armónicos, siendo más frecuente un armónico. Es una vocalización principalmente aguda, FMáx= 13.9 kHz., y de larga duración ($X \pm s = 4.21 \pm 2.48$ s),	El despliegue de vocalizaciones agresivas puede registrarse durante varios minutos, tanto como permanezca en el área el agente que lo originó. Se emite con la boca visiblemente abierta, usualmente va acompañada de piloerección en la cola y/o cabeza, exhibición corporal, excitación y movimientos de la lengua. El emisor puede desplazarse horizontal y verticalmente en el árbol con movimiento errático o sólo mover la cabeza sin cambiar su posición en el mismo.	El despliegue agresivo generalmente es iniciado por el individuo que está realizando la actividad de vigilancia dentro del grupo y puede ser imitado por otros integrantes. No obstante, algunos de ellos pueden emitir otros tipos de vocalizaciones, que incluyen vocalización de exploración, nerviosa, pelea o, incluso, solicitud, dependiendo del grado de alerta en que se encuentre cada uno de ellos y la clase de edad. La vocalización agresiva puede presentarse como respuesta a un estímulo repentino o a la permanencia en el sitio de una fuente potencial de peligro. Hace parte del comportamiento antidepredatorio de la especie, pues en este caso, los individuos adultos y subadultos emiten esta vocalización con el fin de ahuyentar o disuadir al posible depredador. En algunas ocasiones esta vocalización fue dirigida hacia los observadores; en otros casos estuvo relacionada con estímulos del medio.
Alarma	Es una vocalización aguda ($X_{f\text{máx}} \pm s = 9243.7 \pm 741,25$ Hz), alcanza una frecuencia máxima de 13.9 kHz; de muy corta duración ($X \pm s = 0.324 \pm 0.131$ s). Está conformada por el fonema 99, que se repite dos veces. La vocalización de alarma carece de armónicos.	Se emite con la boca abierta y es producida por quien realiza la actividad de vigilancia. Como respuesta, los individuos del grupo reaccionan de manera inmediata, manifestando un evidente incremento en el estado de alerta general.	Está asociada a la cercanía de un potencial depredador o peligro; fue observada en presencia principalmente de aves rapaces como <i>Milvago chimachima</i> y <i>Rupornis magnirostris</i> . También fue registrada ante <i>Catharthes aura</i> . Un infante debido a su inexperiencia emitió vocalización de alarma ante la presencia de una ardilla (<i>Sciurus granatensis</i>).
Alimentación	Es una vocalización de corta duración ($X \pm s = 0.56 \pm 0,83$ s). Presenta la secuencia de fonemas 30, 9, 25.	Producida con la boca semiabierto; puede ser emitida por cualquier individuo.	Esta vocalización se registró cuando los animales encontraron fuentes de alimento y fue emitida mientras se manipulaba el fruto hallado.

Vocalización	Descripción acústica	Comportamiento	Actividad/Contexto
Contacto	Es la vocalización más frecuente (222) y representa el 51.1 % de las vocalizaciones registradas y analizadas. Por ser una vocalización simple, es muy corta ($X \pm s \pm 0.44 \pm 0.18$ s). Se registraron 11 fonemas diferentes para esta vocalización: 13, 20, 28, 29, 40, 43, 45, 57, 77, 84, y 100; no obstante, los más representativos son los fonemas 13 (32.8 %), 57 (17.1 %), 28 (13 %), 100 (9.9 %) y 20 (9 %), los cuales corresponden a silbidos largos. Los armónicos se presentan en número variable.	Producida con la boca semiabierta; puede ser emitida por cualquier individuo del grupo generalmente cuando se encuentran dispersos (aun en el mismo árbol) y se presenta en diferentes actividades.	Se presenta en medio de despliegues de vocalizaciones de exploración, pelea, agresiva, nerviosa, vigilancia y solicitud. La respuesta que evoca puede ser otra vocalización de contacto o vocalizaciones de llamado.
Dolor-Sumisión	Es una vocalización con una duración intermedia ($X \pm s = 1.64 \pm 0.95$ s). En algunos casos se presentó como vocalización compuesta, en otros como vocalizaciones simples. Los fonemas con que se representa son amorfos; incluye los fonemas 23, 79, 80 y 81. Los más representativos son los fonemas 23 y 79 (76.9 %)	Se trata de un grito agudo, emitido con la boca abierta. Es emitida por el receptor de una agresión física. Generalmente va acompañada de intento de huida y de otras vocalizaciones más suaves que tienen como fin apaciguar la situación y evitar la agresión.	Se presenta en los encuentros intergrupales, cuando un individuo aleja a la hembra dominante de su grupo del sitio donde se está dando el enfrentamiento, con el fin de evitar que se acerque a los machos del grupo contrario. También se presenta en los encuentros agresivos intragrupal, cuando un individuo dominante rechazó una oferta de acicalamiento por parte de un subordinado; y cuando un subordinado no respetó las jerarquías en un evento de alimentación. Adicionalmente, se registró durante el juego entre infantes y/o juveniles.
Exploración	Es una vocalización de frecuencia media (alrededor de 3 kHz), de duración intermedia ($X \pm s = 1.64 \pm 0.56$ s), representada por fonemas descendentes, planos, ascendentes, cóncavos, convexos y con forma de J invertida, reuniendo los fonemas 1, 2, 3, 4, 10, 11, 12, 21, 24, 25, 36, 37, 39, 61 y 66. Los elementos constitutivos más importantes de esta vocalización son los fonemas 3 (13.8%) y 37 (43.6 %). En general, los fonemas en esta vocalización presentan un número variable de armónicos. No se define una secuencia clara en esta vocalización, pues al parecer los elementos podrían ser pronunciados de manera independiente, con redundancia.	Puede ser emitida con la boca semiabierta, por cualquier individuo del grupo, en diferentes actividades y situaciones.	Presente en todas las actividades que realizan estos primates. Aparece en periodos de tranquilidad, acompañada de un estado de alerta mínimo. Es producida durante el forrajeo, descanso y actividades sociales (acicalamiento, juegos y encuentros agresivos). En un despliegue agresivo, también puede presentarse vocalización de exploración por un individuo con un estado de alerta bajo.

Vocalización	Descripción acústica	Comportamiento	Actividad /Contexto
Llamado	Es una vocalización larga ($X \pm s = 2.08 \pm 0.15$ s); presenta la secuencia de fonemas 84-85-85; y 28-85-85-85, variación relacionada al parecer con la actividad desarrollada, pues registramos la segunda secuencia en los encuentros agresivos intergrupales por la defensa del territorio. En el caso de los infantes, la vocalización de llamado está compuesta por la secuencia 104-105-105.	Esta vocalización es producida con la boca abierta. Puede ser emitida por cualquier miembro del grupo; generalmente la respuesta que evoca es otra vocalización de llamado o de contacto.	Grabada durante diferentes actividades; es muy importante antes, durante y después de los encuentros agresivos intergrupales por la defensa del territorio. También la registramos cuando el grupo se encontraba disperso y cuando los infantes requirieron apoyo de un individuo adulto en un desplazamiento.
Nerviosa	De larga duración ($X \pm s = 2.84 \pm 0.54$ s) y frecuencia media (2600-2800 Hz). Presenta los fonemas 1, 2, 3, 4, 6, 8, 13, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 56, 67, 74, 77 y 78; reúne ocho formas fonéticas. Los más representativos son los fonemas 38 (29.4%) y 39 (30%)	Es producida con la boca abierta, acompañada de movimientos rápidos; se presenta también algo de piloerección y exhibición del cuerpo.	Emitida ante un estímulo repentino; generalmente se presenta después de una vocalización de alarma, asociada a un alto grado de alerta. El despliegue nervioso puede durar tanto tiempo como permanezca el estímulo en el ambiente. En ocasiones es el preámbulo de un despliegue de vocalizaciones agresivas.
Pelea	Es una vocalización de corta duración ($X \pm s = 0.96 \pm 0.31$ s). Agrupa los fonemas 11, 14, 15, 25, 28, 35, 64, 65, 66, 70, 72, 74, 85, 87, 88 y 96. Se presentaron cuatro vocalizaciones relacionadas con los encuentros intergrupales. La vocalización de pelea 1 tiene la secuencia 96-88-88-88. La vocalización de pelea 2 presenta la secuencia 101-89-89-89- 89-89. Por otra parte la vocalización de pelea 3 tiene la secuencia 14-14-14-14-14-14-14-14. Estas vocalizaciones son exclusivas de los encuentros agresivos intergrupales, mientras que la vocalización de pelea 4, con la secuencia 87-87-88-88- 88-88-88-88-88-88-88-88-88-87-87, se registró durante los despliegues agresivos ante un potencial peligro.	Van acompañadas de piloerección en la cabeza y cola, exhibición del cuerpo, excitación y movimientos de la lengua.	Se presentan en los encuentros agresivos intergrupales por la defensa del territorio, cuando hay contacto visual entre los grupos. Las vocalizaciones de pelea 1 y 2 fueron emitidas en presencia del grupo contrario; la vocalización de pelea 3 fue emitida por los individuos adultos antes del contacto físico. Los encuentros intergrupales incluyen persecuciones y agresión física, principalmente entre los machos dominantes. En los encuentros en los que participaron solo los subadultos no hubo agresión física, sino despliegues de vocalizaciones de pelea, llamado, contacto, agresiva y nerviosa. Los infantes y juveniles no participaron nunca de estos encuentros, pudiendo permanecer en una rama individuos de ambos grupos, vocalizando llamado, nerviosa y solicitud.

Vocalización	Descripción acústica	Comportamiento	Actividad/Contexto
Solicitud	Es una vocalización de duración media ($X \pm s = 1.45 \pm 0.47$ s). Reúne los fonemas 6, 13, 23, 27, 28, 37, 39, 45, 47, 57, 77, 81, 85, 86, 104, 105, y 107. Los fonemas más representativos son el 23 (21.9 %), 104 (20.7%) y 107 (15.8%). La vocalización de solicitud de las crías sigue la secuencia 104-107-107, mientras en los juveniles es 23-23-23.	Va acompañada de vocalizaciones de contacto y de llamado y se produce con la boca semiabierta.	Es emitida principalmente por los infantes cuando requieren apoyo de un adulto o alimento, y en ocasiones por los juveniles. Los individuos adultos se acercan a los infantes y satisfacen esta necesidad, ya sea acarreándolos o proveyéndolos de alimento. Se presentó durante los encuentros agresivos intergrupales, en los desplazamientos del grupo y en los eventos de alimentación.
Vigilancia	Es una vocalización larga ($X \pm s = 4.18 \pm 2.88$ s). Al igual que en las vocalizaciones de exploración y nerviosa, en ésta son unos pocos elementos que se repiten varias veces en una misma vocalización. Comprende los fonemas 1, 2, 3, 12, 14, 20, 35, 37, 38, 39, 40, 42, 43, 64, 77, 87, 88 y 100. Siendo los fonemas 37 (43.1%), 17 (16.6%) y 40 (9.8%) los más importantes.	Es un silbido, asociado a un estado de alerta baja.	Esta vocalización es emitida por quien realiza la actividad de vigilancia al interior del grupo.

Discusión

Los sonidos producidos por el tití cabeciblanco son de corta duración y principalmente agudos. Esto coincide con lo reportado por Morton (1977), quien afirma que en mamíferos y aves la frecuencia fundamental está negativamente correlacionada con el tamaño corporal. Esta afirmación ha sido corroborada por Hauser (1993); por su parte Moynihan (1970 citado por Oppenheimer, 1997) sugiere que los primates pequeños, al tener un riesgo de depredación más alto que los primates de mayor tamaño, han seleccionado frecuencias altas en su comunicación vocal, pues es más difícil ubicar un animal que emplea tales frecuencias. Este es el caso del tití cabeciblanco cuyas vocalizaciones en vida silvestre son principalmente agudas, posiblemente por su tamaño pequeño, y de corta duración, con el fin de minimizar el riesgo de depredación. Esto mismo ha sido reportado para esta especie en condiciones de cautiverio (Cleveland & Snowdon 1982; Campbell & Snowdon, 2007). También es similar a lo reportado para otras especies del género en estado silvestre en Colombia (Rueda & Zerda, 2009; Fuentes, 2006; Fuentes *et al.*, 2013). Las vocalizaciones del tití cabeciblanco también presentan algunas características similares, en cuanto a su duración y forma, a las encontradas por Rueda & Zerda (2009), Fuentes (2006) y Fuentes *et al.* (2013), para el tití

gris (*Saguinus leucopus*). Sin embargo, el tití cabeciblanco alcanza frecuencias más altas en sus vocalizaciones que las reportadas por estos autores para el tití gris en estado silvestre en un bosque de Mariquita, Tolima.

Cleveland & Snowdon (1982) describieron 38 sonidos o combinaciones de sonidos en el repertorio vocal de titíes cabeciblancos adultos mantenidos en cautiverio. En el presente estudio se identificaron 49 sonidos diferentes para la especie en estado silvestre, incluyendo la descripción de los sonidos o fonemas emitidos por infantes, que difieren significativamente de los emitidos por otras clases de edad, constituyéndose en el primer aporte sobre sonidos de los infantes y, en general, de esta especie endémica en condiciones naturales. En cautiverio, los infantes de titíes cabeciblancos producen sonidos que no se presentan en los adultos, aunque parecen comprender los sonidos emitidos por estos (Castro & Snowdon, 2000). Según Rueda & Zerda (2009) es posible que los infantes de titíes emitan vocalizaciones poco definidas y repetitivas, diferentes a otras clases de edad, comparable a lo que ocurre en el lenguaje infantil de los humanos.

La vocalización agresiva registrada para el tití cabeciblanco en vida silvestre, emitida ante un peligro potencial, hace parte del comportamiento antidepredatorio

de la especie. Esta equivale al trino de gorjeos altos identificado por [Campbell & Snowdon \(2007\)](#) para titíes cabeciblancos en cautiverio, con similar duración, forma y frecuencia de inicio de sus elementos constituyentes. Sin embargo, en vida silvestre, la frecuencia máxima alcanzada en estas vocalizaciones es más alta que la reportada para titíes cautivos. Ellos describen una secuencia de sonidos agudos y de corta duración (bark bout), con características similares a la vocalización de pelea 4 de nuestro estudio, que también fue registrada en los despliegues de vocalizaciones agresivas. Al igual que en el estudio de [Campbell & Snowdon \(2007\)](#), encontramos que al ser este un comportamiento social, se presentaron coros de otros individuos del grupo que emitían la misma vocalización o vocalizaciones diferentes, dependiendo de la clase de edad y del estado motivacional. Una vez el estímulo desaparece o disminuye la amenaza, estas vocalizaciones van siendo sustituidas por vocalizaciones nerviosas, pasando a un estado de vigilancia. Sin embargo, contrario a lo predicho por Marler (1955 citado por [Campbell & Snowdon, 2007](#)) y [Bradbury & Vehrencamp \(1998\)](#), quienes afirman que las vocalizaciones antidepredatorias deberían ser de baja frecuencia para facilitar la ubicación del emisor y trabajar conjuntamente en el ahuyentamiento del depredador, las vocalizaciones agresivas del tití cabeciblanco fueron principalmente agudas. Esto también contradice lo descrito por [Morton \(1977\)](#), quien afirma que las vocalizaciones producidas en contextos hostiles son de baja frecuencia.

[Rueda & Zerda \(2009\)](#) reportaron para el tití gris un sonido con forma de "U" invertida, emitido cuando existen amenazas, pudiendo presentarse secuencias de 2-50 señales de este tipo; tal sonido presenta características similares a los fonemas constituyentes de la vocalización agresiva. Por su parte, [Fuentes \(2006\)](#) y [Fuentes et al. \(2013\)](#) reportaron un gorjeo "A" para la misma especie, con forma similar a algunos elementos de la vocalización agresiva de nuestro estudio; sin embargo difiere en la duración y frecuencia, siendo aquellos más largos y de tono más bajo que los registrados para el tití cabeciblanco, pero con funciones similares.

La vocalización de alarma, por su parte, concuerda con lo expuesto por Marler (1955 citado por [Campbell & Snowdon, 2007](#)), [Bradbury & Vehrencamp \(1998\)](#) y [Brown \(1982\)](#) citado por [Inglis & Shepherd, 1990](#)), ya que se trata de una vocalización de tono alto y corta duración, para evitar que el depredador pueda ubicar al emisor. Esta vocalización puede preceder o no a la vocalización agresiva, dependiendo de si los animales

desean evadir o ahuyentar al peligro potencial. El reconocimiento de los depredadores y peligros potenciales para la especie es un comportamiento adquirido debido a su experiencia en el medio. No observamos ataques o intentos de ataque por otro tipo de depredadores (mamíferos terrestres o serpientes), por lo que no se pudo constatar si las vocalizaciones de alarma variaban según el tipo de depredador de acuerdo con lo registrado para otras especies de primates por [Seyfarth & Cheney \(1990\)](#).

El gorjeo tipo E reportado por [Cleveland & Snowdon \(1982\)](#), tiene funciones de evasión según estos autores; su duración, forma y frecuencia son similares a la vocalización de alarma reportada en nuestro estudio. En el caso del tití gris, [Rueda & Zerda \(2009\)](#) describen un *piup* con funciones de alarma; sin embargo este no presenta similitud alguna con la vocalización de alarma del tití cabeciblanco. Tampoco hay similitud entre esta vocalización y la alarma presentada por [Fuentes et al. \(2013\)](#). Por consiguiente, existe especificidad en los sonidos de alarma de cada especie.

Para titíes en cautiverio, [Cleveland & Snowdon \(1982\)](#) reportan un *gorjeo tipo A*, similar al fonema 30 que encontramos en este estudio, pero de frecuencia más baja. También describen el *gorjeo tipo C*, similar al fonema 9 de la vocalización de alimentación. Ellos señalan que este sonido se presenta ante la aproximación a una fuente de alimento. Además describen un *gorjeo tipo D*, cuando el animal tiene en su posesión comida u objetos; sin embargo no se encontró similitud entre éste y alguno de los elementos constituyentes de la vocalización de alimentación. [Rueda & Zerda \(2009\)](#), [Fuentes \(2006\)](#) y [Fuentes et al. \(2013\)](#) presentan para el tití gris un *silbido A*, asociado a contextos alimentarios, con características de duración y frecuencia similares al fonema 30 de la vocalización de alimentación; sin embargo difieren en la forma.

La vocalización de contacto es una vocalización simple, representada por un silbido largo. Es muy importante en la comunicación vocal del tití cabeciblanco, y fue la que más registramos en el estudio. Esta vocalización es empleada para mantener la cohesión del grupo y un espacio mínimo entre los individuos al realizar diferentes actividades. Es útil en la comunicación a distancia, y puede ser empleada para comunicarse, aun cuando el receptor o receptores no son visibles para el emisor. Se presentó en la comunicación desde 1 m hasta más de 50 m. Esta vocalización presenta características similares de duración y frecuencia con los *pequeños silbidos*

modulados inicialmente, pequeños silbidos modulados al final, silbidos planos y silbidos múltiples ascendentes descritos por Cleveland & Snowdon (1982) en diferentes contextos, pero siempre con la función de mantener el contacto entre los miembros del grupo. Fuentes (2006), presenta un *chiih A* como un sonido con funciones de contacto, con variaciones en la respuesta provocada, según el contexto en el que fue emitido por el tití gris; sin embargo, este sonido no tiene equivalente dentro de las vocalizaciones de contacto del tití cabeciblanco. No obstante, este autor describe un *piiip* como un sonido de alarma emitido en diferentes actividades, mientras los animales se esconden y se asoman o huyen de una amenaza. Tal sonido presenta características similares a la vocalización de contacto del tití cabeciblanco; entonces, al presentarse en medio del desarrollo de diferentes actividades, podría tener funciones de contacto para mantener la cohesión del grupo, en lugar de funciones de alarma.

La vocalización de dolor-sumisión es un chillido ruidoso, emitido por el receptor de una agresión física, que busca apaciguar la situación y evitar la agresión. Conforme a lo descrito por Morton (1977), es un sonido de baja frecuencia, presente en un comportamiento hostil.

Generalmente está asociada a los encuentros agresivos intergrupales por la defensa del territorio y al mantenimiento del orden jerárquico. Existe similitud en las características acústicas de esta vocalización y los *graznidos* y *gritos* reportados por Cleveland & Snowdon (1982) para titíes cautivos, presentando la misma función. También es similar al *chillido A* descrito por Rueda & Zerda (2003) y al *chirrido* de Fuentes *et al.* (2013) para el tití gris; sin embargo en estos últimos estudios no especifican si el emisor de la vocalización es el agresor o el agredido.

La vocalización de exploración es una vocalización asociada a un estado de alerta curiosa, en el que no se presentan amenazas para los animales. Esta vocalización, registrada en la mayoría de las actividades realizadas por los titíes, se relaciona con la exploración del territorio en busca de alimentos, refugios y marcaje del mismo. Es una vocalización redundante, es decir, que sus elementos constitutivos se repiten constantemente con el fin de darle mayor duración a la señal en el medio, dado que según la actividad realizada el receptor o receptores podrían encontrarse distraídos. Entonces, se considera que esta vocalización tiene como objetivo informar a los miembros del grupo la ubicación del emisor así como la actividad realizada. Sin embargo, siempre hay un individuo que emite vocalización de vigilancia

para garantizar la seguridad del grupo. El *gorjeo tipo B* descrito por Cleveland & Snowdon (1982), emitido hacia observadores u objetos familiares, presenta similitudes con algunos elementos de la vocalización de exploración. Los sonidos asociados con la exploración del territorio, descritos por Rueda & Zerda (2009) y Fuentes *et al.* (2013) para el tití gris, difieren completamente en su forma y características acústicas a los emitidos por el tití cabeciblanco, indicando que esta vocalización es especie-específica, dado que es necesaria para mantener la unidad grupal en la coordinación y desarrollo de diferentes actividades.

La vocalización de llamado es una vocalización compuesta por silbidos largos, utilizada en la comunicación a distancias superiores de 100 m cuando el grupo se encontró disperso o ante la cercanía de un grupo vecino. Fue la vocalización que más se presentó durante los encuentros agresivos intergrupales, por lo que no sólo tendría la función de reunir al grupo cuando está disperso, sino que también interviene en el mantenimiento y defensa del territorio. Al respecto registramos diferencias en las variables acústicas analizadas, de acuerdo con la actividad realizada y según la clase de edad del emisor. Cleveland & Snowdon (1982), presentan un *llamado largo normal* y el *gorjeo tipo f + silbido* con características de forma, secuencia, duración y frecuencia similares a la vocalización de llamado de este estudio. Ellos indican que se presentan como respuesta a los llamados de otros grupos y durante el aislamiento de un individuo. También presentan un *llamado largo combinado* emitido durante el juego, aislamiento, cuando los animales son socialmente molestados o cuando el animal no está visible; sin embargo ésta es similar a la vocalización de llamado registrada antes de los encuentros agresivos intergrupales, por lo que en estado silvestre tendría la función de reunir y preparar al grupo para defender su territorio. Vocalizaciones de llamado similares al *llamado largo silencioso* de estos autores, se registraron durante los encuentros intergrupos. Las vocalizaciones de llamado del tití cabeciblanco descritas en nuestro estudio difieren en su forma y características acústicas a los sonidos con la función de reunir al grupo en el tití gris descritos por Rueda & Zerda (2009); Fuentes (2006) y Fuentes *et al.* (2013) pero presentan similitudes con los llamados intergrupales de *Saguinus geoffroyi* descritos por Oppenheimer (1977).

La vocalización nerviosa, emitida ante un estímulo del medio que ofrece cierto grado de amenaza, es redundante al igual que la vocalización de exploración, para garantizar que todos los miembros del grupo estén

alerta. No encontramos semejanzas entre esta vocalización y los sonidos reportados por Cleveland & Snowdon (1982) para titíes cautivos. Por su parte, el *pip* descrito por Rueda & Zerda (2009) y el *pip* de Fuentes (2006), presentan características similares a elementos de la vocalización nerviosa.

Identificamos cuatro secuencias diferentes en la vocalización de pelea, dependiendo si hay contacto visual o físico con el grupo contrario. Estas estarían indicando el estado motivacional de cada individuo frente al encuentro intergrupalo. Cleveland & Snowdon (1982) presentan *silbidos rápidos* como una vocalización intragrupo en actividades sociales. Esta es similar a la vocalización de pelea 3 descrita en el presente estudio; sin embargo fue registrada durante un encuentro intergrupalo antes del contacto físico entre los machos dominantes de cada uno de ellos. La variación en el contexto en el que es emitido esta vocalización en cautiverio puede deberse a que en los grupos de titíes cautivos nunca hay intrusión a sus territorios.

La vocalización de pelea 4 es similar a la secuencia de sonidos rápidos y agudos (*bark bout*) descrito por Campbell & Snowdon (2007) para titíes cabeciblancos cautivos; también es similar en forma y características acústicas al *trino A* reportado por Fuentes (2006) y Fuentes *et al.* (2013) para el tití gris.

La vocalización de solicitud es la más común en el repertorio de los infantes. Comunica una necesidad por parte de éstos, que debe ser satisfecha por los otros miembros del grupo. No se encontraron sonidos semejantes a éstos en Cleveland & Snowdon (1982) puesto que ellos no reportan vocalizaciones de infantes. Algunos elementos de esta vocalización presentan características similares a *chillido B*, *chillido C* y *chirr* descritos por Rueda & Zerda (2009) para el tití gris. La vocalización de vigilancia, al igual que las vocalizaciones de exploración y nerviosa, es redundante.

La mayor cantidad de sonidos registrados e identificados en este estudio, comparado con los resultados de Cleveland & Snowdon (1982), pueden deberse a que en vida silvestre los titíes tienen la necesidad de coordinar actividades como los desplazamientos, manteniendo la unidad del grupo, así como un espacio mínimo entre los individuos; exploración en busca de alimentos y refugios, defensa del territorio y defensa ante posibles

depredadores, necesidades que no están presentes en los grupos mantenidos en cautiverio.

Por otra parte, es posible que existan variaciones en la vocalización de alarma debidas a diferentes tipos de depredadores, como ha sido reportado en otras especies de primates (Seyfarth & Cheney, 1990). También podrían existir variaciones en la vocalización de alimentación relacionadas con la preferencia alimentaria (Elowson *et al.*, 1991). En cautiverio, también se han reportado sonidos relacionados con el comportamiento reproductivo y cuidado parental (Cleveland & Snowdon, 1982), que no fueron registrados en el presente estudio. Por tal razón es necesario continuar con los estudios de la comunicación vocal de este primate en vida silvestre, con el fin de llenar los vacíos de información aún existentes.

Referencias

- Altmann, J. (1974). Observational study of behaviour: sampling methods. *Behaviour*, 49(3), 227-267.
<https://doi.org/10.1163/156853974X00534>
- Bradbury, J. & Vehrencamp, S. (1998). *Principles of Animal Communication*. Sunderland, Massachusetts: Sinauer Associates. 882 pp.
- Campbell, M. & Snowdon, C. (2007). Vocal response of captive-reared *Saguinus oedipus* during mobbing. *International Journal of Primatology*, 28(2), 257-270.
<https://doi.org/10.1007/s10764-007-9123-y>
- Campbell, M. & Snowdon, C. (2009). Can auditory playback condition predator mobbing in captive-reared *Saguinus oedipus*? *International Journal of Primatology*, 30(1), 93-102.
<https://doi.org/10.1007/s10764-008-9331-0>
- Castro, N. & Snowdon, C. (2000). Development of vocal responses in infant cotton-top tamarins. *Behaviour*, 137(5), 629-646.
<https://doi.org/10.1163/156853900502259>
- Cleveland, J. & Snowdon, C. (1982). The complex vocal repertoire of the adult cotton-top tamarin (*Saguinus oedipus*). *Zeitschrift für Tierpsychologie*, 58(3), 231-270.
<https://doi.org/10.1111/j.1439-0310.1982.tb00320.x>
- Cumming, G. & Finch, S. (2005). Inference by eye. Confidence intervals and how to read pictures of data. *American Psychologist*, 60(2), 170-180.
<https://doi.org/10.1037/0003-066X.60.2.170>

- Elowson, A. M., Tannenbaum, P. L. & Snowdon, C. T. (1991). Food-associated calls correlate with food preferences in cotton-top tamarins. *Animal Behaviour*, 42(6), 931-937.
[https://doi.org/10.1016/S0003-3472\(05\)80145-9](https://doi.org/10.1016/S0003-3472(05)80145-9)
- Fuentes, J. A. (2006). *Comunicación vocal de tití gris (Saguinus leucopus) en estado silvestre* (Trabajo de grado). Medellín, Colombia: Universidad de Antioquia, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Instituto de Biología. 119 pp.
- Fuentes, J. A., Zerda-Ordoñez, E. & Muñoz-Durán, J. (2013). Comunicación vocal del tití gris (*Saguinus leucopus*) en estado silvestre. *Caldasia*, 35(1), 49-63.
- Hauser, M. (1993). The evolution of nonhuman primate vocalizations: effects of phylogeny, body weight and social context. *American Naturalist*, 142, 528-542.
<https://doi.org/10.1086/285553>
- Inglis, I. & D. Shepherd, (1990). Communication. In: Monaghan, P. & D. Wood-Gush. *Managing the behaviour of animals*. New York: Chapman & Hall Press. Pp 72-122.
- Miller, C., J. Scarl & Hauser M. (2004). Sensory biases underlie sex differences in tamarin long call structure. *Animal Behaviour*, 68(4), 513-520.
<https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2003.10.028>
- Miller, C., C. Iguina & Hauser M. (2005). Processing vocal signals for recognition during antiphonal calling in tamarins. *Animal Behaviour*, 69(6), 1387-1398.
<https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2004.08.021>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (15 de septiembre de 2017). Por la cual se establece el listado de las especies silvestres amenazadas de la diversidad biológica colombiana continental y marino costera [Resolución 1912 de 2017].
- Morton, E. (1977). On the occurrence and significance of motivation-structural rules in some bird and mammal sounds. *The American Naturalist*, 111(981), 855-869.
- Oppenheimer, J. (1977). Communication in new world monkeys. In: Sebeok, T.A. *How animals communicate*. Indiana University Press, Bloomington. Pp 851-889.
<https://doi.org/10.1002/ajpa.1330500114>
- Roush, R. S. & Snowdon, C. T. (1999). The effects of social status on food-associated calling behaviour in captive cotton-top tamarins. *Animal Behaviour*, 58(6), 1299-1305.
<https://doi.org/10.1006/anbe.1999.1262>
- Rueda, L. E. & Zerda, E. (2009). Comunicación vocal de un grupo de tití gris (*Saguinus leucopus*) en Mariquita, Colombia. *Neotropical Primates*, 16(1), 37-43.
<https://doi.org/10.1896/044.016.0109>
- Savage, A. & Causado, J. (2014). *Saguinus oedipus*. The IUCN Red List of Threatened Species.
<https://www.iucnredlist.org/species/19823/17930260>
- Seyfarth, R. & D. Cheney. (1990). The assessment by vervet monkeys of their own and another species' alarm calls. *Animal Behaviour* 40: 754-764.
[https://doi.org/10.1016/S0003-3472\(05\)80704-3](https://doi.org/10.1016/S0003-3472(05)80704-3)
- Sokal, R. R. & Rohlf, F. J. (1995). *Biometry: The Principles and Practice of Statistics in Biological Research*. 3rd Edition. New York: W.H. Freeman and Co. 887pp.
- Weiss, D. & Hauser, M. (2002). Perception of harmonics in the combination long call of Cotton-top tamarins, *Saguinus oedipus*. *Animal Behaviour*, 64(3), 415-426.
<https://doi.org/10.1006/anbe.2002.3083>

Milena Paulo-Morelo

Fundación Mi Naturaleza Colombiana

Bogotá, Colombia

cmpaulom@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-1974-8567>

Pedro Sánchez-Palomino

Universidad Nacional de Colombia

Bogotá, Colombia

psanchezp@unal.edu.co

<https://orcid.org/0000-0002-0685-9217>

Descripción de las unidades fonéticas y sintaxis fonológica del repertorio vocal del tití cabeciblanco (*Saguinus oedipus*) silvestre

Citación del artículo: Paulo-Morelo, M. & Sánchez-Palomino, P. (2021). Descripción de las unidades fonéticas y sintaxis fonológica del repertorio vocal del tití cabeciblanco (*Saguinus oedipus*) silvestre. *Biota Colombiana*, 22(1), 184-199.

<https://doi.org/10.21068/c2021.v22n01a12>





Recibido: 31 de mayo 2020

Aceptado: 9 de noviembre 2020

Artículo de datos

Conjunto de datos de monitoreo acústico pasivo en la Reserva Natural Los Yátaros, Gachantivá, Boyacá, Colombia

Dataset of passive acoustic monitoring at the Nature Reserve Los Yátaros, Gachantivá, Boyacá, Colombia

Juan Diego Tovar García  , Orlando Acevedo-Charry  

Resumen

El monitoreo acústico pasivo es una técnica en la cual se instalan grabadoras con una programación particular de grabación, sin que haya interferencia del observador. A pesar de su reciente interés, muchos lugares en el Neotrópico aún no cuentan con información sobre su actividad acústica. Los eventos de muestreo acústico pasivo de este tipo pueden aportar en un futuro a contestar diferentes preguntas sobre la diversidad acústica del Neotrópico. Presentamos un conjunto de datos de eventos de muestreo acústico pasivo realizados durante el primer semestre de 2020 en la Reserva Natural Los Yátaros, a 6 km de Gachantivá, Boyacá, cordillera Oriental de Colombia. El muestreo consistió en instalar seis grabadoras automáticas AudioMoth, dos en cada sitio de muestreo (n=3). Programamos las AudioMoth para grabar 1 minuto de audio cada 30 minutos a lo largo de todo el día (00:00-23:30) para espectro audible (0 Hz-16 kHz) y en las noches (16:30-06:00) para ultrasonido (hasta 192 kHz). El muestreo se desarrolló desde el 1 de marzo hasta el 2 de mayo del 2020, acumulando en total 12 447 grabaciones, 9055 de espectro audible y 3392 de ultrasonido.

Palabras clave. Actividad acústica. Andes orientales. Alto Ricaurte. Huella acústica. Paisaje sonoro.

Abstract

Passive acoustic monitoring is a technique in which acoustic sensors are placed with a particular recording setting, without interference from the observer. Despite the recent interest, many places in the Neotropics still do not have information on acoustic activity. Such acoustic sampling events would contribute to answer different questions about the acoustic diversity in the Neotropics. We present the dataset of passive acoustic sampling events during the first semester of 2020, at the Natural Reserve Los Yátaros, 6 km away of Gachantivá, Boyacá, Eastern Andes of Colombia. Sampling consisted of installing six AudioMoth acoustic sensors, two at each sampling site (n=3). We programmed all acoustic sensors to record 1 min every 30 minutes throughout the day (00:00-23:30) to audible spectrum (0 Hz-16 kHz), and at night (16:30-06:00) to ultrasound spectrum (up to 192 kHz). The monitoring was conducted from March 1 to May 2, 2020, gathering 12 447 recording, 9055 audible and 3392 ultrasound recordings.

Keywords. Acoustic activity. Acoustic footprint. Eastern Andes. Ricaurte province. Soundscape.

Introducción

Las regiones tropicales son uno de los lugares más biodiversos acústicamente del mundo (Luther & Gentry, 2013), pero aún con vacíos de conocimiento sobre su actividad acústica (Deichmann *et al.*, 2018). Para intentar comprender otras dimensiones de la biodiversidad, recientemente ha surgido el estudio de los paisajes sonoros (Rodríguez-Buriticá *et al.*, 2019). Los paisajes sonoros son la composición de todos los sonidos dentro de un área y momento particular, incluyendo sonidos biológicos producidos por animales (biofonía), sonidos no biológicos ambientales como la lluvia, viento, truenos y cascadas (geofonía), y los sonidos producidos por la actividad humana (antropofonía; Pijanowski *et al.*, 2011). Estudiar el paisaje sonoro ha tomado relativa relevancia en los últimos años, ya que mediante el análisis de los sonidos pueden responderse preguntas sobre patrones de actividad, incluyendo amplias escalas espaciales, y realizando monitoreo de especies específicas para entender la relación de actividad acústica con impacto por actividades humana (Deichmann *et al.*, 2017; Sueur & Farina, 2015; Campos-Cerqueira *et al.*, 2020; Ducretet *et al.*, 2020).

En los últimos años se han venido realizando cada vez más intensamente estudios sobre la actividad acústica (Farina *et al.*, 2014; Boquimpani-Freitas *et al.*, 2007; Schmidt & Balakrishnan, 2014). Cambios en la actividad vocal debido a factores temporales y ambientales puede proporcionar información sobre la respuesta comportamental referentes a señales acústicas. El clima, por ejemplo, puede influenciar el comportamiento y por ende el repertorio vocal de las especies. La precipitación puede restringir las exhibiciones territoriales (Bas *et al.*, 2008) y alterar la complejidad del repertorio vocal (Medina & Francis, 2012). En anuros, largas temporadas de lluvia puede alterar la actividad acústica, como también influenciar cambios poblacionales (Stewart, 1995), y en otros casos, la precipitación da lugar a estanques efímeros donde se reúnen múltiples especies de anuros para vocalizar (Ulloa *et al.*, 2019). Los niveles de luz ambiental también han demostrado tener un efecto en la reproducción, forrajeo e interacciones entre depredador-presa para especies nocturnas de aves (Kronfeld-Schor *et al.*, 2013). En anuros, efectos de la luz ambiental han sido relacionados con el comportamiento durante las temporadas de reproducción (Vignoli & Luiselli, 2013; Onorati & Vignoli, 2017) y

muy poco se ha estudiado en referencia a la actividad acústica (Fitzgerald & Bider, 1974).

El monitoreo acústico tradicional se enfoca en la observación directa del organismo vocalmente activo (Parker, 1991), mientras el monitoreo acústico pasivo utiliza grabadoras colocadas en un área de estudio para grabar vocalizaciones y luego detectar la presencia de los individuos (Blumstein *et al.*, 2011). Los métodos acústicos ofrecen una forma eficiente para obtener de forma autónoma grandes cantidades de información, continua, simultánea y de registros permanentes que reflejan la actividad acústica que pueden ser utilizada nuevamente para responder diferentes preguntas o complementar diferentes metodologías (Boquimpani-Freitas *et al.*, 2007; Aide *et al.*, 2013; Laverte *et al.*, 2017). El objetivo de presentar un conjunto de datos de eventos de muestreo acústico es dejar disponible la información primaria levantada en el campo (archivos de audio), en este caso para una reserva privada del municipio de Gachantivá. Los archivos de audio serán usados para investigar cómo está compuesta la huella acústica de la reserva en los tres puntos de muestreo a lo largo de nueve semanas, lo cual puede luego contrastarse con factores ambientales (precipitación, luz ambiental) que ayuden a explicar cambios en la estructura acústica.

Datos del Proyecto

Título: Conjunto de datos de monitoreo acústico pasivo en la Reserva Natural Los Yátaros de Gachantivá, Boyacá, Colombia.

Personas asociadas: Juan Diego Tovar García

Fuentes de financiación:

Fuentes propias.

Descripción del área de estudio

Los datos fueron recolectados en el noreste de los Andes colombianos, en la Reserva Natural Los Yátaros, vereda La Caja, del municipio de Gachantivá, departamento de Boyacá. La reserva está compuesta por robledales y bosque sub andino en diferentes estadios de regeneración natural. El muestreo fue desarrollado desde el 1 de marzo hasta el 2 de mayo del 2020, lo cual incluye 9 semanas de grabación.

Descripción del proyecto:

El proyecto buscó tener un conjunto de datos de los sonidos en espectro audible y en ultrasonido de los componentes de la huella acústica de la reserva. Para esto, escogimos tres puntos en el sendero principal, separando cada punto de muestreo por más de 150 m. En cada punto instalamos dos grabadoras AudioMoth a diferente tasa de muestreo, posicionadas a alturas diferentes. Las grabaciones fueron ingresadas a la Colección de Sonidos Ambientales y esperan ser analizadas durante los próximos meses.

Cobertura geográfica

Descripción.

En la Reserva Natural Los Yátaros. Departamento de Boyacá, Municipio de Gachantivá, Vereda La Caja (Figura 1).

Coordenadas: 5°47'25.6" N, 73°33'24" O y 5°47'21.3" N, 73°33' 1.6" O.

Cobertura temporal: 01 de marzo de 2020-02 de mayo de 2020

Datos de la colección

Nombre de la colección: Colección de Sonidos Ambientales del Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.

Identificador de la colección: IAvH-CSA, Registro Nacional de Colecciones 3

Identificador de la colección parental: IAvH

Método de preservación de los audios: Archivos digitales en formato WAV

Materiales y Métodos

Área de estudio

Los datos fueron recolectados en el noreste de los Andes colombianos en la Reserva Natural Los Yátaros, vereda La Caja, del municipio de Gachantivá, departamento de Boyacá (Figura 1). La reserva queda a 6 km del casco urbano de Gachantivá, y está compuesta por robledales

y bosque subandino en diferentes estadios de regeneración natural secundaria. El muestreo se desarrolló desde el 1 de marzo hasta el 2 de mayo del 2020, lo cual incluye nueve semanas de grabación.

Descripción del muestreo

Realizamos nueve semanas de grabación en tres puntos a lo largo del camino principal de la reserva, usando grabadoras autónomas AudioMoth, grabando todos los sonidos presentes (biofonía, geofonía y antropofonía). Instalamos dos grabadoras AudioMoth por cada sitio de muestreo (n=3) a lo largo del camino principal dentro de la reserva (Figura 1). Cada punto de muestreo estuvo separado por más de 150 m de los otros, para evitar pseudorréplicas y asumiendo una independencia entre los puntos. La programación de las grabadoras fue de 1 minuto de grabación cada 30 minutos durante todo el día (00:00-23:30) para un set de grabadoras (3) a una tasa de muestreo de 32 kHz, y 1 minuto de grabación cada 30 minutos durante la noche para otro set de grabadoras (3) a 384 kHz, todas en formato de audio no comprimido (wav) y con una ganancia alta. Las grabadoras de espectro audible (32 kHz) las instalamos a 1.5 m del suelo, mientras que las de ultrafrecuencia (384 kHz), a 2.5 m del suelo. El esfuerzo de muestreo fue de nueve semanas, del 1 de marzo al 02 de mayo del 2020.

Control de calidad. Previo a la programación de las grabadoras AudioMoth, realizamos pruebas dentro de las instalaciones de la Colección de Sonidos Ambientales en la sede Villa de Leyva del Instituto Humboldt, seleccionando aquellas grabadoras que tuvieran un buen estado general, con el interruptor on/off completo, y que no tuvieran partes oxidadas. Realizamos una prueba de grabación para verificar el correcto funcionamiento. Aleatoriamente, algunas grabaciones de espectro audible y de ultrasonido fueron seleccionadas para confirmar su estado. Los datos fueron corroborados por la Infraestructura Institucional del Instituto Humboldt (I2D).

Descripción de la metodología paso a paso.

Programación para la toma de los datos acústico: Usamos el programa "AudioMothTime" para ajustar cada grabadora en UTC-5, correspondiente a la hora local colombiana, confirmando que la hora y la fecha estuvieran correctas. Con el programa "AudioMothConfig" configuramos los periodos de grabación y programación de encendido y apagado de la grabadora.

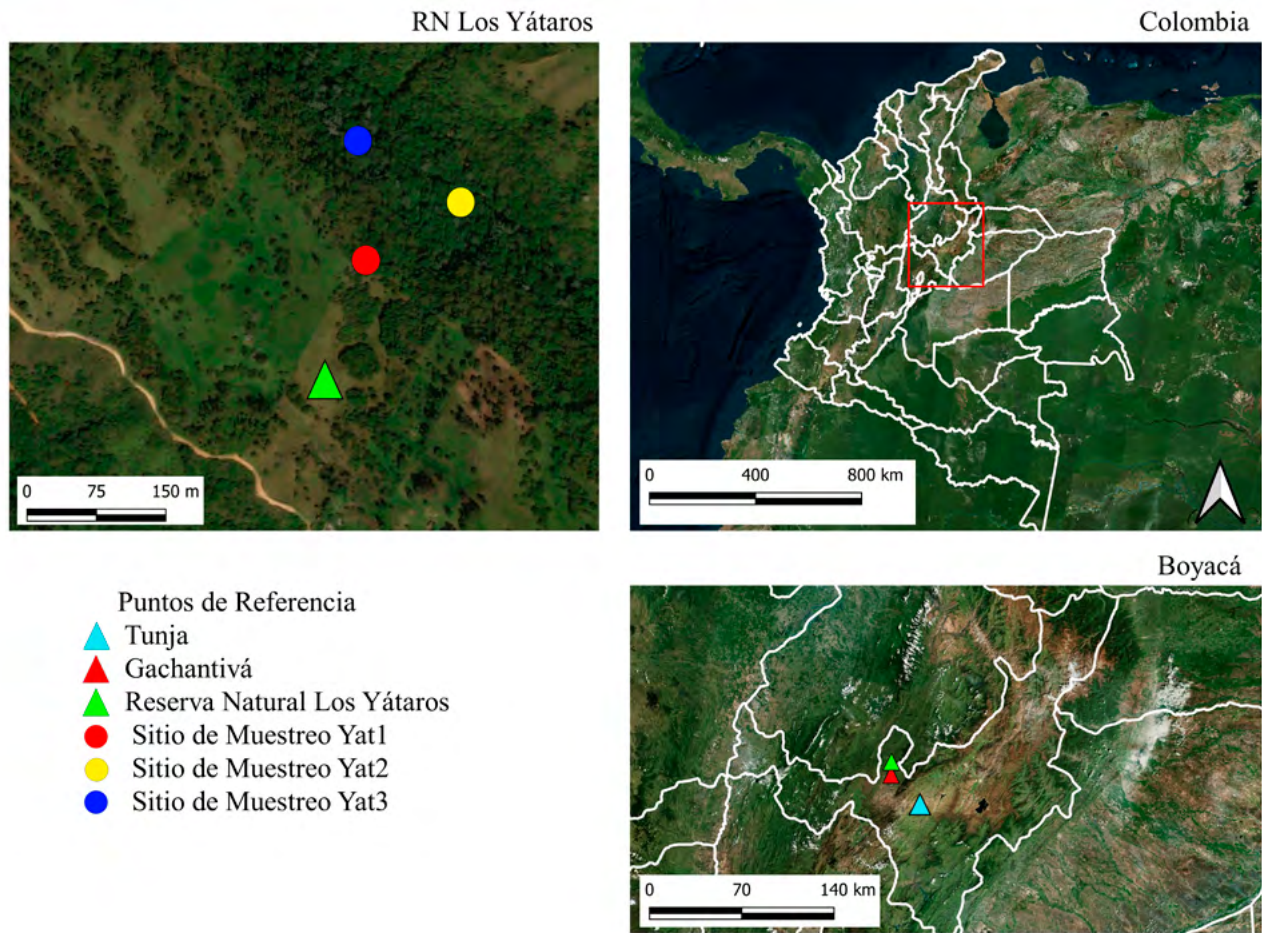


Figura 1. Área de muestreo detallando cada uno de los tres sitios de muestreo en donde se colocaron las grabadoras AudioMoth en la Reserva Natural Los Yátaros, Boyacá, Colombia.

Figure 1. Study area detailing each sampling site where the autonomous AudioMoth recording where placed at the Nature Reserve Los Yátaros, Boyacá, Colombia.

Frecuencia de grabación: Programamos grabar 1 minuto por cada 30 minutos a lo largo de todo el día (00:00-23:30) para espectro audible y 1 minuto por cada 30 minutos en la noche (16:30-06:00) para ultrasonido.

Ajuste de las AudioMoth – espectro audible: Tasa de muestreo: 32 kHz; ganancia: alta; duración de pausa o no grabación: 1760 segundos; duración de grabación: 60 segundos.

Ajuste de las AudioMoth – ultrasonido: Tasa de muestreo: 384 kHz; ganancia: alta; duración pausa o no grabación: 1760 segundos; duración de grabación: 60 segundos.

Altura de las AudioMoth: Las grabadoras programadas en espectro audible fueron instaladas a 1.5 metros de altura en referencia al suelo, mientras que las grabadoras programadas para ultrasonido a 2.5 metros de altura.

Una vez montadas el par de grabadoras por punto de muestreo, registramos metadatos como: coordenadas, elevación (m. s.n.m) y nombre del punto de muestreo.

Las grabaciones en espectro audible están siendo subidas a la plataforma de análisis acústico ARBIMON, para generar representaciones gráficas de la huella acústica por semana por sitio (Deichmann *et al.*, 2017).

Resultados

Reportamos 12 447 registros de audio proveniente de muestreo pasivo con sensores acústicos de la Reserva Natural Los Yátaros en Gachantivá, Boyacá, Colombia (Tabla 1). El conjunto de datos puede ser accedido en el IPT del Instituto Humboldt, el cual se replica en los portales SiB Colombia y GBIF. Para acceder a los datos y al URL único de cada evento de muestreo acústico pasivo se debe descargar el archivo DarwinCore (DwC-A), lo cual genera una carpeta en las descargas con varios archivos *.txt que se vinculan con la columna "id"; de particular interés los archivos "event.txt" y "multimedia.txt" permiten acceder a los datos crudos de cada evento de muestreo y al enlace de acceso al audio. Recomendamos abrirlos con un editor de texto, copiar y pegar en Excel utilizando la herramienta de pegado de texto "Wizard" para definir el separador de columnas. Nuestro fin último es que estos eventos acústicos, con sus datos relacionados, puedan ser dispuestos en una plataforma nacional de acceso y análisis específica para este tipo de información en un futuro cercano.

Descripción del conjunto de datos

URL del recurso. Para acceder a la última versión del conjunto de datos.

IPT. <https://doi.org/10.15472/wt0elp>

Portal SiB Colombia. <https://datos.biodiversidad.co/dataset/8f77f7e5-139f-46ef-a84b-ed9020168dea>

Portal GBIF. <https://www.gbif.org/dataset/8f77f7e5-139f-46ef-a84b-ed9020168dea>

Nombre. Conjunto de datos de monitoreo acústico pasivo en la Reserva Natural Los Yátaros de Gachantivá, Boyacá, Colombia.

Idioma. Español

Codificación de caracteres. UTF-8

URL del archivo. Para acceder a la versión del conjunto de datos descrita en este artículo:

IPT. https://ipt.biodiversidad.co/biota/resource?r=map_yataros_2020

Formato del archivo. Darwin Core Archive

Fecha de publicación de los datos. 2020-05-18

Idioma de los metadatos. Español

Licencia de uso. [Creative Commons Attribution Non Commercial \(CC-BY-NC\) 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

Discusión

Este es un artículo de datos pionero sobre eventos pasivos de muestreo acústico para un sitio en particular. La publicación de otros artículos de datos sobre sonidos del departamento de Boyacá han incluido grabaciones direccionales mantenidas en repositorios particulares (Buitrago-Cardona *et al.*, 2020). Con la inclusión de muestreo pasivo para monitorear los paisajes sonoros se puede evaluar el estado en el que se encuentra un ecosistema haciendo uso de la actividad acústica (Pijanowski *et al.*, 2011; Deichmann *et al.*, 2017).

Tabla 1. Número de grabaciones obtenidas por cada uno de los sitios de muestreo.

Table 1. Number of recordings for each sampling site.

Sitio	Latitud	Longitud	Elevación (m)	Frecuencia Acústica	# de Grabaciones
Yat1	5.78926	-73.55044	2300-2325	0 Hz-24 kHz	3019
	5.78926	-73.55044	2300-2325	0 kHz-192 kHz	996
Yat2	5.78938	-73.54900	2300-2325	0 Hz-24 kHz	3018
	5.78938	-73.54900	2300-2325	0 kHz-192 kHz	968
Yat3	5.79044	-73.54983	2300-2325	0 Hz-24 kHz	3018
	5.79044	-73.54983	2300-2325	0 kHz-192 kHz	1428

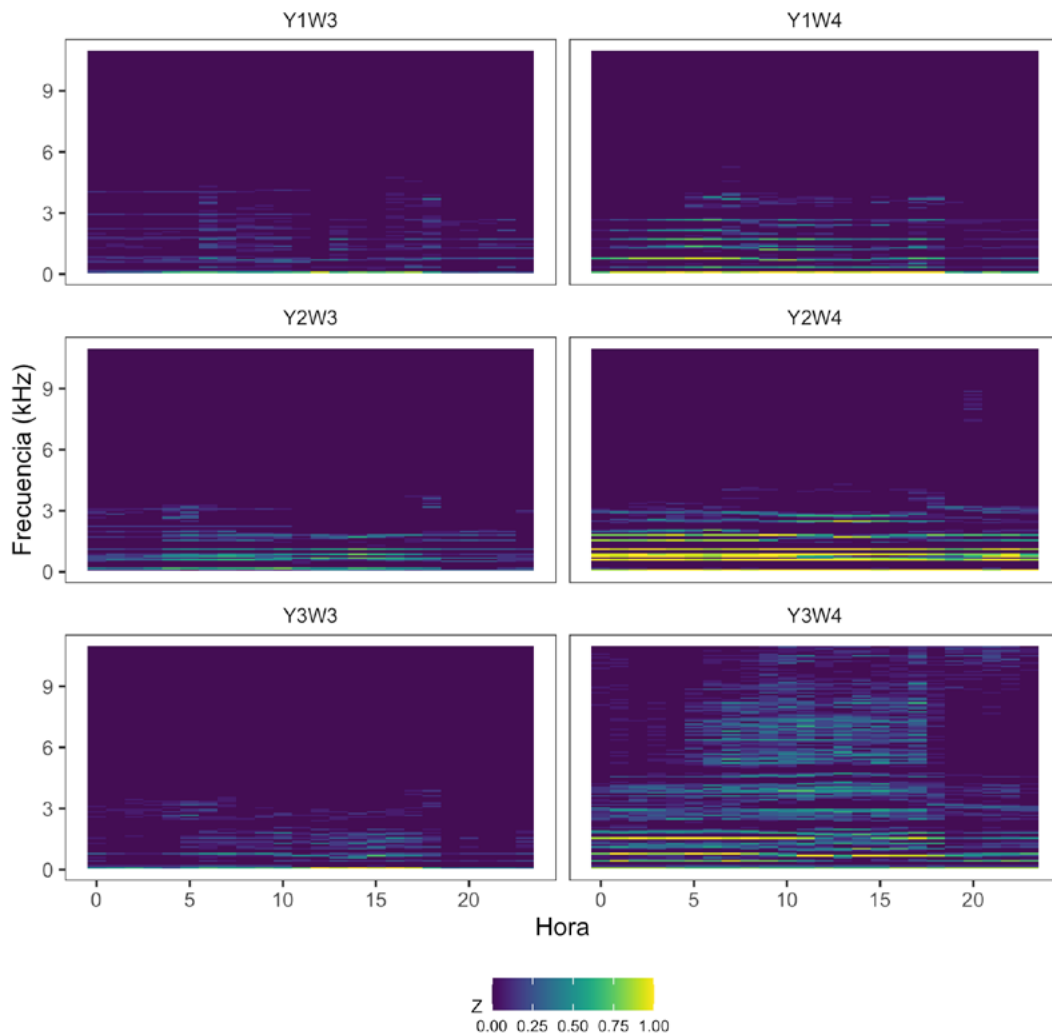


Figura 2. Representación tridimensional del paisaje sonoro para dos semanas (W3, W4) en tres sitios (Y1, Y2, Y3) en la Reserva Natural Los Yátaros, Boyacá, Colombia. Eje horizontal (X) representa la hora del día, eje vertical (Y) representa la frecuencia acústica (en subconjunto de 0-10 kHz) y los colores (Z) representa la proporción de grabaciones con un pico de amplitud mayor a 0.06.

Figure 2. Tridimensional representation of the soundscape in two weeks (W3, W4) for the three sites (Y1, Y2, Y3) at the Los Yátaros Nature Reserve, Boyacá, Colombia. Horizontal axis (X) represents time of the day, vertical axis (Y) acoustic frequency (in 0-10 Hz subsets) and colors (Z) the proportion of recordings with a peak amplitude greater than 0.06.

Aunque monitorear la respuesta de diferentes taxones de animales simultáneamente es aún un reto, con la ayuda de nuevas herramientas emergentes (*e.g.*, ARBIMON II, paquetes en R o Python), la detección e identificación de los individuos vocalmente activos se espera que sea cada vez más fácil (Deichmann *et al.*, 2018; Ducrettet *et al.*, 2020).

En nuestra área de estudio, este conjunto de datos puede ayudar a crear una representación visual de los paisajes sonoros, lo cual puede resaltar las horas del día más activas vocalmente como picos de actividad. Estos picos de actividad en algunos datos bajo actual análisis muestran un coro durante la mañana, en el que la mayoría de las vocalizaciones fueron producidas

por aves, y otro coro en el atardecer, en el que hubo presencia acústica de aves, anfibios e insectos. Los insectos hacen una proporción substancial en el paisaje sonoro, mostrando picos de actividad a lo largo de toda la noche, y solapándose con el coro de amanecer y atardecer. Hasta el momento, tres especies diferentes de anuros han sido identificados en las grabaciones, los cuales servirán para futuros análisis de la actividad acústica de este grupo en la reserva. De igual modo, es evidente la influencia diferencial que ejerce sobre el paisaje sonoro el cambio de lluvias de una semana a otra (Figura 2), lo cual puede influenciar la actividad acústica dentro de la reserva (Ulloa *et al.*, 2019). El actual monitoreo acústico espera ser continuado para abordar preguntas a escala temporal anual dentro del área de estudio.

Agradecimientos.

Estos datos los obtuvimos durante la pasantía de JDTG en el Instituto Humboldt bajo la supervisión de OAC. Agradecemos en particular a Esmeralda y Pablo Forero por permitirnos realizar este proyecto en la Reserva Natural Los Yátaros y por todo el apoyo que brindaron. Fernando Forero y Zuania Colón también apoyaron y fomentaron planteamientos de monitoreo e investigación dentro de la reserva. A los revisores y al equipo editorial que lideró este número especial sobre Ecológica Neotropical.

Referencias

- Aide, T.M., Corrada-Bravo, C., Campos-Cerqueira, M., Milan, C., Vega, G., & Alvarez, R. (2013). Real-time bioacoustics monitoring and automated species identification. *PeerJ*, 1, e103.
<https://doi.org/10.7717/peerj.103>
- Bas, Y., Devictor, V., Moussus, J., & Jiguet, F. (2008). Accounting for weather and time-of-day parameters when analysing count data from monitoring programs. *Biodiversity and Conservation*, 17, 3403-3416.
<https://doi.org/10.1007/s10531-008-9420-6>
- Blumstein, D., Mennill, D., Clemins, P., Girod, L., Yao, K., Patricelli, G., Deppe, J., Krakrauer, A., Clark, C., Cortopassi, K., Hanser, S., McCowan, B., Ali, A., & Kirschel, A. (2011). Acoustic monitoring in terrestrial environments using microphone arrays: applications, technological considerations and prospectus. *Journal of Applied Ecology*, 48(3), 758-767.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2011.01993.x>
- Boquimpani-Freitas, L., Ventura Marra, R., Van Sluys, M., & Duarte Rocha, C. (2007). Temporal niche of acoustic activity in anurans: interspecific and seasonal variation in a neotropical assemblage from south-eastern Brazil. *Amphibia-Reptilia*, 28, 269-276.
<https://doi.org/10.1163/156853807780202422>
- Buitrago-Cardona, A., Colón-Piñeiro, Z., Borja-Acosta, K., Ospina-L., A., Galeano, S. P., & Acevedo-Charry, O. (2020). Dataset on audio records of animals from the northeast Andes of Colombia I: The bird sounds of Boyacá department. *Data in Brief*, 28, 104941.
<https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104941>
- Campos-Cerqueira, M., Mena, J., Tejeda-Gómez, V., Aguilar-Amuchastegui, N., Gutierrez, N., & Aide, T. M. (2020). How does FSC forest certification affect the acoustically active fauna in Madre de Dios, Peru? *Remote Sensing In Ecology and Conservation, Early View*.
<https://doi.org/10.1002/rse2.120>
- Deichmann, J., Hernández-Serna, A., Delgado C., J., Campos-Cerqueira, M., & Aide, T. M. (2017). Soundscape analysis and acoustic monitoring document impacts of natural gas exploration on biodiversity in a tropical forest. *Ecological Indicators*, 74, 39-48.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.11.002>
- Deichmann, J., Acevedo-Charry, O., Barclay, L., Buri-valova, Z., Campos-Cerqueira, M., & d'Horta, F., Game, E., Gottesman, B., Hart, P., Kalan, A., Linke, S., Nascimento, Pijanowski, B., Staaterman, E., Aide, T. M. (2018). It's time to listen: there is much to be learned from the sounds of tropical ecosystems. *Biotropica*, 50(5), 713-718.
<https://doi.org/10.1111/btp.12593>
- Ducretet, M., Forget, P., Ulloa, J., Yguel, B., Gaucher, P., Princé, K., Hauptert, S., & Sueur, J. (2020). Monitoring canopy bird activity in disturbed landscapes with automatic recorders: A case study in the tropics. *Biological Conservation*, 245, 108574.
<https://doi.org/10.1016/j.biocon.2020.108574>
- Farina, A., Pieretti, N., & Malavasi, R. (2014). Patterns and dynamics of (bird) soundscapes: A biosemiotic interpretation. *Semiotica*, 2014(198).
<https://doi.org/10.1515/sem-2013-0109>
- Fitzgerald, G. J. & Bider, J. R. (1974). Influence of moon phase and weather factors on locomotory activity in *Bufo americanus*. *Oikos*, 25, 338-340.
<https://doi.org/10.5194/we-13-1-2013>
- Kronfeld-Schor, N., Bloch, G., & Schwartz, W. (2013). Animal clocks: when science meets nature. *Proceedings of The Royal Society B: Biological Sciences*, 280(1765), 20131354.

- <https://doi.org/10.1098/rspb.2013.1354>
Luther, D., & Gentry, K. (2013). Sources of background noise and their influence on vertebrate acoustic communication. *Behavior*, 150(9-10), 1045-1068.
- <https://doi.org/10.1163/1568539X-00003054>
Laverde-R., O., Caycedo-Rosales, P., Pulgarín-R., P., & Cadena, C. (2017). Bird songs on the shelf: assessing vocal activity and output using data hidden in sound archives. *Preprint*
- <https://doi.org/10.1101/202978>
Medina, I., & Francis, C. (2012). Environmental variability and acoustic signals: a multi-level approach in songbirds. *Biology Letters*, 8(6), 928-931.
- <https://doi.org/10.1098/rsbl.2012.0522>
Onorati, M., & Vignoli, L. (2017). The darker the night, the brighter the stars: consequences of nocturnal brightness on amphibian reproduction. *Biological Journal of The Linnean Society*, 120(4), 961-976.
- <https://doi.org/10.1093/biolinnean/blw007>
Parker III, T. A. (1991). On the use of tape recorders in avifaunal surveys. *The Auk*, 108(2), 443-444.
- <https://doi.org/10.1093/auk/108.2.443>
Pijanowski, B., Villanueva-Rivera, L., Dumyahn, S., Farina, A., Krause, B., Napoletano, B., Gage, S., & Pieretti, N. (2011). Soundscape Ecology: The Science of Sound in the Landscape. *Bioscience*, 61, 203-216.
- <https://doi.org/10.1525/bio.2011.61.3.6>
Rodríguez-Buriticá, S. Savage, D., Caycedo, P., Acevedo-Charry, O., Isaza, C., Daza, JM., Almeira, J., Ulloa, J. S., M. Villamizar, N., Ruiz, J. F., Lopera, A., Oliver, B., Laverde, O., Pijanowski, B., & Red Ecoacústica Colombiana. (2019). *Paisajes Sonoros de Colombia: La otra dimensión de la biodiversidad*. Ficha 103 en: Estado y Tendencias de la biodiversidad continental de Colombia 2018. Bogotá D. C: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt Disponible en <https://reporte.humboldt.org.co/biodiversidad/2018/cap1/103/>
- Schmidt, A., & Balakrishnan, R. (2014). Ecology of acoustic signaling and the problem of masking interference in insects. *Journal of Comparative Physiology A*, 201(1), 133-142.
- <https://doi.org/10.1007/s00359-014-0955-6>
Stewart, M. (1995). Climate driven population fluctuations in rain forest frogs. *Journal of Herpetology*, 29(3), 437.
- <https://doi.org/10.2307/1564995>
Sueur, J., & Farina, A. (2015). Ecoacoustics: The ecological investigation and interpretation of environmental sound. *Biosemiotics*, 8(3), 493-502.
- <https://doi.org/10.1007/s12304-015-9248-x>
Ulloa, J., Aubin, T., Llusia, D., Courtois, É., Fouquet, A., Gaucher, P., Pavoine, S., & Sueur, J. (2019). Explosive breeding in tropical anurans: environmental triggers, community composition and acoustic structure. *BMC Ecology*, 19, 28.
- <https://doi.org/10.1186/s12898-019-0243-y>
Vignoli, L., & Luiselli, L. (2013). Better in the dark: two Mediterranean amphibians synchronize reproduction with moonlit nights. *Web Ecology*, 13, 1-11.

Juan Diego Tovar García

Pontificia Universidad Javeriana

Bogotá, Colombia

juandiegotovargarcia@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-0721-033X>

Orlando Acevedo-Charry

Instituto de Investigación de Recursos Biológicos

Alexander von Humboldt

Bogotá, Colombia

oacevedo@humboldt.org.co

<https://orcid.org/0000-0003-4964-8994>

Conjunto de datos de monitoreo acústico pasivo en la Reserva Natural Los Yátaros, Gachantivá, Boyacá, Colombia

Citación del artículo: Tovar-García, J.D. & Acevedo-Charry, O. (2021). Conjunto de datos de monitoreo acústico pasivo en la Reserva Natural Los Yátaros, Gachantivá, Boyacá, Colombia. *Biota Colombiana*, 22(1), 200-208.

<https://doi.org/10.21068/c2021.v22n01a13>

Recibido: 30 de mayo 2020

Aceptado: 9 de noviembre 2020

Guía para autores

El envío de un manuscrito implica la declaración explícita por parte del autor o los autores de que este no ha sido previamente publicado, ni aceptado para su publicación en otra revista u otro órgano de difusión científica. Todas las contribuciones son de la entera responsabilidad de sus autores y no del Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, ni de la revista o sus editores.

Los trabajos pueden estar escritos en español, inglés o portugués, aunque preferimos que los autores escriban en inglés, para acelerar el proceso de publicación y tener mayor visibilidad e impacto. Los manuscritos no deben exceder de 25 páginas (párrafo espaciado a 1,5 líneas), incluyendo tablas, figuras y anexos.

De particular interés para la revista son las descripciones de especies nuevas para la ciencia, nuevos registros geográficos, listados de especies temáticos o regionales, inventarios, bases de datos relacionados con biodiversidad, colecciones biológicas y reportes de muestreo. Se reciben manuscritos que sean artículos científicos de investigación, así como notas de actualidad, reseñas, novedades bibliográficas y artículos de datos.

Un Artículo de Datos o *Data Paper* es un tipo de publicación académica que surgió como un mecanismo para incentivar la publicación de datos sobre biodiversidad. Como su nombre lo sugiere, este tipo de artículos se basan en la descripción de un conjunto de datos primarios, y aunque no es una investigación científica *sensu stricto*, se espera que contengan información acerca de la historia del conjunto de datos (propósito del mismo, metodología sobre la toma de los datos, financiadores, coberturas taxonómicas y geográficas, etc.) y sobre su valor y utilidad (básica o aplicada) para la comunidad científica. Lo novedoso y venta-

joso de este modelo de publicación es que el manuscrito siempre está vinculado al conjunto de datos, a través de un enlace a un repositorio web persistente y confiable, el IPT (*Integrated Publishing Toolkit*). Adicionalmente los metadatos que describen ese conjunto de datos y que están documentados en la misma herramienta, deben citar el artículo de datos.

Se recomienda someter un artículo de datos cuando los datos a los que hace referencia son primarios, originales y están restringidos temporal y metodológicamente, se encuentran disponibles en agregadores de datos como el SiB Colombia y GBIF, y pueden ser estructurados con el estándar Darwin Core (DwC).

Todos los manuscritos deben estar correctamente escritos y el estilo utilizado debe ser claro y conciso. Aquellos que tengan deficiencias en su redacción, puntuación o gramática serán devueltos sin pasar a evaluación. Por favor asesórese de un experto en redacción en el idioma correspondiente, antes de someter su manuscrito a Biota Colombiana.

Una vez sometidos, los manuscritos serán revisados mínimo por dos pares científicos, cuya respuesta final de evaluación puede ser: a) publicado sin ningún cambio, b) aceptación condicional y c) rechazo. Para proseguir con el proceso editorial para publicación, el manuscrito debe haber sido aceptado por el mínimo de dos pares científicos.

Los trabajos deben ser sometidos a través del portal en línea de la revista (<http://revistas.humboldt.org.co/index.php/biota>). En ese enlace también podrán consultar directrices más detalladas sobre el envío, evaluación y preparación de su manuscrito, así como especificaciones de formato y particularidades de los artículos de datos.

Guidelines for authors

Submitting a manuscript implies the explicit statement by the author(s) that the paper has not been published before, nor accepted for publication in another journal or other means of scientific diffusion. Contributions are the entire responsibility of the author(s) and not of the Research Institute of Biological Resources Alexander von Humboldt, or the journal or their editors.

Papers can be written in Spanish, English or Portuguese, but we prefer contributions in English in order to have shorter publication times and greater visibility and impact. Manuscripts should not exceed 25 pages (with paragraph lines spaced at 1.5) including tables, figures and supplementary material.

Of particular interest for this journal are descriptions of species new to science, new geographic records, thematic or regional species lists, inventories, databases related to biodiversity, biological collections and sampling reports. Biota Colombiana receives scientific research articles, as well as notes, reviews, bibliographic novelties and data papers.

A Data Paper is a type of scientific publication that was designed to stimulate the publication of biodiversity data. As its name suggests, a Data Paper describes a primary data set. Although a Data Paper is not, strictly speaking, a scientific research, it must contain relevant information about the data set (objectives, methods for data collection, funding, taxonomic and geographic coverage, etc.), along with its value and utility (basic or applied) for the scientific community. The great

advantage and novelty of this type of manuscript is that it is linked to the data set through a stable and trustworthy repository, the IPT (Integrated Publishing Toolkit). Also, the data set is supported by metadata also available through the IPT and linked to the Data Paper.

A Data Paper must be submitted only when the linked data are primary and original data that have a temporal and methodological restriction and are available in data aggregators such as SiB Colombia and GBIF. Data must follow the Darwin Core (DwC) standard.

All manuscripts must be written correctly with a clear and concise style. Those with poor writing, punctuation or grammar will be returned to authors. Please seek assistance in writing and ask for help from a native speaker of the language you use in your paper.

Manuscripts will be reviewed by at least two scientific peers. Results of peer review may include any of the following: a) accepted, b) conditional acceptance, and c) rejected. For a manuscript to continue its editorial process, it must have been accepted by at least two reviewers.

Manuscripts must be submitted through the online platform of the journal (<http://revistas.humboldt.org.co/index.php/biota>). In this link you may also consult more details about the submission, evaluation, and preparation of your manuscript, as well as format specifications and particularities of data papers.

Una publicación del / A publication of:

Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt

En asocio con / In collaboration with:

Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia

Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras - Invemar

Missouri Botanical Garden

Pág. 2 **Editorial**

Presentación

Pág. 2 **Tooting the Latin American horn: advances in the scholarship of ecoacoustics and soundscape ecology is occurring with vigor**

Bryan C. Pijanowski, Susana Rodríguez-Buriticá, Juan Sebastian Ulloa

Artículos

Pág. 7 **Estado, desarrollo y tendencias de los estudios en acústica de la fauna en Colombia**

Daniela Martínez-Medina, Orlando Acevedo-Charry, Sofía Medellín-Becerra, Juliana Rodríguez-Fuentes, Silvia López-Casas, Sebastián Muñoz-Duque, Mauricio Rivera-Correa, Yelenny López-Aguirre, Fernando Vargas-Salinas, Oscar Laverde-R., Miguel E. Rodríguez-Posada

Pág. 26 **Relationship between acoustic indices, length of recordings and processing time: a methodological test**

Edgar Cifuentes, Juliana Vélez Gómez, Simon J. Butler

Pág. 36 **Estándares para registrar señales de ecolocalización y construir bibliotecas de referencia de murciélagos en Colombia**

Daniela Martínez-Medina, Jefferson Sánchez, Danny Zurc, Francisco Sánchez, Aída Otálora- Ardila, Carlos Restrepo-Giraldo, Orlando Acevedo-Charry, Fabián Hernández Leal, Diego J. Lizcano

Pág. 57 **Vegetation, bird and soundscape characterization: a case study in Braulio Carrillo National Park, Costa Rica**

Mónica Isabel Retamosa Izaguirre, David Segura Sequeira, Jimmy Barrantes-Madrigal, Manuel Spínola Parallada, Óscar Ramírez-Alán

Pág. 74 **Diferencias en paisajes sonoros de sistemas silvopastoriles y potreros tradicionales del piedemonte llanero, Meta, Colombia**

Andrea Morales Roza, Diego J. Lizcano, Sergio Montoya Arango, Álvaro Velásquez Suarez, Evelyn Álvarez Daza, Orlando Acevedo-Charry

Pág. 96 **Biophony in a noisy tropical urban forest fragment**

Sara Gonçalves Santos, Nadia Pieretti, Robert John Young, Marina Duarte

Pág. 108 **Bioacoustic characterization of mating calls of a freshwater fish (*Prochilodus magdalenae*) for passive acoustic monitoring**

Sebastián Muñoz-Duque, Silvia López -Casas, Héctor Rivera -Gutiérrez, Luz Jiménez-Segura

Pág. 122 **Advertisement call of a population of the nurse frog *Leucostethus fraterdanieli* (Anura: Dendrobatidae), with notes on its natural history**

Julián A. Rojas-Morales, Enrique La Marca, Héctor E. Ramírez-Chaves

Pág. 133 **Vocalizaciones asociadas al comportamiento colonial de *Cacicus chrysonotus leucoramphus* (Icteridae) en Colombia**

David Alejandro Guaitarilla, Juan Pablo Ortiz-Pérez, Jhon Jairo Calderón-Leytón, Miguel A. Gómez-Martínez, Carlos Mauricio Trujillo-Torres, Ronald A. Fernández-Gómez

Pág. 149 **Detección automatizada de cantos de aves continúa siendo un desafío: el caso de warbleR y *Megascops centralis* (búho del Chocó)**

Laura Andrea Hoyos Cardona, Juan Sebastián Ulloa, Juan Luis Parra Vergara

Pág. 164 **Murciélagos insectívoros aéreos en un paisaje ganadero del piedemonte llanero colombiano**

Orlando Fabián Hernández Leal, Francisco Sánchez, Diego J. Lizcano

Pág. 184 **Descripción de las unidades fonéticas y sintaxis fonológica del repertorio vocal del tití cabeciblanco (*Saguinus oedipus*) silvestre**

Milena Paulo-Morelo, Pedro Sánchez-Palomino

Artículo de datos

Pág. 200 **Conjunto de datos de monitoreo acústico pasivo en la Reserva Natural Los Yátaros, Gachantivá, Boyacá, Colombia**

Juan Diego Tovar García, Orlando Acevedo-Charry