

CONSERVATION

# Análisis espacial y conectividad estructural en paisajes con palma de cera (*Ceroxylon quindiuense*) y su relación con aves, mariposas y mamíferos en el departamento del Tolima, Colombia

Spatial analysis and structural connectivity in the landscape with wax palm (*Ceroxylon quindiuense*) and its relationship with birds, butterflies, and mammals in Tolima, Colombia

Laura Daniela Rojas-Sandino <sup>1\*</sup>, Héctor Cruz-Cuellar <sup>2</sup>, Sergio Losada-Prado <sup>3</sup>

- Recibido: 16/Jun/2022
- Aceptado: 18/Jul/2023
- Publicación en línea: 15/Oct/2023

**Citación:** Rojas-Sandino LD, Cruz-Cuellar H, Losada-Prado S. 2023. Análisis espacial y conectividad estructural en paisajes con palma de cera (*Ceroxylon quindiuense*) y su relación con aves, mariposas y mamíferos en el departamento del Tolima, Colombia. *Caldasia* 45(3):518-531. doi: <https://doi.org/10.15446/caldasia.v45n3.102536>

## RESUMEN

Los bosques con palma de cera (*Ceroxylon quindiuense* H.Wendl. ex H.Karst) son ecosistemas constantemente amenazados por procesos agrícolas y ganaderos. Las investigaciones en torno a estos paisajes se han limitado al conocimiento de la fauna y flora asociada. No obstante, en términos de conectividad del paisaje desde un enfoque estructural no existe registro alguno. Este último es un aspecto clave en la persistencia y distribución de comunidades biológicas, como también en el manejo y gestión de la conservación y protección de recursos naturales. Por esta razón, este trabajo desarrolla por primera vez la caracterización de la conectividad estructural de paisajes con palma de cera y la relación de este con las comunidades de aves, lepidópteros diurnos y mamíferos en Ibagué, Cajamarca y Roncesvalles (Tolima, Colombia). A partir del procesamiento y análisis de imágenes satelitales se identificó paisajes altamente intervenidos. Y a través de análisis a nivel de parche, clase y paisaje, se realizaron correlaciones con cada componente de la fauna. Las áreas boscosas en Ibagué y Cajamarca presentaron buena conectividad, relevante para especies de interior y borde, en comparación con Roncesvalles, el cual presentó baja conectividad para este tipo de coberturas. Por otro lado, la relación paisaje-fauna evidenció que el aislamiento es determinante en la riqueza de aves, el área núcleo para mariposas, y el tamaño de los fragmentos y su aislamiento para mamíferos. Lo anterior refleja la importancia de este hábitat para la permanencia, mantenimiento y sustento de especies.

**Palabras clave:** conectividad, estructura del paisaje, palma de cera.

<sup>1</sup> Grupo de Investigación en Zoología (GIZ), Universidad del Tolima. Ibagué, Colombia. [ldrojas@ut.edu.co](mailto:ldrojas@ut.edu.co)

<sup>2</sup> Msc. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Programa de Ingeniería Ambiental, Universidad de Cundinamarca - seccional Girardot

<sup>3</sup> Facultad de Ciencias Básicas, Departamento de Biología, Grupo de Investigación en Zoología (GIZ), Universidad del Tolima. Ibagué, Colombia. [slosada@ut.edu.co](mailto:slosada@ut.edu.co)

\* Autor para correspondencia.



## ABSTRACT

Wax palm (*Ceroxylon quindiuense* H.Wendl. ex H.Karst) forests are constantly threatened ecosystems by agricultural and cattle systems. Research regarding these ecosystems are restricted to their fauna and flora. However, there is no information about the structural aspects of landscape connectivity. This is a key element not only of their sustainability and distribution but also their management and protection. For this reason, this study aims to define the structural connectivity of wax palm landscapes and how they relate to birds, diurnal Lepidoptera, and mammal communities in Ibagué, Cajamarca, and Roncesvalles (Tolima, Colombia). Highly intervened landscapes were identified based on satellite images. Through analyses at the patch, class, and landscape level, correlations were made with each fauna component. In Ibagué and Cajamarca, this landscape has wooded areas with good connectivity, important to interior and periphery species, while Roncesvalles has poor connectivity for this land cover. The correlation between landscapes and fauna showed that isolation is linked to birds' richness, the core area is linked to butterflies', and the size of fragments and their isolation is linked to mammals'. This highlights the importance of this habitat to the conservation and sustainability of these species.

**Keywords:** connectivity, landscape structure, wax palm.

## INTRODUCCIÓN

La función y estructura de los paisajes naturales sufre constantemente transformaciones por factores antropogénicos y naturales (Forman 1995, Bennett 1998, Didham *et al.* 2007, Haddad *et al.* 2015). Esas transformaciones físicas, como tamaño, forma y disposición de los elementos naturales, pueden desencadenar patrones de dispersión de especies, alteración y cambio en procesos biológicos y ambientales (Kattan 2002, Crooks y Sanjayan 2006). Ejemplo de esto son los bosques de niebla ubicados en los Andes Colombianos, los cuales se han visto fuertemente impactados por procesos agrícolas y ganaderos no sostenibles (Armenteras *et al.* 2007).

Estas alteraciones a los bosques de niebla han llevado a la reducción, fragmentación y pérdida de hábitat de especies emblemáticas como la palma de cera (*Ceroxylon quindiuense*) (Galeano *et al.* 2015). Si bien existe un gran número de trabajos investigativos en torno a esta especie de palma y a su fauna y flora asociada, como los desarrollados en el departamento del Tolima (Colombia) (Reinoso-Flórez *et al.* 2017, Losada-Prado *et al.* 2019), la línea base del conocimiento sobre la ecología del paisaje de este hábitat carece de información en términos de estructura y función del paisaje. Así mismo, se desconoce cómo esta influye en la riqueza de especies asociadas. Aspectos clave desde una dimensión ecológica-espacial, para la valoración, análisis

y planificación territorial (Lindenmayer *et al.* 2008) de estos ecosistemas estratégicos en Colombia.

Un punto de partida para comprender los patrones del paisaje y de las especies asociadas es el análisis de la composición y configuración estructural. Esto ha demostrado ser una herramienta ágil que permite, no solo comparar hábitats, sino también identificar la calidad de los elementos paisajísticos (McGarigal *et al.* 2012). Igualmente facilita comprender patrones relacionados con la diversidad de especies y los efectos que se derivan sobre estas, los cuales se manifiestan en diferentes escalas espaciales y son dependientes de las especies (Tischendorf y Fahrig 2000, Goodwin y Fahrig 2002, Lindborg y Eriksson 2004).

Es por esto que este estudio se centra en caracterizar el grado de conectividad estructural en los paisajes con palma de cera en algunos municipios del Tolima (Colombia) y cómo la estructura de estos paisajes influye o se relaciona con la riqueza de comunidades de aves, lepidópteros diurnos y mamíferos presentes en este tipo de hábitat.

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Área de estudio.** Corresponde a seis paisajes denominados La Leona y Las Cruces ubicados en la vereda Alto Toche del municipio de Ibagué; Pajarito y La Reforma en la vereda La Ceja al Noroccidente del municipio de Cajamarca;

Buenos Aires en Anaimé al Suroccidente de Cajamarca y Balsorita en Cucuanita en el municipio de Roncesvalles, los cuales están entre los 2000 y 3000 m de altitud (Fig. 1).

**Procesamiento de imágenes satelitales y clasificación de coberturas del suelo.** Se utilizaron dos imágenes Sentinel-2A con resolución espacial de 10 m y resolución espectral de trece bandas. Estas se obtuvieron del portal web Earth Explorer del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS: <https://earthexplorer.usgs.gov/>). A las imágenes se les realizó corrección atmosférica empleando el plugin de clasificación semiautomática (SCP) asociado al software QGIS 3.14.15 (QGIS Development Team [c2020](#)). Cada escena fue tratada para llevar a cabo la clasificación supervisada, en la cual se adjudicó cada uno de los píxeles de las escenas a clases de coberturas del suelo nivel III de acuerdo con la metodología Corine Land Cover (CLC) adaptada para Colombia a escala 1:100 000. Para esto se utilizó algoritmos de clasificación por máxima probabilidad empleando el software ArcGIS 10.7.1 (ESRI [c2019](#)). Con las imágenes ya clasificadas, se procedió al recorte de cada una de las escenas empleando como máscara de recorte ventanas de 1500 ha para cada una de las localidades de estudio. Teniendo en cuenta la Unidad Mínima Cartografiada (AMC), se aplicó corrección del efecto sal y pimienta (Marquina y Mogollón [2018](#)). Finalmente, se evaluó el grado de exactitud o concordancia entre las clases asignadas y los datos de realidad del terreno empleando el índice kappa mediante el software ArcGIS 10.7.1 (ESRI [c2019](#)).

**Análisis del patrón del paisaje y recopilación de datos biológicos.** Se llevó a cabo el análisis del patrón del paisaje y su conectividad estructural en términos de composición y configuración a nivel de parche, clase y paisaje. Con el software FRAGSTATS® (McGarigal *et al.* [c2012](#)) se empleó los índices de área, borde, agregación y diversidad. Para los índices de área núcleo se empleó una profundidad de borde de 100 m. Esta distancia se determinó de acuerdo a estudios sobre efectos de borde en bosques tropicales (Murcia [1995](#)), los cuales resaltan cambios ecológicos entre los 10 m a 300 m (Lindenmayer y Fischer [2006](#)). Aquellos efectos relacionados con la vegetación leñosa se han detectado hasta 100 m de los márgenes de los fragmentos (Williams-Linera [1990](#), Laurance [1991](#), Williams-Linera [1993](#), Laurance [2000](#), Laurance *et al.* [2011](#)). En lo que respecta al grado de aislamiento y fragmentación, como también a la proporción de uniones funcionales, se

estableció un radio de búsqueda y una distancia umbral de conectividad de 2100 m. Estas se determinaron considerando el área de las ventanas de trabajo, correspondiente a 1500 ha. Con respecto a las listas de especies, se empleó información proveniente de Rojas-Sandino ([2021](#)).

#### Análisis de datos.

Para determinar cuáles fueron las variables con mayor relación a nivel de clase (coberturas) y paisaje, se llevó a cabo un Análisis de Componentes Principales (ACP) y de correlación de Pearson. Se empleó la prueba de Kruskal-Wallis con el fin de evaluar diferencias entre las métricas por cada ventana. Así mismo, las asociaciones entre las métricas del paisaje y la riqueza de especies, se analizaron con el Coeficiente de Correlación de Spearman, y análisis de Regresión Lineal Múltiple. Finalmente, se empleó un ACP para establecer cuál era la relación entre dichas variables. Todos los análisis se realizaron con los softwares InfoStat versión 2020 (Di Rienzo *et al.* [c2020](#)) y R Studio Versión 1.2.5042 (RStudio Team [c2015](#)).

## RESULTADOS

#### Composición del paisaje.

En total se evaluaron hasta 1527 ha por cada localidad, las cuales presentaron una alta heterogeneidad de coberturas (Tabla 1. Composición de paisajes de bosques con palma de cera en el departamento del Tolima.). Se destaca en la localidad Balsorita una alta dominancia de Mosaico de Pastos y Cultivos (MPC), el cual ocupa hasta el 83 % del paisaje (Tabla 1. Composición de paisajes de bosques con palma de cera en el departamento del Tolima.). Las localidades en Ibagué y Cajamarca reflejan una mejor distribución de fragmentos por coberturas (Tabla 1. Composición de paisajes de bosques con palma de cera en el departamento del Tolima.). En estos dos últimos municipios, las localidades Las Cruces, Reforma y Pajarito presentan Bosques Densos (BD) y áreas núcleo con una gran extensión y proporción del área total del paisaje (Tabla 1. Composición de paisajes de bosques con palma de cera en el departamento del Tolima.). Así mismo, se logró identificar dentro de la estructura especial de estos paisajes una matriz compuesta por Pastos Limpios (PL), Vías (V), Ríos (R), Tierras Desnudas (TD), Tejido Urbano Discontinuo (TUD) y Vegetación Secundaria (VS). Dentro de esta estructura solo se destacó diferencias significativas con respecto a la extensión superficial para las coberturas PL ( $P= 0,003$ ), TD ( $P= 0,03$ ) y VS ( $P= <0,0001$ ). Lo anterior evidencia un

Tabla 1. Composición de paisajes de bosques con palma de cera en el departamento del Tolima.

LOC./ÍNDICES	COBERTURAS								ÁREA NÚCLEO			ÍNDICES DIVERSIDAD		
	BD	VS	PL	R	V	TD	MPC	TUD	ANT	NAN	%	RC*	SHDI*	SIDI*
<b>Leona</b>														
Área (Ha)	441,66	140,04	926,12	8,59	6,35	4,68	-	-						
% Cobertura	28,92	9,17	60,63	0,56	0,42	0,31	-	-	29,9	23	2,0	6	0,95	0,54
LPI (%)	13,00	0,72	15,08	0,32	0,42	0,13	-	-						
NP	48	101	47	5	1	4	-	-						
<b>Cruces</b>														
Área (Ha)	491,88	277,52	709,19	9,68	5,88	33,25	-	-						
% Cobertura	32,20	18,17	46,43	0,63	0,38	2,18	-	-	94,2	24	6,2	6	1,17	0,65
LPI (%)	18,19	4,33	15,33	0,32	0,38	0,67	-	-						
NP	48	95	69	11	1	33	-	-						
<b>Pajarito</b>														
Área (Ha)	451,89	160,94	883,34	7,83	-	23,45	-	-						
% Cobertura	29,58	10,54	57,83	0,51	-	1,54	-	-	63,0	27	4,1	5	1,01	0,57
LPI (%)	21,57	0,85	41,03	0,47	-	1,46	-	-						
NP	37	74	35	4		2	-	-						
<b>Reforma</b>														
Área (Ha)	886,07	150,95	417,19	12,96	-	60,24	-	-						
% Cobertura	58,01	9,88	27,31	0,85	-	3,94	-	-	250,2	39	16,4	5	1,07	0,58
LPI (%)	46,85	1,03	5,98	0,52	-	0,98	-	-						
NP	19	76	52	19	-	16	-	-						
<b>Buenos Aires.</b>														
Área (Ha)	214,84	340,61	-	10,30	18,54	11,04	929,70	2,50						
% Cobertura	14,06	22,30	-	0,67	1,21	0,72	60,86	0,16	25,7	23	1,7	7	1,05	0,56
LPI (%)	9,55	6,03	-	0,20	1,03	0,19	23,75	0,08						
NP	33	147	-	21	5	12	92	3						
<b>Balsorita</b>														
Área (Ha)	131,69	84,45	-	2,10	11,77	4,99	1259,62	24,99						
% Cobertura	8,67	5,56	-	0,14	0,77	0,33	82,89	1,64	11,8	4	0,8	7	0,66	0,30
LPI (%)	0,64	4,18	-	0,10	1,15	0,12	59,14	0,41						
NP	33	58	-	2	4	6	25	15						

\*LOC= Localidades, ANT= Área núcleo total, NAN= Número de áreas núcleo, RC= Riqueza de clases, SHDI= Índice de Shannon, SIDI= Índice de Simpson, LPI= Índice del parche más grande, NP= Número de parches.

Tabla 2. Configuración y conectividad estructural de paisajes con bosques con palma de cera en el departamento del Tolima.

LOC./ÍNDICES		COBERTURAS									
		BD	VS	PL	R	V	TD	MPC	TUD		
Leona											
RG (m)*	88,91	54,08	134,11	476,37	1449,12	45,98	-	-	-	-	
FORMA	2,03	1,99	1,93	16,32	26,29	1,53	-	-	-	-	
DFRAC*	1,11	1,14	1,11	1,56	1,59	1,09	-	-	-	-	
CIRCULO	0,56	0,64	0,57	0,99	1,00	0,55	-	-	-	-	
CONTIGÜIDAD	0,78	0,81	0,75	0,32	0,52	0,92	-	-	-	-	
Ily (%)*	70,95	59,57	77,30	52,74	28,08	38,88	-	-	-	-	
AGREGACIÓN (%)	96,65	93,54	98,43	37,56	59,17	96,10	-	-	-	-	
DIVISIÓN	37,83	4586,11	19,58	69150,52	57941,20	360977,84	-	-	-	-	
CONEXIÓN (%)	54,79	50,93	55,04	80,00	0,00	50,00	-	-	-	-	
EVC*	36,10	68,02	26,53	9,79	N/A*	1790,94	-	-	-	-	
PROXIMIDAD	5729,03	121,69	11676,46	328,80	0,00	0,01	-	-	-	-	
<b>Cruces</b>	<b>BD</b>	<b>VS</b>	<b>PL</b>	<b>R</b>	<b>V</b>	<b>TD</b>	<b>MPC</b>	<b>TUD</b>			
RG (m)	86,22	66,00	78,81	301,67	1456,98	30,24	-	-	-	-	
FORMA	2,03	2,15	1,81	11,80	26,01	1,40	-	-	-	-	
DFRAC	1,11	1,14	1,11	1,54	1,59	1,08	-	-	-	-	
CIRCULO	0,53	0,62	0,54	0,98	1,00	0,52	-	-	-	-	
CONTIGÜIDAD	0,68	0,77	0,66	0,31	0,52	0,65	-	-	-	-	
Ily (%)	73,89	66,36	84,98	68,83	43,60	72,08	-	-	-	-	
AGREGACIÓN (%)	97,47	95,00	97,89	36,83	57,78	96,16	-	-	-	-	
DIVISIÓN	25,20	389,83	23,73	77836,07	67513,13	15561,40	-	-	-	-	
CONEXIÓN (%)	66,13	55,77	65,35	58,18	0,00	63,07	-	-	-	-	
EVC	31,19	47,10	36,21	157,82	N/A	173,85	-	-	-	-	
PROXIMIDAD	4193,16	717,50	9649,76	268,13	0,00	387,53	-	-	-	-	
<b>Reforma</b>	<b>BD</b>	<b>VS</b>	<b>PL</b>	<b>R</b>	<b>V</b>	<b>TD</b>	<b>MPC</b>	<b>TUD</b>			
RG (m)	144,62	64,06	96,18	187,90	-	71,08	-	-	-	-	
FORMA	2,61	2,11	1,87	9,11	-	1,72	-	-	-	-	
DFRAC	1,12	1,14	1,11	1,48	-	1,10	-	-	-	-	
CIRCULO	0,51	0,64	0,58	0,97	-	0,55	-	-	-	-	
CONTIGÜIDAD	0,68	0,83	0,85	0,31	-	0,91	-	-	-	-	
Ily (%)	89,57	64,85	85,44	62,52	-	74,41	-	-	-	-	
AGREGACIÓN (%)	98,19	94,19	97,63	37,70	-	97,13	-	-	-	-	
DIVISIÓN	4,46	2991,73	135,36	35827,67	-	4238,33	-	-	-	-	
CONEXIÓN (%)	70,76	54,35	49,10	75,44	-	55,83	-	-	-	-	
EVC	41,91	80,80	52,72	199,12	-	363,15	-	-	-	-	

(Continúa)

LOC./ÍNDICES		COBERTURAS										
		BD	VS	85,09	690,80	0,73	R	V	148,33	TD	MPC	TUD
PROXIMIDAD	Pajarito	28318,21	85,09	690,80	0,73	-	-	-	148,33	-	-	-
	RG (m)	103,29	71,90	125,30	421,35	-	-	-	128,08	-	-	-
	FORMA	2,09	2,25	1,89	15,05	-	-	-	2,43	-	-	-
	DFRAC	1,12	1,15	1,11	1,52	-	-	-	1,16	-	-	-
	CIRCULO	0,61	0,67	0,60	0,96	-	-	-	0,64	-	-	-
	CONTIGÜIDAD	0,84	0,84	0,85	0,28	-	-	-	0,94	-	-	-
	IY (%)	79,81	64,25	77,29	74,35	-	-	-	68,73	-	-	-
	AGREGACIÓN (%)	97,21	94,01	98,75	37,63	-	-	-	98,09	-	-	-
	DIVISIÓN	21,09	3044,77	5,78	45293,89	-	-	-	4684,52	-	-	-
	CONEXIÓN (%)	59,46	60,05	58,15	66,67	-	-	-	0,00	-	-	-
	EVC	65,67	72,65	46,18	830,49	-	-	-	3952,26	-	-	-
	PROXIMIDAD	5679,31	145,82	9676,57	0,05	-	-	-	0,00	-	-	-
	<b>Buenos Aires</b>	<b>BD</b>	<b>VS</b>	<b>PL</b>	<b>R</b>	<b>V</b>	<b>TD</b>	<b>MPC</b>	<b>TUD</b>			
	RG (m)	70,10	51,61	-	183,79	358,37	37,52	67,18	43,29			
	FORMA	1,84	2,03	-	8,30	15,10	1,52	1,72	1,63			
	DFRAC	1,11	1,14	-	1,47	1,51	1,09	1,10	1,11			
	CIRCULO	0,57	0,62	-	0,96	0,98	0,51	0,54	0,61			
	CONTIGÜIDAD	0,75	0,68	-	0,32	0,51	0,74	0,57	0,91			
	IY (%)	51,93	61,32	-	60,28	28,32	13,97	67,28	45,41			
	AGREGACIÓN (%)	97,20	94,61	-	37,96	58,19	95,32	97,73	95,27			
	DIVISIÓN	107,13	193,73	-	131300,45	9367,04	108752,01	12,17	951493,84			
	CONEXIÓN (%)	55,30	54,14	-	64,76	60,00	90,91	62,54	100,00			
	EVC	128,84	23,54	-	27,14	101,18	204,16	11,73	191,60			
	PROXIMIDAD	2175,59	892,14	-	119,72	10,08	72,90	22825,15	65,70			
	<b>Balsorita</b>	<b>BD</b>	<b>VS</b>	<b>PL</b>	<b>R</b>	<b>V</b>	<b>TD</b>	<b>MPC</b>	<b>TUD</b>			
	RG (m)	67,44	52,54	-	627,79	409,85	39,15	154,40	57,95			
	FORMA	1,61	2,07	-	16,32	14,23	1,38	1,91	1,83			
	DFRAC	1,10	1,15	-	1,61	1,51	1,08	1,11	1,14			
	CIRCULO	0,58	0,65	-	1,00	0,98	0,62	0,64	0,70			
	CONTIGÜIDAD	0,84	0,76	-	0,33	0,51	0,88	0,72	0,80			
	IY (%)	43,38	44,09	-	44,67	30,05	14,36	82,39	38,01			
	AGREGACIÓN (%)	97,74	93,42	-	35,34	58,81	96,00	99,00	95,68			
	DIVISIÓN	521,66	4713,82	-	907155,14	23952,94	391339,05	2,68	23629,48			
	CONEXIÓN (%)	64,96	62,92	-	100,00	66,67	80,00	64,33	100,00			
	EVC	139,41	92,04	-	268,92	25,24	410,15	17,16	10,40			
	PROXIMIDAD	78,09	258,80	-	0,15	747,14	11,68	90788,35	986,12			

\* N/A= No aplica, RG= Radio de giro, DFRAC= Dimensión fractal, IY= Interpersión y yuxtaposición, EVC = Distancia euclidiana del vecino más cercano.



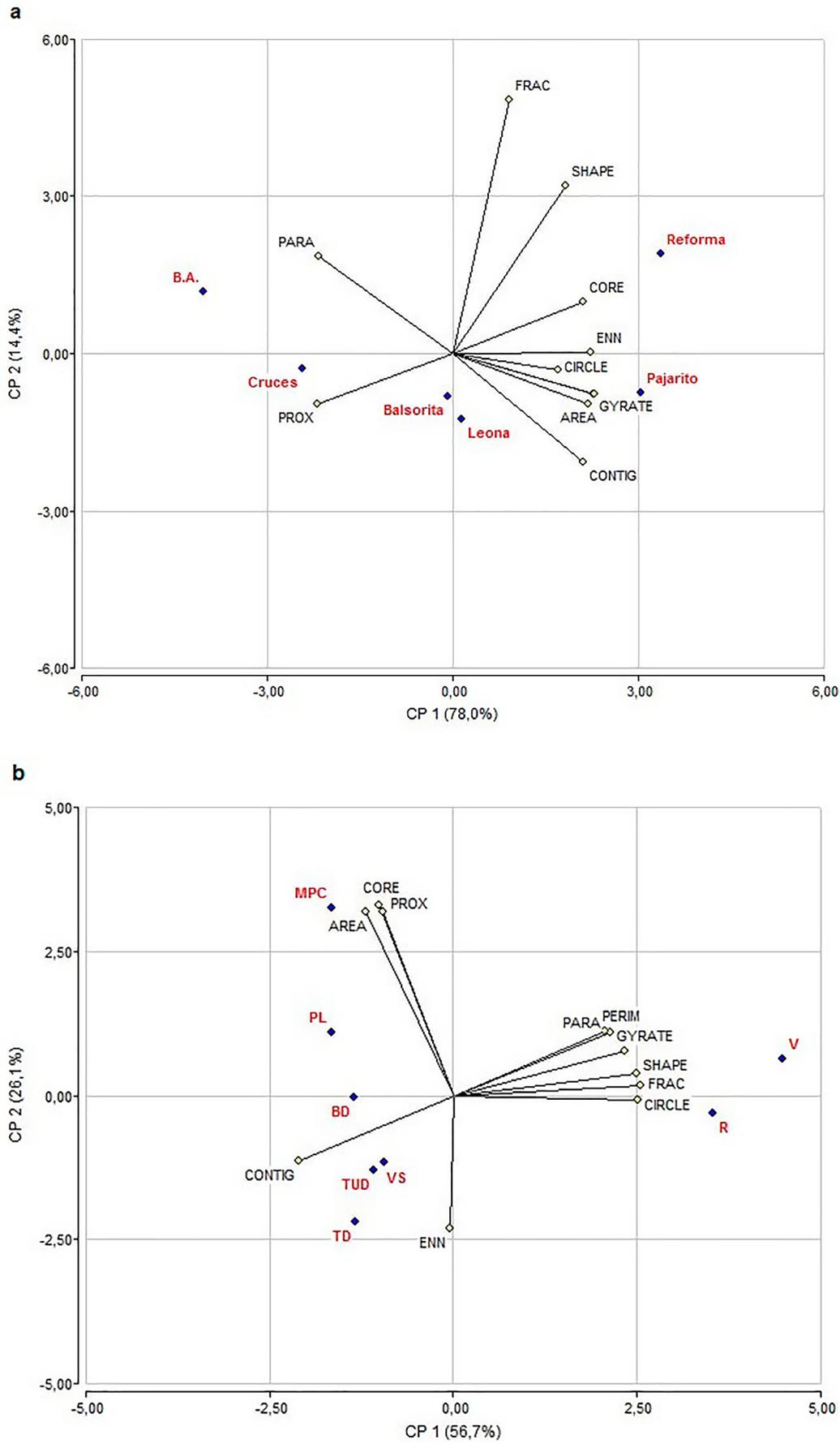
**Figura 1.** Localidades con paisajes con palma de cera en el departamento del Tolima (Colombia).

mayor avance de la matriz circundante sobre los remanentes de bosques con palma de cera en Anaimé y Cucuanita en comparación al noroccidente del Tolima. La disminución de bosques se debe a la implementación de áreas para actividad ganadera y cultivos rotativos locales, como único medio de sustento.

**Configuración del paisaje.** A nivel de clase, Reforma y Pajarito poseen BD que se prolongan superficialmente a una mayor distancia respecto a las demás localidades (Tabla 2). Estos alcanzaron distancias de 144,62 m y 103,29 m, de acuerdo al índice Radio de Giro (Tabla 2), sin diferencias significativas en todas las localidades. En términos de forma, tanto BD y VS se caracterizan por tener fragmentos con tendencia a la circularidad, con alta conexión intrínseca y perímetros lineales (Tabla 2). Esto confiere una ventaja en términos de conservación para especies de interior de bosques, cuya resiliencia y permanencia se relaciona con este tipo de hábitat. Además, la intercalación y división de

estas clases en las localidades La Leona, Cruces, Pajarito y Reforma presentan mayor adyacencia entre fragmentos de la misma clase (I<sub>JY</sub> >70 %). Aspecto diferente en las localidades Buenos Aires y Balsorita, en donde más del 60 % de fragmentos de MPC, VS y R se entremezclan con los de su misma clase (Tabla 2). Es relevante el grado de división de BD, el cual posee fragmentos con áreas menos reducidas y fragmentadas (DIVISIÓN <30) respecto a Buenos Aires y Balsorita (Tabla 2).

Por otro lado, a nivel de paisaje con un 92 % de la varianza total explicada, el ACP refleja paisajes en Ibagué y Cajamarca menos fragmentados. Cruces es la localidad con distancias más cortas entre fragmentos de las mismas clases y Reforma posee áreas núcleo más extensas respecto a los demás paisajes evaluados (Fig. 2a). Finalmente, con un 82,8 % de la varianza total, el ACP de coberturas evidencia fragmentos de BD y VS con gran conexión intrínseca; formas menos complejas, elongadas y anchas y perímetros



**Figura 2.** Diagrama de dispersión del análisis de componentes principales de los índices del paisaje y (a) las localidades, y (b) coberturas del suelo.

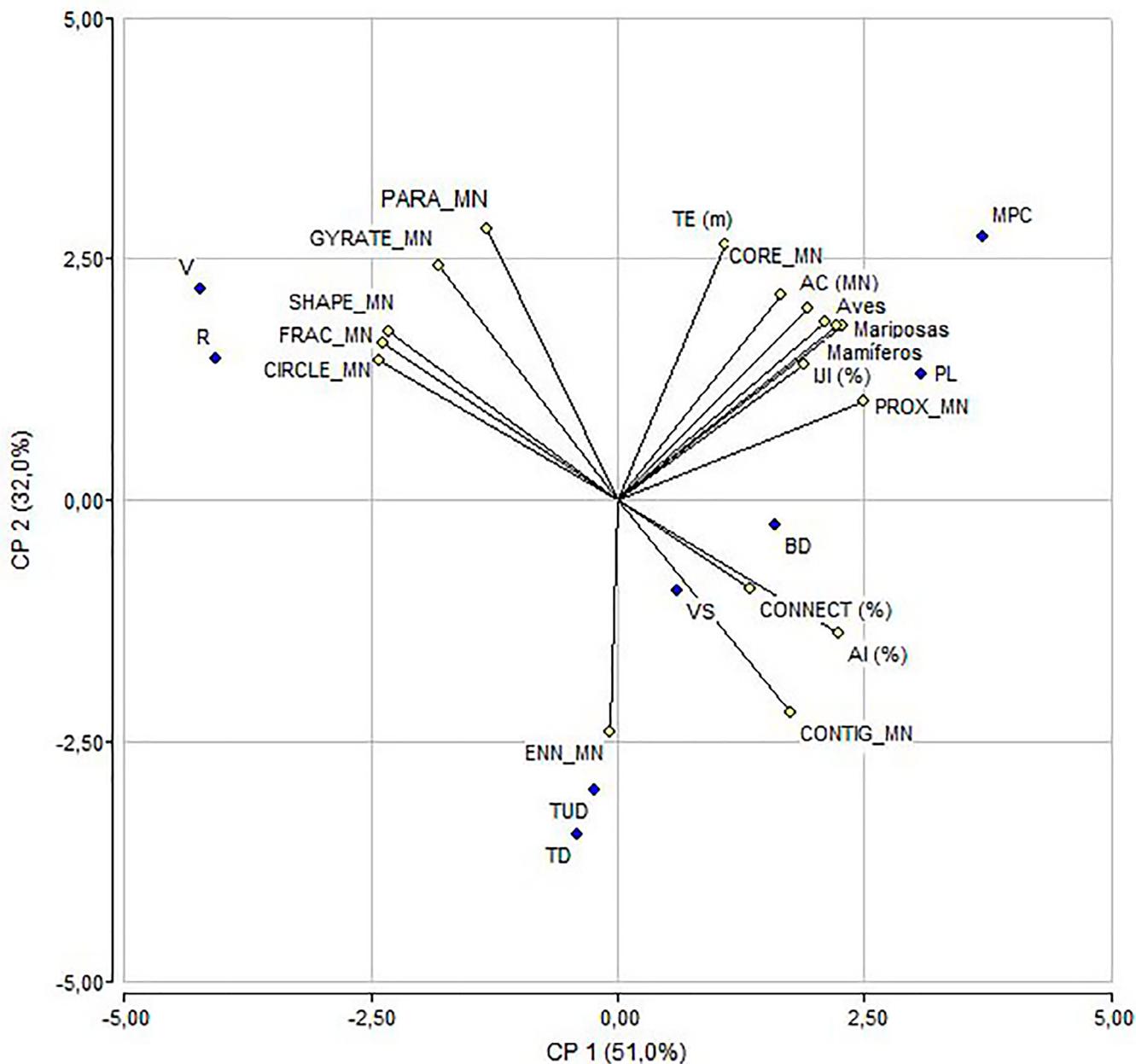
Tabla 3. Correlación entre la riqueza de aves, lepidópteros diurnos, mamíferos y los índices de paisaje evaluados en las seis localidades con bosque con palma de cera.

Índ./Cor./Signi.	Aves		Leona		Cruces		Pajarito		Reforma		Buenos Aires		Balsorita	
	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
ÁREA NÚCLEO	0,82	0,05	0,83	0,04	0,89	0,04	0,89	0,04	0,35	0,56	0,40	0,37	0,59	0,16
BORDE TOTAL	0,82	0,05	0,77	0,07	0,78	0,12	0,78	0,12	0,35	0,56	0,76	0,05	0,81	0,03
RADIO GIRO	0,21	0,69	0,14	0,79	-0,22	0,72	-0,22	0,72	0,00	1,00	-0,18	0,70	-0,10	0,83
NÚCLEO	0,21	0,69	0,54	0,27	0,22	0,72	0,22	0,72	0,35	0,56	0,58	0,17	0,24	0,61
RAPA*	0,33	0,52	-0,66	0,16	-0,22	0,72	-0,22	0,72	-0,35	0,56	0,13	0,78	-0,02	0,97
FORMA	-0,09	0,86	-0,03	0,96	-0,89	0,04	-0,89	0,04	-0,35	0,56	0,04	0,92	-0,06	0,90
DFRAC*	-0,21	0,69	-0,03	0,96	-0,89	0,04	-0,89	0,04	-0,35	0,56	-0,09	0,85	-0,24	0,61
CONTIGÜIDAD	-0,33	0,52	0,66	0,16	0,34	0,58	0,34	0,58	0,35	0,56	-0,13	0,78	0,02	0,97
CÍRCULO	-0,21	0,69	-0,09	0,87	-0,89	0,04	-0,89	0,04	0,00	1,00	-0,09	0,85	-0,47	0,28
EVC*	-0,21	0,69	-0,66	0,16	-0,89	0,04	-0,89	0,04	-0,35	0,56	-0,76	0,05	-0,26	0,58
PROXIMIDAD	0,94	0,01	0,71	0,11	0,89	0,04	0,89	0,04	0,35	0,56	0,58	0,17	0,43	0,33
CONEXIÓN (%)	0,76	0,08	0,49	0,33	-0,34	0,58	-0,34	0,58	-0,71	0,18	-0,53	0,22	-0,87	0,01
IYY (%)*	0,82	0,05	0,43	0,40	0,78	0,12	0,78	0,12	0,35	0,56	0,76	0,05	0,67	0,10
AGREGACIÓN (%)	0,58	0,23	0,60	0,21	0,67	0,22	0,67	0,22	0,35	0,56	0,22	0,63	0,59	0,16
Lepidópteros	Leona		Cruces		Pajarito		Reforma		Buenos Aires		Balsorita			
ÁREA NÚCLEO	0,65	0,16	0,65	0,16	0,71	0,18	0,71	0,18	0,35	0,56	0,77	0,04	0,61	0,14
BORDE TOTAL	0,65	0,16	0,65	0,16	0,35	0,56	0,35	0,56	0,35	0,56	0,43	0,33	0,61	0,14
RADIO GIRO	0,13	0,80	-0,13	0,80	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,08	0,87	0,20	0,66
NÚCLEO	0,65	0,16	0,65	0,16	0,71	0,18	0,71	0,18	0,35	0,56	0,16	0,74	0,61	0,14
RAPA	0,13	0,80	-0,13	0,80	0,00	1,00	0,00	1,00	-0,35	0,56	-0,22	0,64	0,20	0,66
FORMA	-0,39	0,44	-0,39	0,44	-0,71	0,18	-0,71	0,18	-0,35	0,56	-0,04	0,93	0,00	1,00
DFRAC	-0,13	0,80	-0,39	0,44	-0,71	0,18	-0,71	0,18	-0,35	0,56	-0,18	0,70	-0,20	0,66

(Continúa)

Aves		Leona		Cruces		Pajarito		Reforma		Buenos Aires		Balsorita	
Índ./Cor./Signi.	p	P	p	P	p	P	p	P	p	P	p	P	p
CONTIGÜIDAD	-0,13	0,80	0,13	0,80	0,35	0,56	0,35	0,56	0,22	0,64	0,22	0,64	-0,20
CIRCULO	-0,13	0,80	-0,13	0,80	-0,71	0,18	0,00	1,00	-0,35	0,44	-0,35	0,44	-0,20
EVC	-0,13	0,80	-0,13	0,80	-0,71	0,18	-0,35	0,56	-0,43	0,33	-0,43	0,33	-0,41
PROXIMIDAD	0,65	0,16	0,65	0,16	0,71	0,18	0,35	0,56	0,87	0,01	0,87	0,01	0,61
CONEXIÓN (%)	0,39	0,44	0,39	0,44	-0,35	0,56	-0,71	0,18	-0,65	0,11	-0,65	0,11	-0,41
Ily (%)	0,65	0,16	0,65	0,16	0,35	0,56	0,35	0,56	0,61	0,15	0,61	0,15	0,61
AGREGACIÓN (%)	0,65	0,16	0,65	0,16	0,71	0,18	0,35	0,56	0,67	0,10	0,67	0,10	0,61
Mamíferos		Leona		Cruces		Pajarito		Reforma		Buenos Aires		Balsorita	
ÁREA NÚCLEO	0,62	0,19	0,65	0,16	0,35	0,56	0,35	0,56	0,53	0,22	0,53	0,22	0,71
BORDE TOTAL	0,93	0,01	0,65	0,16	0,71	0,18	0,35	0,56	0,80	0,03	0,80	0,03	0,73
RADIO GIRO	-0,19	0,73	-0,13	0,80	-0,35	0,56	0,00	1,00	-0,13	0,78	-0,13	0,78	-0,02
NÚCLEO	0,15	0,77	0,65	0,16	-0,71	0,18	0,35	0,56	0,67	0,10	0,67	0,10	0,12
RAPA	-0,19	0,73	-0,13	0,80	-0,35	0,56	-0,35	0,56	0,18	0,70	0,18	0,70	-0,10
FORMA	-0,37	0,47	-0,39	0,44	-0,35	0,56	-0,35	0,56	-0,04	0,92	-0,04	0,92	-0,18
DFRAC	-0,28	0,59	-0,39	0,44	-0,35	0,56	-0,35	0,56	-0,22	0,63	-0,22	0,63	-0,35
CONTIGÜIDAD	0,19	0,73	0,13	0,80	0,00	1,00	0,35	0,56	-0,18	0,70	-0,18	0,70	0,10
CIRCULO	-0,28	0,59	-0,13	0,80	-0,35	0,56	0,00	1,00	-0,22	0,63	-0,22	0,63	-0,59
EVC	0,19	0,73	-0,13	0,80	-0,35	0,56	-0,35	0,56	-0,80	0,03	-0,80	0,03	-0,22
PROXIMIDAD	0,77	0,07	0,65	0,16	0,35	0,56	0,35	0,56	0,67	0,10	0,67	0,10	0,39
CONEXIÓN (%)	0,37	0,47	0,39	0,44	0,00	1,00	-0,71	0,18	-0,40	0,37	-0,40	0,37	-0,80
Ily (%)	0,93	0,01	0,65	0,16	0,71	0,18	0,35	0,56	0,80	0,03	0,80	0,03	0,63
AGREGACIÓN (%)	0,77	0,07	0,65	0,16	0,00	1,00	0,35	0,56	0,40	0,37	0,40	0,37	0,71

\*RAPA= Radio perímetro-área, DFRAC= Dimensión fractal, EVC = Distancia euclidiana del vecino más cercano, Ily= Interpersión y yuxtaposición.



**Figura 3.** Diagrama de dispersión del análisis de componentes principales de la riqueza de especies de aves, mamíferos y mariposas, variables del paisaje y coberturas del suelo.

lineales (Fig. 2b). No obstante, coberturas como PL y MPC dominan los paisajes en términos de extensión y proximidad (Fig. 2b).

**Conectividad estructural.** Según los índices de aislamiento, BD presenta menos aislamiento en La Leona, Cruces, Pajarito y Reforma, respecto a Buenos Aires y Balsorita (Tabla 2). De acuerdo con el índice de conectancia, Reforma y Cruces son las localidades con mayor conectividad estructural entre fragmentos de BD. Esta cobertura alcanzó más del 70 % y 66 % de uniones funcionales en compa-

ración con Buenos Aires y Balsorita, las cuales presentaron baja conectividad (Tabla 2). Al contrastar este aspecto con el índice de proximidad, la cobertura BD tiene fragmentos menos aislados y más contiguos en La Leona, Cruces, Pajarito y Reforma (Tabla 2). En Buenos Aires y Roncesvalles, BD es la clase más aislada y fragmentada (Tabla 2). Todos estos índices presentaron diferencias significativas en todas las coberturas ( $P \leq 0,05$ ).

Lo anterior pone a BD como la cobertura más aislada y fragmentada en Balsorita, seguido de Buenos Aires. Paja-

rito, Cruces, Leona, y por último Reforma tienen fragmentos más contiguos y menos distantes. Entre Buenos Aires y Balsorita, este último alberga parches más cercanos de MPC y TUD, mientras que VS es la cobertura menos aislada en Cruces y Buenos Aires.

**Paisaje y fauna.** La riqueza de especies evidenció una correlación positiva con el área (AC), borde total (TE), grado de aislamiento (PROX, CON) y fragmentación (IJI, AI). Los índices de forma tienen poca correlación con la riqueza faunística en estos paisajes (Tabla 3). Esto indica que a mayor área, adyacencia, agregación, y conectividad estructural de fragmentos de la misma clase, mayor el número de especies en este tipo de hábitat.

Por otro lado, los modelos de Regresión Lineal Múltiple obtenidos con estos índices indican una mayor relación entre la proximidad de las coberturas y la riqueza de aves ( $P=0,02$ ;  $\alpha=0,05$ ). En el caso de lepidópteros diurnos, el área núcleo se relaciona más con la riqueza de especies ( $P=0,00021$ ;  $\alpha=0,05$ ). Y el área de las coberturas ( $P=0,02$ ;  $\alpha=0,05$ ) y la proximidad ( $P=1,3E-06$ ;  $\alpha=0,05$ ) se relaciona más con la riqueza de mamíferos.

Finalmente, con un 83 % de la varianza explicada, el análisis de ordenación refleja una mayor correlación entre la riqueza de especies, el área (AC, CORE), agregación (IJI, AI) y conectividad (PROX) de MPC y PL. Esto significa que áreas grandes y con alta contigüidad presentan mayor riqueza de los componentes taxonómicos evaluados. Esta alta riqueza de especies también se evidencia en coberturas de BD y VS cuando se agregan en fragmentos únicos y con alta conectividad (Fig. 3).

## DISCUSIÓN

Este trabajo evidencia información más puntual sobre los atributos estructurales de paisajes con palma de cera en Tolima (Colombia). Si se tiene en cuenta las aproximaciones realizadas por Bernal *et al.* (2015), se evidencia un 20 % más de proporción de bosques densos. Sin embargo, la persistencia de este hábitat natural continúa estando bajo amenaza, ya que más del 60 % de la composición de estos paisajes comprende áreas dedicadas a pastos para ganadería y cultivos rotativos locales.

Por otro lado, esta caracterización estructural reitera la influencia de la estructura del paisaje sobre la riqueza de

aves, mamíferos y mariposas (Uezu *et al.* 2005, Martensen *et al.* 2012, McGarigal *et al.* 2012, Crooks *et al.* 2017). El área fue el atributo influyente y común a todos los componentes faunísticos. Por esta razón, el mantenimiento y preservación de bosques en estas localidades constituye un aspecto clave para la persistencia de la palma de cera y especies de bosque o borde de bosque (McGarigal *et al.* 2012). Igualmente, las áreas abiertas como los pastos limpios y cultivos, se convierten en espacios relevantes para un manejo adecuado de las coberturas boscosas. El motivo de esto es la alta intercalación (interacción) que presentan con las coberturas boscosas y vegetación secundaria. Además, cabe resaltar que estos paisajes albergan un mayor número de especies de aves de amplia tolerancia, no restringidas a bosque primario, como también un gran número de especies de mamíferos y mariposas tolerantes a áreas perturbadas (Reinoso-Flórez *et al.* 2017, Losada-Prado *et al.* 2019, Rojas-Sandino 2021).

Aunque la forma no se correlacionó con la riqueza de especies, este atributo estructural resulta ser relevante para estos paisajes. Lo anterior se debe a que los fragmentos de bosque denso y de vegetación secundaria presentan baja complejidad en la forma y alta conexión intrínseca. Esto significa una mayor extensión de hábitats interiores. Localidades como Reforma, Cruces y Pajarito son puntos clave para conservación de estos espacios, ya que poseen el mayor número de áreas núcleo. Además, estas coberturas, en dichas localidades, presentan alta conectividad estructural. Un atributo con alta influencia y correlación en la riqueza de especies de aves y mamíferos para estos paisajes (Goodwin y Fahrig 2002). En el neotrópico, este aspecto ha sido ampliamente estudiado y se ha demostrado que el establecimiento de una fauna diversa y funcional está relacionado con el tamaño y distancia a la cual se encuentran los fragmentos de las mismas clases (Kattan 2002, Sodhi *et al.* 2011, Crooks *et al.* 2017).

Como se evidenció, estos paisajes reflejan atributos únicos en su estructura, los cuales fueron determinantes en la riqueza de especies. Uno de esos atributos claves fue la conectividad estructural, aspecto que es dependiente de la estructura y de las especies que habitan dichos paisajes (Brooks 2003). Por esta razón, Rojas-Sandino (2021) identificó, en las localidades evaluadas, una mayor resistencia de la matriz circundante al desplazamiento de especies focales de mamíferos y mariposas, mientras que para aves estos espacios presentan menor resistencia al desplazamiento. Esto pone en el foco las 1330 ha de bosque denso

identificadas en Alto Toche y la Ceja, los cuales son hábitats estratégicos para organismos de bosque y especies migratorias (Armenteras *et al.* 2007). Por otro lado, aunque la matriz circundante en Anaime y Cucuanita no es favorable para el desplazamiento de mamíferos y mariposas, este trabajo resalta su importancia en el desplazamiento de aves.

Si bien esta información describe paisajes dentro de condiciones específicas y no es biológicamente neutral (Brooks 2003), constituye la primera aproximación hacia el estado estructural de los bosques con palma de cera en el Tolima. Igualmente, evidencia el gran potencial de Alto Toche y La Ceja como áreas para conservación o protección y Anaime y Cucuanita como áreas focales para recuperación de bosques. Estas áreas, de acuerdo a Rojas-Sandino (2021), presentan un número de especies propias de bosque menor en comparación a Ibagué y Cajamarca.

## PARTICIPACIÓN DE AUTORES

LDRS, SLP y HCC realizaron la recolección de datos, el análisis, interpretación de los resultados y escritura del documento. SLP y HCC plasmaron las ediciones sugeridas a la versión final del documento.

## CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existen conflicto de intereses.

## LITERATURA CITADA

Armenteras D, Cadena CE, Moreno RDP. 2007. Evaluación del estado de los Bosques de Niebla y de la meta 2010 en Colombia. Bogotá D.C: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.

Bernal R, Sanín MJ, Galeano G. 2015. Plan de conservación, manejo y uso sostenible de la Palma de Cera del Quindío (*Ceroxylon quindiuense*), árbol nacional de Colombia. Bogotá D.C., Colombia: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Dirección de Bosques, Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos) y Universidad Nacional de Colombia (Grupo de Investigación en Palmas Silvestres Neotropicales).

Brooks CP. 2003. A scalar analysis of landscape connectivity. *Oikos*. 102(2):433-439. doi: <https://doi.org/10.1034/j.1600-0579.2003.11511.x>

Crooks KR, Burdett CL, Theobald DM, King SRB, Di Marco M, Rondinini C, Boitani L. 2017. Quantification of habitat fragmentation reveals extinction risk in terrestrial mammals. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 114(29):7635-7640. doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.1705769114>

Didham RK, Tylianakis JM, Gemmill NJ, Rand TA, Ewers RM. 2007. Interactive effects of habitat modification and species invasion on native species decline. *Trends ecol. evol.* 22(9):489-496. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tree.2007.07.001>

Di Rienzo JA, Casanoves F, Balzarini MG, Gonzalez L, Tablada M, Robledo CW. 2020. InfoStat v. 2020 Software de computador. [Revisada en: 19 Oct 2020]. <http://www.infostat.com.ar>.

ESRI. 2019. ArcGIS Desktop v. 10.7.1 Software de computador. [Revisada en: 19 Oct 2020].

Galeano G, Bernal R, Figueroa Y. 2015. Plan de conservación, manejo y uso sostenible de las palmas de Colombia. Bogotá, Colombia: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Dirección de Bosques, Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos) y Universidad Nacional de Colombia (Grupo de Investigación en Palmas Silvestres Neotropicales).

Goodwin BJ, Fahrig L. 2002. How does landscape structure influence landscape connectivity? *Oikos*. 99(3):552-570. doi: <https://doi.org/10.1034/j.1600-0706.2002.11824.x>

Haddad NM, Brudvig LA, Clobert J, Davies KF, Gonzalez A, Holt RD, Lovejoy TE, Sexton JO, Austin MP, Collins CD, Cook WM, Damschen EI, Ewers RM, Foster BL, Jenkins CN, King AJ, Laurance WF, Levey DJ, Margules CR, Melbourne BA, Nicholls AO, Orrock JL, Song D-X, Townshend JR. 2015. Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems. *sci. adv.* 1(2):1-9. doi: <https://doi.org/10.1126/sciadv.1500052>

Kattan GH. 2002. Ecología y Conservación de Bosques Neotropicales. En: Guariguata MR y Kattan GH, editores. Costa Rica: Ediciones Libro Universitario Regional. Capítulo 22, Fragmentación: patrones y mecanismos de extinción de especies. p. 560-590.

Laurance WF. 1991. Edge effects in tropical forest fragments: Application of a model for the design of nature reserves. *Biol. Conserv.* 57(2):205-219. doi: [https://doi.org/10.1016/0006-3207\(91\)90139-Z](https://doi.org/10.1016/0006-3207(91)90139-Z)

Laurance WF. 2000. Do edge effects occur over large spatial scales? *Trends in Ecology and Evolution*. 15(4):134-135. doi: [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(00\)01838-3](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(00)01838-3)

Laurance WF, Camargo JLC, Luizão RCC, Laurance SG, Pimm SL, Bruna EM, Stouffer PC, Bruce Williamson G, Benítez-Malvido J, Vasconcelos HL, Van Houtan KS, Zartman CE, Boyle SA, Didham RK, Andrade A, Lovejoy TE. 2011. The fate of Amazonian forest fragments: A 32-year investigation. *Biol. Conserv.* 144(1):56-67. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2010.09.021>

Lindborg R, Eriksson O. 2004. Historical landscape connectivity affects present plant species diversity. *Ecology*. 85(7):1840-1845. doi: <https://doi.org/10.1890/04-0367>

- Lindenmayer DB, Fischer J. 2006. *Habitat Fragmentation and Landscape Change: An Ecological and Conservation Synthesis*. Washington, DC: IslandPress.
- Losada-Prado S, Reinoso-Flórez G, Villa-Navarro FA, Guevara-Cardona G. 2019. Informe técnico sobre la caracterización de la Palma de Cera (*Ceroxylon quindiuense*), y su flora y fauna asociada en tres áreas (Roncesvalles, Cajamarca, Ibagué) del departamento del Tolima. Ibagué (Colombia): Cortolima y Universidad del Tolima - Grupo de Investigación en Zoología.
- Marquina JJ, Mogollón RA. 2018. Niveles y escalas de levantamiento de información geográfica en sensores remotos. *Revista Geográfica Venezolana*. 59(1):42-52.
- Martensen AC, Ribeiro MC, Banks-Leite C, Prado PI, Metzger JP. 2012. Associations of Forest Cover, Fragment Area, and Connectivity with Neotropical Understory Bird Species Richness and Abundance. *Conserv. Biol.* 26(6):1100-1111. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2012.01940.x>
- McGarigal K, Cushman SA, Ene E. 2012. FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical and Continuous Maps v. 4 Software de computador. [Revisada en: 10 Oct 2020]. <https://fragstats.org/index.php/downloads>.
- Murcia C. 1995. Edge effects in fragmented forests: implications for conservation. *Trends ecol. evol.* 10(2):58-62. doi: [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(00\)88977-6](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(00)88977-6)
- QGIS Development Team. 2020. QGIS Geographic Information System v. 3.14.15. [Revisada en: 14 Agt 2020]. <https://www.qgis.org/es/site/forusers/alldownloads.html>.
- Reinoso-Flórez G, Losada-Prado S, Villa-Navarro FA, Guevara-Cardona G. 2017. Informe técnico sobre la caracterización de la Palma de Cera (*Ceroxylon quindiuense*), y su flora y fauna asociada en tres áreas definidas de la cuenca del río Toche en los municipios de Ibagué y Cajamarca, Tolima. Ibagué (Colombia): Cortolima y Univesidad del Tolima - Grupo de Investigación en Zoología.
- Rojas-Sandino LD. 2021. Caracterización de la conectividad estructural de áreas boscosas con Palma de Cera (*Ceroxylon quindiuense*) y su relación con las comunidades de aves, mariposas y mamíferos en el departamento del Tolima. [Tesis]. [Ibagué, Colombia]: Universidad del Tolima.
- RStudio Team. 2015. RStudio: Integrated Development for R v. 1.3.1093 Software de computador. [Revisada en: 08 Oct 2020]. <https://rstudio.com/products/rstudio/download/>
- Sodhi NS, Şekercioğlu ÇH, Barlow J, Robinson SK. 2011. Effects of Habitat Fragmentation on Tropical Birds. Chapter 2. *Conservation of Tropical Birds*. New Jersey. Wiley-Blackwell.. p. 27-44. doi: <https://doi.org/10.1002/9781444342611>
- Tischendorf L, Fahrig L. 2000. On the usage and measurement of landscape connectivity. *Oikos*. 90(1):7-19. doi: <https://doi.org/10.1034/j.1600-0706.2000.900102.x>
- Uezu A, Metzger JP, Vielliard JME. 2005. Effects of structural and functional connectivity and patch size on the abundance of seven Atlantic Forest bird species. *Biol. Conserv.* 123(4):507-519. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2005.01.001>
- Williams-Linera G. 1990. Vegetation Structure and Environmental Conditions of Forest Edges in Panama. *The Journal of Ecology*. 78(2):356-373. doi: <https://doi.org/10.2307/2261117>
- Williams-Linera G. 1993. Vegetación de bordes de un bosque nublado en el Parque Ecológico Clavijero, Xalapa, Veracruz, México. *Revista de biología tropical*. 41(3):443-453.