



Estimación de curvas de diversidad de aves en fragmentos de bosque Andino Colombiano

Estimation of Diversity Curves of Birds in Colombian Andean Forest Fragments

  Carlos Barrera-Causil¹;
 Edwar Guarín Galeano²;
 Paula Salazar Moncada³
 Jessica María Rojas⁴

¹ Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín-Colombia,
carlosbarrera@correo.itm.edu.co

² Universidad de Antioquia, Medellín-Colombia,
edwarguarin287436@correo.itm.edu.co

³ Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín-Colombia,
paulasalazarm@itm.edu.co

⁴ Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín-Colombia,
jessicarojas@itm.edu.co

Cómo citar / How to cite

C. Barrera-Causil, E. Guarín Galeano, P. Salazar Moncada, J. M. Rojas, "Estimación de curvas de diversidad de aves en fragmentos de bosque Andino colombiano," *Tecnológicas*, vol. 26, nro. 58, e2830, 2023.
<https://doi.org/10.22430/22565337.2830>

Resumen

Las especies de aves en el mundo han sido amenazadas por factores humanos o naturales que afectan su hábitat. Algunos de estos factores generan fragmentaciones en los bosques, lo que impacta directamente en su biodiversidad. Por lo tanto, se requiere la estimación de la riqueza y abundancia de aves para disponer de herramientas matemáticas que permitan evaluar el impacto ambiental, diseñar proyectos sostenibles y monitorear la salud de los ecosistemas. En este estudio, se evaluó mediante el uso de los índices de Hill la riqueza y abundancia de aves en fragmentos de bosque Andino ubicados en el municipio de Belmira, Antioquia, Colombia, con el objetivo de identificar su potencial para el aviturismo. La metodología incluyó un muestreo de especies utilizando transectos como método principal para la recolección y análisis de datos. Posteriormente, se llevaron a cabo modelamientos de curvas de acumulación, curvas enrarecidas y extrapolación, junto con el cálculo del potencial de aviturismo en el área de estudio. Además, se exploraron correlaciones entre variables paisajísticas y las estimaciones de los índices de Hill. Los resultados revelaron índices de diversidad de Hill con valores medios y altos en los fragmentos de bosque examinados, concluyendo que especialmente el fragmento 3 mostró un mayor potencial para la observación de aves según las tendencias observadas en las curvas de acumulación. Se observó una correlación negativa significativa entre los índices de diversidad calculados y la distancia a los cuerpos de agua, indicando que la riqueza y abundancia de especies aumentan a medida que el punto de observación se acerca a cuerpos de agua. Además, se identificó un potencial para el aviturismo superior a 24 puntos para más de 23 especies en la zona de estudio, señalando un alto atractivo para la práctica del aviturismo según la metodología empleada.

Palabras clave

Curvas de acumulación, deforestación, biodiversidad, extrapolación, números de Hill, riqueza de especies.

Abstract

The bird species worldwide have faced threats from human or natural factors affecting their habitat. Some of these factors result in forest fragmentation, directly impacting biodiversity. Therefore, estimating bird richness and abundance is necessary to have mathematical tools for assessing environmental impact, designing sustainable projects, and monitoring ecosystem health. This study used Hill indices to evaluate bird richness and abundance in Andean forest fragments located in the municipality of Belmira, Antioquia, Colombia, aiming to identify their potential for birdwatching. The methodology included species sampling using transects as the main method for data collection and analysis. Subsequently, models of accumulation curves, rarefaction curves, and extrapolation were carried out, along with the calculation of birdwatching potential in the study area. Additionally, correlations between landscape variables and Hill index estimates were explored. The results revealed Hill diversity indices with medium to high values in the examined forest fragments, concluding that especially fragment 3 showed a higher potential for birdwatching based on observed trends in accumulation curves. A significant negative correlation was observed between calculated diversity indices and the distance to water bodies, indicating that species richness and abundance increase as the observation point gets closer to water bodies. Furthermore, a potential for birdwatching exceeding 24 points for more than 23 species in the study area was identified, indicating high attractiveness for birdwatching according to the employed methodology.

Keywords

Accumulation curves, deforestation, extrapolation, Hill numbers, biodiversity, species richness.

1. INTRODUCCIÓN

La estimación de la riqueza y abundancia de aves a través de medidas estadísticas es una actividad que permite el estudio y conservación de las especies mediante proyectos sostenibles, los cuales buscan crear un equilibrio entre las personas y las especies en un hábitat determinado [1]. Estas estimaciones cobran mayor relevancia cuando nos enfocamos en el cumplimiento de las metas 2, 4 y 5 del Objetivo 15 del Desarrollo Sostenible (ODS) “Gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras, detener la pérdida de biodiversidad”, así como en la crisis mundial originada por el cambio climático y su impacto en la biodiversidad [2], [3]. Nótese que, actividades como la tala de árboles y el manejo inadecuado del suelo afectan directamente el cambio climático y, a su vez, inciden en la abundancia de especies presentes en una zona [4].

Para la fauna existente en un entorno geográfico, la deforestación resultante de la tala de árboles provoca la destrucción de su hábitat, lo que conlleva a afectaciones incluso para los humanos [5]. Este impacto negativo sobre las especies trae consigo otras consecuencias, como la pérdida del equilibrio ecosistémico o aspectos relacionados con actividades económicas derivadas del aprovechamiento de los recursos proporcionados por su ecosistema, entre otros [6]. Zonas deforestadas generan fragmentos que modifican el hábitat de las especies, por lo que es necesario estudiar el impacto de la deforestación sobre la fauna existente en los fragmentos generados [7].

Un insumo necesario para comprender el impacto de la fragmentación de los bosques sobre las especies que los habitan es el cálculo de la diversidad y riqueza de su fauna [8]. Este cálculo se puede lograr a través de métodos matemáticos o estadísticos que permitan estimar el número de especies y, por ende, contar con herramientas para la toma de decisiones con miras a generar proyectos ambientales o de conservación en beneficio de una comunidad [9]. Los números de Hill son medidas estadísticas que se han implementado ampliamente en los campos de la ecología, la biología y la conservación para estimar y comparar la composición de especies en diferentes comunidades o hábitats [10]-[12]. Su implementación proporciona información relevante para el diseño, planificación y gestión de proyectos y sistemas que abordan problemas ambientales en un área determinada [13].

Por su parte, las aves son una de las especies que se ven directamente afectadas debido a la deforestación, y su comportamiento dentro de los fragmentos donde ellas habitan requiere mayor conocimiento con el fin de poder aportar a su conservación e incluso, desde otro ámbito, contribuir con el crecimiento económico de una sociedad a través de actividades de ecoturismo como el avistamiento (como se define en [14]), la cual promueve la conservación de los ambientes y está vinculada al turismo en la naturaleza [15]. La estimación de la riqueza y abundancia de aves, además de su caracterización y cálculo del potencial y perceptibilidad para ejercer prácticas como el aviturismo, permite conocer las capacidades que tiene un área para el desarrollo de programas o proyectos enfocados a la práctica responsable del aviturismo [16]. Colombia es reconocido como el país con mayor diversidad de aves en el mundo [17], representando una oportunidad para el desarrollo de actividades turísticas en torno a la observación de estas especies, dejando ver mayores perspectivas de crecimiento del turismo de naturaleza en el país con casi 2000 especies [18], [19].

La caracterización de la avifauna es una actividad necesaria para comprender los ecosistemas, identificar problemas de conservación y diseñar estrategias efectivas para proteger y preservar la biodiversidad y el equilibrio ecológico. Estos datos pueden guiar la designación de áreas protegidas y la planificación de acciones efectivas de manejo [20]. Por lo anterior, es necesario realizar estudios que permitan caracterizar la avifauna colombiana

y establecer mecanismos que faciliten la conservación de estas especies y el aprovechamiento del aviturismo como una actividad que proporcione valor a nuestros recursos. Es así como, en este artículo, se estima la riqueza y abundancia de aves en fragmentos de bosque andino en Belmira-Antioquia (Colombia) con fines potenciales para el desarrollo de aviturismo. Además, se evalúa la avifauna asociada a un bosque andino con fines de aprovechamiento ecoturístico basado en [21].

Es de resaltar que los esfuerzos de conservación dirigidos al municipio de Belmira, Antioquia, son importantes para proteger y preservar la riqueza hídrica, los ecosistemas únicos y la biodiversidad de la región, así como para garantizar un suministro sostenible de agua para las comunidades locales y áreas urbanas aguas abajo, ya que, debido a su abundancia en agua, abastece gran parte del Área Metropolitana del distrito de Medellín.

La estructura de este artículo se describe de la siguiente manera: en la Sección 2 se presentan los aspectos metodológicos para el desarrollo de la investigación. En esta sección, se define el área de estudio, se describe el mecanismo de muestreo implementado y se proporcionan las definiciones necesarias para el cálculo de la riqueza de especies y el potencial de aviturismo. La Sección 3 muestra los resultados obtenidos y la discusión correspondiente al estudio realizado. A continuación, en la Sección 4 se incluyen las conclusiones derivadas de los hallazgos. La Sección 5 está dedicada a los agradecimientos, y finalmente, la Sección 6 presenta las referencias bibliográficas utilizadas en la elaboración del artículo.

2. ASPECTOS METODOLÓGICOS

2.1 Área de estudio

El municipio de Belmira está localizado en la cordillera central de Colombia, departamento de Antioquia, a una altura que oscila entre los 2400 y 3000 MSNM, y una temperatura promedio de 14 °C. En la Figura 1, se observa la localización de los fragmentos de bosque andino estudiados (imagen de la izquierda) y la ubicación espacial de los mismos (imagen de la derecha). Estos fragmentos de bosque estudiados se encuentran ubicados en la zona con función amortiguadora de un área protegida bajo la figura de conservación denominada “Distrito de Manejo Integrado y Sistema de Páramo y Bosque Altoandino del Noroccidente Medio de Antioquia (DMI SPBANMA)” y pertenece al Sistema Nacional de Áreas protegidas de Colombia (SINAP).

2.2 Muestreo

Con el objetivo de determinar el efecto de borde en un fragmento de bosque sobre la abundancia de aves, y tomando como referencia [22], las áreas de muestreo correspondieron a aquellas que tenían una distancia mínima de 100 metros desde el borde del fragmento hasta el centro. En este punto, se llevó a cabo un análisis de cobertura de los predios utilizando la metodología Corine Land Cover del IDEAM [23]. Además, se emplearon imágenes satelitales disponibles, como la imagen del servidor de la gobernación de Antioquia-Colombia (2010) y la imagen de Planet Scope (2020), con una resolución espacial de tres (3) metros y cuatro (4) bandas espectrales, capturadas el 18 de marzo y el 02 de agosto de 2020 [24].

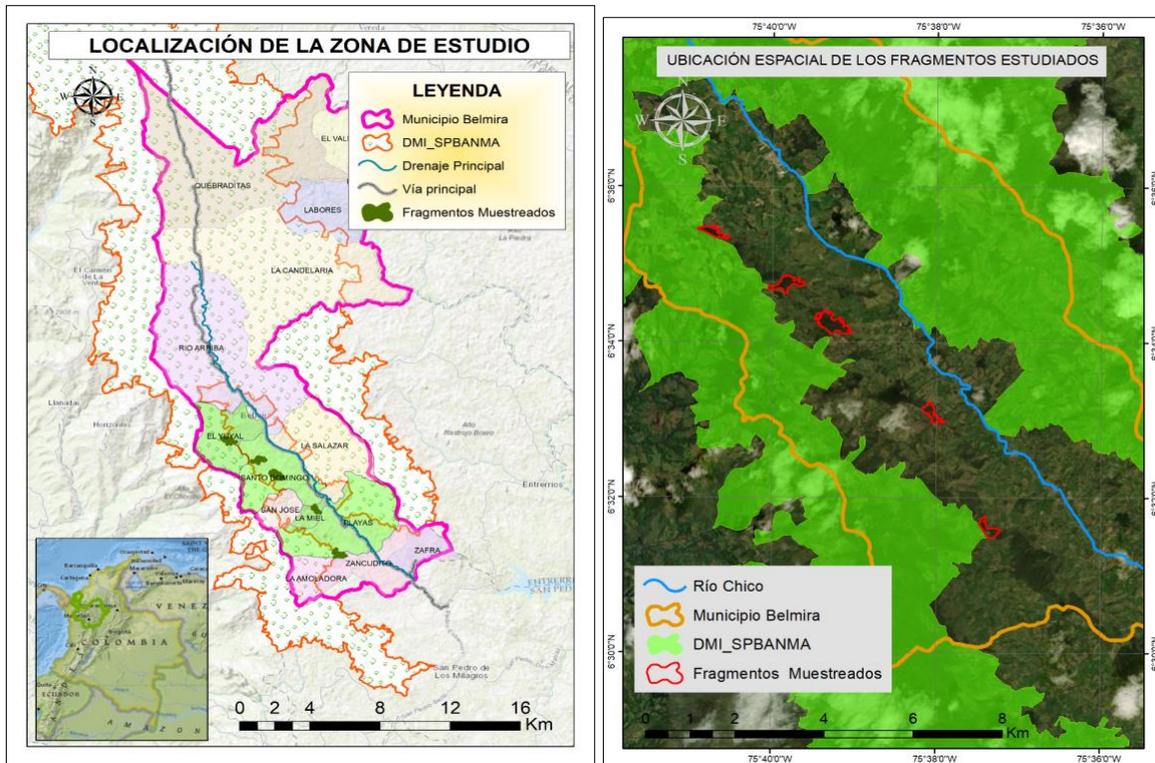


Figura 1. Localización geográfica de la zona de estudio y ubicación espacial de los fragmentos estudiados de acuerdo con criterios de área y cobertura. Fuente: elaboración propia.

En el área de estudio, siete (7) fragmentos (con un total de 94.3828 ha) cumplieron con los criterios mínimos de selección. Por lo tanto, mediante un muestreo aleatorio simple, se seleccionaron 5 fragmentos que equivalían al 78.73 % del área total. La recopilación de datos se basó en la propuesta de [25], por lo que se llevó a cabo en tres puntos diferentes a lo largo de un transecto en cada fragmento seleccionado. Estos puntos fueron los siguientes: punto 1: borde del fragmento; punto 2: a 50 m del borde; punto 3: a 50 m del punto 2 siguiendo el transecto. Los puntos se marcaron sobre una cinta *flagging* biodegradable, y los transectos se midieron utilizando una cinta métrica. Con cinco fragmentos seleccionados y tres puntos de observación por fragmento, se obtuvieron en total 15 puntos de conteo, para los cuales se definieron dos franjas horarias para la toma de datos: mañana (entre las 06:00 a.m. y las 09:00 a.m.) y tarde (desde las 03:00 p.m. hasta las 05:00 p.m.). En cada uno de los 15 puntos de conteo se registraron todas las especies que se observaron y escucharon, utilizando binoculares Vortex 8×42 mm y un dispositivo portátil Hn4 Pro para la grabación de cantos.

En cada punto de muestreo, se llevó a cabo la misma actividad durante 12 minutos consecutivos en radios fijos de 20 metros, tanto en las horas de la mañana como en las horas de la tarde, durante un período continuo de 4 días [25], [26]. Siguiendo las recomendaciones de [21], que sugieren que la recopilación de datos en campo debe incluir al menos dos réplicas por semana y que se obtienen datos más precisos con entre cuatro y ocho réplicas por semana, se realizaron un total de 8 réplicas para cada punto de muestreo en este estudio. En total, cada fragmento de bosque seleccionado presentó 24 registros, acumulando así 120 registros en el área de estudio.

Adicionalmente, se recopilaban características de las especies, como el sexo, el nombre y la distancia a la que se observaron, con el objetivo de lograr un registro completo de las especies. La identificación de las especies se llevó a cabo utilizando “Guía Ilustrada de la

Avifauna Colombiana” [19] y la audioteca de cantos de las especies de aves del mundo Xenocanto.

2.3 Análisis de datos

La estimación de la riqueza y abundancia de aves se llevó a cabo usando la propuesta de [27], con índices de diversidad que permiten calcular riqueza de especie ($q = 0$), índice de Shannon ($q \rightarrow 1$), e índice invertido de Simpson ($q = 2$), y los cuales son obtenidos a partir de la siguiente expresión analítica (1).

$$D^q = \begin{cases} D^0 = S; & \text{Riqueza de especies} \\ D^{-1} = e^{-\sum_{i=1}^S p_i \log p_i}; & \text{Índice de Shannon} \\ D^2 = \left(\sum_{i=1}^S p_i^2 \right)^{-1}; & \text{Índice invertido de Simpson,} \end{cases} \quad (1)$$

Donde S corresponde al número de especies observadas en un punto o área determinada y p es la abundancia relativa. Nótese que $i = 1, 2, \dots, S$, debido a que, en un área o punto determinado, se tienen repeticiones de conteos de especies. Además, cuando ($q = 0$) se obtiene la diversidad de todas las especies, para ($q \rightarrow 1$) especies “típicas”, y cuando ($q = 2$) se obtienen las especies dominantes. Se realizaron estimaciones para los índices de diversidad de Hill (o números de diversidad de Hill), intervalos de confianzas, trazos de curvas de rarefacción y extrapolación con respecto al tamaño de muestra de referencia y muestra completa, respectivamente, de las aves registradas en los diferentes fragmentos de estudio a partir de las expresiones propuestas en [28]. Las estimaciones de la diversidad de Hill se llevaron a cabo usando remuestreo Bootstrap con 1000 simulaciones [29], de tal manera que se obtiene la diversidad para el número de especies observadas a través de interpolación y extrapolación de datos.

Se usaron intervalos de confianza al 95 % para los números de Hill y la probabilidad de observar una especie cualquiera en el área determinada. Además, se hicieron estimaciones por las jornadas horarias y los puntos de observación definidos previamente. Los números de Hill son comparados por franjas horarias usando una prueba de hipótesis con nivel de significancia de 0.005.

Con las variables asociadas al paisaje, como la distancia a centros poblados, cuerpos de agua, borde del fragmento y las estimaciones de los índices de orden, los valores de coeficiente de correlación de Pearson se calcularon para poder explicar las diferencias entre los fragmentos evaluados. Este análisis permitió explorar el tipo de relación existente entre la diversidad de aves y la distancia a centros poblados o cuerpos de agua. Los cálculos de las estimaciones de los números de Hill se realizan a través del paquete iNEXT [28] del software estadístico R [30]. El código R y la base de datos recolectada en campo para el análisis se encuentra disponible como [material suplementario](#).

2.4 Valoración del potencial de aviturismo (PAV)

Implementando la metodología propuesta por [16], a partir de una encuesta que permite obtener un valor numérico asociado a cada una de las características, y/o atributos de los individuos bajo estudio y los cuales son denotados por simplicidad del análisis como

parámetros e hiperparámetros de valoración de cada especie observada. Para esto, se utiliza la siguiente expresión (2).

$$PAV = 1.5Ve + 1.5Ab + 1.5Pe + Ec + End + 0.5Vu + 0.5Vh + 0.5St \quad (2)$$

donde Ve corresponde al valor estético de la especie; Ab es la abundancia relativa; Pe representa la perceptibilidad del ave; Ec es el estado de conservación de las especies el cual está dado de acuerdo con las categorías establecidas por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza, y calculado usando la guía de aves de Colombia de [19] y la página de Birds of the World; End es el endemismo; Vu corresponde al valor de uso e importancia científica; Vh es el valor histórico-cultural; por último, St es la singularidad taxonómica de la especie.

La singularidad taxonómica se determina a partir de Data Zone de BirdLife International. La perceptibilidad del ave (Pe) la cual se obtiene con subparámetros correspondientes a la ecuación propuesta (3) y descrita de forma detallada por [16] como sigue:

$$Pe = 1.5Pa + 1.5Cm + 1.5T + Pac + C + 0.5Pi + 0.5Gt \quad (3)$$

Donde Pa es el periodo de actividad, Cm corresponde al colorido y mimetismo de la especie, T es el tamaño físico de la especie, Pac es la perceptibilidad acústica de la especie, C cuantifica la conducta, Pi son señales como plumaje y huellas, y Gt grado de tolerancia el cual se refiere a la distancia que pueda tener el observador con la especie.

Para el cálculo del Potencial de Aviturismo (PAV), se obtiene inicialmente el Valor Estético de las especies usando una encuesta ejecutada a 30 expertos quienes cuantifican su percepción acerca del color y la forma de cada una de las 77 especies registradas en la zona de estudio (ver encuesta en [material suplementario](#)). Aquí, para obtener la percepción de los expertos, se usan láminas a color de las especies de aves, y se solicita a cada encuestado asignar un valor de cero (0) a tres (3), donde cero corresponde al valor menos llamativo y tres al más llamativo. La valoración individual registrada se promedia para obtener la ponderación como resultado final de cada especie.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En los fragmentos de bosque andino analizados en el área de interés durante el periodo de observación descrito, se identificaron 541 individuos de aves, pertenecientes a 77 especies. Estas especies fueron identificadas por un profesional con más de 15 años de experiencia en la observación de aves, experiencia certificada en caracterizaciones y anillamiento de aves para determinar impactos ambientales, así como también en proyectos de identificación de aves a través de sus cantos. Las especies fueron agrupadas 24 familias y 68 géneros, según la clasificación detallada en la guía de aves ([material suplementario](#)) halladas en la zona de estudio. En el momento del estudio, no se reportaron especies migratorias dado que los muestreos se realizaron entre el mes de julio y agosto del 2021, época en la cual no hay presencia de aves migratorias.

La distribución porcentual de especies identificadas y clasificadas en las familias se puede observar en la Figura 2. Se evidencia que las tres familias de aves con el mayor número de especies registradas corresponden a *Trochilidae* de los colibríes con un 15.3 %, seguida por la familia *Thraupidae* de las tángaras con un 13.3 %, y, por último, en este grupo de familias identificadas como las más frecuentes se encuentra la *Furnariidae* de los trepatroncos y

hojarasqueros con un 10.4 %. Estos resultados muestran que las familias con más individuos encontrados en la zona son aquellas que tienen mayor riqueza de especies en Colombia [19].

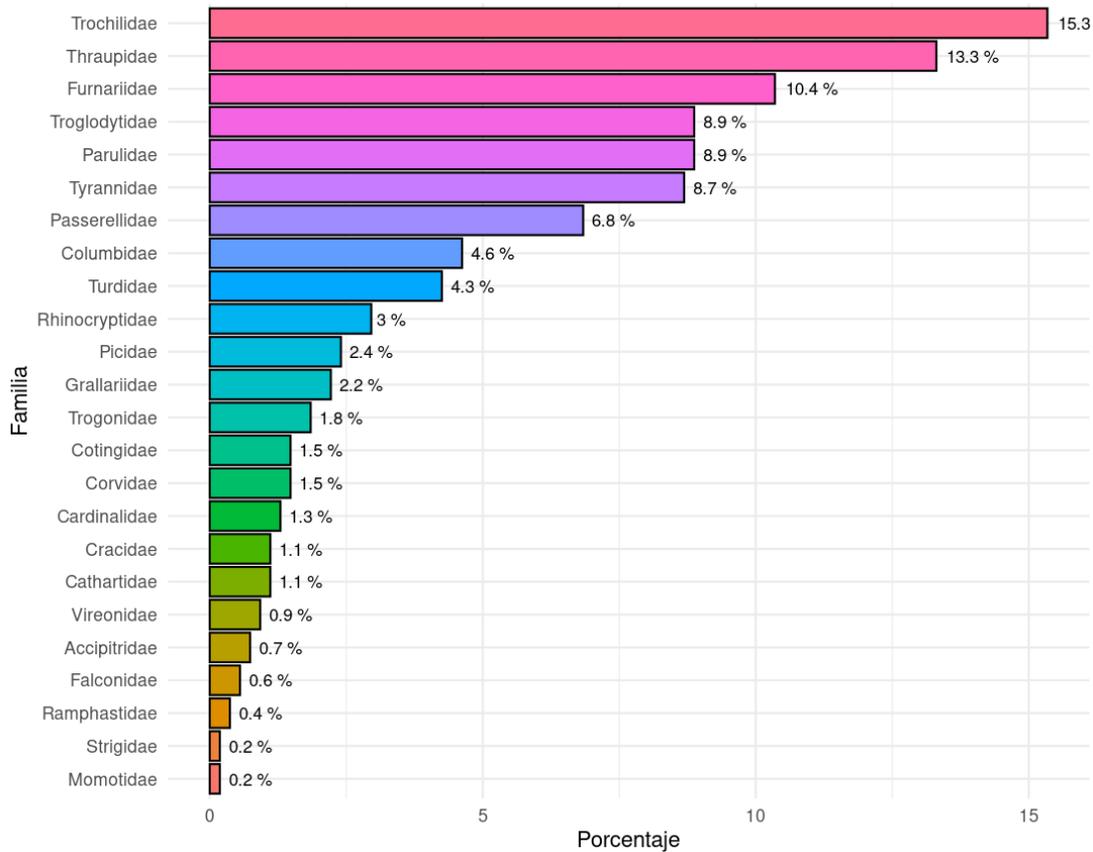


Figura 2. Distribución porcentual de las familias de aves observadas en el área de estudio. Fuente: elaboración propia.

Los valores asociados a la probabilidad de observar una especie, abundancia y riqueza observada, en cada uno de los fragmentos de bosque andino analizados se presentan en la Tabla 1. Notamos que el fragmento 3 es el que presenta mayor abundancia y riqueza de especie observada con valores de 129 y 50, respectivamente. Sin embargo, el fragmento 1 es el que presenta mayor probabilidad de observar una especie.

Tabla 1. Abundancia, riqueza y probabilidad estimada de observar una especie discriminada por fragmentos. Fuente: elaboración propia.

Fragmento	Abundancia	Riqueza	Probabilidad
Fragmento 1	112	38	0.8849
Fragmento 2	104	44	0.8480
Fragmento 3	129	50	0.8466
Fragmento 4	95	34	0.8434
Fragmento 5	101	38	0.8833

En la Figura 3, se observa el comportamiento de las estimaciones de los números de Hill ($q = 0, q \rightarrow 1, q = 2$) a través de las curvas de acumulación enrarecidas y extrapoladas por

fragmentos, permitiendo evidenciar las diferencias en la diversidad de las especies, a lo largo de la acumulación de individuos observados [28]. Notamos que el Fragmento 3 posee la mayor diversidad de especies según los números de Hill, pues las curvas tienden a estar por encima de las correspondientes en los otros fragmentos.

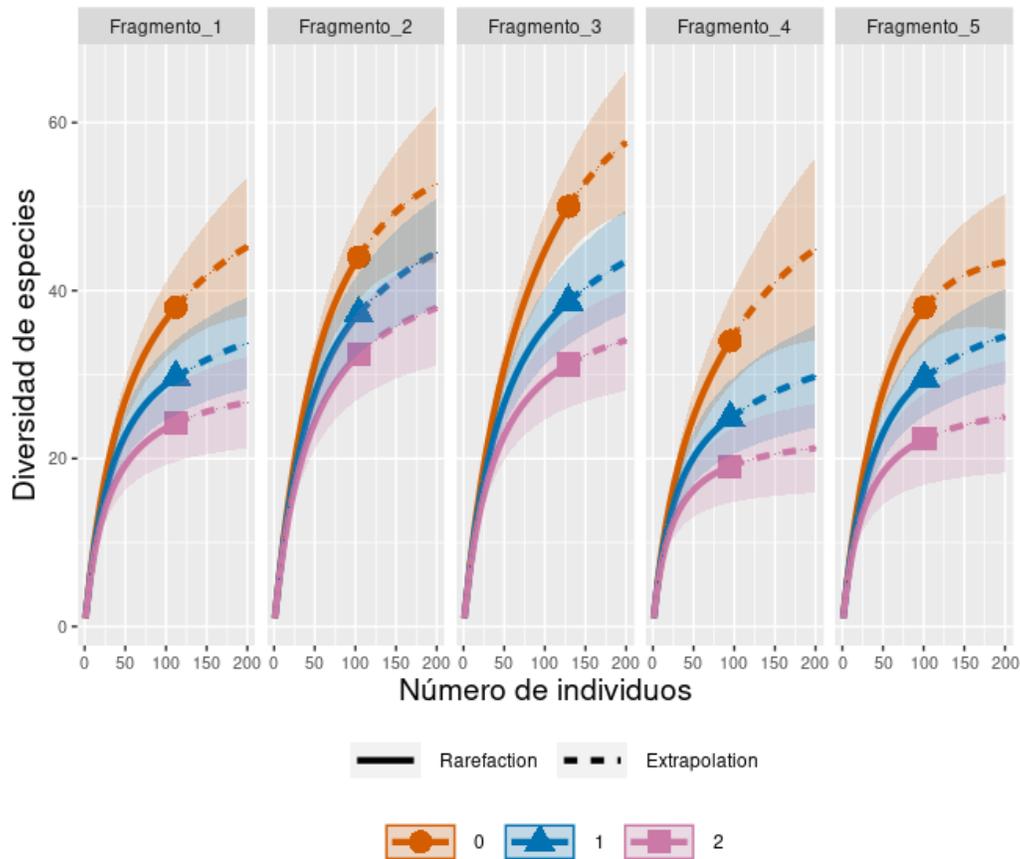


Figura 3. Diversidad de especies para los números de Hill $q: 0, q \rightarrow 1$ y $q: 2$ por fragmentos, con curvas de acumulación, enrarecidas y extrapoladas. Fuente: elaboración propia.

La Tabla 2 muestra los valores para los índices de diversidad de Hill ($q = 0, q \rightarrow 1, q = 2$), la diversidad observada y estimada por fragmentos de bosque andino con los respectivos cálculos del error estándar y de sus intervalos de confianza al 95 % (LCL, UCL), observando un error estándar muy alto para $q = 0$ en casi todos los casos, por lo que no usaremos este índice para comparar entre fragmentos. Por su parte, observamos (valores resaltados al interior de la tabla) para el fragmento 3, con una confianza del 95 %, la diversidad de Shannon $q \rightarrow 1$ se encuentra entre 43.4 y 59.1, con una diversidad puntual estimada de 51.2 y un error estándar de 4.0, siendo este fragmento el que presenta, en promedio, mayor diversidad de especies de aves según los índices calculados.

Tabla 2. Índices de diversidad de Hill q ($q = 0, q \rightarrow 1, q = 2$), observada (Obs) y estimada (Est) por fragmentos de bosque andino con los respectivos cálculos de error estándar (EE) además de sus intervalos de confianza al 95 % (LCI, LCS). Fuente: elaboración propia.

Fragmento	q	Obs	Est	EE	LCI	LCS
Fragmento 1	$q = 0$	38.000	51.958	10.314	41.828	88.892
	$q \rightarrow 1$	29.673	38.201	3.827	30.699	45.702
	$q = 2$	24.216	30.621	3.813	24.216	38.095
Fragmento 2	$q = 0$	44.000	56.677	8.302	47.931	84.881
	$q \rightarrow 1$	37.256	50.530	4.214	42.271	58.789
	$q = 2$	32.383	46.574	4.516	37.723	55.425
Fragmento 3	$q = 0$	50.000	64.175	8.289	54.896	91.037
	$q \rightarrow 1$	38.661	51.223	4.013	43.358	59.088
	$q = 2$	31.221	40.871	4.367	32.313	49.430
Fragmento 4	$q = 0$	34.000	52.553	12.950	39.397	97.779
	$q \rightarrow 1$	24.819	33.489	3.837	25.968	41.009
	$q = 2$	19.080	23.624	3.371	19.080	30.231
Fragmento 5	$q = 0$	38.000	44.481	4.929	39.724	62.363
	$q \rightarrow 1$	29.567	37.800	3.284	31.364	44.236
	$q = 2$	22.322	28.371	3.962	22.322	36.136

Tomado como referencia los puntos de muestreo, podemos observar que, en promedio e independiente del fragmento muestreado, el punto 2 es el que posee mayor riqueza de especies, con una riqueza estimada de 59 y una probabilidad de observar una especie de 0.8667 (ver Tabla 3). Note que este resultado va de la mano con lo expuesto por [31], donde se afirma que las partes intermedias tienden a proporcionar la mayor riqueza de especies debido a que estos se convierten en puntos de transición.

Tabla 3. Estimación de la abundancia, riqueza y probabilidad de observar una especie en cada uno de los puntos de muestreo (independiente del fragmento). Fuente: elaboración propia.

Puntos de muestreo	Abundancia	Riqueza	SC
Punto 1	204	52	0.9220
Punto 2	164	59	0.8667
Punto 3	173	52	0.9025

La Tabla 4 contiene los índices de diversidad para cada punto de conteo, los valores de riqueza y diversidad de especies tanto observada como estimada, y los respectivos cálculos del error estándar e intervalos de confianza al 95 % (LCL, UCL). Sin considerar $q = 0$, dado que tiene un error estándar muy alto, vemos nuevamente el punto 2 con mayor índice de riqueza de especies (ver valores resaltados). Así, con una confianza del 95 % podemos afirmar que el índice de diversidad de Shannon para el punto 2 está entre 49.6 y 67.8, con una diversidad estimada de 58.7 y un error estándar de 4.6. Se chequea además si existe diferencias entre la abundancia y diversidad de especies estimada respecto a la jornada horaria. Es así como se implementa la prueba de Wilcoxon para los números de Hill $q \rightarrow 1$ y $q = 2$ usando un nivel de significancia de 0.005 para las pruebas. Observamos que para $q \rightarrow 1$, el estadístico de prueba $W = 40061$ y $p - value = 0.01015$, por lo que no se rechaza la hipótesis de que la distribución de la diversidad y abundancia de especies por jornadas difieren respecto a un parámetro de localización, es decir, no hay una diferencia significativa

en el número medio de especies observadas por franjas horarias. De forma similar se concluye usando $q = 2$ ($W = 38158$ y $p - value = 0.1373$).

Tabla 4. Índices de diversidad de Hill q ($q = 0, q \rightarrow 1, q = 2$), observada (Obs) y estimada (Est) por puntos de muestreo y los respectivos cálculos de error estándar (EE) además de sus intervalos de confianza al 95 % (LCL, LCS). Fuente: elaboración propia.

Punto de muestreo	q	Obs	Est	EE	LCL	UCL
Punto 1	$q = 0$	52.000	64.737	8.338	55.951	93.058
	$q \rightarrow 1$	36.494	43.478	3.255	37.097	49.858
	$q = 2$	27.744	31.954	2.880	27.744	37.599
Punto 2	$q = 0$	59.000	80.866	12.339	66.802	120.281
	$q \rightarrow 1$	44.674	58.700	4.630	49.625	67.775
	$q = 2$	33.874	42.432	4.813	33.874	51.865
Punto 3	$q = 0$	52.000	63.972	7.592	55.831	89.415
	$q \rightarrow 1$	37.500	46.084	3.085	40.038	52.131
	$q = 2$	28.917	34.520	2.988	28.917	40.376

Con el interés de determinar si existe algún tipo de asociación entre las variables del paisaje *distancia al poblado* y *distancia al agua* desde el punto 1 de observación, y los índices de diversidad, se calcula la correlación de Pearson entre estos. Se encuentra que el índice de riqueza de especies observado y esperado ($q = 0$) está correlacionado negativamente con la distancia al agua en -0.688 y -0.284, respectivamente. De igual forma, el índice de diversidad de especies de Shannon observado y esperado ($q \rightarrow 1$) está correlacionado negativamente con la distancia al agua en -0.823 y -0.780 respectivamente. Además, el índice de diversidad e Simpson ($q = 2$) observado y esperado está correlacionado negativamente con la *distancia al agua* en -0.835 y -0.833, respectivamente. Por lo anterior, podemos decir que a medida que los fragmentos se encontraban más cerca de cuerpos de agua se observa un aumento en los índices de diversidad de las especies de aves. Esto permite resaltar la importancia de implementar corredores de conectividad a través de cuerpos de agua en la zona de estudio, para que las especies puedan tener una mejor movilidad o flujo entre fragmentos del bosque andino.

Los cálculos obtenidos para cada especie respecto al PAV se encuentran dispuestos como [material suplementario](#). De los resultados obtenidos, la mayor valoración está dada para El Tucán de Montaña *Andigena nigrirostris*, con $PAV = 35.60$, mientras que la menor valoración, está dado para *Vireo de Corona Parda*, *Vireo leucophrys* con $PAV = 14.85$.

En general, entre especies de aves caracterizadas y asociadas a los fragmentos de bosque andino, encontramos que las de mayor potencial para prácticas de aviturismo son aquellas que combinan colores vistosos, y, por el contrario, las de colores opacos tienen menor valoración.

4. CONCLUSIONES

Los estimadores de diversidad y abundancia de especies obtenidos a través de los números de Hill muestran que los fragmentos estudiados poseen índices con valores entre medios y altos, destacándose el fragmento 3 como el que tiene mayor abundancia. Además, se observa que el mejor punto de observación es aquel que se encuentra a 50 metros del borde de este fragmento. Nótese que la abundancia y diversidad de especies estimada no difieren

estadísticamente respecto a la franja horaria que se escoja para el avistamiento. No obstante, es importante tener en cuenta que para el desarrollo de esta actividad en la zona se recomienda seguir el protocolo de espera de un tiempo determinado antes de iniciar la observación para evitar generar impactos negativos por la presencia del observador.

Con base en los valores de PAV calculados, podemos concluir que en la zona de estudio del municipio de Belmira hay características potencialmente aprovechables para el desarrollo de actividades de aviturismo. De las 77 especies registradas, 23 poseen un PAV superior a 24 puntos, lo cual representa un área latente para el aprovechamiento social y económico de la región. Además, se observaron 32 especies adicionales con un PAV entre 20 y 24, comprendiendo un rango medio de potencial de aviturismo. Entre este grupo de especies con puntajes altos de potencial de aviturismo, destaca el Tucán de Montaña *Andigena nigrirostris*, con un PAV de 35.60.

Dada la correlación negativa existente entre la distancia a los cuerpos de agua y los índices de abundancia y diversidad de Hill, podemos concluir que la cercanía a los centros de agua tiende a incrementar el número de aves en un punto determinado. Por lo tanto, es importante promover la implementación de corredores de conectividad con cuerpos de agua en la zona de estudio con el fin de incrementar el flujo de aves entre los fragmentos estudiados.

La metodología propuesta para estimar la diversidad y abundancia de aves incentiva la posibilidad de desarrollar turismo de aves, y facilita la creación de proyectos ambientales con criterios y fomenta políticas de conservación a partir de la clasificación y valoración de las especies de aves que impacta de forma benéfica a la población en general.

5. AGRADECIMIENTOS Y FINANCIACIÓN

Los autores expresan su sincero agradecimiento al Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM) por su apoyo a través del proyecto P20244. Extendemos nuestro sincero agradecimiento a Jose Luis González Montañez por su apoyo en la creación de imágenes para este estudio.

CONFLICTOS DE INTERÉS DE LOS AUTORES

Se declara que no existe ningún conflicto de intereses económicos, profesionales o personales que puedan influir de forma inapropiada en los resultados obtenidos en este artículo

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

La contribución de los autores se describe como sigue: conceptualización, Carlos Barrera-Causil y Edwar Guarín Galeano; recolección de datos y trabajo de campo, Edwar Guarín Galeano y Paula Salazar Moncada; análisis y organización de datos, Carlos Barrera-Causil y Jessica María Rojas; adquisición de fondos, Carlos Barrera-Causil; investigación, Carlos Barrera-Causil y Edwar Guarín Galeano; metodología, Carlos Barrera-Causil y Edwar Guarín Galeano; administración y supervisión del proyecto, Carlos Barrera-Causil; redacción del borrador original, Paula Salazar Moncada y Carlos Barrera-Causil. Todos los autores han leído y acordado la versión publicada del manuscrito.

6. REFERENCIAS

- [1] M. Di Marco, T. D. Harwood, A. J. Hoskins, C. Ware, S. L. L. Hill, and S. Ferrier, “Projecting impacts of global climate and land-use scenarios on plant biodiversity using compositional-turnover modelling,” *Glob Chang Biol.*, vol. 25, no. 8, pp. 2763–2778, Aug. 2019. <https://doi.org/10.1111/gcb.14663>
- [2] M. L. Hobi *et al.*, “Patterns of bird species richness explained by annual variation in remotely sensed Dynamic Habitat Indices,” *Ecol Indic.*, vol. 127, p. 107774, Aug. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107774>
- [3] K. J. J. Kuipers, S. Hellweg, and F. Verones, “Potential Consequences of Regional Species Loss for Global Species Richness: A Quantitative Approach for Estimating Global Extinction Probabilities,” *Environ Sci Technol.*, vol. 53, no. 9, pp. 4728–4738, Apr. 2019. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b06173>
- [4] S. Nunez, E. Arets, R. Alkemade, C. Verwer, and R. Leemans, “Assessing the impacts of climate change on biodiversity: is below 2 °C enough?,” *Clim Change.*, vol. 154, pp. 351–365, May. 2019. <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02420-x>
- [5] M. Ehara *et al.*, “Where do people vulnerable to deforestation live? Triaging forest conservation interventions for sustainable non-timber forest products,” *Land use policy*, vol. 131, p. 106637, Aug. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2023.106637>
- [6] W. S. Symes, D. P. Edwards, J. Miettinen, F. E. Rheindt, and L. R. Carrasco, “Combined impacts of deforestation and wildlife trade on tropical biodiversity are severely underestimated,” *Nat Commun.*, vol. 9, no. 1, p. 4052, Oct. 2018. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-06579-2>
- [7] S. Qureshi and A. Yusuf, “Mathematical modeling for the impacts of deforestation on wildlife species using Caputo differential operator,” *Chaos Solitons Fractals*, vol. 126, pp. 32–40, Sep. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2019.05.037>
- [8] M. A. Zemanova, H. L. Perotto-Baldivieso, E. L. Dickins, A. B. Gill, J. P. Leonard, and D. B. Wester, “Impact of deforestation on habitat connectivity thresholds for large carnivores in tropical forests,” *Ecol Process.*, vol. 6, no. 21, Jul. 2017. <https://doi.org/10.1186/s13717-017-0089-1>
- [9] C. A. Joly, J. P. Metzger, and M. Tabarelli, “Experiences from the Brazilian Atlantic Forest: Ecological findings and conservation initiatives,” *New Phytologist*, vol. 204, no. 3, pp. 459–473, Nov. 2014. <https://doi.org/10.1111/nph.12989>
- [10] A. Alberdi and M. T. P. Gilbert, “A guide to the application of Hill numbers to DNA-based diversity analyses,” *Mol Ecol Resour.*, vol. 19, no. 4, pp. 804–817, Jul. 2019. <https://doi.org/10.1111/1755-0998.13014>
- [11] M. Ohlmann, V. Miele, S. Dray, L. Chalmandrier, L. O’Connor, and W. Thuiller, “Diversity indices for ecological networks: a unifying framework using Hill numbers,” *Ecol Lett.*, vol. 22, no. 4, pp. 737–747, Apr. 2019. <https://doi.org/10.1111/ele.13221>
- [12] T. Luybaert *et al.*, “A framework for quantifying soundscape diversity using Hill numbers,” *Methods Ecol Evol.*, vol. 13, no. 10, pp. 2262–2274, Oct. 2022. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13924>
- [13] D. Sánchez-Ochoa *et al.*, “Quantifying phenological diversity: a framework based on Hill numbers theory,” *PeerJ*, vol. 10, p. e13412, May. 2022. <https://doi.org/10.7717/peerj.13412>
- [14] C. H. Sekercioglu, “Impacts of birdwatching on human and avian communities,” *Environ Conserv.*, vol. 29, no. 3, pp. 282–289, Nov. 2002. <https://doi.org/10.1017/S0376892902000206>
- [15] D. Kutzner, “Environmental change, resilience, and adaptation in nature-based tourism: conceptualizing the social-ecological resilience of birdwatching tour operations,” *Journal of Sustainable Tourism*, vol. 27, no. 8, pp. 1142–1166, May. 2019. <https://doi.org/10.1080/09669582.2019.1601730>
- [16] I. V. Jácome-Negrete and H. P. Monar-Barragán, “Aves del sendero Cóndor Machay (cantón Rumiñahui, Pichincha-Ecuador): Evaluación de especies con valor para el aviturismo local,” *Siembra*, vol. 7, no. 2, pp. 069–092, Nov. 2020. <https://doi.org/10.29166/siembra.v7i2.2114>

- [17] J. N. Sánchez Guzmán, J. C. Váquiro-García, and S. Losada-Prado, “Caracterización espacio-temporal de la avifauna del cañón de Las Hermosas, Chaparral, Tolima, Colombia,” *Rev Acad Colomb Cienc Exactas Fis Nat.*, vol. 45, no. 177, pp. 1113–1127, Nov. 2021. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1394>
- [18] J. A. Mora Forero and N. A. Ramírez García, “Potencialidad del aviturismo para el desarrollo de iniciativas comunitarias en Cumaral Meta (Colombia),” *REVISTA INTERNACIONAL DE TURISMO, EMPRESA Y TERRITORIO*, vol. 3, no. 2, pp. 84–112, Dec. 2019. <https://doi.org/10.21071/riturem.v3i2.12130>
- [19] F. A. Quiñones, “*Guía ilustrada de la avifauna colombiana*,” Bogota, Colombia: Panamericana Formas e Impresos S. A, 2018. <https://asociacioncolombianadeornitologia.org/producto/guia-ilustrada-de-la-avifauna-colombiana-2da-edicion-en-espanol/>
- [20] A. T. Knight *et al.*, “Improving conservation practice with principles and tools from systems thinking and evaluation,” *Sustain Sci.*, vol. 14, no. 6, pp. 1531–1548, Nov. 2019. <https://doi.org/10.1007/s11625-019-00676-x>
- [21] C. J. Ralph, S. Droege, and J. R. Sauer, “Managing and Monitoring Birds Using Point Counts: Standards and Applications,” in *Workshop on Monitoring Bird Population Trends by Point Counts*, C. J. Ralph, J. R. Sauer, and S. Droege, Eds., 1995, pp. 161–169. <https://www.fs.usda.gov/research/treesearch/31755>
- [22] G. H. Kattán, “Fragmentación: patrones y mecanismos de extinción de especies,” in *Ecología y conservación de bosques neotropicales*, M. R. Guariguata, and G. Kattan, Eds., 2002, p. 692. <https://sites01.lsu.edu/faculty/kharms/wpcontent/uploads/sites/23/2017/04/GuariguataKattanEds2002.pdf>
- [23] IDEAM, “Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000,” Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Bogotá, D. C., Jun. 2010. Available: https://www.corpocesar.gov.co/files/Ref_UnicoyPersistente/Corine_Land_Cover.pdf
- [24] Planet explorer. “Planet Application Program Interface.” *Planet.com*. Available: <https://www.planet.com/explorer/>
- [25] C. J. Ralph, G. R. Geupel, P. Pyle, T. E. Martin, D. F. DeSante, and B. Milá, “Manual de métodos de campo para el monitoreo de aves terrestres,” U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Research Station, Albany, CA, 1996. <https://doi.org/10.2737/PSW-GTR-159>
- [26] S. Losada-Prado and Y. G. Molina-Martínez, “Avifauna del bosque seco tropical en el departamento del Tolima (Colombia): Análisis de la comunidad,” *Caldasia*, vol. 33, no. 1, pp. 271–294, Jun. 2011. https://www.researchgate.net/publication/262457707_Avifauna_del_bosque_seco_tropical_en_el_Departamento_del_Tolima_Colombia_Analisis_de_la_comunidad
- [27] M. O. Hill, “Diversity and Evenness: A Unifying Notation and Its Consequences,” *Ecology*, vol. 54, no. 2, pp. 427–432, Mar. 1973. <https://doi.org/10.2307/1934352>
- [28] T. C. Hsieh, K. H. Ma, and A. Chao, “iNEXT: an R package for rarefaction and extrapolation of species diversity (Hill numbers),” *Methods Ecol Evol.*, vol. 7, no. 12, pp. 1451–1456, Dec. 2016. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12613>
- [29] B. Efron and R. J. Tibshirani, *An Introduction to the Bootstrap*. Chapman and Hall/CRC, 1994. <https://doi.org/10.1201/9780429246593>
- [30] R Core Team, “R: A Language and Environment for Statistical Computing,” R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2023. <https://www.R-project.org/>
- [31] P. Huayta, N. Alvis, and L. Huaylla, “Riqueza y abundancia de aves en diferentes gradientes altitudinales de un paisaje de la comunidad Pomanasa, municipio de Poroma, Chuquisaca,” *Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca*, vol. 1, no. 1, pp. 1–14, 2014. <https://dokumen.tips/documents/riqueza-y-abundancia-de-aves-en-diferentes-gradientes-tecnologicas-iarticuloaves.html?page=3>