

**Propuesta de conectividad del hábitat para el halcón pechi-
anaranjado (*Falco deiroleucus*) en Colombia: ciencia básica y
ciencia ciudadana aplicadas a la conservación de la
biodiversidad**



Universidad
del Cauca

Eduart Enrique Obando Certuche

Universidad del Cauca
Facultad de Ciencias Naturales Exactas y de la Educación
Departamento de Biología
Maestría en Biología
Popayán - Cauca
2023

**Propuesta de conectividad del hábitat para el halcón pechi-
anaranjado (*Falco deiroleucus*) en Colombia: ciencia básica y
ciencia ciudadana aplicadas a la conservación de la
biodiversidad**

Eduart Enrique Obando Certuche

Informe final presentado como requisito parcial para optar el título de
Magister en Biología

Director
Luis German Gómez Bernal
Profesor titular Departamento de Biología
Universidad del Cauca

Asesor
Carlos Andrés Bravo Vega
Profesor Universidad de los Andes. Bogotá

Universidad del Cauca
Facultad de Ciencias Naturales Exactas y de la Educación
Departamento de Biología
Maestría en Biología
Popayán - Cauca
2023

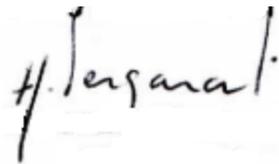
NOTA DE ACEPTACIÓN



Luis German Gómez Bernal (director)



Jurado:



Jurado:

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
3. JUSTIFICACIÓN.....	6
4. OBJETIVOS.....	8
4.1 OBJETIVO GENERAL.....	8
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	8
5. MARCO TEÓRICO.....	9
5.1 ASPECTOS GENERALES DE <i>FALCO DEIROLEUCUS</i>.....	9
5.1.1 Generalidades.....	9
5.1.2 Distribución y hábitat.....	9
5.1.3 Estado de conservación.....	10
5.2 FRAGMENTACIÓN Y CONECTIVIDAD.....	11
5.3 MODELOS DE DISTRIBUCIÓN DE ESPECIES (MDE).....	12
5.4 CIENCIA BÁSICA Y CIENCIA CIUDADANA.....	14
6. ANTECEDENTES.....	16
7. METODOLOGÍA.....	20
7.1 ÁREA DE ESTUDIO.....	20
7.2 MODELAMIENTO DE ÁREA POTENCIAL.....	20
7.2.1 Datos de ocurrencia.....	20
7.2.2 Identificación de variables ambientales y área de procesamiento.....	21
7.2.3 Modelado, distribución potencial.....	22
7.3 DISEÑO DE UN CORREDOR ECOLÓGICO.....	23
7.3.1 Identificación de nodos focales.....	23
7.3.2 Diseño de un corredor.....	24
7.4 EVALUAR EL APORTE DE LAS FUENTES DE INFORMACIÓN.....	25

8. RESULTADOS.....	26
8.1 MODELO DE DISTRIBUCIÓN POTENCIAL	26
8.1.1 Datos de ocurrencia.....	26
8.2 MODELOS DE DISTRIBUCIÓN FINALES.....	32
8.2.1 MDE ciencia básica.....	33
8.2.2 MDE ciencia ciudadana.....	36
8.2.3 MDE datos mixto	40
8.3 ÁREA DE CONECTIVIDAD	43
8.3.1 Resistencia <i>F. deiroleucus</i> . Ciencia básica.....	43
8.3.2 Resistencia <i>F. deiroleucus</i> . Ciencia ciudadana.....	43
8.3.3 Resistencia <i>F. deiroleucus</i> . Datos mixtos	44
8.3.4 Identificación de nodos focales.....	46
8.3.5 Modelamiento de conectividad funcional	49
8.4 COMPARACIÓN ENTRE LOS CONJUNTOS DE DATOS ...	61
8.4.1 Comparación modelos de distribución de especies.....	62
8.4.2 Uso de los MDE de ciencia ciudadana y datos de ciencia biológica básica en la conectividad ecológica.....	65
9. DISCUSIÓN.....	67
10. CONCLUSIONES.....	76
BIBLIOGRAFÍA.....	78

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Variables ambientales utilizadas para predecir la distribución geográfica potencial de <i>Falco deiroleucus</i>	22
Tabla 2. Importancia de la permutación en los modelos preliminares para cada conjunto de datos.	30
Tabla 3. Resultados de la evaluación de los diferentes modelos para cada conjunto de datos.	32
Tabla 4. Parámetros que explican el modelo ideal, para cada conjunto de datos	32
Tabla 5. Análisis de contribución de variables para el modelo final. Ciencia básica.	35
Tabla 6. Análisis de contribución de variables para los modelos finales. Ciencia ciudadana.....	37
Tabla 7. Análisis de contribución de variables para los modelos finales. Datos mixtos.....	42
Tabla 8. Caracterización de los ecosistemas presentes en los nodos focales según cada conjunto de datos.	47
Tabla 9. Parámetros de los corredores del conjunto de datos de ciencia básica	51
Tabla 10. Parámetros de los corredores del conjunto de datos de ciencia ciudadana.	56
Tabla 11. Parámetros de los corredores de menor costo del conjunto de datos mixto.	60
Tabla 12. Comparación entre los modelos de distribución de especies, Ciencia básica, ciencia ciudadana y mixto en toda el área de accesibilidad.....	64
Tabla 13. Comparación entre los modelos de distribución de especies, Ciencia básica ciencia, ciudadana y mixto en Colombia..	64

Tabla 14. Promedio de la longitud de los corredores de menor costo para la especie *F. deiroleucus*, según cada conjunto de datos. 66

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Total de datos georreferenciados para la especie <i>F. deiroleucus</i>	27
Figura 2. Área de accesibilidad.....	28
Figura 3. Grafica de correlaciones. Variables ambientales.....	31
Figura 4. Distribución potencial de <i>F. deiroleucus</i> , con el conjunto de datos ciencia básica.	34
Figura 5. Histogramas de la distribución de densidades de los píxeles .Datos ciencia básica.....	36
Figura 6. Histogramas de la distribución de densidades de los píxeles Datos ciencia básica.....	38
Figura 7. Distribución potencial de <i>F. deiroleucus</i> , con el conjunto de datos ciencia ciudadana..	39
Figura 8. Distribución potencial de <i>F. deiroleucus</i> , con el conjunto de datos mixto.	41
Figura 9. Histogramas de la distribución de densidades de los píxeles datos mixto	42
Figura 10. Mapa de resistencia para la especie <i>F. deiroleucus</i>	45
Figura 11. Identificación de nodos focales para <i>F. deiroleucus</i>	48
Figura 12. Corredores de menor costo entre áreas prioritarias para conservar la especie <i>F. deiroleucus</i> en Colombia.....	52
Figura 13. Cuellos de botella en los corredores para la conservación de <i>F. deiroleucus</i> en Colombia, según los datos de ciencia básica..	53

Figura 14. Corredores de menor costo entre áreas prioritarias para conservar la especie <i>F. deiroleucus</i> en Colombia según los datos de ciencia ciudadana..	55
Figura 15. Cuellos de botella en Colombia, según los datos de ciencia básica.....	57
Figura 16. Corredores de menor costo entre áreas prioritarias para conservar la especie <i>F. deiroleucus</i> en Colombia según los datos mixto.....	59
Figura 17. Cuellos de botella en los corredores que conectan las áreas prioritarias para la conservación de <i>F. deiroleucus</i> en Colombia, según los datos de ciencia básica.....	61
Figura 18. Numero de ocurrencias de la especie <i>F. deiroleucus</i> por año según cada conjunto de datos.	62
Figura 19. Comparación mapas binarios..	65

RESUMEN

Colombia es reconocido como el país con mayor diversidad de aves en el mundo, pero la fragmentación de los bosques y la continua degradación de la calidad del hábitat, tienen efectos negativos en las poblaciones de aves en el que está incluido el halcón pechianaranjado (*Falco deiroleucus* Temminck, 1825), catalogada en la lista roja de la IUCN como NT. Este estudio identificó modelos de distribución de especie (MDE) y de movilidad en Colombia como una posible propuesta de conservación para *F. deiroleucus* a través de corredores ecológicos (LCP). Se usaron datos georreferenciados procedentes de ciencia básica y ciencia ciudadana. Se comparó el rendimiento de los MDE y LCP a partir de estas dos fuentes de datos y a su vez como trabajan juntos (datos mixtos). Los MDE fueron creados usando la librería KUENM y los LCP usando la caja de herramienta complementaria para ArcGis "linkage mapper". Los modelos tuvieron una buena precisión ($AUC > 0.8$ y True Skill Statistic > 0.4), y una alta superposición entre los puntajes de idoneidad (estadístico D > 0.8). Se identificaron varios LCP, cuellos de botella y zonas prioritarias de conservación para *F. deiroleucus* en la región andina del país, donde predominan los ecosistemas andinos y agroecosistemas. Además, los resultados sugieren que los datos de ciencia ciudadana son una fuente complementaria a los datos de ciencia básica en el estudio de especies poco conocidas, como lo es *F. deiroleucus*.

Palabras claves: Conectividad funcional, modelos de menor costo, Maxent, participación ciudadana, halcón.

1. INTRODUCCIÓN

El aislamiento de parches de hábitat por actividades antrópicas reduce la funcionalidad ecológica, limita el intercambio de individuos, reduce el flujo de genes y aumenta el riesgo de extinción de especies (Goossens *et al.*, 2016, Kutschera *et al.*, 2016). Para mitigar los efectos de la fragmentación, es importante preservar la conectividad entre poblaciones que han sido aisladas (Correa-Ayram *et al.*, 2016, Zanin *et al.*, 2016). Para ello, es necesario identificar áreas de hábitat centrales, corredores ecológicos que conecten estas áreas núcleo y otros elementos del paisaje (Di Minin *et al.*, 2016).

En Colombia los problemas ambientales causados por actividades antrópicas están afectando a diferentes poblaciones de aves, reduciendo y fragmentando su hábitat. Dentro de este grupo de aves afectadas está el halcón pechi anaranjado (*Falco deiroleucus*) que es un ave rapaz catalogada como NT (casi amenazada) globalmente y DD (datos insuficientes) en Colombia (BirdLife International, 2016; Renjifo *et al.*, 2016). Para conservar esta especie es necesario conocer su distribución y conectar las áreas idóneas ambientalmente. Los modelos de distribución de especies (MDE) y la identificación de corredores ecológicos pueden ayudar a llenar las brechas de conocimiento para especies poco conocidas al predecir hábitats adecuados dentro de un área de interés, proporcionar información sobre variables de hábitat importantes para la distribución de la especie (Elith y Leathwick, 2009). Para identificar estas zonas es necesario contar con datos georreferenciados, que en su gran mayoría provienen de ciencia básica (registros de museos, colecciones biológicas, observaciones de campo, datos de seguimiento de animales) (Elith *et al.*, 2011). Estos registros de

especies procedentes de ciencia básica son una fuente de datos en estudios preocupados en modelar la distribución de especies, sin embargo, los datos no son actuales, son difíciles de conseguir y en algunos casos son costosos. Si bien son útiles, se sabe que los registros de especímenes de ciencia básica sufren de sesgos espaciales, ambientales y temporales, requiriendo un análisis detallado para garantizar que las ubicaciones de los registros estén georreferenciadas con precisión para evitar la introducción de errores en los modelos de distribución (Newbold, 2010; Soberón *et al.*, 2000).

Con el auge del internet los proyectos de ciencia ciudadana se han incrementado de manera considerable, proporcionando grandes cantidades de datos sobre muchas especies. Este conjunto de datos pueden ser una modalidad alternativa para los proyectos enfocados en modelar distribuciones de especies sin grandes cantidades de dinero para financiar salidas de campo o comprar materiales necesarios para rastrear los movimientos de las especies (Bonney *et al.*, 2009, 2014). Sin embargo, estos datos también presentan dificultades debido a que los registros provienen de personas ajenas a investigaciones científicas lo que produce una mayor probabilidad de identificar erróneamente una especie o georreferenciar mal un punto de ocurrencia (Geldmann *et al.*, 2016; Lee *et al.*, 2020b).

Esta investigación tuvo como objetivo identificar un área de conectividad para *F. deiroleucus* y explorar la comparación de los MDE generados por los datos de ciencia ciudadana, los datos de ciencia básica y a la vez como trabajan juntos estos dos conjuntos de datos (datos mixtos).

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Colombia se reconoce como el segundo país más biodiverso a nivel global y el primero en diversidad de aves (Romero *et al.*, 2007). De las cerca de 11158 especies de aves que existen en el mundo, 1941 especies se encuentran en Colombia (Ayerbe-Quiñones, 2019; Vélez *et al.*, 2021). Las aves ocupan una amplia variedad de nichos ecológicos, siendo además importantes en iniciativas de conservación, educación ambiental, actividades económicas y turismo sostenible (Sekercioglu, 2006). Para el país es necesario lograr mantener esa diversidad de aves, sin embargo, actualmente 236 especies se encuentran en distintas categorías de amenaza (1 extinta, 16 en peligro crítico, 80 en vulnerable, 110 casi amenazado) (IUCN, 2016; Renjifo *et al.*, 2016), número que corresponde cerca del 11% de la avifauna nacional.

La razón principal por el aumento de aves amenazadas es la transformación y pérdida del hábitat, hecho derivado de las actividades agrícolas y ganaderas (Negret *et al.*, 2021). Las aves continentales son altamente dependientes de la existencia de cobertura vegetal, por lo cual su fragmentación o pérdida baja el nivel de protección contra depredadores, reduce su alimento, además que al disminuir la conectividad dificulta el movimiento y en tanto las posibilidades de reproducción e intercambio genético (Haddad *et al.*, 2013). Una de las especies que se está viendo afectada de manera grave por la pérdida del hábitat es el halcón pechi-anaranjado (*Falco deiroleucus*, Temminck, 1825). Se sospecha que el hábitat de esta ave rapaz se está perdiendo entre un 23,9% y 27,5% de hábitat idóneo dentro de su distribución y que su población disminuirá en una tasa cercana al 30% en tres generaciones (Soares-Filho *et al.*, 2006).

Lo anterior hace que la especie esté en categoría NT (casi amenazada) a nivel global y con datos insuficientes (DD) a nivel nacional (BirdLife International, 2016; Renjifo et al., 2016). Esta ave rapaz tiene una distribución discontinua en Centroamérica y al norte y sur de Suramérica (BirdLife International, 2016; Thorstrom et al., 2002). Ese tipo de distribución discontinua puede ser un factor negativo para la movilidad de la especie, por eso es necesario conectar las poblaciones dentro de los ecosistemas naturales que permita su conservación.

Para consolidar una estrategia de conservación de *F. deiroleucus*, es necesario tener información sobre la distribución potencial en el país, conocer las diferentes rutas de conexión entre los núcleos poblacionales en Colombia. Esta información se puede obtener a partir de un modelo de distribución para la especie (MDE), modelo que no ha sido construido para Colombia. Los MDE son calculados a partir de observaciones de campo procedente de diferentes fuentes de información (ciencia básica y ciencia ciudadana) y una serie de variables ambientales, que actúan como predictoras (Peterson, 2012). Los datos procedentes de ciencia básica han sido la fuente principal de información para construir los modelos de distribución potencial, pero esos datos se podrían reforzar con registros de ciencia ciudadana. Cada conjunto presenta beneficios y dificultades a la hora de modelar las distribuciones potenciales de las especies. Los registros de ciencia básica provenientes de museos, colecciones privadas de historia natural, herbarios y la literatura histórica (Newbold, 2010), ofrecen una vasta fuente de información, lo cual hace que estos datos pueden ser muy valiosos en los esfuerzos de conservación. Sin embargo, presentan algunas dificultades, por

ejemplo, los registros de ocurrencia están desactualizados, en algunos casos son difíciles de conseguir y presentan sesgos espaciales debido a que son muy limitados (Soberón *et al.*, 2000; Newbold, 2010). Por otro lado, los datos de ciencia ciudadana recopilados por personas que no se encuentran capacitadas como científicos, pero son aficionados a la naturaleza, pueden ofrecer información igualmente significativa sobre la distribución de especies poco estudiadas o de difícil observación (Bonney *et al.*, 2009). Estos registros de observación en los últimos años han recopilado enormes cantidades de datos que pueden utilizarse para explorar las distribuciones de especies en amplios paisajes geográficos, con un bajo presupuesto e información actualizada (Bonney *et al.*, 2009, 2014). Sin embargo, la calidad de estos datos contiene errores como una identificación incorrecta de la especie o una mala georreferenciación de un punto de presencia (Genet *et al.*, 2003), por lo tanto, es necesario evaluar la procedencia de los datos, de cómo afectan o contribuyen en la construcción de los MDE.

Con base en lo anterior, esta investigación aborda las siguientes preguntas de investigación:

- ¿Cuál es la distribución potencial del halcón pechi – anaranjado (*Falco deiroleucus*)?
- ¿Cuáles son las áreas y rutas más idóneas para conectar los hábitats del halcón pechi-anaranjado (*Falco deiroleucus*) en Colombia?
- ¿Cuál es la contribución de las fuentes de información usadas (datos de ciencia básica y ciencia ciudadana) en la elaboración de la propuesta de conservación?

3. JUSTIFICACIÓN

En la actualidad el estudio y la conservación de las aves resulta de vital importancia, debido a que estas especies brindan servicios ecosistémicos fundamentales para la supervivencia del ser humano. Un ejemplo de ello son las aves rapaces que son grandes depredadoras de plagas, convirtiéndose en aliados del ser humano y de la agricultura en general (Acuña, 2014). Cuando se pierde una especie de ave, los beneficios que ella podría haber brindado desaparecen. Estos beneficios para los seres humanos y otros organismos probablemente disminuirán junto con el número de aves y otras especies, debido a que este grupo taxonómico tiene un papel importante en el control de otros organismos; su declive puede incluso fomentar la propagación de enfermedades (American Museum of Natural History, 2019).

A pesar de que Colombia es el país más rico en diversidad de especies de aves, las actividades antrópicas en este territorio han afectado a la subsistencia de la avifauna, reduciendo y afectando las áreas idóneas donde habitan. Por este motivo, la presente investigación es pertinente porque contribuirá en el conocimiento para disminuir la pérdida de conectividad ecológica del halcón pechianaranjado, planteando el diseño de corredores ecológicos, además, de que hay pocos estudios relacionados sobre propuestas de conectividad para las aves en sur América (Sánchez, 2015). Esta investigación puede aportar en el fortalecimiento de un sistema de gestión ambiental que integre, conserve y utilice la biodiversidad en el marco de las prioridades del desarrollo económico, sostenible y social, constituyendo la opción idónea para alcanzar objetivos de conservación en el territorio colombiano.

Actualmente, los estudios sobre la distribución de las especies y de conectividad ecológica los ha posicionado como importantes, sobre todo para los proyectos de conservación que buscan salvaguardar la biodiversidad del planeta. Estos estudios ayudan a llenar las brechas de conocimiento para las especies poco conocidas, puesto que ayudan a predecir hábitats adecuados dentro de un área de interés; (Zimmermann *et al.*, 2010). Esta investigación es apropiada, porque la especie *F. deiroleucus* al estar catalogada como NT a nivel global y DD a nivel local, dando a entender que aún existen vacíos en su distribución y tendencias del hábitat (Márquez *et al.*, 2005; IUCN, 2016; Renjifo *et al.*, 2016). El desarrollo de la investigación brinda información sobre la distribución potencial y otros aspectos de la ecología de esta especie, de esta manera se contribuirá con conocimiento sobre el halcón pechi-anaranjado llenando algunos vacíos que existen, con el fin de permitir su conservación.

Los datos de ciencia ciudadana son cada vez más valiosos para estudiar la biogeografía de las especies y el éxito de los esfuerzos de conservación (Devictor *et al.*, 2010). La importancia de utilizar datos de ciencia ciudadana se origina en el potencial de compensar la falta de recursos para generar bases de datos de presencia de especies completas y actualizadas (Delaney *et al.*, 2008). En particular, los voluntarios y los observadores ciudadanos pueden contribuir a un monitoreo más frecuente, generalizado y rentable.

La información obtenida será una herramienta que facilitará a las entidades competentes, generar estrategias de conservación, permitiendo que a futuro se formulen planes de manejo ambiental y gestión sostenible para las demás especies de aves que están en un estado de amenaza, con el propósito de evitar su desaparición.

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Proponer un área de conectividad del hábitat del halcón pechi-anaranjado (*Falco deiroleucus*) en Colombia usando información de ciencia básica y ciencia ciudadana.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Modelar la distribución potencial del halcón pechi-anaranjado (*Falco deiroleucus*) a partir de datos de ciencia ciudadana y datos de ciencia básica.
2. Identificar un área de conectividad potencial para el halcón pechi - anaranjado (*Falco deiroleucus*) en Colombia.
3. Evaluar el aporte de las fuentes de información en la elaboración de la propuesta de conservación.

5. MARCO TEÓRICO

5.1 ASPECTOS GENERALES DE *FALCO DEIROLEUCUS*

5.1.1 Generalidades.

El halcón pechi-anaranjado (*Falco deiroleucus*; Temminck, 1825), es un ave rapaz del orden Falconiformes Sharpe, 1874, de la familia Falconidae Leach, 1820. Es un halcón grande y de difícil observación que mide entre 38 cm y 40 cm. Tiene anillos oculares de color amarillo, las plumas de la espalda son de color negro con márgenes de color gris, su pecho es de color café rojizo (Brown y Amadon, 1989). Se alimenta de otras aves de tamaño medio, murciélagos y grandes insectos. Alberga generalmente en cornisas o en orillas de rocas ubicadas dentro del bosque (Hilty y Brown 1986) sin embargo, también existe evidencia de que anida en árboles secos (Berry *et al.*, 2010).

5.1.2 Distribución y hábitat.

Su rango de distribución cubre gran parte de América Latina (Figura 1). En Sudamérica su rango está por los países de Colombia, Venezuela, Guayanas, Surinam, Trinidad y Tobago, Ecuador, Perú, Bolivia, norte de Argentina, y en Brasil (BirdLife International, 2016). En Centroamérica estudios sugieren que *F. deiroleucus* está ausente, encontrando solo poblaciones reproductivas en Guatemala, Belice y algunos avistamientos en Panamá (Thorstrom *et al.*, 2002). El halcón pechi anaranjado se encuentra en una variedad de hábitats, incluidos bosques de tierras bajas, bordes de sabanas, regiones secas, laderas de montañas subtropicales y también está presente en paisajes

antrópicos (Berry *et al.*, 2010). En Colombia se distribuye entre los 200 m.s.n.m y 2400 m.s.n.m (Ayerbe Quiñones, 2019). Sus hábitats en este territorio concuerdan con la vertiente pacífica caucana, en las bases oeste de la serranía del Perijá, este de la cordillera Oriental, Casanare y en el alto valle del Magdalena; sus hábitats corresponden a bosques húmedos, selva baja tropical, piedemontes, colinas o montañas (Renjifo *et al.*, 2016).

La principal amenaza para *F. deiroleucus* es la deforestación, que conduce a la fragmentación y degradación de su hábitat lo cual es una amenaza significativa en gran parte de su área de distribución (Soares-Filho *et al.*, 2006; BirdLife International, 2016).

5.1.3 Estado de conservación.

F. deiroleucus está catalogado como una especie casi amenazada (NT) a nivel global (IUCN, 2016), debido a la disminución de su hábitat en su área de distribución y se cree que la población total de esta especie está experimentando disminuciones continuas a una tasa del 25% a 30% durante tres generaciones (Soares-Filho *et al.*, 2006) por lo tanto, se ha incluido en la categoría casi amenazada. En Colombia se encuentra en categoría DD (datos insuficientes) debido a los registros que se tienen son escasos y variados. Además, es un ave con poca información con la que se cuenta y se sugiere que la abundancia poblacional de la especie es pequeña y podría estar disminuyendo como consecuencia de la transformación de los hábitats naturales (Renjifo *et al.*, 2016).

5.2 FRAGMENTACIÓN Y CONECTIVIDAD

El crecimiento acelerado de la población mundial, que se estima en 81 millones de personas por año (Naciones Unidas, 2018), aumentará las necesidades de desarrollo urbano y usos productivos de la tierra, que tendrían consecuencias ecológicas negativas en los ecosistemas naturales. La destrucción y degradación de los ecosistemas son las principales causas de la disminución de la biodiversidad mundial, que conduce a la división del hábitat en fragmentos más pequeños y aislados, separados por una matriz de cobertura terrestre transformada por el hombre (Haddad *et al.*, 2013). Derivado de esta problemática muchas poblaciones de aves están experimentando una rápida disminución en todo el mundo, incluido Colombia (Negret *et al.*, 2021). Los procesos de fragmentación que afectan a las aves se producen actualmente en entornos terrestres, donde las diferentes especies responden de manera distinta a los cambios en la configuración del hábitat (Zuluaga *et al.*, 2021). La fragmentación del hábitat terrestre obliga a las aves a volar distancias más largas durante las actividades de forrajeo o de migración (Voigt *et al.*, 2018; Tucker *et al.*, 2019). Para minimizar la pérdida de hábitat, la fragmentación y la reducción de la conectividad ecológica, los planes de ordenamiento territorial deben aprovechar las herramientas accesibles, fáciles de usar y sólidas para evaluar las alternativas de la planificación espacial.

Como alternativa a las problemáticas mencionadas anteriormente, organizaciones encargadas a la preservación del medio ambiente han realizado diferentes estrategias de conservación, en la que se destaca el concepto de conectividad ecológica. Este término se originó en los Estados Unidos a finales del siglo XIX (Taylor *et al.*,

1984). La conectividad ecológica se sitúa en la ecología del paisaje, donde la comprensión de cómo los flujos de materia, energía e información se mueven a través del paisaje (Subirós *et al.*, 2006). Un caso específico dentro de estos flujos es el movimiento de especies vegetales y animales a través de corredores ecológicos, estos son un medio importante para mantener la estabilidad de los ecosistemas y mejorar la sostenibilidad ecológica de un territorio (Hou *et al.*, 2021). Los corredores ecológicos son cruciales para muchos procesos ecológicos, como por ejemplo mejorar la tasa de movimiento de sustancias específicas como nutrientes y genes entre parches, reducir el riesgo de fragmentación, perturbación y pérdida del paisaje poblacional (Jordán, 2000), por lo que esta metodología de conservación facilita movimientos entre los elementos o parches que lo componen. Los modelos de trayectoria de menor costo (LCP) miden varios procesos de movimiento espacial basados en la teoría de grafos, reflejando la resistencia generalizada de paisajes heterogéneos al movimiento espacial. LCP es un método potente, operable y flexible para analizar la conectividad de paisajes heterogéneos. Los modelos LCP se han convertido en el método principal para la identificación de corredores y se utilizan ampliamente en proyectos de optimización del paisaje, como la protección de especies, la planificación de reservas naturales y el diseño de patrones de seguridad ecológica regional (Hashmi *et al.*, 2017).

5.3 MODELOS DE DISTRIBUCIÓN DE ESPECIES (MDE)

Los modelos de distribución de especies (MDE) se han utilizado con éxito para desarrollar estrategias de gestión de la vida silvestre, priorizar las áreas de conservación, identificar hábitats críticos,

rastrear la propagación de enfermedades (Kaky *et al.*, 2020). Los MDE utilizan las características ambientales de los sitios de ocurrencia conocidos de las especies, para comprender las condiciones ambientales bajo las cuales pueden mantener poblaciones en un sitio (Peterson, 2012).

La realización de los MDE son básicamente técnicas numéricas utilizadas para identificar hábitats potenciales (Anoop *et al.*, 2020; D'Elia *et al.*, 2015). Además, estos modelos proporcionan información importante que es esencial para garantizar una protección adecuada en áreas recién colonizadas, prevenir conflictos con humanos y optimizar las estrategias de monitoreo y gestión (Belitz *et al.*, 2020; Swinnen *et al.*, 2017). Existen varios métodos de modelado de nichos ecológicos, que emplean diferentes algoritmos estadísticos y parámetros de entrada (Phillips y Dudík, 2008). Entre ellos, MaxEnt es uno de los más populares (Merow *et al.*, 2013). MaxEnt es un software de modelado desarrollado por Steven Phillips con el objetivo de estimar la distribución espacial potencial de especies vegetales y animales. Se basa en el principio de máxima entropía y requiere relativamente poca información: datos de presencia a escala de paisaje y variables de paisaje (Phillips *et al.*, 2006). Además, es fácil de operar y produce una alta precisión incluso con tamaños de muestra pequeños. Devuelve directamente un mapa de idoneidad del hábitat (Phillips *et al.*, 2006; Phillips y Dudík, 2008).

La creación de un modelo rigurosamente es una tarea desafiante, especialmente en la fase de calibración es crítica y en ocasiones complicada. KUENM, es un nuevo conjunto de herramientas para realizar un desarrollo detallado de MDE, que usa la plataforma maxent de una manera reproducible (Cobos *et al.*, 2019). Este es un

paquete diseñado para el lenguaje R, facilita el proceso de calibración del modelo y la creación final de una manera más robusta y reproducible. El objetivo de este paquete es diseñar conjuntos de modelos candidatos para crear diversas calibraciones de modelos maxent y permitir la selección de parametrizaciones óptimas para cada estudio (Cobos *et al.*, 2019). Este paquete funciona en tres fases cruciales en la construcción de los MDE: calibración, creación del modelo y la evaluación. Los modelos candidatos se crean utilizando maxent, con diferentes valores de multiplicadores de regularización, diferentes combinaciones de feature class (forma en la que la especie responde a las variables ambientales de manera lineal, cuadrática, producto entre otras) y diferentes conjuntos de variables ambientales. La selección del modelo se basa en importancia estadística, capacidad predictiva y complejidad; es decir, los modelos son filtrados primero para detectar aquellos que son estadísticamente significativos (Cobos *et al.*, 2019).

5.4 CIENCIA BÁSICA Y CIENCIA CIUDADANA

En los últimos años, el uso de bases de datos de los especímenes depositados en museos, herbarios y en plataformas de ciencia ciudadana, es cada vez más común como herramienta para abordar los problemas de conservación y gestión de la biodiversidad. Estas bases de datos son a menudo grandes en tamaño, complejas en estructura, y su aplicación a la conservación merece una apreciación más amplia de algunos de los sesgos y posibles obstáculos comunes a ellos (Soberón *et al.*, 2000). El conjunto de datos de ciencia básica provenientes de museos, colecciones privadas de historia natural, herbarios y la literatura histórica (Newbold, 2010) ofrecen una vasta

fuentes de información sobre las distribuciones de las especies. Los registros a partir de estas fuentes se capturan cada vez más en bases de datos electrónicas y se publican a través de Internet. Estos registros pueden ser muy valiosos en los esfuerzos de conservación (Newbold, 2010), sin embargo, estos datos pueden tener dificultades para localizar información relevante para informar los esfuerzos de conservación y rehabilitación, debido a que son de difícil acceso y en algunos casos costosos (Pocock *et al.*, 2019; Soberón *et al.*, 2000).

La ciencia ciudadana representa un enfoque llamativo para involucrar al público en los esfuerzos científicos en pro de la conservación. El auge de Internet y las innovaciones tecnológicas han acelerado el ritmo en los cuales los proyectos de ciencia ciudadana se han extendido por todo el mundo y han aumentado la cantidad de datos recopilados por los voluntarios (Harrington, 2019). El campo de la ciencia ciudadana es un tipo de investigación científica en rápida evolución que se centra en la colaboración de voluntarios motivados con científicos profesionales, para generar nuevos conocimientos e información (Pocock *et al.*, 2019). Este crecimiento refleja una demanda de hacer que la investigación sea socialmente relevante; desarrollar conjuntos de datos de monitoreo a gran escala y a largo plazo para respaldar las decisiones científicas y de planificación y diseño de investigación (Silvertown, 2009). Los proyectos de ciencia ciudadana más complejos se pueden distinguir de los proyectos más generales que involucran al público y a las partes interesadas por el nivel relativo de participación de los voluntarios, que está influenciado por uno o más factores motivacionales (Bonney *et al.*, 2009). Haklay (2013) por ejemplo, define cuatro niveles de participación de la ciencia ciudadana: nivel 1 (bajo) hasta la 'ciencia ciudadana extrema' (nivel

4, alto). Esta información derivada de los ciudadanos no está estandarizada y a menudo se asocia con una diversidad de sesgos relacionados con la accesibilidad, visibilidad del hábitat y uso heterogéneo del espacio, causando inexactitud en estudios y posiblemente dando lugar a predicciones erróneas si no se consideran (Genet *et al.*, 2003).

6. ANTECEDENTES

La construcción de los presentes antecedentes está vinculada con dos campos de investigación: el uso de los modelos de distribución de especie en la construcción de corredores ecológicos y la evaluación de datos de ciencia básica y ciencia ciudadana en la elaboración de los modelos de distribución.

Un primer antecedente, es la investigación realizada por Rodríguez y colaboradores (2017) titulada “Distribución potencial y conectividad del paisaje: Criterios para reevaluar el grado de amenaza de *Campylorhynchus yucatanicus yucatanicus*, (Aves: Troglodytidae)” en la cual tuvo como objetivo determinar el área de distribución geográfica potencial de *C. yucatanicus* Hellmayr, 1934 (ave endémica de México), además de evaluar la conectividad del paisaje, debido a que hay una pérdida de extensión territorial en Yucatán (México), a causa del incremento de actividades antrópicas. La metodología de esta investigación se dividió en dos partes: 1) identificar la distribución potencial de *C. yucatanicus*, en la cual se usaron 64 registros georreferenciados, un conjunto de variables climáticas y una capa de índice de vegetación de diferencia normalizada. Estos mapas de distribución potencial fueron generados en el programa maxent y validados a través de los valores de AUC. 2) La segunda parte fue

evaluar el grado de conectividad del paisaje utilizando un mapa de tipos de vegetación, uso del suelo, distancia a pueblos y caminos pavimentados. Se establecieron nodos focales haciendo uso de puntos de ocurrencia de las bases de datos del Gbif y eBird, además de registros de campo. Para evaluar la conectividad del paisaje se utilizó la caja de herramientas Circuitscape que es empleada para identificar el grado en el cual el paisaje facilita o impide el movimiento de los individuos. Este antecedente se relaciona con esta propuesta de investigación, debido a la metodología utilizada para la evaluación de la conectividad del paisaje haciendo uso de puntos focales y la realización de un mapa de idoneidad, permite adquirir modelos de resistencia más certeros que se acercan a la realidad de la ecología de la especie.

Otro antecedente es la investigación de Tarabon y colaboradores (2019) realizada en Lyon- Francia en los paisajes urbanos. Tuvo como objetivo proponer un marco metodológico, para calcular el impacto global de un proyecto de desarrollo en el funcionamiento de una red ecológica, y seleccionar las mejores ubicaciones para implantar nuevos parches de hábitat, destinados a mejorar la conectividad del paisaje, aplicado a tres especies representativas de mamíferos terrestres: la ardilla roja, el tejón euroasiático y el erizo europeo. Esta investigación usó una metodología que combina el modelo de distribución especies (MDE) que se desarrolló en el software maxent con el modelo de conectividad funcional (horizontal *graphab*). Esta información contribuye a esta investigación porque la metodología que se implementó en este estudio ayudó a identificar la conectividad del hábitat en la jerarquía de mitigación y a mejorar el diseño del proyecto de desarrollo, gracias a que se determinaron

parches de hábitat con modelización de distribución de especies, usando el modelado de máxima entropía maxent, que permitió identificar hábitats adecuados para cada especie estudiada y crear un índice de adecuación del hábitat de la especie en toda el área de estudio.

Un estudio realizado por los autores Coxen y colaboradores (2017), titulado “Species distribution models for a migratory bird based on citizen science and satellite tracking data”. En este estudio se comparó el rendimiento de los MDE de palomas de cola de banda (*Patagioenas fasciata*, Say 1823) creados con maxent. Estos modelos fueron realizados a partir de dos fuentes de datos de ocurrencias en Nuevo México: aves rastreadas por satélite y observaciones reportadas en el conjunto de datos de eBird. Se usaron 27 variables ambientales para desarrollar el MDE. Los modelos fueron evaluados por pruebas estadísticas (AUC y true skill). Los resultados de este estudio muestran que ambos modelos tuvieron una buena superposición entre las puntuaciones de idoneidad (estadística $D = 0,786$) y los parches de hábitat adecuados. La contribución de esta investigación a este estudio resalta que los programas de ciencia ciudadana pueden facilitar los procesos de conservación, proporcionando una gran cobertura de datos y bajos gastos económicos, para especies que carecen de información. Los resultados sugieren que los datos de ocurrencia de eBird se pueden utilizar con Maxent para crear predicciones precisas de idoneidad de hábitat para especies aviares a nivel estatal.

Finalmente, una investigación que se realizó en Berlín - Alemania por los autores Planillo y colaboradores (2021) titulada “Citizen science data for urban planning: Comparing different sampling schemes for

modelling urban bird distribution” cuyo objetivo fue comparar diversos MDE a escalas espaciales detalladas obtenidas de tres proyectos de ciencia ciudadana con diferentes esquemas de muestreo. Utilizando como ejemplo una especie altamente carismática, el ruiseñor común (*Luscinia megarhynchos*, Brehm 1831). Los MDE se proyectaron con los siguientes datos provenientes de los proyectos de ciencia ciudadana: proyecto estructurado basado en el transecto (breeding bird survey for Berlin), proyecto semiestructurado a escala global (eBird), proyecto local oportunista no estructurado (proyecto nachtigall). Los resultados de este estudio mostraron la comparación de los modelos de distribución de ruiseñores en Berlín basados en tres conjuntos de datos: estructurados, semiestructurados y no estructurados. A esta escala espacial tan fina los dos modelos basados en datos estructurados mostraron patrones de distribución similares, pero el modelo de distribución basado en datos oportunistas no identificó las áreas más relevantes para la especie en las afueras de la ciudad. Los aportes de este estudio a esta investigación son en el modo en que se deben organizar los datos y al análisis de estos datos, de modo que los datos de proyectos de ciencia ciudadana diseñados para este antecedente presentaron sesgos a la hora de modelar la distribución de la especie. En cuanto a los otros grupos de datos como el semiestructurado se acercó a un modelo de referencia, sin embargo, la cantidad de datos disponibles era limitada, lo que no permitía un control total para el esfuerzo de muestreo.

7. METODOLOGÍA

7.1 ÁREA DE ESTUDIO

Este estudio se centra en Colombia que es uno de los puntos que contiene la mayor biodiversidad, debido a su complejidad estructural y ubicación en el norte de Suramérica. Colombia está conformado por seis regiones naturales (Amazonía, Andina, Caribe, Orinoquía Pacífica e Insular), cada una caracterizada por una serie de biomas y ecosistemas. La zona andina es la región más rica en especies, pero también es la más densamente poblada. Esta región consta de tres cadenas montañosas o cordilleras (Oriental, Central y Occidental) que crean múltiples valles interandinos aislados. La zona amazónica es la segunda región biogeográfica más rica del país y posee alrededor del 10% de la selva amazónica. La región Pacífica es una estrecha franja de bosque húmedo y es considerada uno de los puntos calientes de biodiversidad del mundo debido a los altos niveles de endemismo de animales y plantas (Secretaría del convenio de diversidad biológica, 2004; Etter *et al.*, 2006).

7.2 MODELAMIENTO DE ÁREA POTENCIAL

7.2.1 Datos de ocurrencia.

Se evaluó la disponibilidad de datos mediante la búsqueda de registros de ocurrencia *F. deiroleucus* en The Global Biodiversity Information Facility (GBIF), INaturalist y otras bases de datos a través del paquete “spocc” (Chamberlain, 2021). Los datos obtenidos se agruparon en datos de ciencia ciudadana, datos de ciencia básica y datos mixtos (unión entre los datos de ciencia ciudadana y ciencia básica). Una vez clasificados todos los puntos de presencia fueron

revisados y examinados con el fin de realizar un proceso de depuración para evitar la intensidad de sobre muestreo y dependencia, de tal manera eliminar registros irregulares y datos repetidos espacialmente (Saha *et al.*, 2021).

7.2.2 Identificación de variables ambientales y área de procesamiento.

Una vez depurados los registros georreferenciados para cada conjunto de datos, se procedió a la calibración del área de accesibilidad (M), que es un espacio geográfico que ha sido accesible a la especie y a la vez es un elemento importante en la construcción de los MDE, (Barve *et al.*, 2011). Aquí se definió esta zona utilizando los datos de ocurrencia de la especie junto a la capa de ecorregiones de WWF (Olson *et al.*, 2001) que considera las similitudes de los factores bióticos y abióticos. Este enfoque se usará para incluir áreas que podrían ser habitadas por la especie, pero que no contienen registros debido al sesgo de muestreo (Burgman y Fox, 2003). Se usaron 15 variables bioclimáticas obtenidas de la base de datos de Worldclim versión 2.0 a 30 segundos de resolución (Fick y Hijmans, 2017) (Tabla 1). Se descartaron las variables ambientales bio8, bio9, bio18 y bio19 ya que presentan irregularidades espaciales entre píxeles vecinos (Escobar *et al.*, 2014). Con las variables restantes y una vez calculada el área de accesibilidad (M) de la especie, se procedió a cortar las variables ambientales al tamaño del área de la M.

Tabla 1. Variables ambientales utilizadas para predecir la distribución geográfica potencial de *Falco deiroleucus*.

Código	Nombre de la variable bioclimática
BIO1	Temperatura media anual
BIO2	Rango diurno medio
BIO3	Isotermalidad
BIO4	Estacionalidad de la temperatura
BIO5	Temperatura máxima del mes más cálido
BIO6	temperatura mínima del mes más frío
BIO7	Rango de temperatura anual
BIO10	temperatura media del cuarto más cálido
BIO11	temperatura media del cuarto más frío
BIO12	Precipitación anual
BIO13	Precipitación del mes más lluvioso
BIO14	Precipitación del mes más seco
BIO15	estacionalidad de la precipitación
BIO16	Precipitación del cuarto más húmedo
BIO17	Precipitación del trimestre más seco

7.2.3 Modelado, distribución potencial.

Se identificaron variables ambientales correlacionadas debido a que el uso de datos ambientales altamente correlacionados para el MDE afecta el proceso de predicción y sobreestima la distribución (Butler *et al.*, 2012). Para determinar y excluir variables altamente correlacionadas y minimizar el sobreajuste, se usó el método del

coeficiente de correlación de Pearson ($> 0,85$) (Elith *et al.*, 2011), que se ejecutó en el lenguaje R versión 4.1.3 (R Core Team, 2022). utilizando el paquete *ntbox* (Osorio-Olvera *et al.*, 2020). En cada par de variables altamente correlacionadas es necesario eliminar una de ellas; para determinar cuál se eliminó, se realizaron modelos preliminares en el software Maxent (Phillips *et al.*, 2006), para identificar las variables que más aportan y menos aportan al modelo. Este proceso se realizó a través del análisis de la importancia de la permutación (Phillips *et al.*, 2006). Para la realización y calibración de los modelos finales se ejecutaron en el paquete *KUENM* en R (Cobos *et al.*, 2019). Cada proceso de calibración se realizará con base a las variables ambientales, identificadas en el paso anterior. Los diferentes modelos se ejecutarán usando las combinaciones de los features clases: lineal, cuadrática y producto, y 8 multiplicadores de regularización (0,1–1 a intervalos de 0,1 y 2–5 a intervalos de 1). Los modelos candidatos se evaluaron con base en la significancia estadística (ROC parcial), capacidad predictiva (tasas de omisión, $E = 5\%$). Finalmente, se eligieron las mejores parametrizaciones entre los modelos significativos que tenían las tasas de omisión más bajas (por debajo del 5% cuando sea posible) y los valores menores de AICc.

7.3 DISEÑO DE UN CORREDOR ECOLÓGICO

7.3.1 Identificación de nodos focales.

Para identificar las áreas que se deben conectar (nodos focales), según la información proporcionada por cada conjunto de datos, se realizó una reclasificación de los MDE identificando las zonas > 0.85

y posteriormente una intersección entre estas zonas con los puntos de presencia con un buffer de una distancia de 50km.

7.3.2 Diseño de un corredor.

El modelamiento del corredor ecológico se realizó de la siguiente manera: 1) se realizó un mapa de resistencia para la especie *F. deiroleucus*, donde se combinó el resultado de cada MDE, con el ráster de la capa de índice de huella humana para Colombia (Correa Ayram *et al.*, 2020). La combinación de las dos capas genera un nuevo ráster, que se usará como la resistencia que tiene *F. deiroleucus*. 2) Se usó la herramienta “Linkage Mapper” (Kavanagh *et al.*, 2017) en Arcmap versión 10.8 (ESRI, 2011) que permite llevar a cabo análisis territoriales basados en conectividad de espacios naturales mediante corredores ecológicos de menor costo.

7.3.3 Identificación de cuellos de botella.

Identificados los corredores de menor costo se usó la opción “Pinchpoint Mapper” que está incluido en “Linkage Mapper” (McRae y Kavanagh 2011). Una vez que los corredores han sido mapeados, “Pinchpoint Mapper” ejecuta Circuitscape (McRae y Shah 2009) dentro de los corredores resultantes. Esto produce mapas actuales que identifican y mapean cuellos de botella en los corredores de menor costo. También proporciona valores de resistencia efectivos del corredor, una medida de conectividad que complementa las distancias de menor costo.

7.4 EVALUAR EL APOORTE DE LAS FUENTES DE INFORMACIÓN

Se evaluó la eficacia de los aportes por los tres conjuntos de datos realizando una comparación en el aporte del número de datos obtenidos inicialmente con el número de datos depurados incluidos para la realización del modelo de distribución potencial. También se realizó una comparación entre los modelos finales de distribución potencial aplicando el mapa de presencia – ausencia que es calculado a partir del resultado de los MDE, aplicando el umbral “Training omission rate” igual a cero. Se realizaron comparaciones estadísticas en los resultados para cada modelo mediante el paquete de R “ENMTools” (Broennimann *et al.*, 2012) para identificarse si existen diferencias en las idoneidades ambientales, utilizando el estadístico D de Schoener (Schoener, 1968). Finalmente, también se evaluó cómo afecta estos dos conjuntos de datos en la elaboración del mapa de resistencia para realizar la propuesta de conectividad y el número de corredores identificados para cada conjunto de datos.

8. RESULTADOS

8.1 MODELO DE DISTRIBUCIÓN POTENCIAL

8.1.1 Datos de ocurrencia.

Se obtuvieron un total de 471 registros para la especie *Falco deiroleucus*, de los cuales el 80.04% (377 registros) equivalen a datos provenientes de ciencia ciudadana y el 19.96% (94 registros) provienen de datos de ciencia básica (Figura 1-A). Las dos bases de datos que mayor número de registros provee es "Observation" y "Inaturalist", ambas son proyectos de ciencia ciudadana (Anexo 1). Posteriormente se realizó la limpieza espacial y ambiental de estos registros en el cual se usaron diferentes criterios (registros que no tuvieran georreferenciación, datos duplicados y registros atípicos), para reducir la base de datos. Como resultado se obtuvo que la base de datos se redujo a 186 registros, donde el conjunto de datos de ciencia ciudadana es el que más aporta con un 77.42 % (144 registros) y el conjunto de datos de ciencia básica con un 22.58% (42 registros) (figura 1-B). Del total número de datos depurados, las bases de datos que mayor número de registros provee es "Observation" seguido por "Inaturalis", los dos primeros mencionados son proyectos de ciencia ciudadana y el tercero es una base de datos que recopila información de varias fuentes a nivel mundial (Anexo 2).

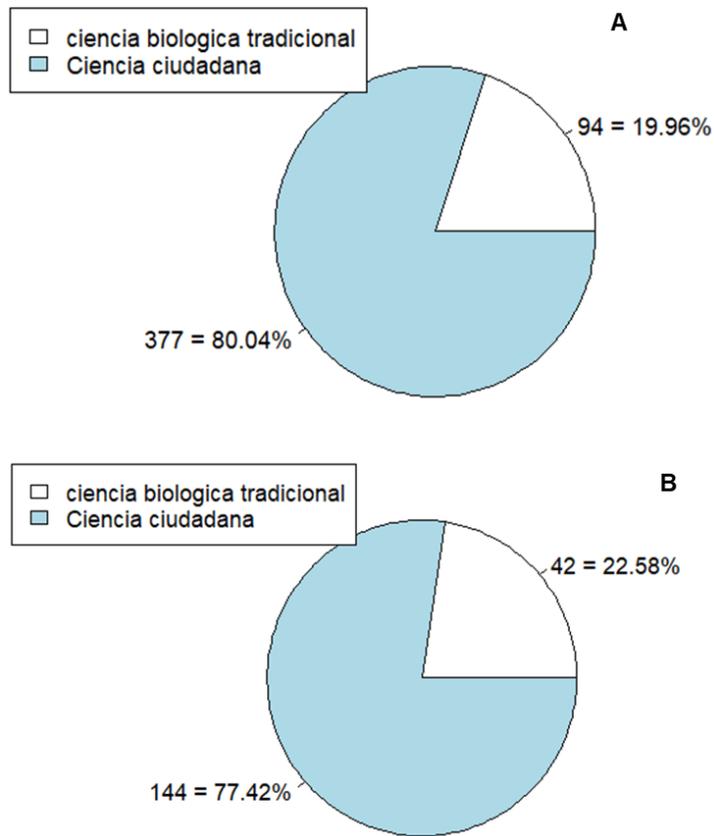


Figura 1. A) Total, de datos georreferenciados para la especie *F. deiroleucus*. B) Total, de datos georreferenciados depurados para la especie *F. deiroleucus*.

Los registros de ciencia ciudadana donde participan personas ajenas a la investigación científica provienen de las siguientes sub-bases de datos: Observation, Inaturalist, xenocanto y naturgucker. Los registros de ciencia básica provienen de 12 diferentes fuentes de información como museos, colecciones biológicas y proyectos ambientales, “UMS patriNat” que es un centro de especialización y datos sobre patrimonio natural es la fuente de información que más proporciona datos con 15 registros.

8.1.2 Calibración del área de accesibilidad (M).

El área de accesibilidad (M) fue calculada con los 186 registros debido a que esta área es necesaria para realizar las evaluaciones finales y la comparación de los modelos. Esta zona concuerda con la distribución de la especie, que abarca desde el sur de México hasta de Brasil (figura 2).

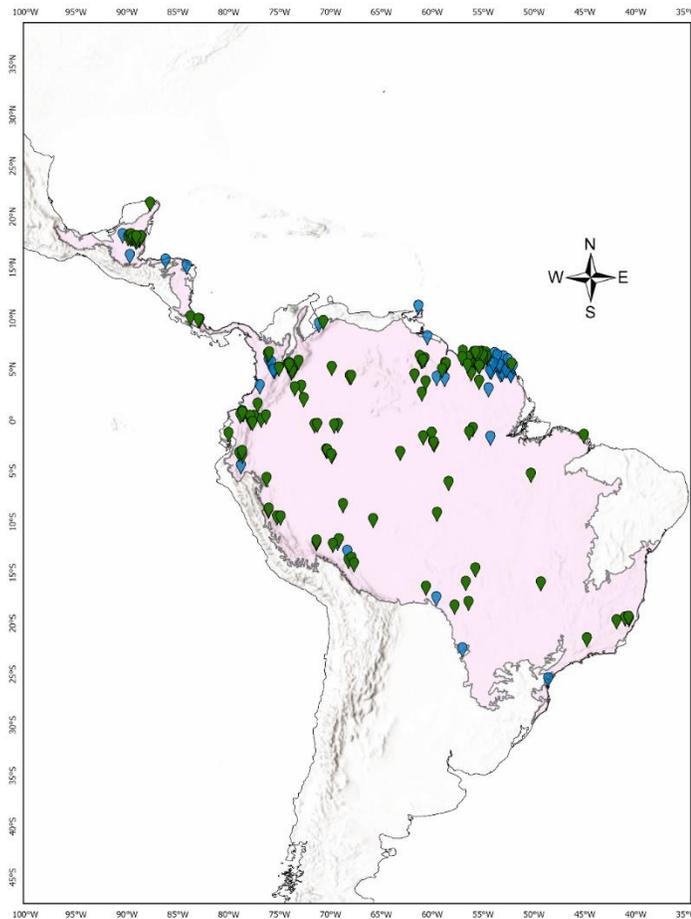


Figura 2. Área de accesibilidad (M) representada de color rosado. Los puntos de color azul hacen referencia al conjunto de datos de ciencia básica y los puntos de color verde a los datos de ciencia ciudadana.

8.1.3 Selección de variables ambientales.

Se encontró que para el conjunto de datos de ciencia básica las variables ambientales que menos aportan al desarrollo del modelo preliminar son bio7, bio10, bio1 y bio 17, todas con un 0% en la importancia de la permutación y las tres variables ambientales que más aportan son bio 13 (26.6%), bio 15 (25 %) y bio 2 (19.1 %) (Tabla 2).

En el conjunto de datos de ciencia básica las variables ambientales bio11 (29.7%), bio6 (24.2) y bio10 (16.3%) son las variables ambientales que más aportan a la ejecución del modelo preliminar. Las variables ambientales bio7, bio1, bio13 y bio16 son las que menos aportan con un 0% en la importancia de la permutación (Tabla 2).

En el conjunto de datos mixto la variable ambiental que menos aportan al modelo preliminar es bio 1 con un 0% en la importancia de la permutación. Las variables ambientales bio 11 (30%), bio 6 (13.7%) y bio 5 (8.6%) son las variables ambientales que más aportan al desarrollo del modelo preliminar (Tabla 2).

Tabla 2. Importancia de la permutación en los modelos preliminares para cada conjunto de datos.

Ciencia básica		Ciencia ciudadana		Datos mixtos	
Variable	Importancia de la permutación	Variable	Importancia de la permutación	Variable	Importancia de la permutación
bio7	0	bio7	0	bio1	0
bio10	0	bio1	0	bio17	0.2
bio1	0	bio13	0	bio3	0.5
bio17	0	bio16	0	bio12	0.5
bio3	0.2	bio12	0.1	bio14	2.3
bio6	0.4	bio17	0.2	bio10	3.8
bio4	0.8	bio3	0.3	bio16	4.9
bio5	0.9	bio14	0.5	bio13	5.5
bio11	2.2	bio2	1.4	bio7	6.4
bio14	6.9	bio5	3.6	bio4	7.4
bio16	7.9	bio15	11.8	bio2	8
bio12	10	bio4	11.8	bio15	8.3
bio2	19.1	bio10	16.3	bio5	8.6
bio15	25	bio6	24.2	bio6	13.7
bio13	26.6	bio11	29.7	bio11	30

Identificado las variables ambientales que aportan para la ejecución de los diferentes modelos, se continuó con la eliminación de algunas variables para mejorar el rendimiento del modelo. Para cada conjunto de datos se seleccionaron todas las variables ambientales que aportaran un $\geq 0.1\%$, esto se realizó con el fin de no sobre ajustar el modelo de distribución potencial. Se calculó el coeficiente de

correlación de Pearson de las variables bioclimáticas para cada conjunto de datos. En la Figura 3, se muestran las correlaciones realizadas en RStudio, utilizando el paquete ntbox, donde los valores mayores a ≥ 0.85 se consideran como una correlación fuerte. Donde hubo correlaciones se seleccionó la variable ambiental que tuviera un mayor porcentaje de importancia de la permutación.

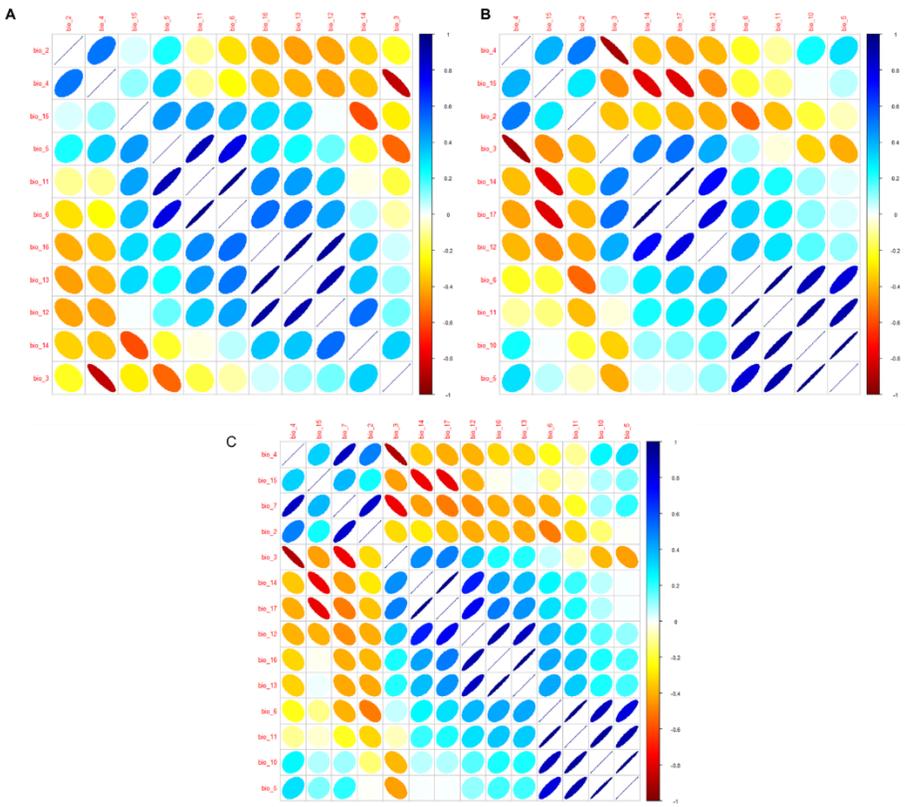


Figura 3. Grafica de correlaciones entre las variables ambientales para cada conjunto de datos. Los colores azul y rojo oscuros que se asemejan a una línea, significa una fuerte correlación. A) Correlaciones ciencia básica. B) Correlaciones ciencia ciudadana. C) Correlaciones datos mixto.

Como resultado se obtuvo que para el conjunto de datos de ciencia básica se seleccionaron 6 variables ambientales para realizar el modelo final (bio11, bio13, bio14, bio15, bio2 y bio4). Para el conjunto de datos de ciencia ciudadana se seleccionaron 6 variables ambientales para el modelo final (bio 11, bio 12, bio 14, bio 15, bio 2, bio 4) y finalmente para el conjunto mixto se seleccionaron 7 variables ambientales (bio11, bio13, bio14, bio15, bio2, bio4 y bio 7) (Figura 7).

8.2 MODELOS DE DISTRIBUCIÓN FINALES

Los tres modelos predijeron hábitats diferentes en áreas con ocurrencia conocida del halcón pechi anaranjado con diferentes valores de idoneidad ambiental. El procedimiento de selección del mejor modelo para cada conjunto de datos produjo diferentes parámetros y diferentes calibraciones en los modelos, (Tablas 3 y 4).

Tabla 3. Resultados de la evaluación de los diferentes modelos para cada conjunto de datos.

Modelo	Aicc	Mean AUC ratio	Auc
Ciencia ciudadana	4597.528	1.157	0.807
Ciencia básica	1325.863	1.205	0.839
Mixto	5963.394	1.129	0.767

Tabla 4. Parámetros que explican el modelo ideal, para cada conjunto de datos.

	Ciencia básica	Ciencia ciudadana	Datos mixtos
Regularization multipliers	0,6	0,5	4
Feature classes	L	Lqp	Lq

8.2.1 MDE ciencia básica.

De los 42 registros georreferenciados se dividieron los datos de manera aleatoria, en el cual el 75% de los datos se destinaron para entrenamiento y el 25% restante de los datos fueron para evaluación. El mejor modelo para este conjunto de datos se explica con un multiplicador de regularizador igual a 0.6 y un feature class I (lineal) (Tabla 4). Este modelo refleja que en Centroamérica (Belice, Guatemala, Honduras, Nicaragua, Costa Rica, Panamá) hay una alta idoneidad ambiental. En Suramérica países como Colombia (centro y oriente), la parte central de Ecuador, al noroccidente de Venezuela, Guyana francesa, Guyana, Surinam, trinidad y Tobago y al suroriente y norte de Brasil existe alta idoneidad ambiental (Figura 4-A). En Colombia el modelo indica que para la región andina del país hay valores medios y altos de idoneidad específicamente en las cordilleras oriental, central y occidental. En la región pacífica también se predicen valores medios y altos. En la región de la amazonia y parte de la región de la Orinoquia se pronostican valores medios de idoneidad ambiental. Los valores con menor idoneidad fueron en las zonas de la región pacífica, parte de la región de la Orinoquia y amazonia (Figura 4-B).

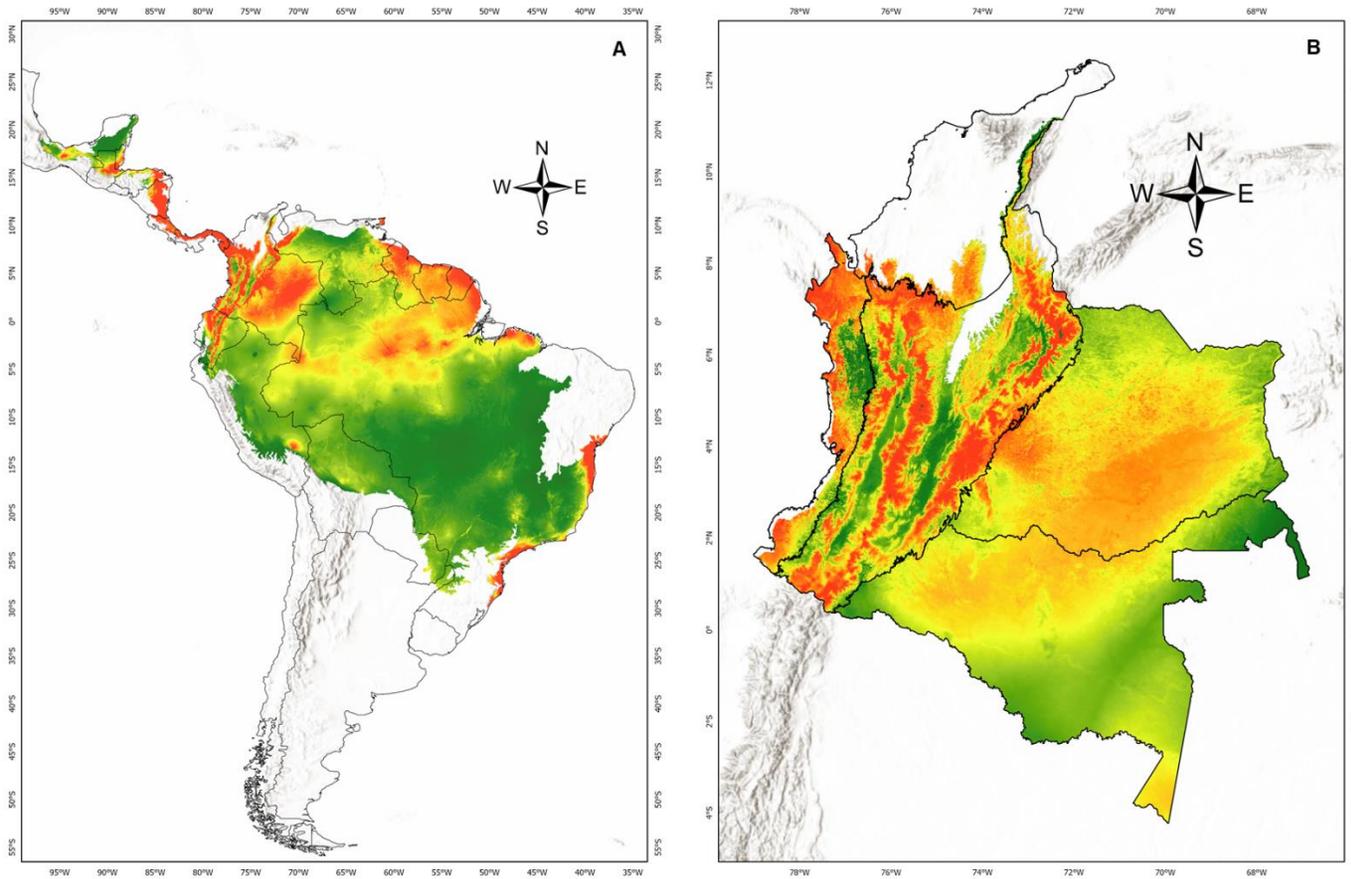


Figura 4. Distribución potencial de *F. deiroleucus*, con el conjunto de datos ciencia básica. Los colores rojos hacen referencia a una alta portabilidad de presencia. Los colores verdes hacen referencia a una baja probabilidad de presencia. A) Área de distribución. B) Colombia.

El modelo de distribución potencial seleccionó modelos de predicción climática de alto rendimiento para las condiciones climáticas adecuadas actuales. Las tres principales variables ambientales que ayudan a explicar las áreas potenciales para el halcón pechi anaranjado son: el rango diurno medio (bio 2) contribuyó con un 45.4 %, seguida por la estacionalidad de la precipitación (bio 15) con un 24.2% y por último la precipitación del mes más lluvioso (bio13) con un 14.3%, fueron los principales factores que afectaron la distribución de *F. deiroleucus*, con una contribución acumulada del 83.9% (Tabla 5).

Tabla 5. Análisis de contribución de variables para el modelo final. Ciencia básica.

Variable	Importancia de la permutación
bio2	45.4
bio15	24.2
bio13	14.3
bio11	7.9
bio14	7.6
bio4	0.6

Los resultados de idoneidad de hábitat para Colombia y en la zona de distribución con el conjunto de datos de ciencia básica muestran la existencia de zonas con altos valores de idoneidad ambiental indicando una calidad de hábitat alta para *F. deiroleucus* (Figura 5). Esto muestra que según el conjunto de datos de ciencia básica la distribución potencial para *F. deiroleucus* en base a la idoneidad ambiental es media - alta con zonas restringidas.

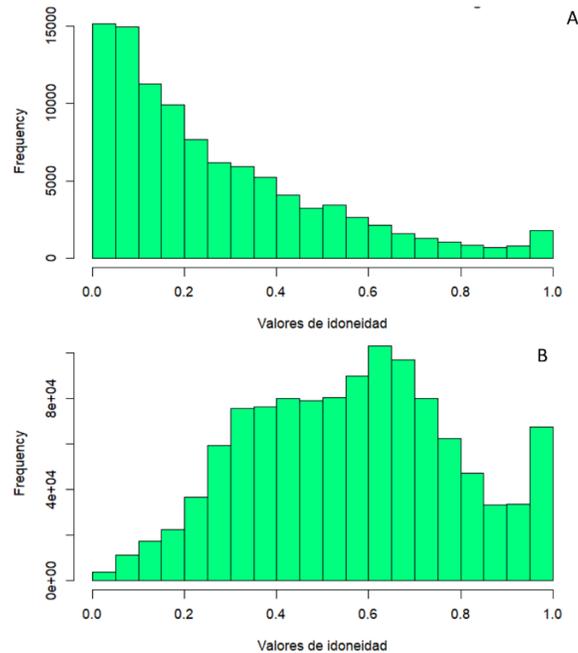


Figura 5. Histogramas de la distribución de densidades de los píxeles en función de la idoneidad de hábitat con el conjunto de datos ciencia básica. A) Área de accesibilidad. B) Colombia.

8.2.2 MDE ciencia ciudadana.

De los 144 registros georreferenciados se dividieron los datos de manera aleatoria, en el cual el 75% de los datos se destinaron para entrenamiento y el 25% restante de los datos fueron para evaluación. El mejor modelo para este conjunto de datos se explica con un multiplicador de regulizador equivalente a 0.5 y un feature class lqp (Lineal, cuadrático y producto) (Tabla 4). Este modelo predijo valores medios y altos en Centroamérica (sur de México, Belice, Guatemala, norte de Honduras, Nicaragua, Costa Rica y Panamá). En Suramérica refleja (centro de Colombia, parte central de Ecuador, sur de Perú, centro de Bolivia, noroccidente de Venezuela, Guyana francesa, Guyana, Surinam, trinidad y Tobago y al suroriente y norte de Brasil)

hay una alta idoneidad ambiental (Figura 7-A). En Colombia el modelo indica que para la región andina del país hay valores medios y altos de idoneidad, específicamente en las cordilleras occidental y central. Este conjunto de datos predijo valores medios en gran parte de la región de la amazonia y al sur de la región de la Orinoquia. Los valores con menor idoneidad fueron en la región pacífica y al norte de la región de la Orinoquia. (Figura 7-B).

El modelo de distribución seleccionó modelos de predicción climática para las condiciones climáticas adecuadas actuales. Las tres principales variables ambientales que ayudan a explicar las áreas potenciales para el halcón pechi anaranjado son: el rango diario medio (bio 2) contribuyó con un 30.3%, seguida por la temperatura mínima del mes más frío (bio 4) con un 21.1 %, y temperatura media del trimestre más frío (bio11) con un 21 %, fueron los 3 principales factores que afectaron la distribución de *F. deiroleucus*, con una contribución acumulada del 72.4% (Tabla 6).

Tabla 6. Análisis de contribución de variables para los modelos finales.
Ciencia ciudadana.

Variable	Importancia de la permutación
bio2	30.3
bio4	21.1
bio11	21
bio15	13.3
bio14	8.9
bio12	5.4

Los datos de ciencia ciudadana dan como resultado, que en el área de accesibilidad y en Colombia prevalece un alto número de valores de alta idoneidad en zonas muy específicas, indicando una calidad de hábitat alta para *F. deiroleucus* (Figura 7).

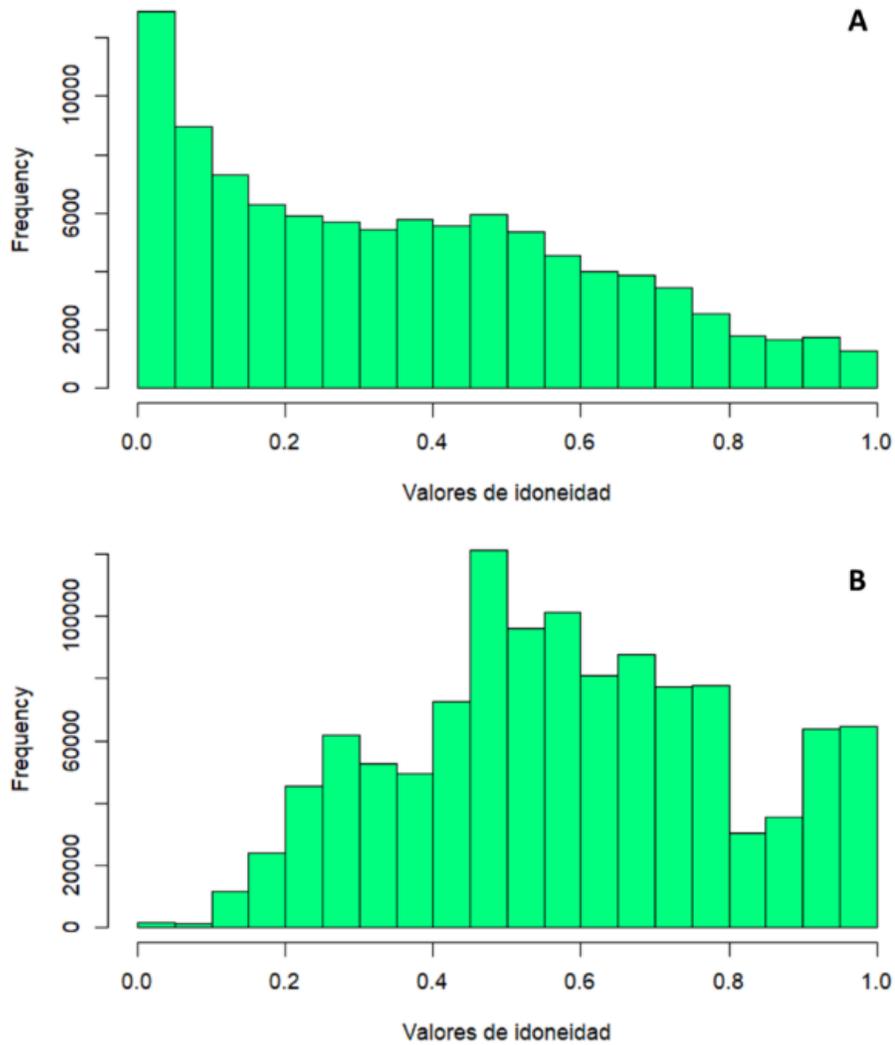


Figura 6. Histogramas de la distribución de densidades de los píxeles en función de la idoneidad de hábitat con el conjunto de datos ciencia básica. A) Área de accesibilidad. B) Colombia.

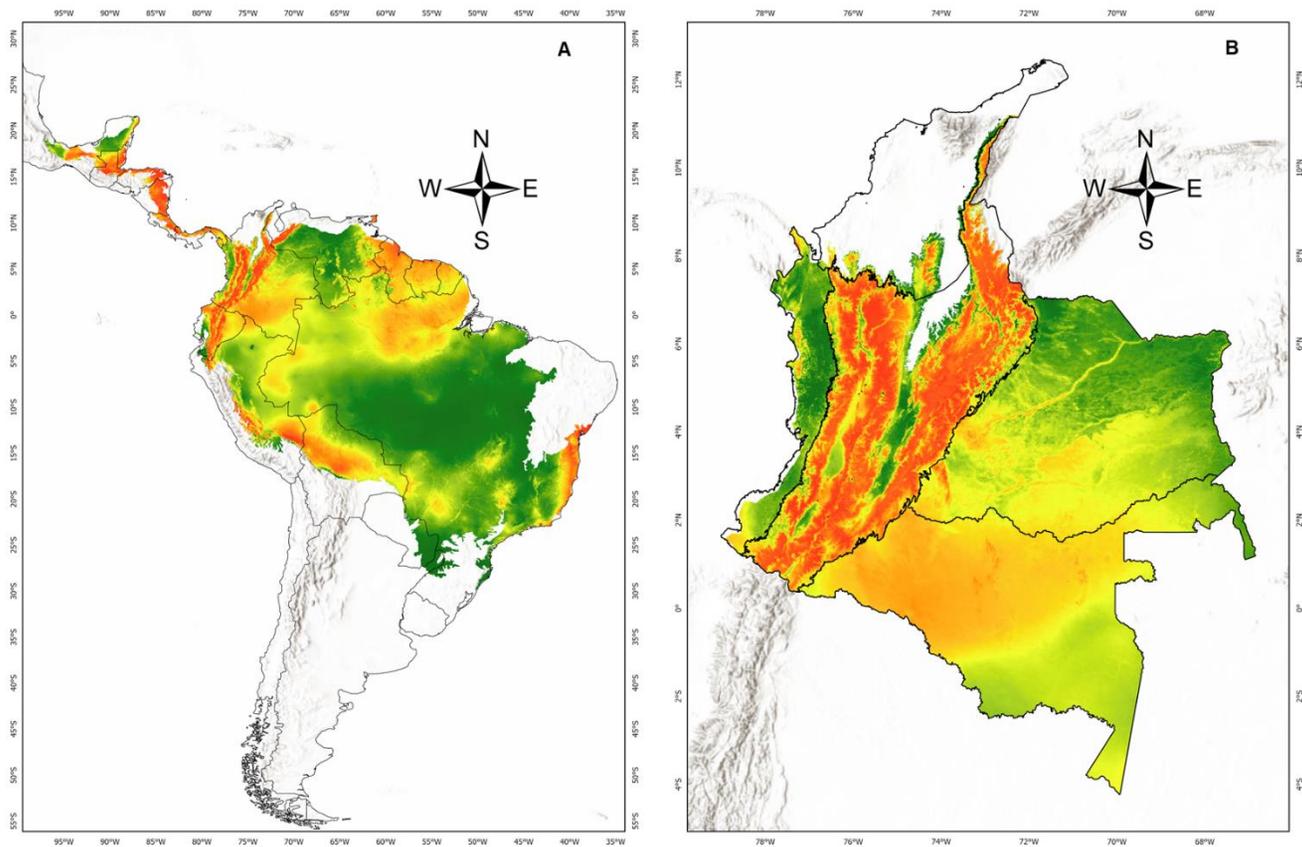


Figura 7. Distribución potencial de *F. deiroleucus*, con el conjunto de datos ciencia ciudadana. Los colores rojos hacen referencia a una alta portabilidad de presencia. Los colores verdes hacen referencia a una baja probabilidad de presencia. A) Área de accesibilidad. B) Colombia.

8.2.3 MDE datos mixto.

Al igual que los anteriores modelos de los 186 registros georreferenciados los datos fueron divididos de manera aleatoria, en el cual el 75% de los datos se destinaron para entrenamiento y el 25% restante de los datos fueron para evaluación. El mejor modelo para este conjunto de datos se explica con un multiplicador de regularizador igual a 4 y un feature class lq (lineal y cuadrático) (Tabla 4). Este modelo refleja que en Centroamérica (sur de México, Belice, Guatemala, Honduras, Nicaragua, Costa Rica y Panamá) hay una alta idoneidad ambiental. En Suramérica países como Colombia, Ecuador, al noroccidente y oriente de Venezuela, Guyana francesa, Guyana, Surinam, trinidad y Tobago y al suroriente y norte de Brasil existe alta idoneidad ambiental (Figura 8-A). En Colombia el modelo indica que para la región andina del país hay valores altos de idoneidad específicamente en las cordilleras oriental, central y occidental. En la región pacífica también se predicen valores medios de idoneidad ambiental. En la región de la amazonia y parte de la región de la Orinoquia se pronostican valores medios de idoneidad ambiental. Los valores con menor idoneidad fueron en las zonas de la región pacífica y parte de la región de la Orinoquia (Figura 8-B).

El modelo de distribución potencial seleccionó modelos de predicción climática de alto rendimiento para las condiciones climáticas adecuadas actuales. Las tres principales variables ambientales que ayudan a explicar las áreas potenciales para el halcón pechi anaranjado son: el rango diurno medio (bio 2) contribuyó con un 24.9 %, seguida por la estacionalidad de la precipitación (bio 15) con un 22.1% y por último la precipitación del mes más lluvioso (bio11) con un 19.9%, fueron los principales factores que afectaron la distribución de *F. deiroleucus*, con una contribución acumulada del 66.9% (Tabla 7).

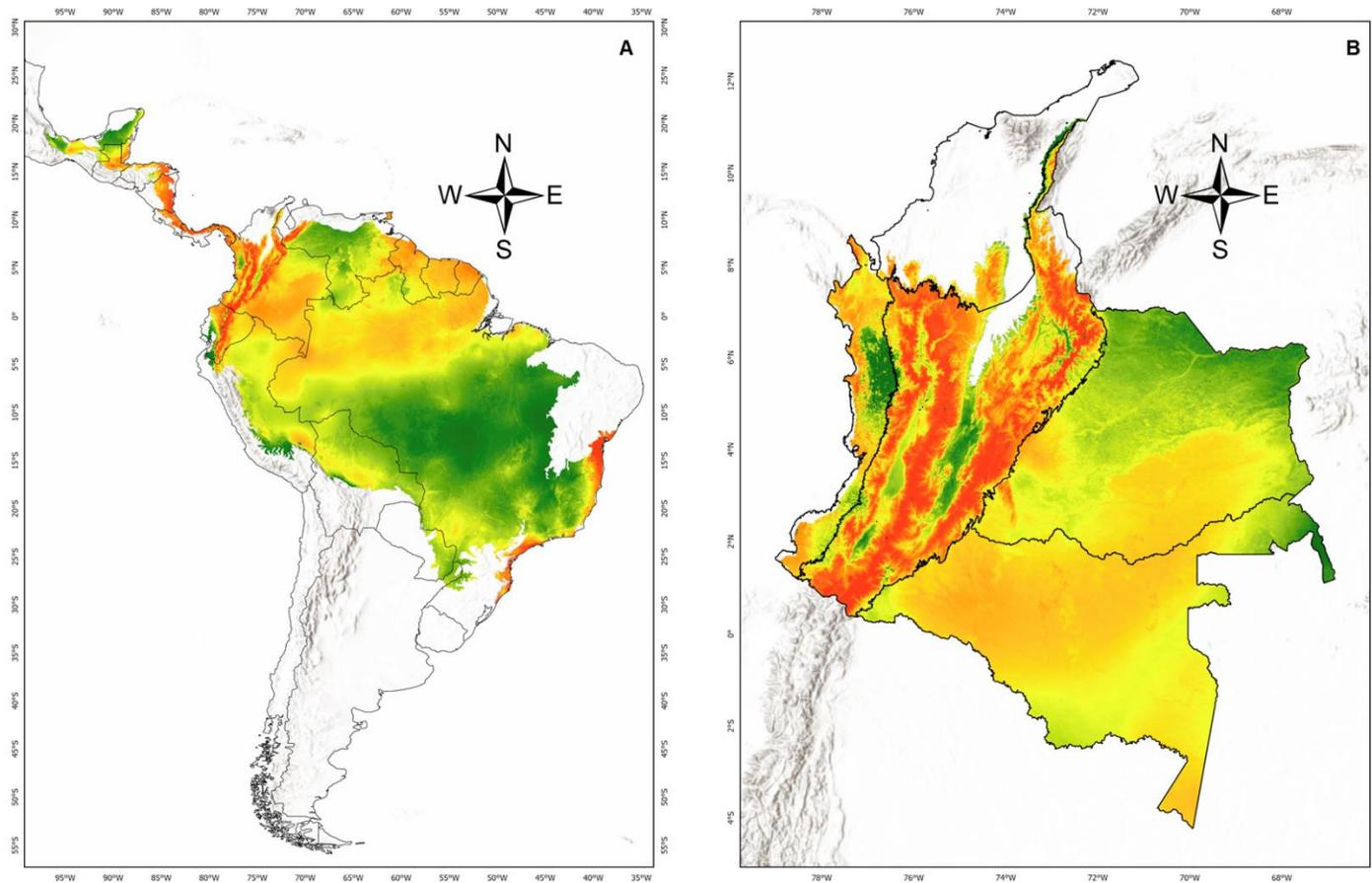


Figura 8. Distribución potencial de *F. deiroleucus*, con el conjunto de datos mixto. Los colores rojos hacen referencia a una alta portabilidad de presencia. Los colores verdes hacen referencia a una baja probabilidad de presencia. A) Área de accesibilidad. B) Colombia.

Tabla 7. Análisis de contribución de variables para los modelos finales.
Datos mixtos.

Variable	Importancia de la permutación
bio2	24.9
bio15	22.1
bio11	19.9
bio7	14.7
bio4	9.2
bio14	7.4
bio13	1.9

Los resultados de idoneidad de hábitat para Colombia y en la zona de distribución con el conjunto de datos mixto muestran la existencia de zonas con altos valores de idoneidad ambiental indicando una calidad de hábitat alta para *F. deiroleucus* (Figura 9). Esto muestra que según el conjunto de datos Mixto la distribución potencial para *F. deiroleucus* en base a la idoneidad ambiental es media alta con zonas muy amplias.

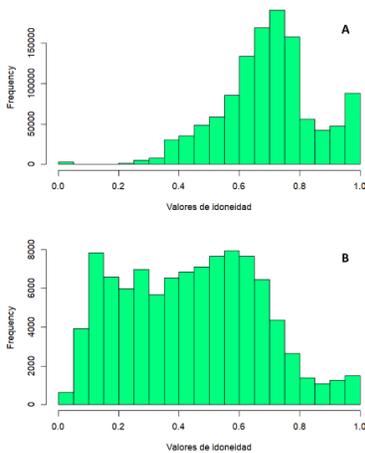


Figura 9. Histogramas de la distribución de densidades de los píxeles en función de la idoneidad de hábitat con el conjunto de datos Mixto. A) Área de accesibilidad. B) Colombia.

8.3 ÁREA DE CONECTIVIDAD

La huella espacial humana se basa en el nivel de modificación del hábitat, debido a la extracción de recursos y los usos y manejo predominantes de la tierra (uso de la tierra, densidad de la población rural, distancia a las carreteras, distancia a los asentamientos, índice de fragmentación) y años de intervención en ecosistemas (según el cambio histórico en relación con un mapa de los tipos originales de vegetación) (Correa Ayram *et al.*, 2020).

8.3.1 Resistencia *F. deiroleucus*. Ciencia básica.

El modelo de distribución potencial realizado por los datos providentes de ciencia básica junto a la huella humana para Colombia, Identificó una gran parte de la superficie terrestre presenta valores de baja resistencia (color verde). Estas zonas corresponden a lugares donde existe una mayor probabilidad de encontrar menos conflictos ambientales con la especie *Falco deiroleucus* y a sitios con menor presencia antrópica. Estas zonas están ubicadas en la región pacífica, en la región andina (cordillera occidental, central y oriental) y gran parte de las regiones amazónica y Orinoquía. Las zonas donde existe mayor resistencia (Color verde) hace referencia a lugares intervenidos por el ser humano y sitios con mayor probabilidad de encontrar conflictos ambientales en contra del halcón pechi anaranjado. Estas zonas están en las partes bajas de la región de los andes, unas pequeñas zonas al noroccidente de la región de la Orinoquía, al igual que en la región de la amazonia, con valores moderados y altos de resistencia (Figura 10-A).

8.3.2 Resistencia *F. deiroleucus*. Ciencia ciudadana.

El modelo de distribución potencial realizado por los datos providentes de ciencia ciudadana junto a la huella humana para Colombia, Identificó una gran

parte de la superficie terrestre presenta valores de baja resistencia (color rojo). Estas zonas corresponden a lugares donde existe una mayor probabilidad de encontrar menos conflictos ambientales con la especie *Falco deiroleucus* y a sitios con menor presencia antrópica. Estas zonas están ubicadas en la región andina (cordillera occidental, sur de la cordillera central y sur – norte de la cordillera oriental), gran parte de la región amazónica y por último al sur de la región de la Orinoquia. Las zonas donde existe mayor resistencia (Color verde) hace referencia a lugares intervenidos por el ser humano y sitios con mayor probabilidad de encontrar conflictos ambientales en contra del halcón pechi anaranjado. Estas zonas están en las partes bajas de la región de los andes, norte y centro de la región de la Orinoquia y en la región pacífica, con valores moderados y altos de resistencia (Figura 10-B).

8.3.3 Resistencia *F. deiroleucus*. Datos mixtos.

El modelo de distribución potencial realizado por el conjunto de datos mixto junto a la huella humana para Colombia, identificó una gran parte de la superficie terrestre presenta valores de baja resistencia (color rojo). Estas zonas corresponden a lugares donde existe una mayor probabilidad de encontrar menos conflictos ambientales con la especie *Falco deiroleucus* y a sitios con menor presencia antrópica. Estas zonas están ubicadas en la región andina (cordillera occidental, sur de la cordillera central y sur – norte de la cordillera oriental), gran parte de la región amazónica, al sur de la región de la Orinoquia y por último en la región del pacífica. Las zonas donde existe mayor resistencia (Color verde) hace referencia a lugares intervenidos por el ser humano y sitios con mayor probabilidad de encontrar conflictos ambientales en contra del halcón pechi anaranjado. Estas zonas están en las partes bajas de la región de los andes, norte y centro de la región de la Orinoquia, con valores moderados y altos de resistencia (Figura 10-C).

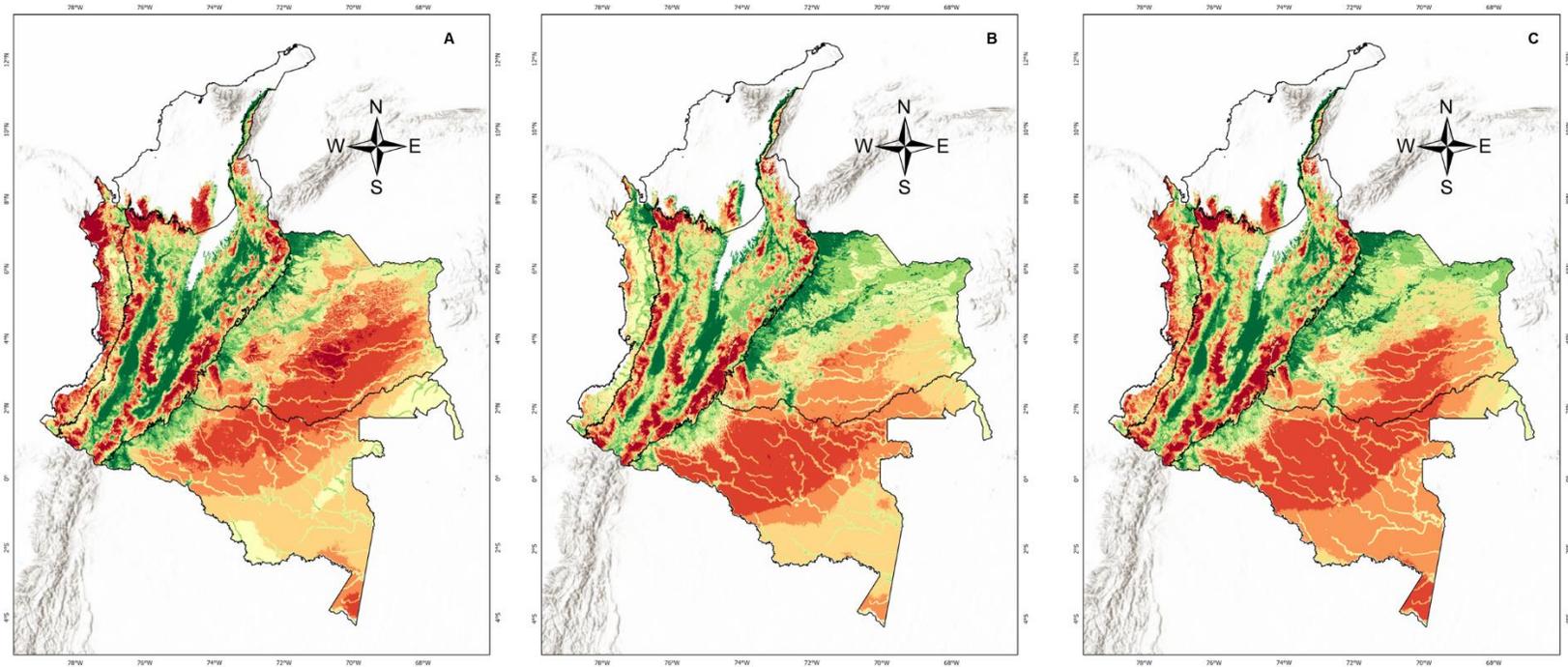


Figura 10. Mapa de resistencia para la especie *F. deiroleucus*, A) datos de ciencia básica. B) Ciencia ciudadana. C) datos mixtos. Los colores rojos indican una baja resistencia. Los colores verdes indican una alta resistencia.

8.3.4 Identificación de nodos focales.

Los registros provenientes de ciencia básica identificaron 12 núcleos de conservación, donde están presentes 11 ecosistemas diferentes que tienen una alta probabilidad que habite *F. deiroleucus*. Los registros provenientes de ciencia ciudadana identificaron 9 núcleos de conservación, donde están presentes 14 ecosistemas diferentes que tienen una probabilidad muy alta de hábitat idóneo para la especie *F. deiroleucus*. Por último los datos mixtos identificaron 19 núcleos de conservación, donde hay presencia de 16 ecosistemas diferentes aptos para el hábitat del halcón pechi anaranjado (Tabla 8). Los diferentes núcleos de conservación y ecosistemas están agrupados en diferentes zonas dentro de la región andina de Colombia. Dependiendo del conjunto de datos estas zonas son claves para la conservación del *F. deiroleucus* y es necesario llevar una conexión entre ellas (Figura 11).

Dentro de cada grupo de nodos focales o núcleos de conservación se calculó la centralidad de cada uno de ellos, con el fin de identificar cual es el nodo más importante dentro de cada conjunto de datos. Para el conjunto de datos de ciencia básica los tres principales parches que contiene una mayor centralidad es el nodo focal 10 que se ubicada en la región andina, en la cordillera central. El siguiente nodo con mayor centralidad es el nodo focal 9, ubicado en la región andina, en la cordillera oriental, y finalmente el nodo 11 que también está ubicado en la región andina, en la cordillera oriental. Para los datos de ciencia ciudadana los tres principales nodos que contienen una mayor centralidad son el nodo focal 7, ubicado en la región andina en la cordillera oriental. El siguiente nodo con mayor centralidad para este conjunto de datos es el 6 que está ubicado al norte de la cordillera central dentro de la región andina. Por último, en el conjunto de datos mixto, los tres nodos con

mayor centralidad son el nodo focal 18, ubicado al norte de la cordillera central dentro de la región andina. Posteriormente el nodo 13 contiene una mayor centralidad para este conjunto de datos y se ubica en la cordillera oriental en la región andina 1. Finalmente, el nodo 1 ubicado al norte de la cordillera occidental dentro de la región andina es el tercer nodo con mayor centralidad para el conjunto de dato mixto (Anexo 2). Para cada conjunto de datos, las áreas con baja centralidad tenían pocas conexiones, por lo tanto, deben considerarse vulnerables como con mayor riesgo de aislarse.

Tabla 8. Caracterización de los ecosistemas presentes en los nodos focales según cada conjunto de datos.

Ecosistema	Ciencia básica	Ciencia ciudadana	Mixto
Agroecosistemas Cafeteros	X	X	X
Agroecosistemas campesinos mixtos	X	X	X
Agroecosistemas empresariales de secano	X		X
Agroecosistemas Lecheros		X	
Áreas Rurales Intervenidoas no diferenciadas (<20% de ecosistemas originales remanentes)	X	X	X
Áreas Rurales Intervenidoas no diferenciadas (20 a 50% de ecosistemas originales remanentes)	X	X	X
Áreas Urbanas		X	X
BBD Altoandinos Húmedos y de Niebla	X	X	X
BBD Altoandinos secos		X	X
BMD Andinos y Altoandinos de Roble	X	X	X
BMD Húmedos Andinos	X	X	X
Bosques húmedos Sub-andinos			X
Bosques Plantados (Pino, Eucalipto, Cipriano)	X	X	X
Humedales del altiplano Cundiboyacense			X
Matorrales xerófilos y Altoandinos		X	
Paramos húmedos	X	X	X
Paramos Secos		X	X
Super Paramo	X		x

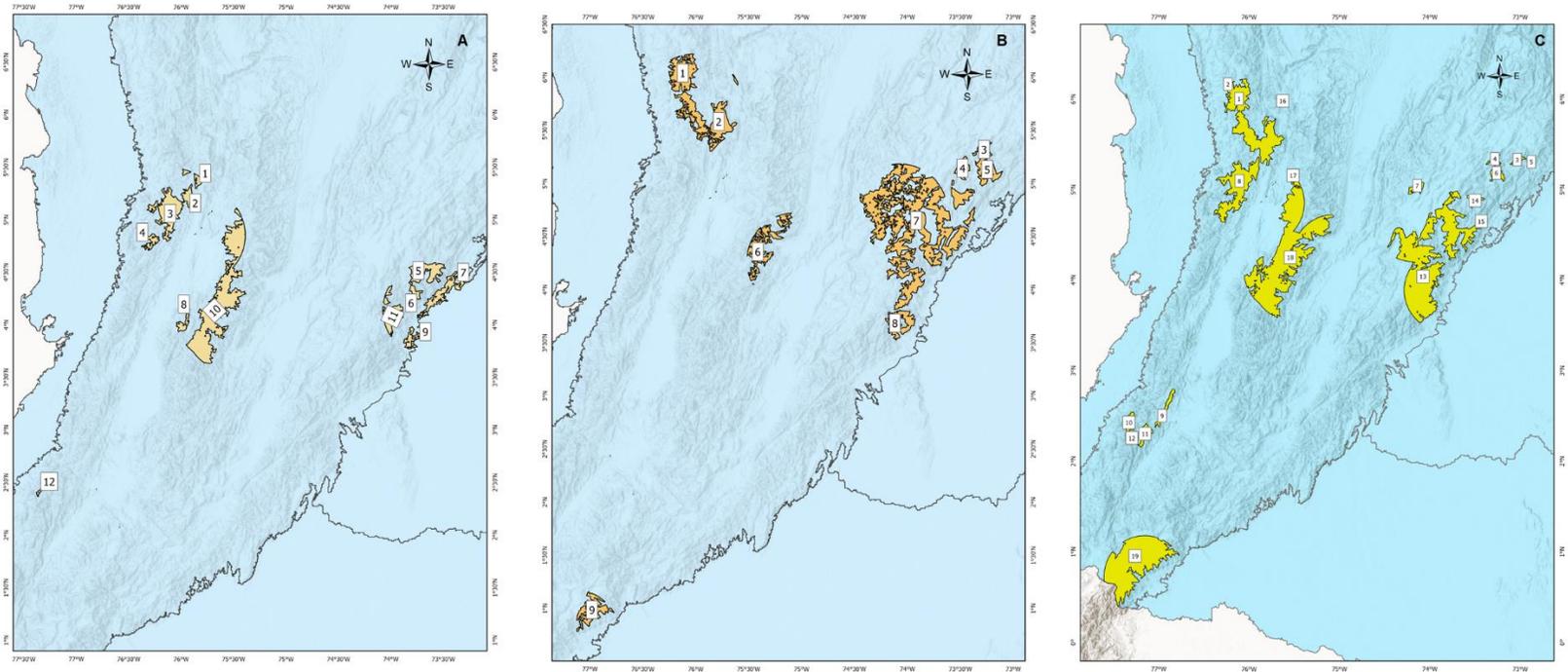


Figura 11. Identificación de nodos focales para *F. deiroleucus* según cada conjunto de datos. A) Ciencia básica. B) Ciencia ciudadana. C) Mixto.

8.3.5 Modelamiento de conectividad funcional.

Las probabilidades entre los vínculos de las áreas focales se resumieron en números diferentes de conectores lineales dependiendo el conjunto de datos, los cuales son las rutas de menor costo entre las áreas focales, que simbolizan rutas con las condiciones mejores y el menor costo en distancia y esfuerzo por donde *F. deiroleucus* podría moverse entre los nodos focales. Teniendo en cuenta todas las combinaciones posibles, se seleccionaron las rutas que tienen menor costo (LCPs), dibujadas en forma de polilíneas en una capa vectorial (shapefile) con el correspondiente valor de las distancias efectivas y de mínimo coste. Los modelos de menor costo generan mapas del costo acumulativo que resaltan los corredores de menor costo y las rutas de menor costo entre los sitios de parches.

Se presentan de manera apartada los resultados para los tres conjuntos de datos en cuanto a número, longitud e integridad de los enlaces. En la tabla 10, se muestra los resultados y la comparación en cuanto al número máximo de corredores entre los parches de hábitat para cada conjunto de datos (enlaces), las márgenes de distancia euclídea (menor distancia y mayor distancia en metros), el promedio de las distancias euclidianas de todos los corredores, el rango de la distancia costo (menor distancia costo y mayor distancia costo).

Los corredores identificados con el conjunto de datos de ciencia básica distinguieron una alta concentración de ecosistemas de bosques húmedos y agroecosistemas que suman el 61.11%. Otros ecosistemas naturales que hacen parte importante de la conectividad son: los bosques húmedos, paramos húmedos y bosques altoandinos que suman un 12.5%. El porcentaje restante son ecosistemas intervenidos o modificados por el ser humano como

los agroecosistemas campesinos, empresariales de secano, cañeros entre otros (Figura 12-A).

El mapa de resistencia realizado con el conjunto de datos de ciencia básica, identificaron 21 corredores de menor costo entre los nodos focales (Figura 12-B). La distancia euclídea media fue de 82.18 km (min = 0.35 km y max = 409.82 km), el promedio de la distancia de la ruta de menor costo (LCP) fue de 100.17 km (min = 0.922 km y max = 551.45 km). El corredor con valor más alto en extensión fue el 19, que conecta los nodos focales 9 a 12 (Euc = 409.821 km, LCP = 551.459 km). El corredor con distancias más cortas son los que conectan los nodos focales 5 a 6 (Euc = 0.35 km, LCP = 0.92 km) (Tabla 10).

Los cuellos de botella y las barreras se distribuyeron principalmente al occidente de la región andina, en la cordillera occidental. Los corredores que no tuvieron cuellos de botella fueron el corredor 10 que conecta las áreas 4 y 8, el corredor 21 que une las áreas 8 a 10.

Las zonas donde hay mayores cuellos de botellas dentro de los corredores fueron: el corredor 12 que une las áreas 4 a 12, el corredor 18 que conecta las áreas 6 a 11, el corredor 22 que une las zonas 8 a 12, el corredor 23 que conecta las áreas 9 a 10, el corredor 25 que une las áreas 9 a 12 y finalmente el corredor 27 que conecta las áreas 10 a 12 (Figura 13).

Tabla 9. Parámetros de los corredores del conjunto de datos de ciencia básica. Los corredores están en orden descendente según la extensión del corredor.

Código del corredor	Punto de Inicio	Punto de llegada	Distancia euclidiana en Km	Longitud en Km del corredor
19	9	12	409821	551.459
8	4	12	271636	315.694
21	10	12	212488	258.92
16	8	12	216976	252.051
17	9	10	174807	201.844
20	10	11	145831	187.277
7	4	8	73428	83.638
6	3	10	49253	54.388
4	2	10	42478	50.828
2	1	10	44523	47.295
12	6	11	15712	17.663
14	7	11	15255	16.069
18	9	11	12601	15.37
13	7	9	10714	14.513
15	8	10	9367	10.914
11	6	7	6994	7.829
10	5	7	5367	7.065
5	3	4	4095	4.613
1	1	2	3168	4.073
3	2	3	922	1.304
9	5	6	350	0.922

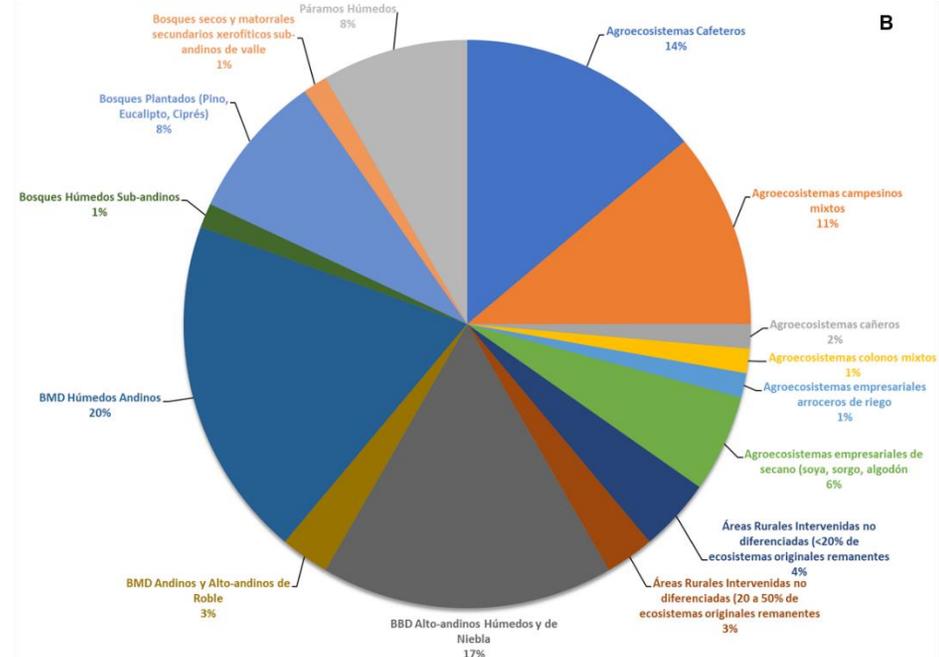
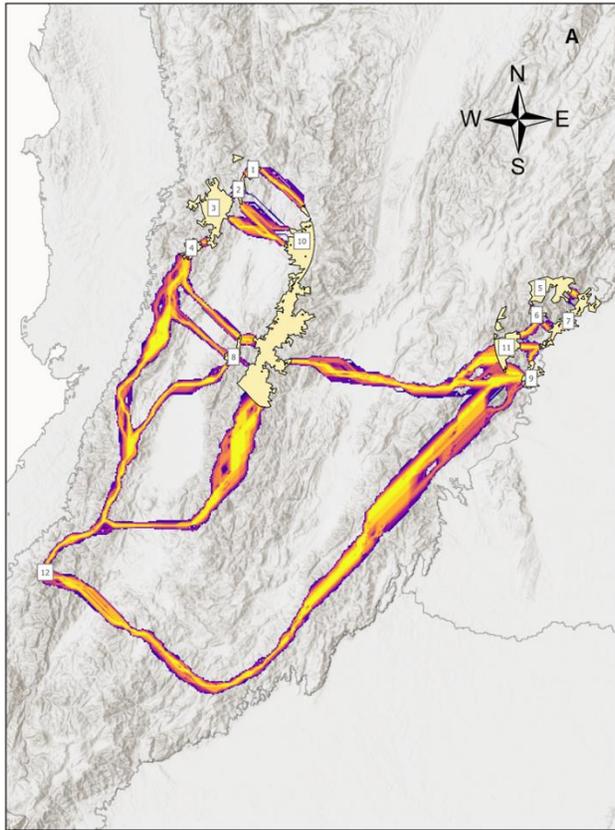


Figura 12. Corredores de menor costo entre áreas prioritarias (números) para conservar la especie *F. deiroleucus* en Colombia según los datos de ciencia básica. A) Las rutas con menor resistencia se muestran en amarillo. B) Ecosistemas presentes en las rutas de menor costo.

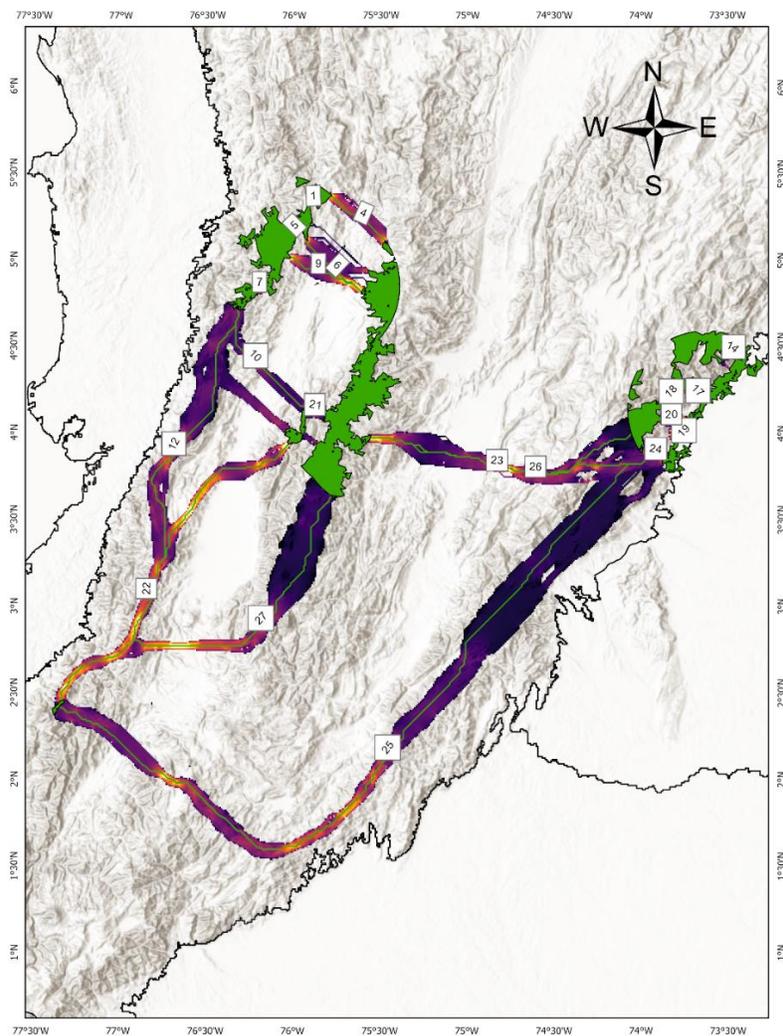


Figura 13. Cuellos de botella en los corredores que conectan las áreas prioritarias para la conservación de *F. deiroleucus* en Colombia, según los datos de ciencia básica. Los colores amarillos son los cuellos de botellas. Los números son las etiquetas de los corredores de menor costo.

Los corredores identificados por el conjunto de datos de ciencia ciudadana distinguieron una alta concentración de ecosistemas alto andinos húmedos y de niebla junto a agroecosistemas que suman el 48%. Otros ecosistemas naturales que hacen parte importante de la conectividad son: los bosques

andinos, sub andinos, paramos húmedos, bosques secos y matorrales que suman un 23 %. El porcentaje restante son ecosistemas intervenidos o modificados por el ser humano como los agroecosistemas colonos mixtos, cañeros, empresariales entre otros (Figura 13-A).

El mapa de resistencia realizado con el conjunto de datos de ciencia ciudadana, identificaron 15 corredores de menor costo entre los nodos focales (Figura 25). La distancia euclídea media fue de 113.14 km (min = 0.92 km y max = 476.91 km), el promedio de la distancia de la ruta de menor costo (LCP) fue de 128.22 km (min = 1.84 km y max = 564.84 km). El corredor con valor más alto en extensión fue el 5, que conecta los nodos focales 2 a 9 (Euc = 476.91 km, LCP = 564.84 km). El corredor con distancias más cortas son los que conectan los nodos focales 1 a 2 (Euc = 0.92 km, LCP = 1.84 km) (Tabla 11).

Los cuellos de botella y las barreras se distribuyeron principalmente al norte de la región andina, en las tres cordilleras (occidental, oriental y central). Los corredores que no tuvieron cuellos de botella fueron el corredor 10 que conecta las áreas 4 y 5, el corredor 16 que une las áreas 7 a 8. Las zonas donde hay mayores cuellos de botellas dentro de los corredores fueron: el corredor 5 que une las áreas 2 a 9, el corredor 4 que conecta las áreas 2 a 7, el corredor 15 que une las zonas 6 a 9, el corredor 14 que conecta las áreas 6 a 8 y finalmente el corredor 13 que conecta las áreas 6 a 7 (Figura 26).

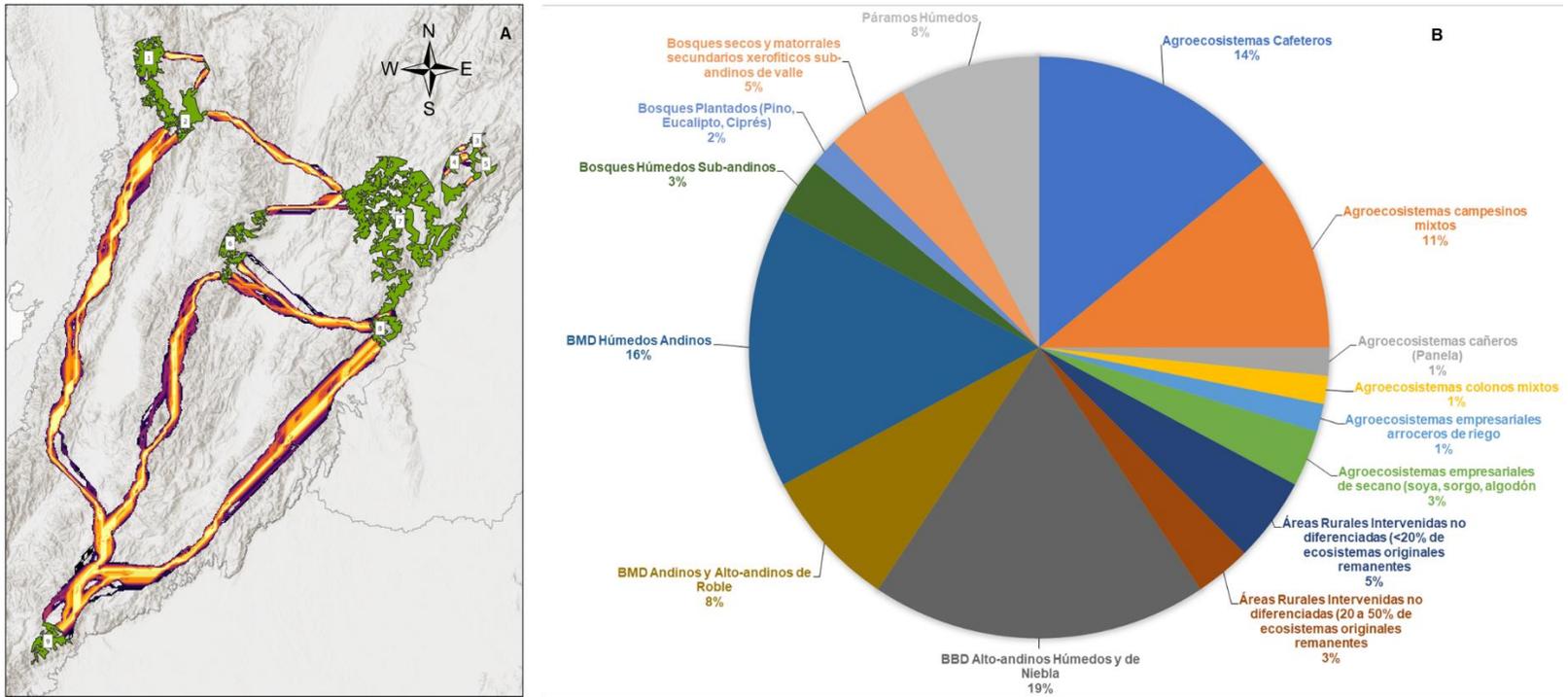


Figura 14. Corredores de menor costo entre áreas prioritarias (números) para conservar la especie *F. deiroleucus* en Colombia según los datos de ciencia ciudadana. A) Las rutas con menor resistencia se muestran en amarillo. B) Ecosistemas presentes en las rutas de menor costo.

Tabla 10. Parámetros de los corredores del conjunto de datos de ciencia ciudadana. Los corredores están en orden descendente según la extensión del corredor.

Código del corredor	Punto de Inicio	Punto de Llegada	Distancia euclidiana en Km	Longitud en Km del corredor
5	2	9	476914	564.846
17	8	9	409146	447.825
15	6	9	363696	413.202
4	2	7	148459	161.069
14	6	8	134712	150.88
13	6	7	73275	79.013
2	1	6	36304	40.126
3	2	6	19899	23.964
12	5	7	8959	10.057
10	4	5	6996	8.528
6	3	4	6999	7.988
11	4	7	7089	7.829
16	7	8	2062	3.532
7	3	5	1709	2.609
1	1	2	922	1.845

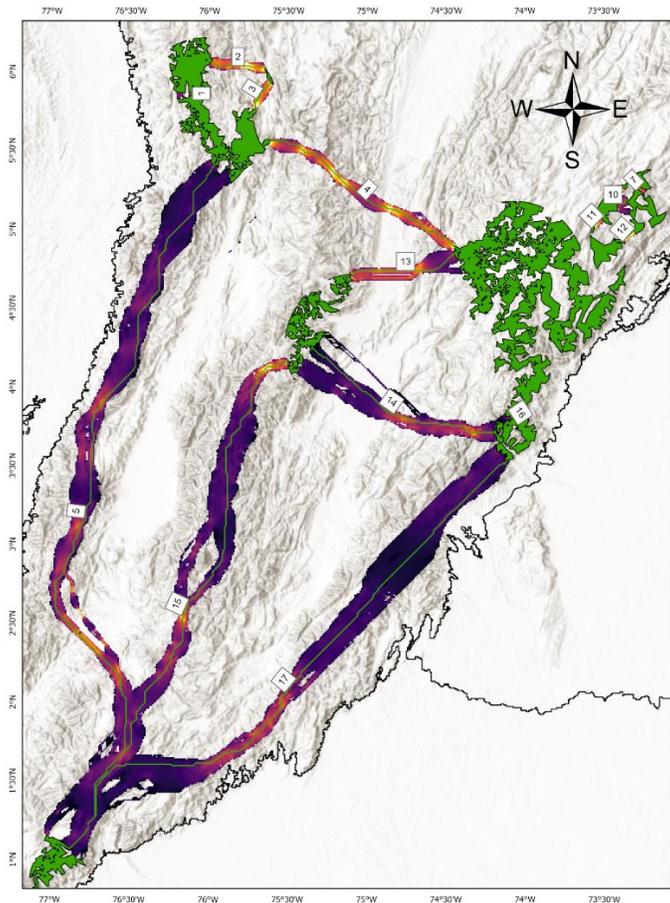


Figura 15. Cuellos de botella en los corredores que conectan las áreas prioritarias para la conservación de *F. deiroleucus* en Colombia, según los datos de ciencia básica. Los colores amarillos son los cuellos de botellas. Los números son las etiquetas de los corredores de menor costo.

Los corredores identificados por el conjunto de datos mixto hay una alta concentración de ecosistemas alto andinos húmedos y de niebla junto a agroecosistemas campesinos mixto que suman el 48%. Otros ecosistemas naturales que hacen parte importante de la conectividad son: ecosistemas alto andinos secos y húmedos, paramos secos que suman un 17%. El porcentaje restante son ecosistemas intervenidos o modificados por el ser humano como

áreas rurales intervenidas, agroecosistemas colonos, empresariales entre otros (Figura 27).

El mapa de resistencia realizado con el conjunto de datos mixto, identificaron 36 corredores de menor costo entre los nodos focales (Figura 28). La distancia euclídea media fue de 75.05 km (min = 1.54 km y max = 306.28 Km), el promedio de la distancia de la ruta de menor costo (LCP) fue de 88.71 Km (min = 3.53 Km y max = 336.73 Km). El corredor con valor más alto en extensión fue el 48, que conecta los nodos focales 18 a 19 (Euc = 306.28 Km, LCP = 336.73 Km). El corredor con distancias más cortas son los que conectan los nodos focales 1 a 8 (Euc = 1.54 Km, LCP = 3.53 km) (Tabla 12). Los cuellos de botella y las barreras se distribuyeron principalmente al norte de la región andina, en la cordillera oriental. Los corredores que no tuvieron cuellos de botella fueron el corredor 3 que conecta las áreas 1 y 8, el corredor 16 que une las áreas 7 a 8, el corredor 28 que conecta las áreas 8 a 9, el corredor 30 que une las zonas 8 a 18 y finalmente el corredor 43 que conecta las áreas 13 a 18. Las zonas donde hay mayores cuellos de botellas dentro de los corredores fueron: el corredor 12 que une las áreas 3 a 15, el corredor 15 que conecta las áreas 4 a 7, el corredor 16 que une las zonas 4 a 13, el corredor 21 que conecta las áreas 5 a 15, el corredor 27 que conecta las áreas 7 a 18, el corredor 29 que une las áreas 8 a 10, y finalmente el corredor 37 que conecta las zonas 10 a 19 (Figura 29).

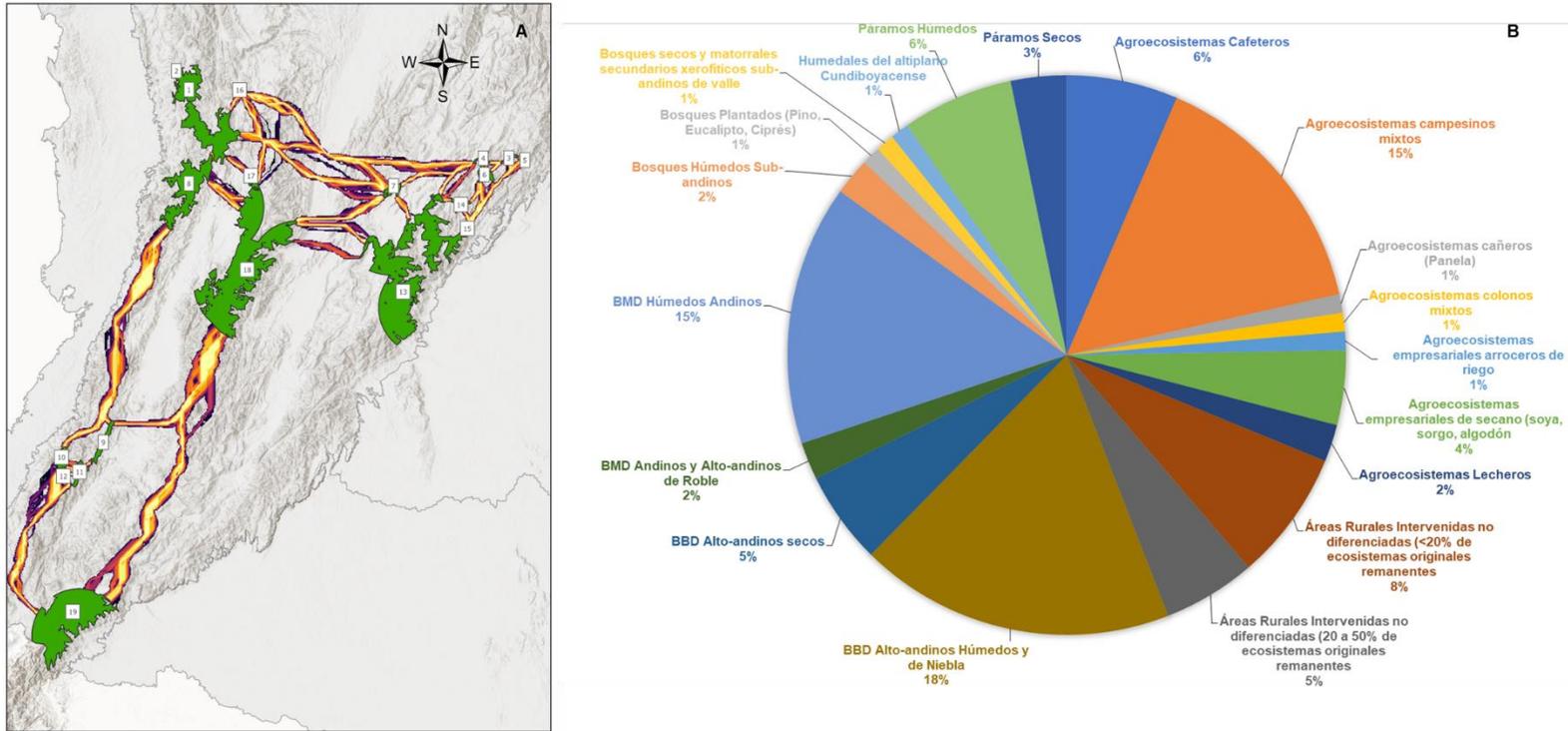


Figura 16. Corredores de menor costo entre áreas prioritarias (números) para conservar la especie *F. deiroleucus* en Colombia según los datos mixto. A) Las rutas con menor resistencia se muestran en amarillo. B) Ecosistemas presentes en las rutas de menor costo.

Tabla 11. Parámetros de los corredores de menor costo del conjunto de datos mixto. Los corredores están en orden descendente según la extensión del corredor.

Codigo del corredor	Punto de inicio	Punto de llegada	Distancia euclidiana en Km	Longitud en Km del corredor
48	18	19	306.281	336.732
29	8	10	256.831	289.819
18	4	16	256.424	284.97
28	8	9	213.064	238.739
26	7	16	182.205	204.411
2	1	7	164.746	179.327
33	9	18	147.95	179.103
37	10	19	125.922	184.52
40	12	19	119.401	181.053
39	11	19	108.545	176.346
27	7	18	96.035	104.283
46	16	18	89.145	106.576
21	5	15	88.727	96.147
15	4	7	79.498	88.214
12	3	15	72.948	83.797
43	13	18	71.531	82.77
16	4	13	47.929	54.454
24	6	15	46.012	52.253
30	8	18	41.897	45.832
5	1	17	31.101	35.168
25	7	13	26.41	30.647
23	6	14	22.677	25.586
4	1	16	19.291	23.041
45	14	15	16.638	18.204
9	3	6	13.068	14.895
7	3	4	11.269	13.683
35	10	11	10.187	12.061
41	13	14	8.03	9.609
38	11	12	6.418	7.447
8	3	5	6.206	7.988
32	9	11	4.273	6.683
42	13	15	3.553	4.613
47	17	18	2.65	3.914
36	10	12	2.157	3.532
14	4	6	2.147	3.691
3	1	8	1.54	3.532

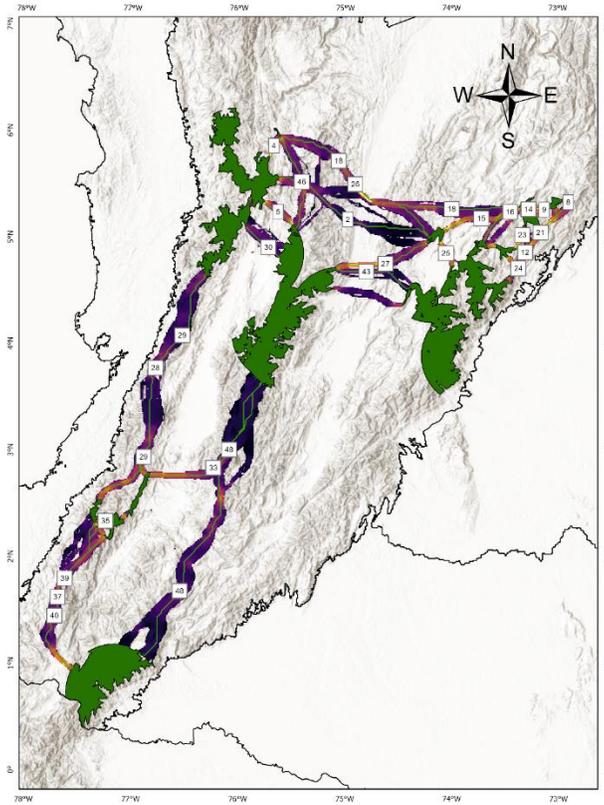


Figura 17. Cuellos de botella en los corredores que conectan las áreas prioritarias para la conservación de *F. deiroleucus* en Colombia, según los datos de ciencia básica. Los colores amarillos son los cuellos de botellas. Los números son las etiquetas de los corredores de menor costo.

8.4 COMPARACIÓN ENTRE LOS CONJUNTOS DE DATOS

Como se puede evidenciar en los resultados anteriores el conjunto de datos de ciencia ciudadana, ciencia básica y mixto tuvieron diferencias y similitudes debido a los datos de ocurrencia para desarrollar los diferentes análisis. A continuación, se presentan de manera más clara las diferencias entre ambos conjuntos de datos.

El conjunto de ciencia ciudadana obtuvo una mayor cantidad de datos para ejecutar el modelo final a comparación con el conjunto de datos de ciencia básica (figura 2). Además, el conjunto de datos de ciencia ciudadana obtuvo

registros georreferenciados más actuales que el conjunto de ciencia básica (Figura 30). El registro más antiguo de ciencia ciudadana es en el año 1958 (1 registro) y el más reciente es en el año 2022 (5 registros). En cambio, en el conjunto de la ciencia básica los datos son mucho más antiguos. El dato más antiguo es en el año 1911 (1 registro) y el más actual es en el año 2017 (2 registros).

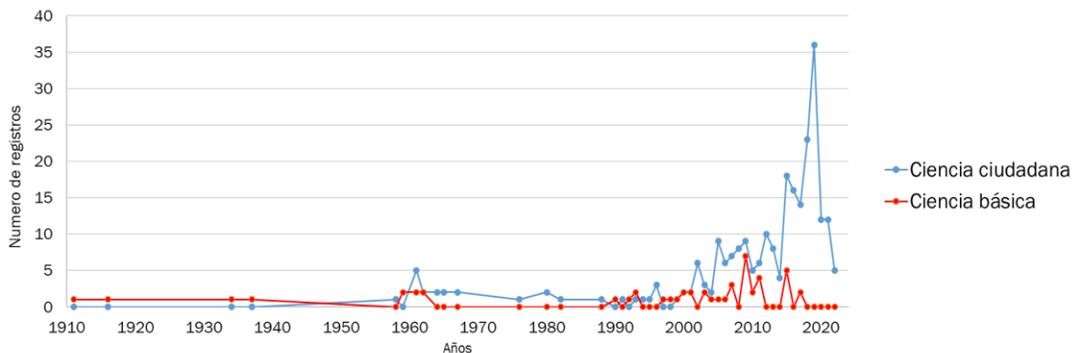


Figura 18. Numero de ocurrencias de la especie *F. deiroleucus* por año según cada conjunto de datos.

8.4.1 Comparación modelos de distribución de especies.

Como se observó anteriormente, el procedimiento de selección del modelo de distribución preliminar y final produjo diferentes conjuntos de variables ambientales para cada fuente de datos de ocurrencia y la importancia de la permutación de las variables ambientales difirió entre los modelos. Los tres modelos predijeron hábitats adecuados en áreas con ocurrencia conocida de *Falco deiroleucus* actuales e históricas, lo que sugiere una buena alineación de los modelos. Sin embargo, los datos de ciencia básica predijeron zonas ambientalmente muy idóneas al norte de la región pacífica que es una zona donde no se tiene registro de esta especie. Además, predijo zonas bajas de idoneidad ambiental al norte de Belice, donde la literatura sugiere que es una zona donde hay presencia de esta especie.

El conjunto de ciencia ciudadana predijo zonas medias de idoneidad ambiental en el área de Guyana en comparación con el conjunto de datos de ciencia básica que predijo áreas con valores más altos de idoneidad ambiental (Figuras 8 y 11). De manera general se puede decir que el conjunto de datos de ciencia básica predijo valores más altos de idoneidad ambiental en zonas más concretas en el área de accesibilidad y los datos de ciencia ciudadana predijo valores medios y altos de idoneidad ambiental en dicha zona (Figuras 10 y 13). En Colombia el conjunto de ciencia ciudadana predomina los valores medios de idoneidad ambiental a diferencia que el conjunto de ciencia básica donde los valores de idoneidad son mucho más menores comparados con la ciencia ciudadana (Figuras 10 y 13). La unión de ambos conjuntos de datos denominado mixto (ciencia básica + ciencia ciudadana) el modelo final predijo valores de muy alta idoneidad en la cordillera de los andes en los países ecuator y Colombia y en gran parte de países de centro América. Los valores de idoneidad ambiental que predominan para este conjunto de datos son bajos-medios, siendo el modelo que más énfasis hace a este resultado para el área de accesibilidad. En Colombia, en su gran materia predominan valores medios de idoneidad ambiental (Figura 16). El modelo mixto es el conjunto de datos que más valores de idoneidad ambiental (1) predijo para Colombia en comparación con los otros dos modelos. En los tres modelos de distribución existen diferencias en el área de accesibilidad, pero en la escala local son mucho más semejantes (Figura 31). La estadística D de Schoener indicó una superposición alta de nichos en promedio en los tres modelos ($D = 0.805$). Los modelos de ciencia ciudadana y datos mixtos son los que más se asemejen ($D = 0.84$) en toda el área de distribución. Los modelos más diferentes fueron los datos de ciencia ciudadana vs ciencia básica ($D = 0.761$) (Tabla 12). En la escala local (Colombia) las semejanzas fueran más evidentes. La estadística D de Schoener indicó una superposición alta en

promedio en los tres modelos ($D = 0.870$). Los modelos de ciencia ciudadana y los datos mixtos fueron los modelos más semejantes ($D = 0.910$). Los modelos que más se diferenciaron fueron los datos de ciencia ciudadana vs los datos de ciencia básica ($D = 0.827$) (Tabla 13).

Tabla 12. Comparación entre los modelos de distribución de especies, Ciencia básica, ciencia ciudadana y mixto en toda el área de accesibilidad. El estadístico D valores cercanos a 1 significa gran similitud y los valores cercanos a 0 significa una diferencia entre los modelos.

Modelos	Ciencia ciudadana	Datos mixtos	Ciencia básica
Ciencia ciudadana	1	0.842004	0.7613833
Mixto		1	0.8135889
Ciencia básica			1

Tabla 13. Comparación entre los modelos de distribución de especies, Ciencia básica ciencia ciudadana y mixto en Colombia. El estadístico D valores cercanos a 1 significa gran similitud y los valores cercanos a 0 significa una diferencia entre los modelos

Modelos	Ciencia ciudadana	Datos mixtos	Ciencia básica
Ciencia ciudadana	1	0.910528	0.8279626
Mixto		1	0.8730163
Ciencia básica			1

El mapa binario refleja las diferencias y similitudes entre los tres modelos. Se puede evidenciar que en el área de accesibilidad (Figura 31) existen algunas diferencias en la predicción del área de distribución. De manera general los datos provenientes de ciencia ciudadana (color rosado) predicen valores únicos en áreas del centro de Brasil y pequeñas zonas al sur de Perú y

México. En general se puede decir que los tres modelos predijeron modelos muy similares tal como lo sugiere la D de Schoener.

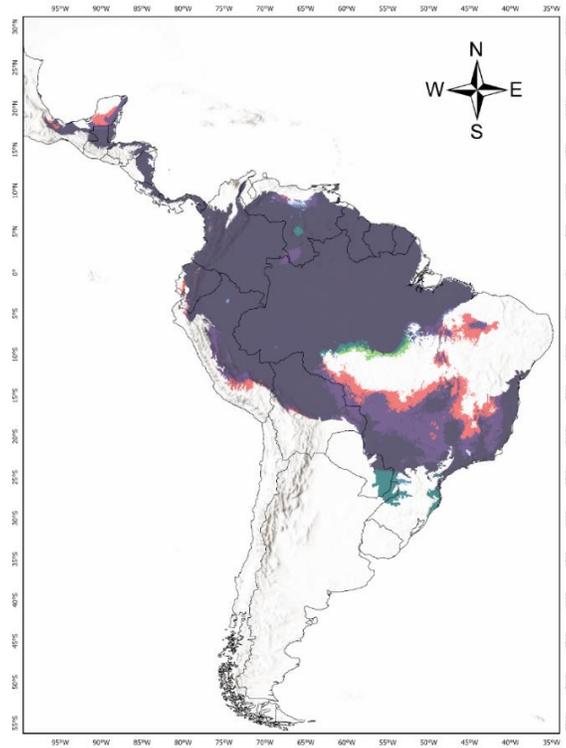


Figura 19. Comparación mapas binarios. Los colores hacen referencia a la distribución de *F. deiroleucus*. El color rosado es la distribución en base a los datos de ciencia ciudadana. El color verde a los datos de ciencia básica y el color azul a los datos mixtos. El color morado claro a las semejanzas entre ciencia ciudadana y mixto. El color verde azulado a las semejanzas entre ciencia básica y mixto. El morado oscuro a las semejanzas entre los tres modelos.

8.4.2 Uso de los MDE de ciencia ciudadana y datos de ciencia básica en la conectividad ecológica.

En la identificación de corredores hubo diferencias según la procedencia de los datos. Los datos de ciencia básica identificaron 21 corredores de menor costo y los datos de ciencia ciudadana identificaron 15 corredores de menor

costo esto es debido a que en el modelo de distribución de especie, los datos de ciencia básica tuvo mayores zonas de idoneidad ambiental lo que se ve reflejado en el resultado del modelo de conectividad ecológica, ya que Linkage mapper funciona utilizando un mapa de resistencia donde cada celda se le asigna un valor que representa el “costo” energético o el impedimento que posee una especie al moverse de esa celda (Kavanagh *et al.*, 2017). Lo que condujo a tener menos zonas de resistencia, proyectando un corredor menos a comparación del MDE de ciencia ciudadana, donde este último tuvo valores más altos en el mapa de resistencia. Debido a esto también se pueden notar diferencias en la extensión de los corredores (Tablas 10 y 11), donde el promedio de la longitud de los corredores para los datos de ciencia básica es de 100.18 km y para los datos de ciencia ciudadana es de 128.22 km. Cuando estos dos conjuntos de datos trabajan juntos (datos mixtos) incrementan el número de corredores de menor costo (36 corredores identificados), pero disminuye el promedio de la longitud de los corredores (88.71 km) (Tabla 14).

Tabla 14. Promedio de la longitud de los corredores de menor costo en kilómetros para la especie *F. deiroleucus*, según cada conjunto de datos

	Promedio LCP
Ciencia básica	100.18
Ciencia ciudadana	128.22
Mixto	88.71

9. DISCUSIÓN

Conservar la conectividad del hábitat es una tarea principal para minimizar los efectos de la fragmentación en especies de aves con necesidades ecológicas como el halcón pechi anaranjado (Perrin *et al.*, 2022). Los modelos generados para este estudio presentan una primera aproximación de la conectividad ecológica para la especie *F. deiroleucus*. Los resultados indican algunos de los desafíos que enfrentan actualmente la especie, particularmente en los sitios de los nodos focales que están muy cercanos a zonas con gran intervención humana (mapas de resistencia). Este estudio proporciona implicaciones científicas y la participación ciudadana para proponer soluciones y optimizar la estructura de espacios verdes bajo una rápida expansión urbana y así garantizar la conectividad de la especie mediante redes ecológicas. Estas redes ecológicas son cruciales para la conservación de la naturaleza y el bienestar humano, ya que apoyan la biodiversidad, los procesos ecológicos y los servicios ecosistémicos (Kukkala & Moilanen, 2017).

La calidad de un modelo de distribución de especie se ve afectada por la procedencia de los datos de ocurrencias que influyen en el sesgo de generación en el modelo asociado con el esfuerzo de muestreo (Phillips *et al.*, 2006). Uno de los objetivos específicos de esta investigación fue comparar el rendimiento de los modelos de distribución de especies del halcón pechi anaranjado, generados a partir de datos de ocurrencia de ciencia ciudadana con datos de ciencia básica y como estos dos conjuntos de datos trabajan juntos. Los resultados de esta investigación sugieren que el conjunto de datos de ciencia ciudadana puede modelar las distribuciones potenciales similares a los datos de ciencia básica y utilizar variables ambientales para modelar estas distribuciones a escala local.

Las altas mediciones de superposición para puntajes de idoneidad (estadística D) en los datos de ciencia básica y los modelos de ciencia ciudadana, sugieren que los datos de derivados del conjunto de ciencia ciudadana pueden ser una fuente de datos de muestra efectiva en los modelos de distribución de especies a esta escala (escala local) (Coxen *et al.*, 2017). En el total del área de distribución (área de accesibilidad) los datos de ciencia ciudadana se pueden interpretar como un conjunto de datos complementarios a los datos de ciencia básica, donde se complementan unos a los otros llenando vacíos en la distribución (Troudet *et al.*, 2017). Esto se ve reflejado en la estadística D, donde las diferencias son mucho más notables; es decir que a esta escala la procedencia de los datos influye en los resultados de los MDE. En la escala local, aunque tuvieron altas mediciones de superposición de idoneidad cabe de resaltar que existieron diferencias que se encontraron en el rendimiento de estos dos conjuntos de datos que en su gran mayoría fue en los valores de idoneidad. Ambos modelos predijeron zonas de ocurrencia conocidas para *F. deiroleucus*, pero con diferentes valores de idoneidad ambiental. El conjunto de datos de ciencia básica predice altos valores de idoneidad ambiental a comparación con los datos de ciencia ciudadana. Además, hubo diferencias en la predicción de áreas. Los datos de ciencia básica predijeron áreas idóneas al norte de la región de los andes, de la región pacífica y una pequeña zona al sur de la región del del caribe, a diferencia de los datos de ciencia ciudadana donde reporto valores muy bajos de idoneidad en las zonas mencionadas anteriormente. Esta diferencia se debe a que los modelos desarrollados en Maxent se pueden encontrar dos tipos de errores: error de omisión (el modelo falla al no predecir áreas donde hay puntos georreferenciados) y comisión (el modelo predice áreas donde hay no puntos georreferenciados) (Phillips *et al.*, 2006). Los datos de ciencia básica presento valores altos de idoneidad, prediciendo áreas donde no hay

puntos de presencia (error de comisión) que se puede interpretar de dos maneras una “sobre-predicción” del modelo o una “predicción de área potencial” de la especie. Este tipo de error sucede por varios factores: 1) áreas con poco muestreo, donde la especie podría estar. Se sabe que *F. deiroleucus* es un ave de difícil observación y probablemente este presente en estas zonas y nadie la ha reportado (Berry *et al.*, 2010). 2) Áreas adecuadas donde la especie no está por algún evento histórico. Según Renjifo y colaboradores (2016) se sospecha que *F. deiroleucus* en Colombia sus poblaciones son muy pequeñas y no podrían estar cubriendo toda su distribución potencial.

Dado el buen rendimiento de los MDE basados en datos de ocurrencia de ciencia ciudadana, la facilidad de acceso y la amplia cobertura de los datos provenientes de proyectos de ciencia ciudadanía como por ejemplo inaturalist, naturgucker, Xenocanto y observation.org, es alentador para los estudios centrados en otras especies de aves poco conocidas (Coxen *et al.*, 2017). Esta implementación de los datos de ocurrencia de ciencia ciudadana en los modelos de Maxent también se ha demostrado en otros estudios. Barahona y colaboradores (2021) y Fink y colaboradores (2021) evidenciaron que el conjunto de datos recopilados por la ciencia ciudadana se desempeña bien al modelar las distribuciones de macro hongos y una especie de invertebrado endémico (*Americobdella valdiviana*, Philippi 1872), respectivamente. Estos resultados de estas investigaciones demuestran el interés científico de los datos de ciencia ciudadana son importantes no solo porque involucran a la ciudadanía en los procesos en la toma de decisiones, sino que los programas de ciencia ciudadana también pueden tener ahorros significativos de tiempo y dinero en comparación con los métodos tradicionales de recopilación de datos (Bonney *et al.*, 2009, 2014). Los datos de ciencia ciudadana solo requirieron el tiempo dedicado a filtrar y manipular los registros, para que se puedan usar las ocurrencias en los modelos Maxent y en el paquete de R KUENM, y estos

datos proceden de observaciones de campo; datos que son menos invasivos y más fáciles de recopilar en comparación con otras técnicas de muestreo. Si bien las observaciones oportunistas de los datos de ciencia ciudadana pueden presentar sesgos espaciales debido a que las personas no están involucradas a investigaciones científicas (Genet *et al.*, 2003), en esta investigación la cobertura general de los datos de ciencia ciudadana que se utilizó para realizar el modelo en toda el área de accesibilidad fue mayor en comparación con los datos de ciencia básica. Geldmann y colaboradores (2016) plantea que los esfuerzos de muestreo en los proyectos de ciencia ciudadana en diferentes hábitats no pueden reflejar la ocurrencia real de las especies debido a que estos datos son más propensos a ubicarse a zonas más pobladas y de fácil acceso (ciudades, carreteras o senderos para caminar). De esta manera, los usuarios de diferentes proyectos de ciencia ciudadana pueden estar sujetos a reportar especies en áreas más cercanas a centros urbanos. También hay sesgo hacia especies más fácilmente detectadas, con taxones raros y crípticos detectados con menos frecuencia. En este estudio no se tuvo en cuenta las diferencias espaciales en el esfuerzo de muestro de los datos de ciencia ciudadana debido a que la especie (*F. deiroleucus*) con la que se realizó el modelo es una especie de difícil observación y cuenta con pocas observaciones, además otras investigaciones sugieren que esta ave está presente en ecosistemas intervenidos por el ser humano (BirdLife International, 2016), por lo cual al eliminar estos datos los MDE no brindarían información adecuada con la especie. Aun así, los resultados de esta investigación y los resultados de otros estudios que utilizan datos de ciencia ciudadana sugieren que los datos de ocurrencia de ciencia ciudadana pueden ser datos complementarios para especies de difícil observación para crear modelos de distribución de especies de alta calidad. Las predicciones de los tres modelos tuvieron diferencias en gran parte con

la distribución conocida y la historia de vida del halcón pechi anaranjado (Ayerbe Quiñones, 2019; IUCN, 2016). Los modelos de ciencia ciudadana, ciencia básica y mixto predijeron una alta idoneidad en áreas que actualmente cuentan con vegetación y características climáticas que se sabe que apoyan las poblaciones de *F. deiroleucus*, pero también evidencian que esta ave está en zonas intervenidas por el ser humano (BirdLife International, 2016; Renjifo *et al.*, 2016). En Colombia, estos hábitats generalmente ocurren en los siguientes ecosistemas naturales: bosques altoandinos húmedos y de niebla, bosques andinos y altoandinos de roble, bosques de galería y morichales, arbustales esclerófilos de cimas de las serranías, bosques de los planos estructurales arenosos (Etter *et al.*, 2015; Renjifo *et al.*, 2016). Esta predicción de los ecosistemas que se caracterizan por las condiciones de niebla y nubosidad con temperaturas medias diarias que varían entre los 6°C y los 12°C con precipitaciones que oscilan entre los 500 y 4000 mm/año (alto andinos) (Etter *et al.*, 2015) y también zonas que van desde bosques de galería, zonas arboladas rodeadas de áreas de sabana, (morichales) hasta agrupaciones de zonas pantanosas con vegetación herbácea y arbustiva y algunos afloramientos rocosos, explican la importancia de los valores de idoneidad ambiental en Colombia.

Los tres modelos también predijeron zonas idóneas en ecosistemas alterados por el ser humano, esto es debido a que esta especie, exhibe cierta tolerancia a la fragmentación y degradación del bosque, registrándose en paisajes modificados con campos cultivados, huertos y pastos (Berry *et al.*, 2010), pero también se puede interpretar que esta especie está amenazada por la alteración su hábitat (Renjifo *et al.*, 2016). A fin de prevenir la desaparición de la especie y llevar a cabo una relación sostenible, la identificación de los corredores por los tres conjuntos de datos propone ciertas características que

se deben mantener para conectar los hábitats de esta especie, como lo son los bosques andinos, bosques andinos húmedos y bosques de niebla.

Los resultados de esta investigación sobre las características del hábitat de la distribución potencial del halcón pechi anaranjado se puede utilizar como referencia preliminar para los planes de gestión del hábitat de la especie hasta que se disponga de datos de campo más detallados especialmente sobre las poblaciones actuales de esta especie. La región de los andes, en las tres cordilleras que atraviesan a Colombia representan las zonas más idóneas del hábitat del halcón pechi anaranjado. *F. deiroleucus* en Colombia es catalogada como DD (datos insuficientes) por tal motivo datos como estos son guías importantes para los planes de conservación y gestión ambiental.

La fragmentación del hábitat derivada de las actividades y del desarrollo humano son un desafío para la conservación de la avifauna en Colombia, por tal razón es necesario priorizar y proteger los corredores ecológicos para mantener estables las poblaciones de la avifauna nacional. Los resultados de esta investigación identificaron áreas prioritarias para la conservación de *F. deiroleucus* para Colombia, además de actualizar la información de la distribución esta especie. Se identificaron áreas prioritarias vulnerables debido tanto a la presencia de cuellos de botella en los corredores, como a la distancia entre estas áreas. Los corredores con cuellos de botella son de gran importancia para mantener el movimiento de las especies (Balbuena-Serrano *et al.*, 2022), de modo que la pérdida de corredores pone en riesgo la conectividad entre áreas prioritarias. Sin embargo, es posible proponer estrategias de conservación enfocadas en áreas específicas para aumentar la conectividad (Brambilla *et al.*, 2020).

Este estudio utilizó un enfoque de modelado que combina la teoría de circuitos, la conectividad y el análisis de rutas de menor costo para identificar los corredores potenciales para conectar los ecosistemas naturales donde se

ha observado el halcón pechi anaranjado. Las redes de conectividad ecológica pueden informar la planificación de la conservación de la biodiversidad y luego pueden indicar cómo la planificación puede minimizar el daño ecológico además para las implicaciones sociales, se sabe que la planificación verde tiene varios beneficios psicológicos (Najihah *et al.*, 2017). Las redes ecológicas es una herramienta de apoyo a la toma de decisiones y, por lo tanto, incorpora opiniones públicas, mejora la responsabilidad social y aumenta la conciencia de los beneficios más amplios de los espacios verdes (Kong *et al.*, 2010; Najihah *et al.*, 2017).

Muchos de los corredores identificados están expuestos por campos agrícolas y de cultivos además de estar cerca de asentamientos humanos, que dificultan el movimiento de *F. deiroleucus*. Se destaca los campos agrícolas y de intervención humana ya que son considerados una de las principales problemáticas que está afectando esta especie (BirdLife International, 2016; Renjifo *et al.*, 2016). Por esta razón mantener las redes de conectividad para la avifauna en un paisaje dominado por el hombre es una tarea difícil, y es aquí donde juegan un papel importante los corredores ecológicos que pueden ser una herramienta efectiva para informar las decisiones de conservación y de manejo que incluyen la restauración del hábitat en o alrededor de los corredores o propuestas de desarrollo sostenible (Kong *et al.*, 2010; Najihah *et al.*, 2017; Tzoulas *et al.*, 2007).

La problemática de la fragmentación ha producido abundantes parches de hábitat en los ecosistemas. Identificar áreas de conectividad entre ellos es una herramienta indispensable que se debe tener en cuenta para conservar las poblaciones del halcón pechi anaranjado. Los recursos económicos y temporales en proyectos para la conservación son generalmente limitados, por lo tanto, es necesario priorizar las acciones de conservación en áreas con baja conectividad o aquellas áreas que están aisladas además de involucrar

la participación ciudadana, ya que se ha identificado que los proyectos en pro de la conservación con participación ciudadana tienen resultados más eficaces (Young *et al.*, 2019). Las estrategias de conservación deben centrarse en corredores con cuellos de botellas para mantener la funcionalidad de la especie y del ecosistema en general (Balbuena-Serrano *et al.*, 2022). Este estudio es el primero en describir la distribución potencial del halcón pechi anaranjado utilizando variables climáticas y además de proponer un área de conectividad para su conservación en Colombia, por consiguiente y basándose en los modelos realizados, se estimó que la región andina, específicamente en las tres cordilleras que atraviesan el territorio Colombia presentan las zonas más adecuadas ambientalmente y, por lo tanto, contiene la mayoría del hábitat adecuado de *F. deiroleucus*. Pero de manera contradictoria las zonas donde existe una mayor resistencia para la especie *F. deiroleucus* es la región andina, debido a que estas zonas son las más intervenidas por el hombre (Correa Ayram *et al.*, 2020). Es urgente reglamentar políticas de conservación para áreas y corredores prioritarios, dado que sin un soporte político continuo áreas importantes podrían ser eliminadas, ignoradas o autorizadas para ser ocupadas por la agricultura y la industria sin ningún control ambiental (Dunning, 2022). En esta investigación se identificaron corredores que atraviesan zonas intervenidas por el ser humano que es una de las principales causas de fragmentación. Sin embargo, dentro de estos corredores se describieron cuellos de botella, por lo que se puede inferir que los modelos de conectividad ecológica identificaron hábitat potencial, pero con necesidades de conservación. Estas zonas pueden ser usadas para prácticas de desarrollo sostenible agroecológicas o ecoturismo que son una fuente de medidas de mitigación de conflictos para mantener o mejorar la permeabilidad y funcionalidad (Angelier *et al.*, 2016).

La precisión de los modelos de distribución de especies, como cualquier modelo predictivo, depende de la calidad de la información de entrada, en este caso los registros de presencia, de ciencia ciudadana y ciencia básica por esta razón era importante llevar a cabo el filtrado de ambos en base a los criterios descritos en la metodología. Aun así, los datos georreferenciados de proyectos de ciencia ciudadana y ciencia básica tuvieron similitudes y diferencias. Esto se puede interpretar como un cierto grado de error para especies poco estudiadas o de difícil observación (Worthington *et al.*, 2020). Lo ideal para un modelo de conectividad ecológica sería incluir registros de aves en tránsito, pero esos son difíciles de obtener en cantidad suficiente para generar modelos y es que si probablemente se desarrollaran o se incentivaran más los proyectos de ciencia ciudadana podrían llenar los vacíos en la distribución de las especies (Silvertown, 2009).

Infortunadamente, el incremento en la población, el cambio de uso de la tierra, la pérdida de hábitat y el aislamiento de parches que esto genera ocurren a mayor velocidad que la generación de información espacial y ecológica. Por lo tanto, esta investigación realizó modelos con los datos más precisos, para presentar una visión general de la distribución potencial y conectividad del hábitat del halcón pechi anaranjado en Colombia. Se destacaron las áreas y corredores prioritarios existentes, así como las zonas que pueden representar una amenaza. Los resultados de esta investigación se pueden utilizar para implementar medidas de protección y restauración a corto plazo. A mediano plazo, se sugiere validar la efectividad de los corredores identificados mediante la evaluación de su uso por parte de las poblaciones del halcón pechi anaranjado a través del monitoreo de campo. La caracterización del corredor y los factores de presión que identificamos también deben utilizarse para implementar acciones que aumenten su efectividad.

10. CONCLUSIONES

El monitoreo de la biodiversidad y las estrategias de conservación requieren la recopilación de una gran cantidad de datos y estos a su vez deben ser de buena calidad y que abarquen escalas espaciales o temporales para realizar predicciones de MDE y de conectividad ecológica, que puedan ser utilizados como base para identificar áreas de conservación. Esta investigación evaluó la procedencia de los registros provenientes de proyectos de ciencia ciudadana comparándolos con los datos de ciencia básica para la especie *F. deiroleucus*. Utilizando esta metodología, los proyectos de ciencia ciudadana son un medio rentable de recopilación de datos de ocurrencia de especies de interés para su conservación. Esta investigación se centró en una especie de difícil observación por lo tanto dichos datos (ciencia ciudadana) pueden funcionar como complementarios a los datos muestreados profesionalmente con tamaños de muestra pequeños cuando se usan en modelos de distribución de especies a gran escala.

Se llegó a la conclusión en esta investigación que los datos de biodiversidad de ciencia ciudadana se pueden utilizar como complementarios para especies con pocos registros o de difícil observación que traen beneficios como una reducción en gastos y llenar los vacíos geográficos en los datos de biodiversidad actualmente disponibles. Sin embargo, se debe tener cuidado en el manejo de los datos realizados por las personas para mantener o mejorar aún más la calidad y el valor de los conjuntos de datos de ciencia ciudadana (Tulloch *et al.*, 2013).

Por otro lado, se identificaron áreas prioritarias para la conservación para *F. deiroleucus* en Colombia y además se propuso un área para la conectividad que potencialmente podrían mantener estas áreas conectadas. Los resultados del modelado de la conectividad del paisaje utilizando datos de ciencia ciudadana y ciencia básica pueden ser en conjunto una herramienta

confiable que explica el estado actual de la conectividad de los bosques nativos remanentes. Este método se puede utilizar para priorizar acciones conservando sitios de mayor conectividad o priorizar la gestión de áreas con poca conectividad.

A pesar de que gran parte de las zonas ambientalmente idóneas concuerdan con las zonas de mayor resistencia, los resultados permiten resaltar que todavía hay dos regiones (Oriente y occidente de Colombia) que funciona para garantizar la persistencia de las poblaciones de *Falco deiroleucus*. Sin embargo, la región andina se vio fuertemente afectada por tener una gran resistencia para la conectividad del paisaje donde se identificaron cuellos de botellas que se deben priorizar para acciones de conservación o de desarrollo sostenible. Por lo tanto, se deben alentar los proyectos de restauración y recuperación de tierras en estas áreas para mitigar la falta de conectividad del paisaje, asegurando la persistencia de las poblaciones del halcón pechi anaranjado, manteniendo la biodiversidad y los procesos vitales para los ecosistemas. Por lo tanto, se recomienda que las políticas públicas deben centrarse en la restauración de áreas degradadas en paisajes con alta resistencia a la conectividad paisajística, al tiempo que refuerzan las acciones de conservación de áreas menos degradadas para preservar el funcionamiento y la conectividad.

BIBLIOGRAFÍA

- Acuña, J. R. (2014). papel ecológico de las aves rapaces: del mito a su conocimiento y conservación en Chile. *Ed. Nelson Colihueque*.
- American Museum of Natural History. (n.d.). *About how big is the bird population? Has it gone down because of global warming or pollution? AMNH*. Retrieved September 30, 2021, from
- Angelieri, C. C. S., Adams-Hosking, C., Paschoaletto, K. M., de Barros Ferraz, M., de Souza, M. P., & McAlpine, C. A. (2016). Using species distribution models to predict potential landscape restoration effects on puma conservation. *PLoS ONE*, 11(1).
- Ayerbe Quiñones, F. (2019). *Avifauna Colombiana* (Segunda ed).
- Balbuena-Serrano, Á., Zarco-González, M. M., Carreón-Arroyo, G., Carrera-Treviño, R., Amador-Alcalá, S., & Monroy-Vilchis, O. (2022). Connectivity of priority areas for the conservation of large carnivores in northern Mexico. *Journal for Nature Conservation*, 65.
- Berry, R. B., Benkman, C. W., Muela, A., Seminario, Y., & Curti, M. (2010). Isolation and decline of a population of the Orange-breasted Falcon. *Condor*, 112(3), 479–489.
- BirdLife International. (2016). *Falco deiroleucus* (Orange-breasted Falcon).
- Bonney, R., Cooper, C. B., Dickinson, J., Kelling, S., Phillips, T., Rosenberg, K. v., & Shirk, J. (2009). Citizen science: A developing tool for expanding science knowledge and scientific literacy. *BioScience*, 59(11), 977–984.
- Bonney, R., Shirk, J. L., Phillips, T. B., Wiggins, A., Ballard, H. L., Miller-Rushing, A. J., & Parrish, J. K. (2014). Next steps for citizen science. *Science*, 343(6178), 1436–1437.
- Brambilla, M., Rizzolli, F., Franzoi, A., Caldonazzi, M., Zanghellini, S., & Pedrini, P. (2020). A network of small, protected areas favoured generalist but not specialized wetland birds in a 30-year period. *Biological Conservation*, 248.
- Broennimann, O., Fitzpatrick, M. C., Pearman, P. B., Petitpierre, B., Pellissier, L., Yoccoz, N. G., Thuiller, W., Fortin, M. J., Randin, C., Zimmermann, N. E., Graham, C. H., & Guisan, A. (2012). Measuring ecological niche overlap from occurrence and spatial environmental data. *Global Ecology and Biogeography*, 21(4), 481–497.

- Burgman, M. A., & Fox, J. C. (2003). Bias in species range estimates from minimum convex polygons: Implications for conservation and options for improved planning. *Animal Conservation*, 6(1), 19–28.
- Cobos, M. E., Townsend Peterson, A., Barve, N., & Osorio-Olvera, L. (2019). Kuenm: An R package for detailed development of ecological niche models using Maxent. *PeerJ*, 2019(2), 1–15.
- Correa Ayram, C. A., Etter, A., Díaz-Timoté, J., Rodríguez Buriticá, S., Ramírez, W., & Corzo, G. (2020). Spatiotemporal evaluation of the human footprint in Colombia: Four decades of anthropic impact in highly biodiverse ecosystems. *Ecological Indicators*, 117(April), 106630.
- Coxen, C. L., Frey, J. K., Carleton, S. A., & Collins, D. P. (2017). Species distribution models for a migratory bird based on citizen science and satellite tracking data. *Global Ecology and Conservation*, 11, 298–311.
- Delaney, D. G., Sperling, C. D., Adams, C. S., & Leung, B. (2008). Marine invasive species: Validation of citizen science and implications for national monitoring networks. *Biological Invasions*, 10(1), 117–128.
- Devictor, V., Whittaker, R. J., & Beltrame, C. (2010). Beyond scarcity: Citizen science programmes as useful tools for conservation biogeography. *Diversity and Distributions*, 16(3), 354–362.
- Dunning, K. (2022). Biodiversity conservation policy in megadiverse countries: Comparing policy systems for 2020 targets to inform management in the coming decades. *Journal of Environmental Management*, 302.
- Elith, J., Phillips, S. J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y. E., & Yates, C. J. (2011). A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*, 17(1), 43–57.
- Escobar, L. E., Lira-Noriega, A., Medina-Vogel, G., & Peterson, A. T. (2014). *Potential for spread of the white-nose fungus (Pseudogymnoascus destructans) in the Americas: use of Maxent and NicheA to assure strict model transference.*
- Etter, A., Andrade, A., Amaya, P., & Arévalo, P. (2015). *ESTADO DE LOS ECOSISTEMAS COLOMBIANOS-2014 Una aplicación de la metodología Lista Roja de Ecosistemas-UICN.*

- Etter, A., McAlpine, C., Wilson, K., Phinn, S., & Possingham, H. (2006). Regional patterns of agricultural land use and deforestation in Colombia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 114(2–4), 369–386.
- Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302–4315.
- Geldmann, J., Heilmann-Clausen, J., Holm, T. E., Levinsky, I., Markussen, B., Olsen, K., Rahbek, C., & Tøttrup, A. P. (2016). What determines spatial bias in citizen science? Exploring four recording schemes with different proficiency requirements. *Diversity and Distributions*, 22(11), 1139–1149.
- Genet, K. S., Sargent, L. G., Genet, K. S., & Sargent, L. G. (2003). *Evaluation of methods and data quality from a volunteer - based amphibian call survey*. 31(3), 703–714.
- Haddad, N. M., Brudvig, L. A., Clobert, J., Davies, K. F., & Gonzalez, A. (2013). Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems. *Applied Mechanics and Materials*, 315(March), 108–112.
- Haklay, M. (2013). Citizen science and volunteered geographic information: Overview and typology of participation. In *Crowdsourcing Geographic Knowledge: Volunteered Geographic Information (VGI) in Theory and Practice* (Vol. 9789400745872, pp. 105–122). Springer Netherlands.
- Harrington, E. G. (2019). Citizen Science. In *Academic Libraries and Public Engagement with Science and Technology* (pp. 115–144). Elsevier.
- Hashmi, M. M., Frate, L., Nizami, S. M., & Carranza, M. L. (2017). Assessing transhumance corridors on high mountain environments by least cost path analysis: the case of yak herds in Gilgit-Baltistan, Pakistan. *Environmental Monitoring and Assessment* 2017 189:10, 189(10), 1–9.
- Hou, Q., Du, Y., Dong, W., Zeng, Z., Zhang, L., Duan, Y., & Hou, X. (2021). Smart city oriented ecological corridor layout of Sanshui River Basin in arid area of Loess Plateau. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 44, 100993.
- IUCN Red List. (2012). *IUCN Red List of Threatened Species*. Choice Reviews Online.
- Jordán, F. (2000). A reliability-theory approach to corridor design. *Ecological Modelling*, 128(2–3), 211–220.

- Kaky, E., Nolan, V., Alatawi, A., & Gilbert, F. (2020). A comparison between Ensemble and MaxEnt species distribution modelling approaches for conservation: A case study with Egyptian medicinal plants. *Ecological Informatics*, 60(September), 101150.
- Kavanagh, D., Nuñez, T., & Mcrae, B. (2017). *Climate Linkage Mapper User Guide*.
- Kong, F., Yin, H., Nakagoshi, N., & Zong, Y. (2010). Urban green space network development for biodiversity conservation: Identification based on graph theory and gravity modeling. *Landscape and Urban Planning*, 95(1–2), 16–27.
- Kukkala, A. S., & Moilanen, A. (2017). Ecosystem services and connectivity in spatial conservation prioritization. *Landscape Ecology*, 32(1), 5–14. <https://doi.org/10.1007/s10980-016-0446-y>
- Lee, K. A., Lee, J. R., & Bell, P. (2020b). A review of Citizen Science within the Earth Sciences: potential benefits and obstacles. In *Proceedings of the Geologists' Association* (Vol. 131, Issue 6, pp. 605–617). Geologists' Association.
- Najihah, A., Nor, M., Corstanje, R., Harris, J. A., Grafius, D. R., & Siriwardena, G. M. (2017). Ecological connectivity networks in rapidly expanding cities. *Heliyon*, 3, 325.
- Negret, P. J., Maron, M., Fuller, R. A., Possingham, H. P., Watson, J. E. M., & Simmonds, J. S. (2021). Deforestation and bird habitat loss in Colombia. *Biological Conservation*, 257(March), 109044.
- Newbold, T. (2010). Applications and limitations of museum data for conservation and ecology, with particular attention to species distribution models. *Progress in Physical Geography*, 34(1), 3–22.
- Perrin, M., Bertrand, N., & Vanpeene, S. (2022). Ecological connectivity in spatial planning: From the EU framework to its territorial implementation in the French context. *Environmental Science and Policy*, 129, 118–125.
- Peterson, A. T. (2012). Ecological niches and geographic distributions. In *Choice Reviews Online* (Vol. 49, Issue 11).
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., Dudík, M., Schapire, R. E., & Blair, M. E. (2017). Opening the black box: an open-source release of Maxent. *Ecography*, 40(7), 887–893.
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190, 231–259.

- Planillo, A., Fiechter, L., Sturm, U., Voigt-Heucke, S., & Kramer-Schadt, S. (2021). Citizen science data for urban planning: Comparing different sampling schemes for modelling urban bird distribution. *Landscape and Urban Planning*, 211, 104098.
- Pocock, M. J. O., Roy, H. E., August, T., Kuria, A., Barasa, F., Bett, J., Githiru, M., Kairo, ... Trevelyan, R. (2019). Developing the global potential of citizen science: Assessing opportunities that benefit people, society and the environment in East Africa. *Journal of Applied Ecology*, 56(2), 274–281.
- Remsen. (2018). *Species lists of birds for South American countries and territories*.
- Renjifo, L., Amaya, A., Burbano, J., & Velasquez, J. (2016). Libro Rojo de Aves de Colombia. Volumen II. In *Instituto Humboldt, Pontificia Universidad Javeriana*.
- Rodríguez, A., Escalona Segura, G., Alexis, P., Eduardo, I., & Ruiz Montoya, L. (2017). Distribución potencial y conectividad del paisaje: Criterios para reevaluar el grado de amenaza de *Campylorhynchus yucatanicus* (Aves: Troglodytidae). *Revista de Biología Tropical*, 65(4), 1554–1568.
- Romero, M., Cabrera, E., & Ortiz, N. (2007). *Informe sobre el estado de la biodiversidad en Colombia*.
- Saha, A., Rahman, S., & Alam, S. (2021). Modeling current and future potential distributions of desert locust *Schistocerca gregaria* (Forskål) under climate change scenarios using MaxEnt. *Journal of Asia-Pacific Biodiversity*, 14(3), 399–409.
- Sanchez, Y. F. (2015). *Variables que influyen en la distribución y abundancia de rapaces diurnas y en la ubicación de sus sitios de anidación en Cuba*.
- Secretaria del convenio de diversidad biológica. (2004). *Programa de Trabajo sobre Áreas Protegidas*.
- Şekercioğlu, Ç. H. (2012). Promoting community-based bird monitoring in the tropics: Conservation, research, environmental education, capacity-building, and local incomes. *Biological Conservation*, 151(1), 69–73.
- Silvertown, J. (2009). A new dawn for citizen science. In *Trends in Ecology and Evolution* (Vol. 24, Issue 9, pp. 467–471). Elsevier Ltd.
- Soares-Filho, B. S., Nepstad, D. C., Curran, L. M., Cerqueira, G. C., Garcia, R. A., Ramos, C. A., Voll, E., McDonald, A., Lefebvre, P., & Schlesinger, P. (2006). Modelling conservation in the Amazon basin. *Nature*, 440(7083), 520–523.

- Soberón, J. M., Llorente, J. B., & Oñate, L. (2000). The use of specimen-label databases for conservation purposes: An example using Mexican Papilionid and Pierid butterflies. *Biodiversity and Conservation*, 9(10), 1441–1466.
- Subirós, J., Linde, D., Pascual, A., & Palom, A. (2006). Conceptos y métodos fundamentales en ecología del paisaje (landscape ecology). Una interpretación desde la geografía. *Theoretical and Applied Genetics*, 92(3–4), 151–166.
- Tarabon, S., Bergès, L., Dutoit, T., & Isselin-Nondedeu, F. (2019). Maximizing habitat connectivity in the mitigation hierarchy. A case study on three terrestrial mammals in an urban environment. *Journal of Environmental Management*, 243(May), 340–349.
- Taylor, P. D., Fahrig, L., Henein, K., & Merriam, G. (1984). Connectivity: a fundamental ecological characteristic of landscape pattern. *Oikos*, 68(3), 571–573.
- Thorstrom, R., Watson, R., Baker, A., Ayers, S., & Anderson, D. L. (2002). Preliminary ground and aerial surveys for Orange-breasted Falcons in Central America. *Journal of Raptor Research*, 36(1), 39–44.
- Troudet, J., Grandcolas, P., Blin, A., Vignes-Lebbe, R., & Legendre, F. (2017). Taxonomic bias in biodiversity data and societal preferences. *Scientific reports*, 7(1), 1-14.
- Tzoulas, K., Korpela, K., Venn, S., Yli-Pelkonen, V., Kaźmierczak, A., Niemela, J., & James, P. (2007). Promoting ecosystem and human health in urban areas using Green Infrastructure: A literature review. In *Landscape and Urban Planning* (Vol. 81, Issue 3, pp. 167–178). Elsevier.
- Young, B. E., Dodge, N., Hunt, P. D., Ormes, M., Schlesinger, M. D., & Shaw, H. Y. (2019). Using citizen science data to support conservation in environmental regulatory contexts. *Biological Conservation*, 237, 57–62.
- Zimmermann, N. E., Edwards, T. C., Graham, C. H., Pearman, P. B., & Svenning, J. C. (2010). New trends in species distribution modelling. In *Ecography* (Vol. 33, Issue 6, pp. 985–989).
- Zuluaga, S., Speziale, K., & Lambertucci, S. A. (2021). Flying wildlife may mask the loss of ecological functions due to terrestrial habitat fragmentation. *Science of The Total Environment*, 803, 150034.

ANEXOS

Correlaciones entre las variables climáticas

Ciencia básica

var_names	bio_11	bio_12	bio_13	bio_14	bio_15	bio_16	bio_2	bio_3	bio_4	bio_5	bio_6
bio_11	1	0.3434	0.4367	-0.0281	0.4277	0.4702	-0.1080	-0.1858	-0.1077	0.8876	0.9763
bio_12	0.3434	1	0.9071	0.5380	0.0008	0.9387	-0.4217	0.1339	-0.4245	0.1470	0.4289
bio_13	0.4367	0.9071	1	0.3551	0.3110	0.9672	-0.4310	0.0918	-0.3952	0.2345	0.5167
bio_14	-0.0281	0.5380	0.3551	1	-0.5971	0.3555	-0.3397	0.3372	-0.3660	-0.2018	0.0674
bio_15	0.4277	0.0008	0.3110	-0.5971	1	0.3164	0.0368	-0.2720	0.1039	0.4431	0.3786
bio_16	0.4702	0.9387	0.9672	0.3555	0.3164	1	-0.4073	0.0414	-0.3621	0.2820	0.5388
bio_2	-0.1080	-0.4217	-0.4310	-0.3397	0.0368	-0.4073	1	-0.2178	0.5118	0.2264	-0.3015
bio_3	-0.1858	0.1339	0.0918	0.3372	-0.2720	0.0414	-0.2178	1	-0.8656	-0.5408	-0.0817
bio_4	-0.1077	-0.4245	-0.3952	-0.3660	0.1039	-0.3621	0.5118	-0.8656	1	0.3354	-0.2428
bio_5	0.8876	0.1470	0.2345	-0.2018	0.4431	0.2820	0.2264	-0.5408	0.3354	1	0.7913
bio_6	0.9763	0.4289	0.5167	0.0674	0.3786	0.5388	-0.3015	-0.0817	-0.2428	0.7913	1

Ciencia ciudadana

var_names	bio_10	bio_11	bio_12	bio_14	bio_15	bio_17	bio_2	bio_3	bio_4	bio_5	bio_6
bio_10	1	0.9428	0.1628	0.0935	0.0082	0.1131	-0.1983	-0.3395	0.2375	0.9876	0.8809
bio_11	0.9428	1	0.2988	0.2277	-0.1261	0.2622	-0.3732	-0.0336	-0.0992	0.9081	0.9765
bio_12	0.1628	0.2988	1	0.7313	-0.4613	0.8011	-0.4053	0.4014	-0.3900	0.1007	0.3720
bio_14	0.0935	0.2277	0.7313	1	-0.7991	0.9818	-0.3148	0.4993	-0.3790	0.0240	0.2899
bio_15	0.0082	-0.1261	-0.4613	-0.7991	1	-0.8083	0.2860	-0.4700	0.3912	0.0614	-0.1962
bio_17	0.1131	0.2622	0.8011	0.9818	-0.8083	1	-0.3815	0.5235	-0.4253	0.0380	0.3376
bio_2	-0.1983	-0.3732	-0.4053	-0.3148	0.2860	-0.3815	1	-0.3632	0.5038	-0.0615	-0.5467
bio_3	-0.3395	-0.0336	0.4014	0.4993	-0.4700	0.5235	-0.3632	1	-0.9132	-0.4051	0.0878
bio_4	0.2375	-0.0992	-0.3900	-0.3790	0.3912	-0.4253	0.5038	-0.9132	1	0.3019	-0.2184
bio_5	0.9876	0.9081	0.1007	0.0240	0.0614	0.0380	-0.0615	-0.4051	0.3019	1	0.8216
bio_6	0.8809	0.9765	0.3720	0.2899	-0.1962	0.3376	-0.5467	0.0878	-0.2184	0.8216	1

Datos Mixtos

var_names	bio_10	bio_11	bio_12	bio_13	bio_14	bio_15	bio_16	bio_17	bio_2	bio_3	bio_4	bio_5	bio_6	bio_7
bio_10	1	0.9362	0.1614	0.2216	0.0637	0.0769	0.2286	0.0728	-0.1374	-0.3830	0.2539	0.9873	0.8703	0.0932
bio_11	0.9362	1	0.3071	0.3456	0.1957	-0.0412	0.3520	0.2232	-0.3203	-0.0667	-0.1016	0.9033	0.9754	-0.2156
bio_12	0.1614	0.3071	1	0.8668	0.6984	-0.3956	0.9077	0.7757	-0.4038	0.3468	-0.3939	0.1095	0.3821	-0.4690
bio_13	0.2216	0.3456	0.8668	1	0.3725	0.0105	0.9754	0.4596	-0.4125	0.2185	-0.3327	0.1807	0.4177	-0.4167
bio_14	0.0637	0.1957	0.6984	0.3725	1	-0.7755	0.4244	0.9788	-0.2899	0.4622	-0.3545	0.0002	0.2589	-0.4342
bio_15	0.0769	-0.0412	-0.3956	0.0105	-0.7755	1	-0.0191	-0.7837	0.2360	-0.4315	0.3311	0.1231	-0.1114	0.3807
bio_16	0.2286	0.3520	0.9077	0.9754	0.4244	-0.0191	1	0.5043	-0.3867	0.2240	-0.3287	0.1874	0.4143	-0.4005
bio_17	0.0728	0.2232	0.7757	0.4596	0.9788	-0.7837	0.5043	1	-0.3616	0.4926	-0.4085	0.0039	0.3025	-0.5016
bio_2	-0.1374	-0.3203	-0.4038	-0.4125	-0.2899	0.2360	-0.3867	-0.3616	1	-0.3171	0.4995	-0.0021	-0.5031	0.8413
bio_3	-0.3830	-0.0667	0.3468	0.2185	0.4622	-0.4315	0.2240	0.4926	-0.3171	1	-0.8988	-0.4358	0.0508	-0.7712
bio_4	0.2539	-0.1016	-0.3939	-0.3327	-0.3545	0.3311	-0.3287	-0.4085	0.4995	-0.8988	1	0.3088	-0.2233	0.8610
bio_5	0.9873	0.9033	0.1095	0.1807	0.0002	0.1231	0.1874	0.0039	-0.0021	-0.4358	0.3088	1	0.8128	0.2096
bio_6	0.8703	0.9754	0.3821	0.4177	0.2589	-0.1114	0.4143	0.3025	-0.5031	0.0508	-0.2233	0.8128	1	-0.3992
bio_7	0.0932	-0.2156	-0.4690	-0.4167	-0.4342	0.3807	-0.4005	-0.5016	0.8413	-0.7712	0.8610	0.2096	-0.3992	1

Resultados de calibración

Ciencia básica

In all, 70 candidate models, with parameters reflecting all combinations of 14 regularization multiplier settings, 5 feature class combinations, and 1 distinct sets of environmental variables, have been evaluated. Model performance was evaluated based on statistical significance (Partial_ROC), omission rates (OR), and the Akaike information criterion corrected for small sample sizes (AICc).

Table 1. Parameters of the candidate models.

	Parameters
Regularization multipliers	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1, 2, 3, 4, 5
Feature classes	l, lq, lqp, lqpt, lqpth
Sets of predictors	Set_m

Model calibration statistics

In the following table is information about how many models met the four selection criteria that this function uses.

Table 2. General statistics of models that met distinct criteria.

Criteria	Number_of_models
All candidate models	70
Statistically significant models	68
Models meeting omission rate criteria	2
Models meeting AICc criteria	1
Statistically significant models meeting omission rate criteria	0
Statistically significant models meeting AICc criteria	1
Statistically significant models meeting omission rate and AICc criteria	0

Best models according to user-defined criteria

The following table contains the best models selected according to the user's pre-defined criteria.

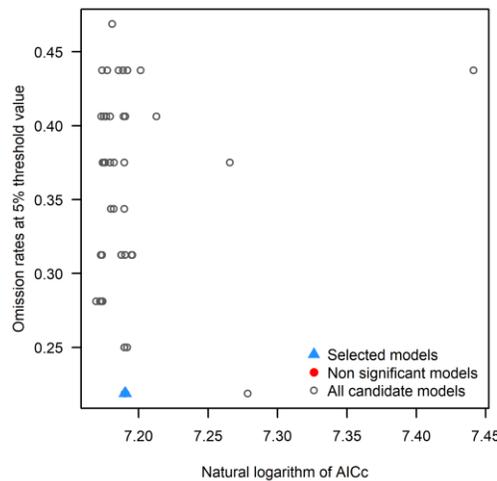
Note that if the selection criterion was "OR_AICc", models below the omission rate and among them those with lower AICc values, delta AICc values were recalculated only among models meeting the omission rate criterion (E).

Table 3. Performance statistics for the best models selected based on the user's pre-defined criteria.

Model	Mean_AUC_ratio	Partial_ROC	Omission_rate_at_5%	AICc	delta_AICc	W_AICc	num_parameters
M_0.6_F_I_Set_m	1.205	0	0.219	1325.863	0.000	1	6
M_0.7_F_I_Set_m	1.202	0	0.219	1325.908	0.045	1	6
M_0.8_F_I_Set_m	1.203	0	0.219	1325.957	0.094	1	6
M_0.9_F_I_Set_m	1.212	0	0.219	1326.013	0.150	1	6
M_1_F_I_Set_m	1.221	0	0.219	1326.074	0.210	1	6
M_2_F_I_Set_m	1.229	0	0.219	1327.010	1.147	1	6

Model performance plot

The figure below shows the position of the selected models in the distribution of all candidate models in terms of statistical significance, omission rates, and AICc values.



Ciencia ciudadana

In all, 70 candidate models, with parameters reflecting all combinations of 14 regularization multiplier settings, 5 feature class combinations, and 1 distinct sets of environmental variables, have been evaluated. Model performance was evaluated based on statistical significance (Partial_ROC), omission rates (OR), and the Akaike information criterion corrected for small sample sizes (AICc).

Table 1. Parameters of the candidate models.

	Parameters
Regularization multipliers	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1, 2, 3, 4, 5
Feature classes	I, Iq, Iqp, Iqpt, Iqpth
Sets of predictors	Set_m

Model calibration statistics

In the following table is information about how many models met the four selection criteria that this function uses.

Table 2. General statistics of models that met distinct criteria.

Criteria	Number_of_models
All candidate models	70
Statistically significant models	70
Models meeting omission rate criteria	0
Models meeting AICc criteria	1
Statistically significant models meeting omission rate criteria	0
Statistically significant models meeting AICc criteria	1
Statistically significant models meeting omission rate and AICc criteria	0

Best models according to user-defined criteria

The following table contains the best models selected according to the user's pre-defined criteria.

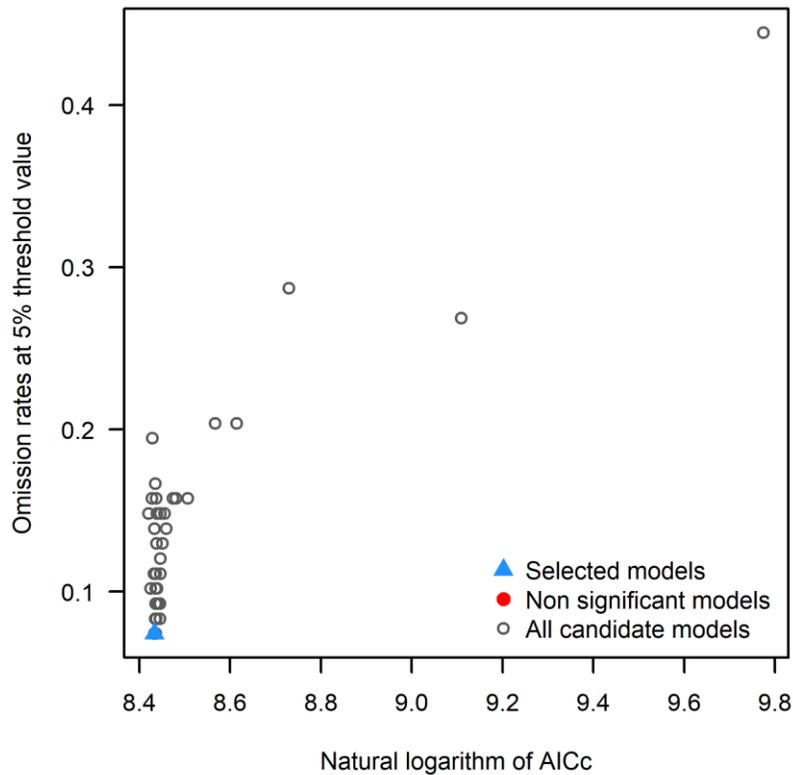
Note that if the selection criterion was “OR_AICc”, models below the omission rate and among them those with lower AICc values, delta AICc values were recalculated only among models meeting the omission rate criterion (E).

Table 3. Performance statistics for the best models selected based on the user’s pre-defined criteria.

Model	Mean_AUC_ratio	Partial_ROC	Omission_rate_at_5%	AICc	delta_AICc	W_AICc	num_parameters
M_0.5_F_lqp_Set_m	1.157	0	0.074	4597.528	0	1	19

Model performance plot

The figure below shows the position of the selected models in the distribution of all candidate models in terms of statistical significance, omission rates, and AICc values.



Modelo mixto

In all, 70 candidate models, with parameters reflecting all combinations of 14 regularization multiplier settings, 5 feature class combinations, and 1 distinct sets of environmental variables, have been evaluated. Model performance was evaluated based on statistical significance (Partial_ROC), omission rates (OR), and the Akaike information criterion corrected for small sample sizes (AICc).

Table 1. Parameters of the candidate models.

	Parameters
Regularization multipliers	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1, 2, 3, 4, 5
Feature classes	l, lq, lqp, lqpt, lqpth
Sets of predictors	Set_m

Model calibration statistics

In the following table is information about how many models met the four selection criteria that this function uses.

Table 2. General statistics of models that met distinct criteria.

Criteria	Number_of_models
All candidate models	70
Statistically significant models	49
Models meeting omission rate criteria	11
Models meeting AICc criteria	1
Statistically significant models meeting omission rate criteria	11
Statistically significant models meeting AICc criteria	0
Statistically significant models meeting omission rate and AICc criteria	1

Best models according to user-defined criteria

The following table contains the best models selected according to the user's pre-defined criteria.

Note that if the selection criterion was “OR_AICc”, models below the omission rate and among them those with lower AICc values, delta AICc values were recalculated only among models meeting the omission rate criterion (E).

Table 3. Performance statistics for the best models selected based on the user’s pre-defined criteria.

Model	Mean_AUC_ratio	Partial_ROC	Omission_rate_at_5%	AICc	delta_AICc	W_AICc	num_parameters
M_4_F_lq_Set_m	1.129	0.016	0.05	5963.394	0	0.995	9

Model performance plot

The figure below shows the position of the selected models in the distribution of all candidate models in terms of statistical significance, omission rates, and AICc values.

