



Predicciones de extinción futura de los primates colombianos con base en las categorías de amenaza de la IUCN

**BRAYAN DAVID AROCA GONZALEZ**

Universidad Manuela Beltrán

Maestría en Bioestadística

Bogotá, Colombia

2022



Predicciones de extinción futura de los primates colombianos con base en las  
categorías de amenaza de la IUCN

BRAYAN DAVID AROCA GONZALEZ

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de:

*Magíster en Bioestadística*

Director

Carlos Andrés Collazos. Físico, Magíster en Ingeniería Electrónica y Computadores, PhD.  
en Ciencias.

Universidad Manuela Beltrán

Maestría en Bioestadística

Bogotá, Colombia

2022



## **AUTORIDADES ACADÉMICAS**

Dra. ALEJANDRA ACOSTA HENRÍQUEZ

Rectora

Dra. CLAUDIA MILENA COMBITA LOPEZ

Vicerrectora Académica

Ing. FREDY ALBERTO SANZ RAMIREZ

Vicerrector de Investigaciones y Altos Estudios Posgraduales

Dra. ROCIO BERNAL GARAY

Vicerrectora de Calidad

Dra. MARLENY BELTRAN NARANGO

Director de Ciencias Básicas

Dr. JAIME ANDRÉS ROBAYO MESA

Coordinador Maestría en Bioestadística

*La presente investigación la dedico a mi familia y a quienes me rodearon de su afecto y calor humano, también a quienes sueñan con crear, trabajar y hacer de la ciencia su propósito de vida, ustedes me inspiran y me motivan.*

## Agradecimientos

En primer lugar, extiendo mis más sinceros agradecimientos a mi familia, quienes me han apoyado sin falta y se han convertido en esa fuente inagotable de energía para cumplir todos los objetivos que me propongo, a mi novia quien además de ser parte de esa familia, me lleva de la mano y nunca me ha dejado solo.

Agradezco a la vida, por permitirme ser parte de su existencia y coincidir en estos momentos que, aunque difíciles para el mundo, no dejan de sorprendernos y llenarnos de todo su conocimiento y esplendor.

Una especial gratitud al profesor Carlos Collazos quien desde la parte académica y directiva me ha prestado su total apoyo, obrando como mentor y guía, brindándome los mejores consejos e instrucciones para llevar a cabo esta investigación, le agradezco profundamente su calidad humana y su comprensión en los momentos difíciles que tuve que pasar.

Gracias a mi compañía de trabajo Montechelo, sus áreas directivas y a Pablo Díaz, por ser los promotores de mi educación y crecimiento profesional, a mis compañeros quienes son ejemplo de empeño y clima laboral, en especial a Christian Castro por apoyarme y motivarme constantemente con sus enseñanzas.

Extiendo mi gratitud a mis maestros quienes son parte fundamental de este logro, por su dedicación y compromiso, he aprendido mucho de ustedes, de sus formas de enseñanza y su calidad humana, son ejemplo de excelencia.

Finalmente, quiero agradecer a la Universidad Manuela Beltrán por brindarme la oportunidad de estudiar allí, abriendo sus espacios para que yo en calidad de estudiante pudiese saciar mi sed de conocimiento; su propósito en la educación es loable y es algo que me llena de completo orgullo.

Muchas gracias.



## Resumen

Problemáticas ambientales han amenazado la condición de los bosques tropicales a lo largo de los años a causa de la deforestación, la explotación minera y los avances en la frontera antrópica. Las especies que allí habitan han mostrado importantes reducciones en sus poblaciones, siendo indicadores de esta problemática. Especies como los primates, que aportan su vida al mantenimiento y conservación del hábitat por medio de la dispersión de semillas, han sido fuertemente afectadas. Un registro del impacto que han sufrido es realizado por la IUCN (Unión Internacional Para la Conservación de la Naturaleza y los Recursos Naturales) al categorizar su riesgo de extinción por más de 20 años. Los primates colombianos, han evolucionado en las diferentes categorías de riesgo de la IUCN, acercándose cada vez y con mayor rapidez hacia la extinción. En el presente estudio, se estiman las categorías de conservación de la IUCN en 100 años próximos, con el fin de proveer información útil para el levantamiento de medidas que los protejan. Se aplicó un algoritmo de Cadenas de Márkov Monte Carlo (MCMC) usando el paquete de R *iucnsim*, el cual, a partir del historial de categorías simula a través de los años la categoría de clasificación futura. Durante la simulación, se incluyó información complementaria como la duración de la generación (GL) y la masa corporal (BM) para reforzar las estimaciones. Se estima la pérdida de al menos seis especies en los siguientes 100 años. Las especies con mayor probabilidad de extinción durante este periodo son *Saguinus oedipus*, *Plecturocebus caquetensis* y *Ateles hybridus*. La presente investigación, es la primera en proveer información concreta sobre el número de extinciones y evolución de las categorías de clasificación de los primates colombianos. Esta información debe tomarse con cautela, y como un soporte para la toma de decisiones respecto a las medidas de conservación de los primates colombianos.

**Palabras clave:** Conservación, Colombia, Estimación, Extinción, Futuro, IUCN, Primates.

## Abstract

Environmental problems have threatened the tropical forests condition over the years due to deforestation, mining exploitation, and advances in the anthropic frontier. Species that live there have shown significant reductions in their populations. Species such as primates, which contribute their lives to maintenance and habitat conservation through seed dispersal, have been strongly affected. A record of the impact they have suffered is done by IUCN (International Union for the Conservation of Nature and Natural Resources) categorizing their extinction risk for more than 20 years. Colombian primates have evolved into different risk categories of the IUCN, approaching a faster extinction status. In the present study, the IUCN conservation categories are estimated over the next 100 years to provide helpful information for creating measures that protect them. A Markov Monte Carlo Chain (MCMC) algorithm was applied using the R *iucnsim* package. The algorithm simulates future classification categories over the years. In the simulation phase, supplementary information such generation length (GL) and body mass (BM) was included to improve the estimates. The loss of at least six species is estimated to occur in the next 100 years. The species most likely to become extinct during this period are *Saguinus oedipus*, *Plecturocebus caquetensis*, and *Ateles hybridus*. This research is the first to provide concrete information about the number of extinctions and classification categories evolutions of the Colombian primates. This information should be taken with caution and must be used for decision-making, regarding conservation measures for Colombian primates.

**Keywords:** Conservation, Colombia, Future, IUCN, Prediction, Primates, Threatened

---

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>13</b>
<b>CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>14</b>
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	16
1.2 OBJETIVOS.....	17
1.2.1 <i>Objetivo general</i> .....	17
1.2.2 <i>Objetivos específicos</i> .....	18
<b>CAPÍTULO II: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y ANTECEDENTES.....</b>	<b>19</b>
2.1 IUCN .....	19
2.2 PRIMATES COLOMBIANOS Y PREDICCIONES DE EXTINCIÓN .....	22
<b>CAPÍTULO III: METODOLOGÍA.....</b>	<b>25</b>
3.1 SELECCIÓN DEL GRUPO DE REFERENCIA .....	25
3.2 ESTIMACIÓN DEL TAMAÑO DE LA GENERACIÓN (GL).....	26
3.2.1 <i>Preparación de los datos de rasgos para imputación filogenética</i> .....	26
3.2.2 <i>Imputación filogenética</i> .....	27
3.2.3 <i>Cálculo GL de especies faltantes</i> .....	28
3.3 SIMULACIÓN DE EXTINCIÓN FUTURA.....	28
3.3.1 <i>Tasas de cambio de categorías</i> .....	29
3.3.2 <i>Simulación de futuras extinciones</i> .....	31
3.3.3 <i>Nota aclaratoria</i> .....	33
3.4 EVALUACIÓN DE RESULTADOS .....	34
<b>CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y ANÁLISIS.....</b>	<b>35</b>
4.1 SELECCIÓN DE GRUPOS .....	35
4.3 TASAS DE CAMBIO.....	40
4.4 SIMULACIÓN DE EXTINCIÓN FUTURA.....	41
<b>CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>52</b>
5.1 CONCLUSIONES .....	52
5.2 RECOMENDACIONES.....	53

<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>55</b>
---	-----------

<b>ANEXO A: MATERIAL SUPLEMENTARIO .....</b>	<b>69</b>
--	-----------

## **Lista de figuras**

<i>Figura 1: Distribución del grupo de referencia.</i> .....	35
<i>Figura 2: Distribución del grupo objetivo.</i> .....	36
<i>Figura 3: Prueba – modelos de imputación filogenética.</i> .....	38
<i>Figura 4: Tiempos de extinción muestreados para las especies de primates colombianos.</i> .....	42
<i>Figura 5: Tiempos de extinción principales especies de primates colombianos.</i> .....	43
<i>Figura 6: Predicción – Pérdida de diversidad de primates colombianos.</i> .....	46
<i>Figura 7: Trayectoria de la diversidad de primates colombianos a través de las categorías IUCN.</i> .....	47
<i>Figura 8: Trayectoria de principales especies en las categorías de la IUCN.</i> .....	49
<i>Figura 9: Precisión de la estimación de las tasas de cambio de categoría.</i> .....	51
<i>Figura 10: Precisión de la estimación de las tasas de extinción.</i> .....	51

## **Lista de tablas**

<i>Tabla 1: Listado de especies del grupo objetivo, hábitat, tendencia, categoría IUCN y GL.</i> .....	39
<i>Tabla 2: Eventos de cambio en el grupo de referencia.</i> .....	40
<i>Tabla 3: Progresiones y regresiones de los eventos de cambio en el grupo de referencia.</i> .....	40

## **Lista de ecuaciones**

<i>Ecuación 1: Muestreo – probabilidad posterior cambios de categoría.</i> .....	29
<i>Ecuación 2: Función log verosimilitud de la probabilidad posterior.</i> .....	29
<i>Ecuación 3: Ecuación tasas de cambio hacia la extinción.</i> .....	31
<i>Ecuación 4: Función de potencia para las tasas de extinción.</i> .....	31
<i>Ecuación 5: Función de cambio como proceso Poisson.</i> .....	32
<i>Ecuación 6: Función verosimilitud proceso de muerte.</i> .....	33
<i>Ecuación 7: Muestreo – probabilidad posterior tasas de extinción.</i> .....	33

## INTRODUCCIÓN

En el presente documento se explica el desarrollo de una investigación realizada para optar al título de magíster en Bioestadística de la Universidad Manuela Beltrán. Esta, cuenta con una estructura muy cercana a la de un artículo de revista académica, exponiendo las motivaciones, el contexto y los datos relevantes que preceden la temática que se aborda, así como también las justificaciones que soportan el despliegue de la investigación y adicionalmente se manifiestan las expectativas y alcances de esta.

Este estudio plantea la aplicación de una estrategia para la construcción un modelo, que tiene el propósito de realizar la predicción de los eventos de extinción futura en los primates colombianos, esto se propuso bajo un esquema práctico-experimental, en el que se hace uso de datos que se encuentran en bases de datos científicas, y se modelan a través de lenguajes de programación especializados en estadística y analítica de datos como lo son R y Python.

En concordancia, el documento se organiza de la siguiente forma: el Capítulo 1 presenta la introducción a la investigación y los temas de estudio, así como el planteamiento del problema y los objetivos. En el Capítulo 2 se expone el marco teórico y referencial que fungirá como base teórica de la investigación, adicionalmente allí, se indican los antecedentes más relevantes. El Capítulo 3, explica detalladamente la metodología utilizada para la elaboración del modelo predictivo y sus métricas de validación. En los Capítulos 4 y 5 se presentan respectivamente los resultados, análisis de investigación y las conclusiones.

## CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

En el mundo, un gran número de especies se enfrenta constantemente a la amenaza de extinción (Powers & Jetz, 2019), eventos como el calentamiento global, la contaminación, la deforestación y las dinámicas de expansión de la especie humana han acelerado notablemente la pérdida de biodiversidad (Hirt et al., 2021). Durante los últimos años estos eventos han desencadenado una ola creciente de investigaciones, con el propósito de estudiar los detalles que rodean estos fenómenos y brindar una mayor comprensión de todo lo que rodea esta clase de problemas (Semper-Pascual et al., 2019).

La pérdida de la biodiversidad a causa de estos fenómenos, afecta de múltiples formas la vida en la tierra, incurriendo en la disponibilidad del alimento, aumentando el número de enfermedades, disminuyendo el control y la protección ante plagas o eventos climáticos de riesgo (Edwards & Abivardi, 1998; Hisano et al., 2018; Worm et al., 2006). Aunque se han estimado costes monetarios sobre el impacto de la pérdida de biodiversidad, las cifras son inconmensurables (Braat & Ten Brink, 2010). Sin llegar a afirmaciones exageradas, la vida humana depende en gran medida de los servicios que la tierra pone en nuestras manos, brindándonos protección y asegurando nuestra permanencia a lo largo de los años.

Teniendo en cuenta la afección global respecto a la pérdida de biodiversidad, es primordial acercarse a las diferentes problemáticas con estrategias que permitan entender y conocer con valores muy cercanos a la exactitud, las dimensiones que las rodean (Zilio, 2019). En ese sentido, conocer el número de especies que se encuentran en riesgo de extinción y cuáles de estas actualmente lo están, puede proveer información crucial para detallar y planificar rutas de trabajo para la conservación de la biodiversidad de manera eficaz (Feng et al., 2021; Gardner et al., 2013; Green et al., 2005; Reddy, 2021). Actualmente, muchas organizaciones como la ONU (Organización de las Naciones Unidas), UNESCO (Organización de Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura), WWF (Fundación Mundial para la Naturaleza),

Conservación Internacional, WCS (Sociedad para la Conservación de la vida salvaje), RIOB (Red Internacional de Organismos de Cuenca), IUCN (Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y los Recursos Naturales) y los entes gubernamentales de la mayoría de países, han incluido en sus agendas, metas y planes para mitigar el avance de eventos nocivos que afectan la biodiversidad, y de esta manera, mejorar los procesos de protección y conservación del medio ambiente (Anyango-van Zwieten et al., 2019; Puppim de Oliveira et al., 2011; Reed, 2016; Robinson, 2012; Shiiba et al., 2022).

Particularmente la IUCN, la organización más importante en el control y seguimiento del estado de conservación de las especies, ha diseñado herramientas de clasificación y seguimiento para cerca de 150.000 especies (IUCN, 2022c), un número realmente bajo cuando se compara con el número total estimado de especies existentes. Sin embargo, no es un esfuerzo pequeño, la organización invierte considerables sumas de dinero y tiempo, para la obtención y actualización de esta información (Rondinini et al., 2014). A la fecha, algunos de estos datos se encuentran desactualizados, o son algo imprecisos dadas las dificultades inherentes al estudio de las diferentes especies. A pesar de esto, y de la existencia de avances tecnológicos, estas tareas aún no han podido optimizarse del todo, no obstante, esta información sigue siendo de gran utilidad para la generación y aplicación de estrategias de conservación más eficaces. De acuerdo a esto, cobra gran relevancia, los esfuerzos que se imprimen en la generación de conocimiento sobre el estado de conservación de las especies y de los recursos naturales (IUCN, 2022b). Con estos, se espera que la información obtenida sea cada vez mayor y más acertada, esto permitirá mejorar notablemente los planes ya establecidos, o diseñar unos nuevos con mayor eficiencia en la conservación de la biodiversidad. En especial, se espera mejorar aquellos planes que pretenden proteger las especies que se encuentran en un estado de amenaza importante, como lo pueden ser las especies objeto del presente estudio, los primates colombianos y los mamíferos.

Dentro de estos últimos, varios grupos son afines a estas problemáticas y sufren crudas realidades, por ello, se encuentran en estados de grave peligro, tal es el caso de los primates, un grupo de organismos con características únicas que los hacen cercanos a nosotros los seres

humanos, pero que difieren en muchos otros aspectos como el hecho de poseer pelaje en todo su cuerpo, presentar en la mayoría de los casos una cola prensil, tener hábitos de vida y comportamiento comunes del entorno natural, entre muchos otros (Alvarez, 2022). Los primates son organismos que aportan su vida a la conservación de los bosques, esto lo hacen indirectamente por medio de la dispersión de semillas, garantizando la expansión y mantenimiento de diferentes especies de plantas, esto incrementa la vida vegetal y contrarresta los avances de la deforestación (Aramburo Jaramillo, 2021; Bautista Plazas, 2019; Chapman & Dunham, 2018; McConkey, 2018; Ramis et al., 2018; Razafindratsima et al., 2018). Si bien, ese es un trabajo que es realizado debido a sus hábitos alimenticios y de movilidad, no ve reflejado sus frutos en el corto plazo, ya que dependen del crecimiento de las semillas y los demás procesos inherentes a esto. Con todo esto, esa es la manera con la cual las especies de primates se han convertido en protectoras de los bosques y promotoras de la conservación de la biodiversidad y la lucha contra el cambio climático.

### 1.1 Planteamiento del problema

Particularmente en Colombia, uno de los países con mayor diversidad de primates (de Luna & Link, 2018; Henao Diaz et al., 2020; Piedrahita-Cortés & Soler-Tovar, 2016; Rylands et al., 1997; Stevenson et al., 2010), no se está lejos de las incidencias antes mencionadas, inclusive, este país es uno de los sitios en donde mayormente se ve afectada la diversidad de los primates; debido a fenómenos como el avance de la frontera agrícola y la invasión hacia los bosques con dinámicas extractivas y de deforestación, reduciendo durante los últimos años las poblaciones de las diferentes especies que aquí habitan (Aquino et al., 2021; De La Ossa et al., 2013; Franco-E. et al., 2019; Link et al., 2010; Ortiz-Moreno et al., 2022; Pereira-Bengoa et al., 2010; Rodríguez-Bolaños et al., 2013). Múltiples investigaciones y publicaciones en el área de la primatología, han incorporado modelos de distribución bajo escenarios futuros, a fin de establecer una estimación del impacto de estas problemáticas en las áreas de distribución, y las densidades poblacionales de los primates colombianos (Castro-Avenidaño et al., 2020; Henao Diaz et al., 2020; Rodríguez-Bolaños et al., 2013; Tirira, 2021; Villota et al., 2022). Los hallazgos de dichos modelamientos no son promisorios debido a que, bajo dinámicas altamente

extractivistas, las poblaciones de primates colombianos reducirían su número a la mitad en menos de 10 años, y algunas de ellas estarían cerca de la extinción. Por otra parte, el panorama actual, es decir, un panorama en donde mantenemos una dinámica “intermedia” de extracción y de deforestación, tampoco es alentadora, pues la reducción de la población y sus áreas de distribución continúan en constancia a lo largo de los años, y aunque no sea de una manera drástica, da continuidad a la problemática en la conservación de primates que existe en el país.

Los estudios realizados hasta el momento han aportado conocimientos que le han permitido a las autoridades de control ambiental, y a distintas organizaciones el establecimiento de planes de conservación con fines de protección y preservación de las poblaciones y áreas de distribución de los primates. En especial, de aquellas especies que en la actualidad se encuentran bajo alta amenaza, como *Aotus brumbacki*, *Aotus griseimembra*, *Aotus lemurinus*, *Aotus nancymae*, *Ateles belzebuth*, *Ateles fusciceps*, *Ateles hybridus*, *Callimico goeldii*, *Cebuella pygmaea*, *Cebus albifrons*, *Cebus capucinus*, *Cebus leucocephalus*, *Cebus malitiosus*, *Cebus versicolor*, *Cheracebus medemi*, *Lagothrix lagothricha*, *Pithecia milleri*, *Plecturocebus caquetensis*, *Plecturocebus ornatus*, *Saguinus leucopus*, *Saguinus oedipus*, es decir, cerca de un 55% de las especies de primates colombianos. Por esta razón, y como contribución a la especificación de parámetros que permiten y refuerzan la construcción de estrategias de conservación más informadas y acertadas, se propone la implementación de modelos de corte predictivo bajo la construcción de un modelo estocástico aplicando Cadenas de Márkov Monte Carlo, que permiten estimar la evolución de las categorías de conservación para las especies colombianas en un periodo futuro determinado. De esta forma, se pretende develar el futuro de cada una de las especies de primates colombianos, en términos del riesgo de extinción.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 *Objetivo general*

Simular las categorías de conservación futura y la pérdida de diversidad, de las especies de primates colombianos utilizando un modelo de Cadenas de Márkov Monte Carlo.

### 1.2.2 *Objetivos específicos*

- Incluir datos sobre categorías de conservación, características, y tamaño de la generación de todos los mamíferos, a partir de fuentes especializadas en el modelo de Cadenas de Márkov Monte Carlo.
- Aplicar métodos de imputación para datos faltantes de la duración de la generación (GL), y evaluar la calidad de estos.
- Estimar tasas de cambio de categoría y tasas de extinción para las especies de primates colombianos y evaluar su precisión.
- Determinar el estado de conservación futuro más probable, para el grupo de los primates colombianos a partir de las tasas estimadas.
- Brindar recomendaciones acordes a los resultados, que posibiliten la toma de decisiones en temas de conservación por parte de las autoridades competentes.

## CAPÍTULO II: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y ANTECEDENTES

### 2.1 IUCN

La IUCN y su Lista Roja de especies amenazadas, es el principal dictamen a nivel mundial en la definición de criterios para clasificar las especies en una categoría de amenaza o riesgo (Betts et al., 2020; IUCN, 2021). Desde el 2001, dicha organización determinó los criterios para la clasificación de las especies según su estado de conservación. Estas clasificaciones, son realizadas con base en revisiones y evaluaciones de expertos (IUCN Species Survival Commission (SSC), 2001). De acuerdo con esos criterios, se definieron nueve categorías de clasificación, de las cuales, siete representan al riesgo de extinción. De manera ascendente según el riesgo están: Preocupación Menor (LC), Casi Amenazado (NT), Vulnerable (VU), En Peligro (EN), En Peligro Crítico (CR), Extinto en Estado Silvestre (EW) y Extinto (EX). Las categorías restantes, hacen referencia a Datos Insuficientes (DD) y No Evaluado (NE). En el año 2020 la IUCN introdujo dos subcategorías adicionales para el nivel de riesgo CR (IUCN, 2020) que son: Posiblemente Extinto [CR(PE)] y Posiblemente Extinto en Estado Silvestre [CR(PEW)].

Se debe especificar que la definición de esas categorías de riesgo, están sujetas al cumplimiento de al menos cinco criterios que van en orden alfabético desde la A hasta la E. Los criterios A – D se centran en el declive de las poblaciones y su fragmentación. Por otro lado, el criterio E, está asociado a la probabilidad de extinción, en donde, por ejemplo, para la categoría CR la especie debe poseer un 50% de probabilidad de extinción dentro de los siguientes 10 años o tres generaciones, lo que sea más largo. Según este criterio, la categoría EN debe tener un 20% de probabilidad de extinción en los siguientes 20 años o cinco generaciones y por último VU con 10% de probabilidad de extinción en los próximos 100 años (IUCN Species Survival Commission (SSC), 2001).

Las categorías de conservación de la IUCN se han utilizado en múltiples estudios, con la intención de predecir la pérdida de biodiversidad y de entender las dinámicas de extinción de las diferentes especies (Cooke et al., 2019; Davis et al., 2018; Oliveira et al., 2020; Ricciardi & Rasmussen, 1999; Soares, 2021; Veron et al., 2016; Welch & Beaulieu, 2018). En dichos estudios, el riesgo de extinción es tomado según el criterio E antes explicado, sin embargo, deja de lado los demás criterios A – D. Ahora bien, esto sucede porque se asume que el riesgo de extinción según el criterio E, puede transferirse de una forma más simple a las especies que fueron categorizadas siguiendo los lineamientos omitidos (Akçakaya et al., 2006; Andermann et al., 2021). De cualquier manera, además del riesgo calculado mediante el criterio E, existen otros acercamientos en donde se incluyen datos adicionales para reforzar la explicación de los cambios en las categorías de clasificación de la IUCN, como lo pueden ser, probabilidades de extinción o riesgo.

Como lo menciona Andermann et al. (2021) y Monroe et al. (2019), además del criterio E, existen otros aspectos clave que usualmente no se incluyen en las predicciones de extinción futura cuando se utilizan las categorías de clasificación de la IUCN. Uno de estos aspectos, corresponde al tamaño de la generación (GL), que se define como la tasa de rotación promedio de individuos con capacidad reproductora dentro de una población (IUCN, 2022a). Adicionalmente, otro aspecto no incluido, son los cambios esperados en la categoría de conservación, estos últimos hacen referencia a los cambios que se dan constantemente en las categorías de clasificación, es decir, la variación de la categoría a lo largo del tiempo. Por este hecho, las categorías de amenaza nunca deben tomarse como un suceso estático. Como la IUCN ha clasificado durante al menos 20 años las especies bajo el esquema v3.1 (IUCN Species Survival Commission (SSC), 2001), existe un número importante de casos que dan cuenta de esos cambios. De igual manera, otros estudios también han demostrado que incluso los cambios de categoría de conservación para algunas especies, pueden presentarse en periodos cortos de tiempo y ser bastante significativos (Butchart et al., 2007; Rondinini et al., 2014). De esta manera, es razonable pensar que las especies en categorías como LC tengan una probabilidad de extinción menor en comparación con las especies cuya categoría es CR (Andermann et al., 2021).

Algunos primates incluidos en este estudio, que demuestran que este hecho es una realidad, y quienes han cambiado recientemente son: *Alouatta palliata* LC – VU, *Ateles fusciceps* CR – EN, *Cebuella pygmaea* quien pasó de LC a VU, *Pithecia hirsuta* DD – LC, *Pithecia milleri* DD – VU, y *Saguinus leucopus* EN – VU (Carretero, 2021; Cortes-Ortíz et al., 2015; de la Torre et al., 2015; Link et al., 2020; Marsh et al., 2015; Moscoso et al., 2020), todos los cambios mencionados, sucedieron en un periodo de un año. La información sobre estas variaciones puede ser obtenida a través del registro histórico de la IUCN, y es un ejemplo de la información utilizada en esta y otras investigaciones aquí mencionadas.

Para este trabajo se utilizó el enfoque propuesto por Andermann et al. (2021) el cuál no solo recopila las estrategias utilizadas por otros autores, como lo es la utilización del criterio E (Mooers et al., 2008) y los cambios históricos de las categorías de conservación (Monroe et al., 2019). Ellos añaden mejoras novedosas, con la intención de robustecer las estimaciones. En estrategias basadas en el criterio E, los autores sugieren complementar la información para la estimación con datos de GL, y en las estrategias basadas en cambios históricos recomiendan considerar los posibles taxones extintos.

Todo lo anterior es posible, gracias al desarrollo realizado y presentado por Andermann et al. (2021), que en un principio se lanzó como un programa de línea de comando llamado *iucn\_sim* y cuya instalación era realizada a través del administrador de paquetes conda. En la actualidad, este programa se encuentra también como un paquete de R llamado *iucnsim*, el cual es más fácil de usar e instalar, y por ese motivo fue utilizado para esta investigación. El paquete incorpora los enfoques de los autores antes mencionados mediante un algoritmo de cadenas de Márkov Monte Carlo (MCMC), con el que se estiman las tasas de cambio de las categorías de conservación de las especies utilizando los datos históricos de la IUCN. Con esas tasas, se simulan los futuros cambios en las categorías de conservación, lo que se traduce en la estimación de posibles extinciones.

## 2.2 Primates colombianos y predicciones de extinción

Colombia es uno de los países con mayor riqueza y diversidad de primates en el mundo, en el país se encuentran un total de 38 especies de acuerdo a la asociación primatológica colombiana (APC) y a su listado más actualizado (APC, 2020). Esta cifra suele cambiar debido a la existencia de incertidumbres respecto a su taxonomía (Stevenson et al., 2010). De estas especies, 9 son endémicas y se agrupan en las familias Aotidae, Atelidae, Callitrichidae, Cebidae, y Pitheciidae. La distribución de los primates en el territorio colombiano es bastante amplia y abarca la mayoría de departamentos del país, así mismo, habitan múltiples zonas con rangos de altitud que van desde 0 hasta más de 3000 msnm (Henaó Díaz et al., 2020). A pesar de su amplio rango de distribución, la mayoría de poblaciones de estas especies, se encuentran en declive a causa de factores como la pérdida de hábitat, la cacería ilegal y el tráfico de fauna (Defler, 2003). Respecto a sus rasgos físicos, los hay de múltiples tamaños y colores, algunos son muy pequeños como el leoncito *Cebuella pygmaea* el cual posee un peso de aproximadamente 0,12 kg, y en cambio hay otros de mayor tamaño, como varios de los miembros de la familia Atelidae, con pesos entre 6 y 10 kg. La distribución de los primates colombianos es de preferencia boscosa, por lo que en aquellos departamentos como el Cauca y el Chocó, los cuales gozan de una gran cantidad de áreas con bosques, se posee la mayor cantidad de especies de primates registrados (Henaó Díaz et al., 2020). Los estudios de conservación en primates, indican que la causa principal de la pérdida de diversidad es la deforestación, y es de especial afección para estos, dada su estrecha relación a la vida en los árboles y las dinámicas frugívoras de su alimentación (Rodríguez-Bolaños et al., 2013). Más de la mitad de las especies de primates colombianos se encuentran bajo amenaza de extinción y la tendencia se mantiene, así lo han demostrado diferentes estudios sobre el estado de conservación de este grupo, en los cuales se manifiesta directamente la gravedad de la situación que enfrentan, siendo una problemática que se ha intensificado a lo largo de los años (Defler, 2013; Henaó Díaz et al., 2020; Link et al., 2013; Stevenson et al., 2010).

Ante esta situación, estudios han indicado que para lograr la constitución de planes de conservación para las especies de primates en Colombia que realmente sean efectivos, es

necesaria información e investigaciones sobre estas, respecto a la cantidad, densidad y estado poblacional. Este tipo de investigaciones poco se han llevado a cabo o en algunos casos solo han impactado a las especies con mayor carisma (de Luna & Link, 2018; Stevenson et al., 2010). Este hecho, ha limitado la protección efectiva del conjunto total de especies de primates en Colombia.

Las investigaciones sobre primates en Colombia han seguido un patrón que se ha concentrado en estudios de los aspectos ecológicos de estas especies (Stevenson et al., 2010); dejando a un lado, con una menor incidencia investigativa, trabajos sobre su conservación o las interacciones antrópicas que les ponen en riesgo. En su mayoría, los trabajos que integran la predicción del estado de conservación para los primates colombianos lo han hecho indirectamente, a través de estudios que evalúan la pérdida de áreas de distribución y hábitat, utilizando modelos u algoritmos de corte espacial, en lo que se denomina Modelado de Nicho Ecológico (ENM). De los anteriores, se destaca el estudio de Castillo Ayala (2016) en donde se integran los ENM como herramienta para la generación de planes de conservación de los primates en Colombia. También, es de importante mención la investigación realizada por Henao Diaz et al. (2020) con colaboración del Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt en donde además de presentar un atlas completo sobre la diversidad de primates, utilizan modelos llamados “BioModelos” que son plasmados en mapas y dan cuenta de la distribución potencial y remanencia de las especies, de acuerdo a los cambios en los bosques durante las últimas décadas en el país, así mismo, son incluidas gráficas de tendencia en la distribución con estimaciones a futuro bajo diferentes escenarios. Otros trabajos de igual importancia en donde se han utilizado estrategias de ENM, y que han enfocado sus esfuerzos en identificar el estado de conservación de especies o grupos concretos dentro de los primates colombianos, son las investigaciones realizadas por Link et al. (2013), Rodríguez-Bolaños et al. (2013) y Roncancio et al. (2013). La primera, sobre el estado de conservación del mono araña café *Ateles hybridus*; la segunda, la generación de modelos predictivos de distribución para los micos atelinos *Ateles* y *Lagothrix*, y finalmente la tercera sobre la distribución potencial y disponibilidad de hábitat para el tití gris *Saguinus leucopus*. En todas las anteriores, se utilizó el algoritmo de ENM más famoso llamado MaxEnt, el cual utiliza el principio de máxima entropía a razón de variables

ecológicas, datos geográficos y coordenadas de individuos para producir mapas con probabilidades de presencia y/o ausencia (Elith et al., 2011; Phillips et al., 2006).

Si bien, estudios de este estilo permiten visualizar y explicar los aspectos asociados a la pérdida de diversidad de los primates colombianos y su constante estado de riesgo, se alejan de una definición concreta y a futuro sobre su categoría de conservación, el cual se prevé incierto a falta de la información necesaria para constituir modelos más precisos. Por esta razón, y en concordancia con la importancia de proveer información actualizada sobre la diversidad de los primates colombianos, su población y estado de conservación a futuro; en este estudio se propone la implementación de un modelo de Cadenas de Márkov Monte Carlo, el cual permite la estimación a futuro de las categorías de conservación de la IUCN. Por consiguiente, se contribuye con información actualizada sobre la categoría de conservación de los primates colombianos, y a su vez, se brinda una estimación a futuro con la intención de que esta sea divulgada y utilizada, para la definición de esquemas de protección eficaces.

## CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

A continuación, se describe el flujo de trabajo para simular las extinciones futuras y cambios en las categorías de conservación de la IUCN para los primates colombianos. En primer lugar, y siguiendo los pasos en el enfoque de Andermann et al. (2021) se definen los siguientes términos:

- Grupo de referencia: Grupo de especies, cuyo historial de categorías de conservación de la IUCN, es utilizado para estimar las tasas de cambio, es decir, las tasas en que una especie cambia de una categoría de conservación a otra. Para efectos del presente estudio, hace referencia a una selección de mamíferos quienes comparten una serie de criterios con los primates colombianos, estos criterios se detallan más adelante.
- Grupo objetivo: Es el grupo de especies para las que se simulan las futuras extinciones. Sobre estas, se aplican las tasas de cambio antes mencionadas. En la presente investigación corresponden a las especies de primates colombianos (Tabla 1).

Se puede acceder a la serie de pasos de referencia, en los repositorios oficiales del paquete de R *iucnsim* (Andermann et al., 2021) los cuales se encuentran en GitHub (<https://github.com/tobiashofmann88/iucnsim>), el proceso de instalación es sencillo, solo requiere la instalación previa de las dependencias correspondientes, estas son *devtools*, *rredlist* y *reticulate*, paquetes o librerías de R. Las instrucciones de instalación también se encuentran en el repositorio antes mencionado.

### 3.1 Selección del grupo de referencia

La selección de un grupo de referencia es un punto crucial en el éxito de las estimaciones de las categorías de estado de la IUCN para el grupo objetivo, estas aportan la base de “referencia” con la cual se estimarán las tasas de cambio de categoría; por tal motivo, esta selección debe tener en cuenta la representatividad de la muestra y que a su vez, las especies seleccionadas

reflejen con similitud las tendencias de cambio de categoría del grupo objetivo (Andermann et al., 2021).

Para lograr esto, se descargaron todas las ocurrencias de mamíferos de la base de datos de registros de la IUCN (<https://www.iucnredlist.org>), de las cuales resultaron 5968 especies. Seguido, se realizó una observación inicial de los primates colombianos para resumir y conocer las características que los definen dentro de la base de datos. A partir de esa observación, se estableció que el mejor filtro de búsqueda para elegir el grupo de referencia que representaría a los primates colombianos es el tipo de hábitat y la tendencia poblacional. Los primates colombianos según los registros de la IUCN se encuentran en su mayoría en hábitats de bosque y poseen una tendencia poblacional decreciente. Se aplicó el filtro de búsqueda sobre toda la base de mamíferos y se obtuvo un total de 1621 especies, las cuales conformaron el grupo de referencia. Cabe resaltar que los primates colombianos siendo el grupo objetivo, también se incluyen en el grupo de referencia con el fin de reforzar el patrón histórico de categorías de conservación de la IUCN, que se usó para la estimación de las tasas de cambio de categoría.

### 3.2 Estimación del tamaño de la generación (GL)

Se recopilaron los datos de GL disponibles del artículo llamado “Generation length for mammals” de Pacifici et al. (2013), allí se provee el siguiente enlace para poder descargarlos <https://datadryad.org/stash/dataset/doi:10.5061/dryad.gd0m3>. Estos datos son cargados a través del lenguaje de programación Python, en donde se realiza limpieza y corrección de nombres para consolidar la base de datos de GL inicial, e identificar la información faltante.

#### 3.2.1 Preparación de los datos de rasgos para imputación filogenética

Para ejecutar una óptima imputación filogenética es importante enriquecer los datos GL iniciales con datos de masa corporal, para esto, se obtuvieron datos de rasgos (“trait data”) los cuales se encuentran en PHYLACINE (Atlas filogenético de macroecología de mamíferos) (Faurby et al., 2020). Estos datos comprenden una serie de valores de masa corporal para cada

especie de mamífero allí registrado, además de información sobre el origen de dichos valores, es decir, si estos han sido observados o imputados previamente. Aquellos valores que se obtuvieron por medio de la imputación son omitidos puesto que aquí se realizará una imputación de datos GL y se desea contar con valores de referencia y de masa corporal lo más cercanos a la realidad.

Para finalizar este paso, se consolidó un archivo con los valores disponibles de GL y BM (Masa corporal), siguiendo como listado principal el listado de especies provisto por PHYLACINE.

### 3.2.2 Imputación filogenética

Una vez más, se verificaron las especies presentes en el listado de PHYLACINE, y para aquellas especies de este listado de las cuales no se contaba con información de GL, se ejecutó una imputación filogenética usando el paquete de R *Rphylopars* (Goolsby et al., 2017) bajo la idea de que la GL posee una correlación filogenética, además de incluir la masa corporal como variable complementaría para este propósito (Cooke et al., 2018).

Para hacer esto, se descargaron de PHYLACINE 1000 muestras de árboles filogenéticos de especies de mamíferos, los árboles se encontraban almacenados en archivos de formato NEXUS. Estas filogenias contienen el 91% de los nombres de especies de mamíferos existentes enumerados en IUCN v3 2021 – 3 (IUCN, 2021).

Para estas especies, se probaron diferentes modelos de imputación filogenética, en todos ellos se seleccionaron 100 árboles al azar de la distribución de árboles descargada. Como resultado de esa prueba, se determinó que el mejor modelo de imputación filogenética, de acuerdo al criterio de información de Akaike (Akaike, 1974, 1980), fue el modelo lambda de Pagel (Pagel, 1997, 1999) (Figura 3). El modelo lambda de Pagel, se representa como una “señal” filogenética en la que el historial de relaciones de las especies extiende los rasgos hacia las puntas de los árboles (Thomas & Freckleton, 2012). La definición de “señal” filogenética puede entenderse

como la relación estadística entre las características de las especies, respecto a su historial filogenético en un esquema de dependencia (Münkemüller et al., 2012; Revell et al., 2008).

Luego de aplicar el modelo lambda de Pagel de imputación filogenética, se obtuvo el valor promedio de GL y su respectiva desviación estándar. Con estas, se construyeron 1000 muestras aleatorias con distribución normal para cada especie y de dichas muestras, se tomó una porción de 100 valores aleatorios, esto con el fin de contar con una cantidad suficiente a la hora de ejecutar las estimaciones de las tasas de cambio que se realizaron más adelante.

### 3.2.3 Cálculo GL de especies faltantes

Hasta este punto, se contaba con un listado de especies de mamíferos y su respectiva GL de acuerdo con las especies que se encontraban en PHYLACINE, sin embargo, como se mencionó anteriormente PHYLACINE no contiene la totalidad de las especies de mamíferos reportadas por IUCN v3 2021 – 3, siendo este último, el listado principal para la investigación. Por esta razón, para completarlo, se modelaron los últimos valores faltantes de las especies, como el promedio del valor de GL del género al que pertenece, cuando no se contaba con información de otros individuos del mismo género, automáticamente se realizó el cálculo con el siguiente nivel taxonómico disponible. Se calcularon de esta forma, 100 valores promedio para cada especie faltante.

## 3.3 Simulación de extinción futura

Una vez se preparó la información necesaria para la simulación de extinción futura de los primates colombianos, se procedió a la aplicación de las diferentes técnicas que rodean al algoritmo de MCMC. A continuación, se expone el flujo metodológico llevado a cabo en los lenguajes de programación Python y R, y el paquete *iucnsim*.

### 3.3.1 Tasas de cambio de categorías

Como primera medida, se descargó el historial de la IUCN del grupo de referencia desde el año 2001, usando la función *get\_iucn\_history* del paquete *iucnsim* (Andermann et al., 2021), esta función se conecta a IUCN v3 2021 – 3 y extrae todo el historial de categorías de las especies que se le indiquen, siempre y cuando cumplan con los estándares de IUCN ver. 3.1 (IUCN Species Survival Commission (SSC), 2001). Esta extracción incluyó la categoría más reciente para cada especie.

Utilizando el historial de la IUCN del grupo de referencia descargado, y la función *evaluate\_iucn\_history* del paquete *iucnsim* (Andermann et al., 2021), se elaboró una tabla de conteos con todos los cambios y el tiempo acumulado entre cada categoría para todo el grupo de referencia (Tabla 2).

A partir de los conteos, y utilizando la función *estimate\_transitions\_rate* del paquete *iucnsim* (Andermann et al., 2021), se aplicó el algoritmo de MCMC para realizar un muestreo Bayesiano de las tasas de cambio anuales entre todos los pares de categorías siguiendo la siguiente probabilidad posterior como se indica en la ecuación (1):

$$P(q_{ij}|N_{ij}, t_i) \propto P(N_{ij}, t_i|q_{ij}) \times P(q_{ij}) \quad (1)$$

Donde  $N_{ij}$  representa los pares de categorías,  $t$  el tiempo y  $q_{ij}$  la tasa de cambio anual. Para lo anterior, la función de log verosimilitud es el cambio de categoría descrito a través de un proceso Poisson en la ecuación (2)

$$\log P(N_{ij}, t_i|q_{ij}) \propto N_{ij} \log(q_{ij}) - q_{ij}t_i \quad (2)$$

aquí  $P(q_{ij}) \sim U[0,1000]$ , es a priori uniforme en la tasa de cambio anual.

Durante las estimaciones de las tasas de cambio, la función *estimate\_transitions\_rate* incorpora medidas de incertidumbre al tomar 100 muestras de la distribución posterior por cada tipo de cambio que se presentó. Adicionalmente, la función muestrea 100 tasas de cambio para los pares de cambios que partieran de la categoría DD hacia cualquier otro, esto con el fin de utilizarlas para seleccionar una categoría válida inicial para las especies del grupo objetivo que actualmente se encuentran en DD cuando se realizaran las simulaciones de extinción futura.

Como paso final, la función modela las tasas de cambio hacia la extinción desde cualquier categoría  $i$  ( $q_{i \rightarrow EX}$ ) utilizando alguno de los dos enfoques que pone a disposición para seleccionar. El primero llamado “modo critE EX”, el cual calcula las probabilidades de extinción, basándose en el criterio E de la IUCN. Este criterio estima la probabilidad de extinción de un taxón, con relación a su historia de vida conocida, los requerimientos de hábitat, sus amenazas y manejo específico (IUCN, 2019). Adicionalmente el modo critE EX permite la incorporación de los datos de GL obtenidos, para lograr una mejor variación de las tasas estimadas. El segundo enfoque disponible, denominado “modo empirical EX” a diferencia del anterior, calcula las probabilidades de extinción con base en las observaciones de los cambios en el historial de la IUCN para el grupo de referencia, e incorpora taxones posiblemente extintos. En este estudio, fue importante lograr un cálculo cercano a la realidad de las especies de primates colombianos, por este motivo y atendiendo a la obtención de mejores variaciones en las tasas de cambio estimadas, se utilizó el modo critE EX, en el que se incluyeron los datos de GL imputados, y el historial de IUCN del grupo de referencia.

Como lo indican Andermann et al. (2021), el modo CritE EX expuesto en el paquete *iucnsim* y desarrollado en la función *estimate\_transitions\_rate* como un parámetro de selección, transforma las probabilidades de extinción  $E_t$  asociadas a las categorías de clasificación de la IUCN y definidas en espacios específicos de tiempo  $t$ , en tasas de cambio hacia la extinción EX específicas para cada categoría  $q_{i \rightarrow EX}$  usando la fórmula que proveen (Kindvall & Gärdenfors, 2003), y que se indica en la ecuación (3):

$$q_{i \rightarrow EX} = 1 - \sqrt[t]{1 - E_t} \quad (3)$$

Según Andermann et al. (2021), como las probabilidades de extinción solo se definen para las categorías VU, EN y CR, las tasas de cambio hacia EX específicas para cada categoría se extrapolan para las categorías faltantes LC y NT, ajustando una función de potencia a las tasas de extinción calculadas para los estados VU, EN y CR, estimando los parámetros  $a$  y  $b$  como se muestra en la ecuación (4):

$$q_{i \rightarrow EX} = ax^b \quad (4)$$

Donde  $x$  representa la categoría de clasificación, ordenada de acuerdo con el nivel de riesgo. Una vez los parámetros son obtenidos, se calculan las tasas de cambio anuales hacia EX para las categorías LC y NT.

Una vez más, de acuerdo con la formulación de Andermann et al. (2021), y en consecuencia a las definiciones de la IUCN, las probabilidades asociadas a las categorías EN y CR para especies individuales son dependientes de su respectiva GL. En este punto, la función del paquete aplica los datos de GL para ajustar los periodos de tiempo  $t$  relacionados con las probabilidades de extinción. Las tasas de cambio anuales hacia EX ajustadas con datos de GL, se añaden a las matrices de tasas de cambio de categorías ya calculadas, esto se puede realizar fácilmente debido a que se comparte el mismo tipo de valor, es decir, tasas expresadas como eventos de cambio por especie y por año.

### 3.3.2 Simulación de futuras extinciones

Para simular los cambios de categoría de los primates colombianos desde su categoría actual hasta EX, se utilizaron las tasas de cambio de categoría calculadas en el paso anterior. Para esta

fase, se sigue utilizando el paquete de R *iucnsim* (Andermann et al., 2021), pero en esta ocasión se usó la función *run\_future\_sim* la cual en primer lugar, toma las especies del grupo objetivo cuya categoría actual es DD, y a partir de la muestra de tasas de cambio, selecciona una nueva categoría válida de inicio.

La función modela los cambios como un proceso Poisson para generar simulaciones en el tiempo futuro de cada una de las especies dentro del grupo objetivo, esto con base en los tiempos de espera entre los eventos de cambio y de acuerdo con la expresión de la ecuación (5):

$$\Delta t \sim \text{Exp} \left( \sum_{j \in S \setminus i} q_{ij} \right) \quad (5)$$

Donde  $S \setminus i$  corresponde al conjunto de categorías excluyendo la categoría actual  $i$ .

La categoría posterior al tiempo de espera  $\Delta t$  es obtenido aleatoriamente con probabilidades proporcionales a las tasas en  $S \setminus i$ . Las simulaciones a tiempos futuros son repetidas para cada especie dependiendo el tiempo predefinido. Para el presente estudio se seleccionó un tiempo de  $t_{max} = 100$  años futuros, así mismo se definió el número de repeticiones, produciendo un total de 10000 simulaciones.

De esas simulaciones, la función *run\_future\_sim* extrae para cada especie, los tiempos de extinción  $t_{\{EX\}}$  en aquellas réplicas donde  $t_{\{EX\}} < t_{max}$ , y los tiempos de espera de tamaño  $t_{max}$  en aquellas réplicas donde las especies no se extinguieron en el periodo de tiempo predefinido.

Finalmente, y con el uso de la función *estimate\_extinction\_rates* del paquete *iucnsim* (Andermann et al., 2021), se toman los tiempos de extinción  $t_{\{EX\}}$  y tiempos de espera simulados  $\Delta t$  para cada especie  $i$ , y sobre estos se aplican MCMC para obtener muestras posteriores de

las tasas de extinción  $\mu_i$ , usando la función de verosimilitud de un proceso de muerte (Silvestro et al., 2019), tal como se expresa en la ecuación (6):

$$P(\omega|\mu_i) \propto \mu_i^D \times \exp\left(-\mu_i \sum_{j \in \omega} (\omega_j)\right) \quad (6)$$

donde  $D$  es el número de instancias en las que  $\omega \leq t_{max}$ .

De las muestras posteriores de las tasas de extinción  $\mu_i$  que se obtuvieron, se realiza un nuevo muestreo utilizando nuevamente el algoritmo de MCMC bajo la ecuación (7):

$$P(\mu_i|\omega) \propto P(\omega|\mu_i) \times P(\mu_i) \quad (7)$$

donde  $P(\mu_i)$  se distribuye a priori uniforme  $U[0,1000]$  en las tasas de extinción. Para cada especie la función *estimate\_extinction\_rates* arroja el valor promedio, y el intervalo HPD al 95% de las tasas de extinción futuras estimadas.

### 3.3.3 Nota aclaratoria

Es pertinente aclarar que la formulación matemática anteriormente explicada, no es producto tácito de esta investigación, salvo en los casos en los que se definieron parámetros constantes para abordarlos en el contexto de las especies de primates colombianos. En consecuencia, las fórmulas se exponen detalladamente, con la intención de explicar el fondo matemático que rodea las estimaciones que se producen. En ese sentido, se puede obtener más información acerca de esto, y del paquete de R *iucnsim* y sus funciones, dirigiéndose al artículo de Andermann et al. (2021) de donde estas operaciones han surgido.

### 3.4 Evaluación de resultados

Se evaluó la precisión de las estimaciones de las tasas de cambio de categoría y las tasas de extinción. Para ello, se simularon nuevos datos históricos de IUCN para las especies del grupo de referencia en un periodo igual al original, es decir 20 años, esta simulación se realizó tomando la distribución de categorías del periodo original y calculando una nueva de acuerdo con las probabilidades empíricamente observadas. Con los nuevos datos históricos de IUCN, se desarrolló una nueva simulación de extinción futura con estimaciones de tasas de cambio de categoría y tasas de extinción. Las tasas estimadas originalmente fueron graficadas y comparadas respecto a las nuevas tasas (Figura 9 y 10) para determinar el nivel de ajuste entre estas. En adición, las tasas de cambio y de extinción, también se evaluaron en comparación con las estimaciones de pérdida de áreas de distribución y estudios poblacionales reportados en otros estudios.

## CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 4.1 Selección de grupos

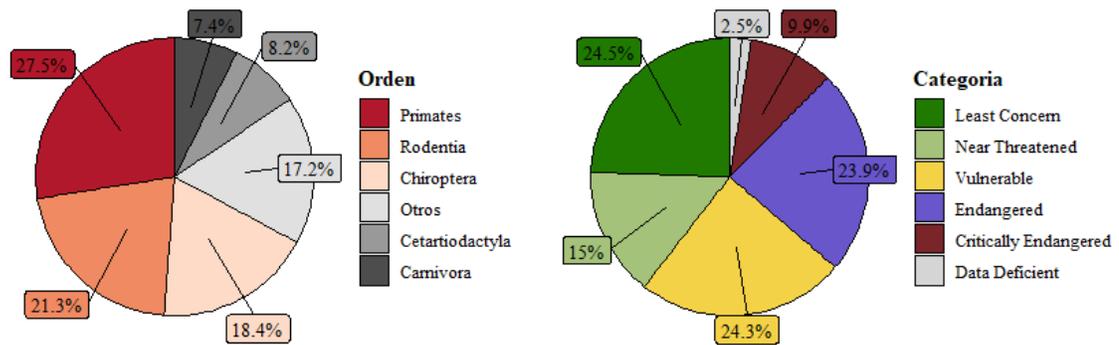


Figura 1: Distribución de miembros por orden taxonómico, y categorías de clasificación de la IUCN del grupo de referencia

El grupo de referencia ( $n = 1621$ ), fue constituido en su mayoría por especies del grupo de los primates con un 27.5% de participación como se indica en la Figura 1. Allí, no solo se incluyeron las especies del grupo objetivo, sino que se adicionaron miembros especiales de este orden con la intención de representar las condiciones de vulnerabilidad de los primates colombianos. Se recuerda que la selección del grupo de referencia se vio influenciada por las características halladas en los datos descargados, y que se compartieran entre las especies. Particularmente, una característica esencial fue el tipo de hábitat, puesto que los primates colombianos, en su mayoría, habitan principalmente los bosques (Defler, 2010, 2013; Henao Diaz et al., 2020). De esta forma, la selección de otros organismos que representan dicho comportamiento debe cumplir con la condición de hábitat requerida. Así, como se aprecia en la Figura 1, otros grupos que hicieron parte del grupo de referencia estuvieron poblados principalmente por los órdenes Rodentia y Chiroptera con 21.3% y 18.4% respectivamente, grupos que poseen múltiples especies con preferencias de hábitat de bosques. Respecto al segundo filtro, en la selección del grupo de referencia, la tendencia poblacional en descenso no

fue algo trivial, dado que las tendencias poblacionales han demostrado estar relacionadas al hábitat y los problemas de conservación que estos presenten. Diferentes formas de afección ya mencionadas hacen parte de la realidad de estos organismos. En especial, las pérdidas de áreas de distribución a causa de la deforestación y el avance de las fronteras humanas (Aquino et al., 2021; De La Ossa V et al., 2013; Franco-E. et al., 2019; Link et al., 2010; Ortiz-Moreno et al., 2022; Pereira, 2010; Rodríguez-Bolaños et al., 2013). Así, no solo los primates como habitantes de los bosques se ven afectados, sino que la inmensa mayoría de especies que allí se encuentran también ven afectadas sus poblaciones, y han puesto en peligro su futuro. De esta manera, la selección del grupo de referencia no solo reflejó una distribución similar de la variedad de especies en comparación con el grupo objetivo, sino que, simultáneamente brindó las tendencias de conservación, en cuanto a las categorías de clasificación, con las que se estimaron las tasas de cambio y se realizaron las simulaciones de extinción futura. En el grupo de referencia señalado en la Figura 1, estas categorías se distribuyeron de la siguiente forma: 24.5% LC, 24.3% VU, 23.9% EN, 15% NT, 9.9% CR y 2.5% DD.

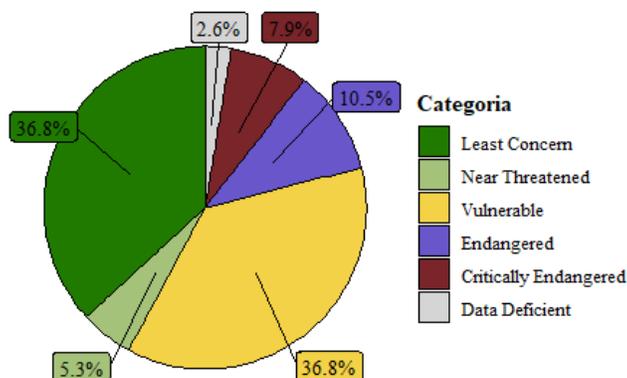


Figura 2. Distribución de categorías de clasificación del grupo objetivo

En contraparte, se puede observar en la Figura 2 la distribución de categorías de clasificación dentro del grupo objetivo, y comparándolos, se puede apreciar nuevamente la relación que existe entre las distribuciones de categorías de ambos grupos, o por lo menos en las tres primeras categorías LC, VU y EN. Estos comparten de manera respectiva las proporciones en cada una de las categorías, indicando de muy buena manera la idoneidad del grupo de referencia frente al grupo objetivo. Cuya selección, como indican Andermann et al. (2021) es esencial para

garantizar la precisión y exactitud de las tasas estimadas. En resumen, los porcentajes de distribución respecto a las categorías de clasificación actuales de la IUCN en el grupo objetivo, en orden descendente correspondieron a: 36.8% LC, 36.8% VU, 10.5% EN, 7.9% CR, 5.3% NT y 2.6% DD.

#### 4.2 Obtención de valores de GL

Las clasificaciones de conservación de las especies han existido por más de dos décadas, y aunque se han incorporado mejoras para realizar dichas clasificaciones con precisión, se ha omitido información relevante (Andermann et al., 2021). Tal es el caso de la información de GL, que, aunque quizá se encuentra dentro de las definiciones de la IUCN de manera indirecta al expresarse como el límite de años o generaciones que deben ocurrir en categorías como EN o CR (IUCN Species Survival Commission (SSC), 2001), resulta en una generalización para todas las especies. Dado que la información de GL se encuentra disponible para muchas de estas, se convierte en un recurso importante para modular y fortalecer las clasificaciones y estimaciones en relación a las categorías de conservación de las especies (IUCN, 2021; Pacifici et al., 2013). Por este motivo, y la especificidad, se precisó la adquisición de esta información en búsqueda de aplicar el enfoque propuesto por Andermann et al. (2021) para la simulación de extinción futura.

En mayor medida, los datos de GL de las especies en el grupo de referencia provenían de Pacifici et al. (2013), sin embargo, en algunos casos esta información no estaba disponible o no se originó en un proceso riguroso. En dichos casos, y por medio de la realización de un proceso de imputación filogenética y de imputación por promedio entre congéneres, se obtuvieron los valores faltantes. Los resultados de los procesos de imputación se pueden segmentar en dos partes: la primera, en relación con la selección del modelo de imputación filogenética de acuerdo con el menor valor de AIC mostrado en la Figura 3, y la segunda, a los valores de GL en sí mismos. Estos últimos, comprenden un listado para 1621 especies, cien valores por cada especie en el grupo de referencia. Por este motivo, estos se adjuntan como anexo en el presente escrito (Anexo A). Los valores de GL resultantes en el grupo objetivo oscilan entre 1.23 y 19.46 años,

el origen de estos valores puede apreciarse en la Tabla 1, allí se especificó si es resultado de la imputación filogenética o correspondió al cálculo del promedio entre congéneres.

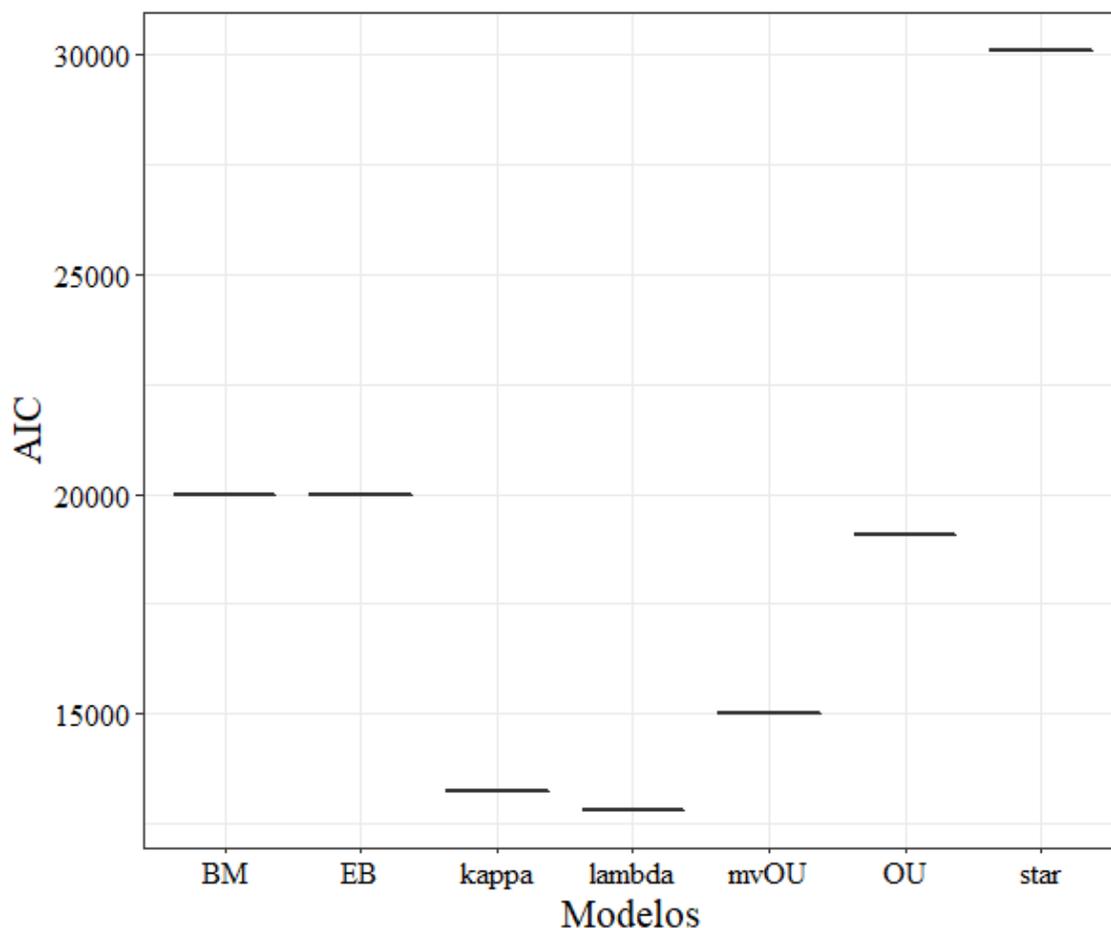


Figura 3. Prueba de modelos de imputación filogenética

Los resultados de la imputación filogenética de la GL y su relación con BM (Cooke et al., 2018), o en su defecto el tamaño reportado de la especie, puede apreciarse y comprobarse de acuerdo a los resultados de la imputación para las especies de primates colombianos. Puede verse, cómo los valores más altos de GL se posicionan en individuos del género *Ateles* que son conocidos por su tamaño mayor en relación a otras especies de primates neotropicales (Defler, 2010; Henao Diaz et al., 2020). Especies como *Cebuella pygmaea* cuyo tamaño es menor poseen los valores más bajos de GL.

**Tabla 1. Listado de especies objetivo, hábitat, tendencia poblacional, categoría IUCN actual y valores de GL (\* Imputación filogenética, \*\* Imputación por promedio del género)**

Especie	Hábitat	Tendencia poblacional	Categoría IUCN	GL
<i>Alouatta palliata</i>	Bosques	Descendiendo	VU	9.79
<i>Alouatta seniculus</i>	Bosques y sabanas	Descendiendo	LC	10.5
<i>Aotus brumbacki</i>	Bosques y sabanas	Descendiendo	VU	*10.34
<i>Aotus griseimembra</i>	Bosques	Descendiendo	VU	*10.21
<i>Aotus jorgehernandezi</i>	Bosques	Desconocida	DD	*10.26
<i>Aotus lemurinus</i>	Bosques	Descendiendo	VU	*9.47
<i>Aotus nancymae</i>	Bosques	Descendiendo	VU	*10.16
<i>Aotus trivirgatus</i>	Bosques	Descendiendo	LC	9.74
<i>Aotus vociferans</i>	Bosques	Desconocida	LC	*9.96
<i>Aotus zonalis</i>	Bosques	Desconocida	NT	*10.26
<i>Ateles belzebuth</i>	Bosques	Descendiendo	EN	12.97
<i>Ateles fusciceps</i>	Bosques	Descendiendo	EN	13.59
<i>Ateles hybridus</i>	Bosques	Descendiendo	CR	*15.65
<i>Cacajao melanocephalus</i>	Bosques	Estable	LC	**11.33
<i>Callimico goeldii</i>	Bosques	Descendiendo	VU	6.77
<i>Cebuella pygmaea</i>	Bosques	Descendiendo	VU	6.52
<i>Cebus albifrons</i>	Bosques y sabanas	Descendiendo	LC	15.08
<i>Cebus capucinus</i>	Bosques y sabanas	Descendiendo	VU	18.60
<i>Cebus leucocephalus</i>	Bosques	Descendiendo	VU	**15.55
<i>Cebus malitiosus</i>	Bosques	Descendiendo	EN	*15.06
<i>Cebus versicolor</i>	Bosques	Descendiendo	EN	*15.25
<i>Cheracebus lucifer</i>	Bosques	Desconocida	LC	*11.55
<i>Cheracebus lugens</i>	Bosques y sabanas	Desconocida	LC	*10.10
<i>Cheracebus medemi</i>	Bosques	Descendiendo	VU	*10.37
<i>Lagothrix lagothricha</i>	Bosques y sabanas	Descendiendo	VU	*14.55
<i>Leontocebus fuscus</i>	Bosques	Desconocida	LC	*8.05
<i>Leontocebus nigricollis</i>	Bosques	Descendiendo	LC	*7.91
<i>Pithecia hirsuta</i>	Bosques	Descendiendo	LC	**10.85
<i>Pithecia milleri</i>	Bosques	Descendiendo	VU	*11.28
<i>Plecturocebus caquetensis</i>	Bosques	Descendiendo	CR	*10.32
<i>Plecturocebus discolor</i>	Bosques	Desconocida	LC	*9.97
<i>Plecturocebus ornatus</i>	Bosques	Descendiendo	VU	*8.89
<i>Saguinus geoffroyi</i>	Bosques	Descendiendo	NT	7.28
<i>Saguinus inustus</i>	Bosques	Estable	LC	*7.11
<i>Saguinus leucopus</i>	Bosques	Descendiendo	VU	*7.68
<i>Saguinus oedipus</i>	Bosques	Descendiendo	CR	8.98
<i>Saimiri cassiquiarensis</i>	Bosques	Desconocida	LC	*10.85
<i>Sapajus apella</i>	Bosques y sabanas	Descendiendo	LC	*12.50

### 4.3 Tasas de cambio

En total se presentaron 595 cambios de categoría en el histórico de la IUCN en el grupo de referencia entre los años 2001 y 2020 (Tabla 3). Particularmente, el grupo de referencia no mostró ningún cambio desde la categoría CR a EX, pero presentó la mayor cantidad de cambios entre las categorías VU y EN con 74 cambios (Tabla 2). Los cambios de categoría para el presente estudio se presentaron como “progresión”, es decir, como un aumento en la categoría de clasificación de la IUCN o, por el contrario, como una “regresión” cuando el cambio sucedió en la dirección contraria. En total, ocurrieron 307 progresiones y 288 regresiones, esta información y otros detalles son presentados en la Tabla 3.

**Tabla 2. Eventos de cambio en el grupo de referencia**

	LC	NT	VU	EN	CR	DD	EX
LC	0	60	40	9	0	3	0
NT	41	0	44	14	2	3	0
VU	21	36	0	74	6	6	0
EN	2	6	59	0	46	0	0
CR	0	0	4	29	0	0	0
DD	7	12	27	32	12	0	0
EX	0	0	0	0	0	0	0

Las tasas de cambio obtenidas obedecen a los cambios observados en la historia de la clasificación de la IUCN para las especies en el grupo de referencia. Cabe recordar, que las especies del grupo objetivo también se encontraban allí. Por ello, las tendencias totales presentadas en la Tabla 3, explican de cierto modo las tendencias específicas de las poblaciones dentro de los primates colombianos. En otras palabras, el número de progresiones respecto al de regresiones, indica un avance hacia categorías de mayor riesgo en el grupo objetivo.

**Tabla 3. Progresiones y regresiones de los eventos de cambio**

	N	%	Factor
Cambios	595		
Progresiones	307	52	1.07
Regresiones	288	48	0.94

El promedio las tasas de cambio por tipo de evento, mostró que el evento de cambio de VU a EN, es el más alto entre todas las especies del grupo de referencia con una tasa de  $1.4 \times 10^{-2}$ . Otros valores como la tasa de cambio de NT a VU de  $1.1 \times 10^{-2}$  también fue elevada, esto en relación con los demás eventos. Explicando, porqué la mayoría de los primates colombianos y de las especies en el grupo de referencia, se han ubicado en su historia en las categorías VU y EN (Defler, 2013). En efecto, tasas de cambio elevadas, dirigen las especies hacia estas categorías. Estos valores y los de los demás eventos de cambio, se encuentran adjuntos en el Anexo A.

#### 4.4 Simulación de extinción futura

A partir de los cambios observados, no solo se obtuvieron los cambios de estado anuales con los que se muestrearon las tasas de cambio de categoría, sino que, además, se contabilizó la duración en tiempo entre cada cambio. Con estas duraciones, se muestrearon con 10000 réplicas los tiempos hasta la extinción para cada una de las especies dentro del grupo objetivo y se señalan en la Figura 4. Para algunas especies, en especial las especies cuya categoría inicial es CR, los tiempos hasta la extinción se estiman cortos. En otras palabras, en los casos anteriores, las simulaciones estiman con mayor probabilidad eventos de cambio hacia EX en periodos de menos de 25 años. Especies como *Saguinus oedipus*, *Plecturocebus caquetensis* y *Ateles hybridus* quienes presentan esta condición, son probablemente las especies que corren mayor riesgo de extinción. Las problemáticas que rodean a estas tres especies, se concentran en problemas de pérdida de hábitat (Defler, 2013; Henao Diaz et al., 2020; Rodríguez-Bolaños et al., 2013). Por ende, esto implica una reducción en sus áreas de distribución, llevándolos hacia zonas apartadas y fragmentadas, que en el peor de los casos los podría conducir hasta la extinción. Estudios han indicado disminuciones de más del 30% en sus áreas de distribución en los últimos años, además de relacionar los factores específicos de cada especie para su consideración como especie altamente vulnerable. Lo más desalentador de estas apreciaciones es que se prevé que este patrón de afección continúe (Defler, 2010; Defler et al., 2010; Henao Diaz et al., 2020; Miller et al., 2004)

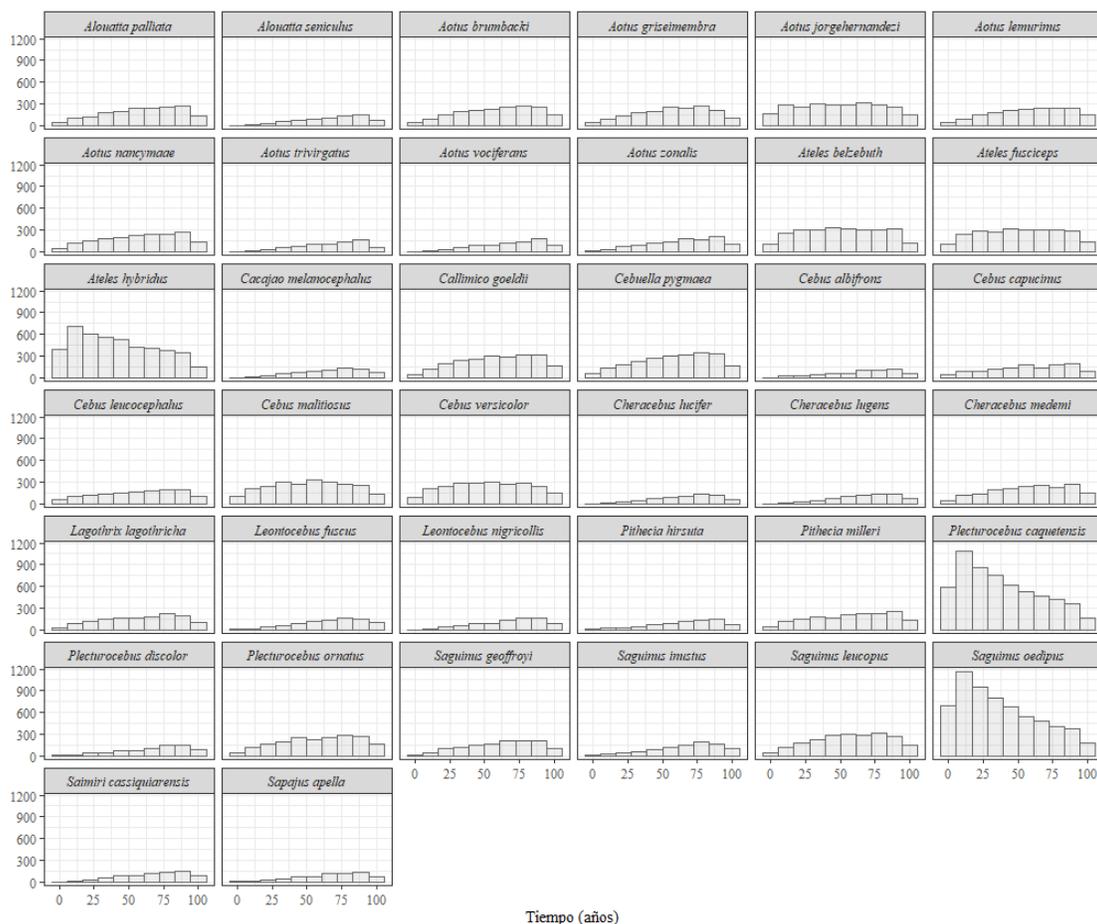


Figura 4. Tiempos de extinción muestreados para las especies de primates colombianos

Con mayor detalle, en la Figura 5 se expone la tendencia observada de las principales especies de primates colombianos, y se establece, un nivel de riesgo (Alto, Medio, Bajo) acorde a los tiempos hasta la extinción.

La gráfica de tiempos de extinción para los tres grupos de especies, es decir la Figura 5, se presenta como una generalidad de todas las especies de primates colombianos. Un grupo reducido de especies en riesgo alto comparte el patrón de distribución en los tiempos hasta la extinción, las especies en este nivel de riesgo son: *Saguinus oedipus*, *Plecturocebus caquetensis*, *Ateles hybridus* y *Ateles belzebuth*. En seguida, en el nivel de riesgo medio, se encuentran especies cuyas muestras de tiempos hasta la extinción, parecen distribuirse de manera uniforme a lo largo de los años; en este nivel se encuentran: *Aotus jorgehernandezi*, *Ateles fusciceps*,

*Cebus malitiosus*, *Cebus versicolor*, *Cebuella pygmaea* *Callimico goeldii*, *Saguinus leucopus*, *Plecturocebus ornatus*, *Cheracebus medemi*, *Aotus brumbacki*, *Aotus nancymae*, *Aotus lemurinus*, *Alouatta palliata*, *Aotus griseimembra*, *Pithecia milleri*, *Lagothrix lagothricha*, *Cebus leucocephalus*, *Saguinus geoffroyi*, *Cebus capucinus* y *Aotus zonalis*. En este sentido, está claro que las especies cuya categoría inicial se encuentra más cerca a EX, presentan un mayor número de muestras en tiempos relativamente cortos, a diferencia de especies cuya categoría inicial es distante a EX, en donde los tiempos hasta la extinción muestreados se distribuyen principalmente en años posteriores.

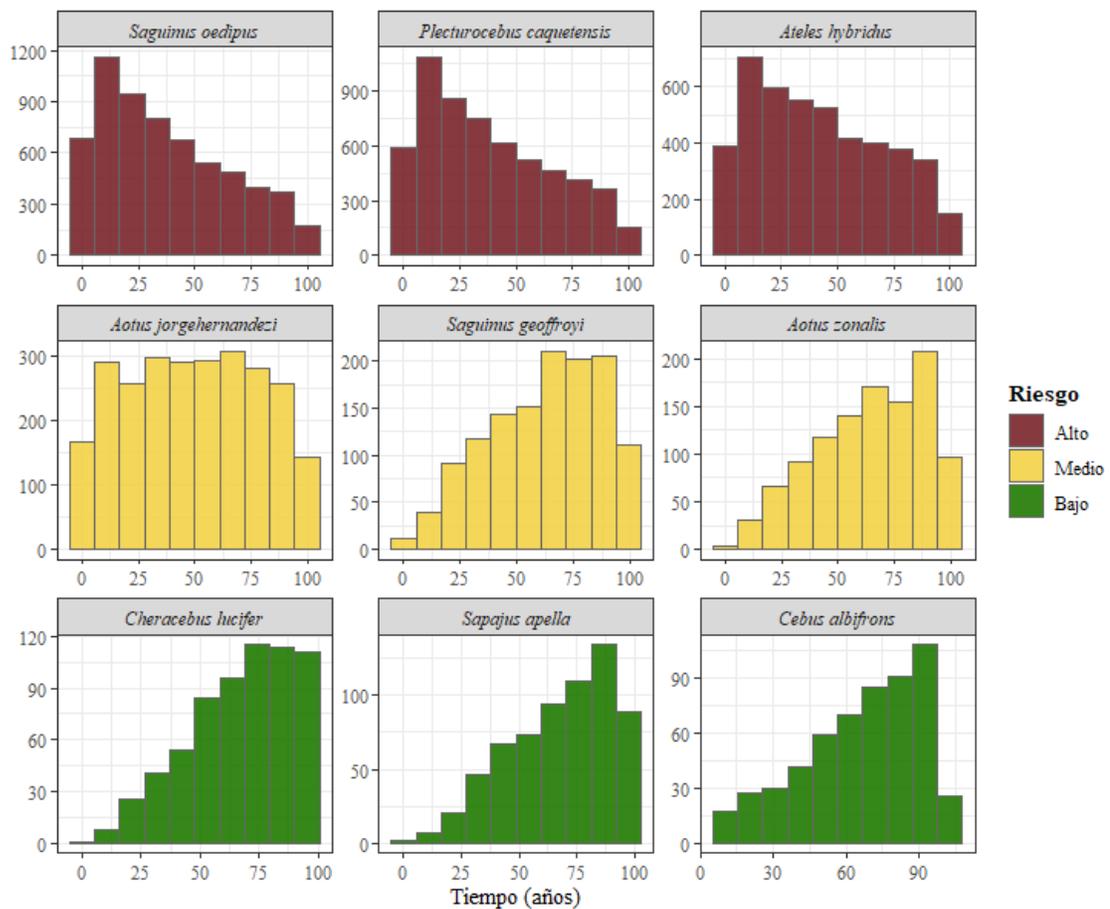


Figura 5. Comparativa – Tiempos de extinción de las principales especies de primates colombianos

Finalmente, en el nivel más bajo, se encuentran las especies de primates en las cuales los tiempos de extinción se prolongan mayoritariamente hacia el final del tiempo estimado. Estas

especies son *Saguinus inustus*, *Leontocebus fuscus*, *Leontocebus nigricollis*, *Aotus vociferans*, *Saimiri cassiquiarensis*, *Aotus trivirgatus*, *Plecturocebus discolor*, *Pithecia hirsuta*, *Alouatta seniculus*, *Cheracebus lugens*, *Cacajao melanocephalus*, *Cheracebus lucifer*, *Sapajus apella* y *Cebus albifrons*. Las especies se presentaron en orden, de acuerdo con las tasas de extinción estimadas. En ese sentido, *Saguinus oedipus* presenta la tasa y los tiempos hacia la extinción más cercanos dentro del grupo objetivo, y *Cebus albifrons* los más lejanos.

Hay que tener en cuenta que *Aotus jorgehernandezii* es una especie con categoría inicial DD, para la cual, se asignó una nueva categoría válida antes de realizar las simulaciones de extinción futura. Por este hecho, y por la asignación aleatoria de una categoría de clasificación cercana a CR, la especie presenta valores simulados sobreestimados y se le exhibe erróneamente en importante riesgo.

De acuerdo a las clasificaciones y estimaciones de pérdidas de biodiversidad presentadas en Henao Diaz et al. (2020), además de las áreas de ocurrencia actual de las especies de primates colombianos, el orden en que se presentan las especies aquí respecto a los niveles de riesgo, es acorde a lo expresado en dicha publicación. Ello, extiende la información disponible para la comprensión de las dinámicas poblacionales de las especies en sus diferentes grados de vulnerabilidad. Así, para las especies más críticas, no solo se cuenta ahora con estimaciones de pérdida de área de distribución, sino que se especifican los tiempos más probables para su extinción.

Las simulaciones de extinción futura que se expresan en la Figura 6, además de arrojar los tiempos hasta la extinción, predijeron la extinción de 6 especies durante el periodo futuro de 100 años (con un intervalo de confianza (IC) al 95%: 3 – 11 especies) un 15% de la diversidad total de primates colombianos, con una primera extinción dentro de los 20 años iniciales. Las especies extintas según la simulación y en orden de extinción, son *Saguinus oedipus*, *Plecturocebus caquetensis*, *Ateles hybridus*, *Ateles belzebuth*, *Ateles fusciceps* y *Cebus malitiosus*. Es evidente que estas especies de acuerdo con su historial lleguen a extinguirse, debido a que su situación actual es crítica. En algunos casos *Saguinus oedipus*, *Plecturocebus*

*caquetensis*, *Ateles hybridus* han llegado a catalogarse como las especies de primates con mayor peligro de extinción en toda Colombia (Defler, 2013; Defler et al., 2010, 2016; Uribe, 2017), en donde nuevamente, las fronteras agrícolas, las dinámicas de deforestación y extracción de minerales, además de las actividades de caza se hacen presentes.

Las particularidades asociadas a las pérdidas de biodiversidad en Colombia y específicamente de primates, son múltiples y abarcan problemáticas que van desde malas gestiones políticas, las cuales han inhabilitado posibles medidas de protección, hasta las actividades de expansión y explotación de los humanos por los recursos naturales de manera desmesurada. Todo esto, sin programas de restauración eficaces o promoción de una cultura de cuidado del medio ambiente (Defler, 2013).

Si bien, en el presente estudio se podría especificar uno a uno los patrones de cambio y estimación futura para cada especie dentro de los primates colombianos, el objetivo principal de la investigación es construir un conocimiento general sobre lo que se espera en materia de pérdida de diversidad y de cambios dentro de las categorías de clasificación de la IUCN durante los próximos 100 años. No obstante, aquí se mencionan los hallazgos particulares más relevantes, y se brindan como material anexo, los detalles de las demás especies.

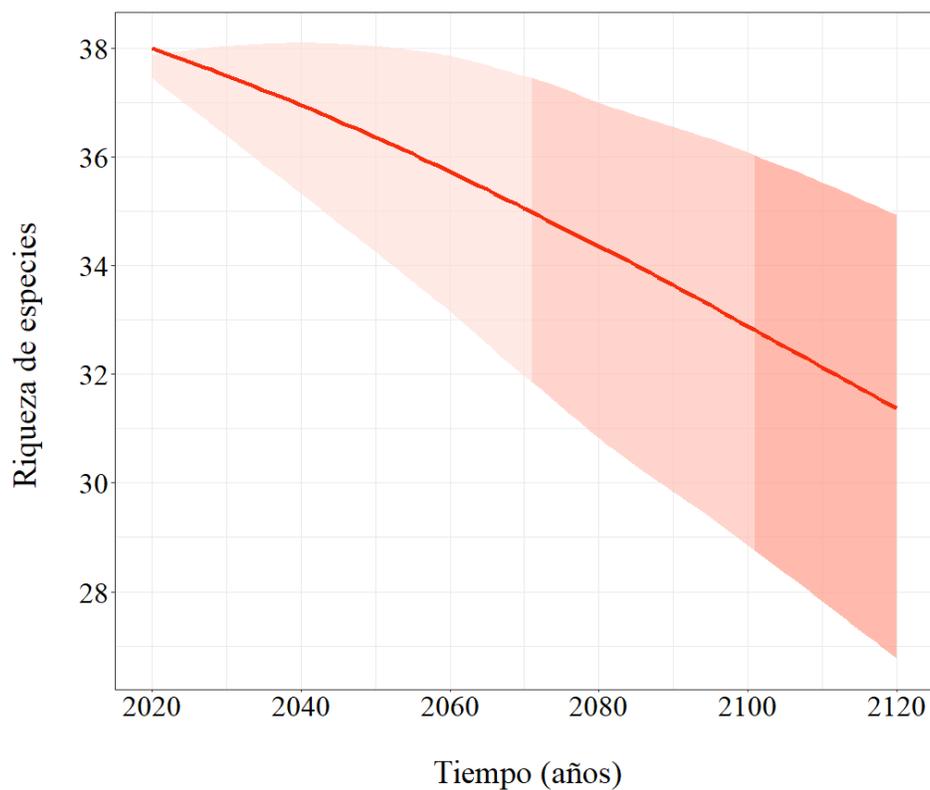


Figura 6. Predicción – Pérdida de diversidad de primates colombianos

La predicción de pérdida de diversidad de los primates colombianos también fue trazada de acuerdo con las categorías de clasificación, esto puede verse en la Figura 7, en donde se observa una fuerte tendencia de las especies a reunirse en la categoría EN con al menos 3 especies que se suman. Así mismo, se predice un aumento leve de 2 en el número de especies en la categoría NT y una pequeña disminución de 1 especie en la categoría CR, todas estas, se ven afectadas de manera indirecta por las 6 especies que se espera, se desplacen hacia EX.

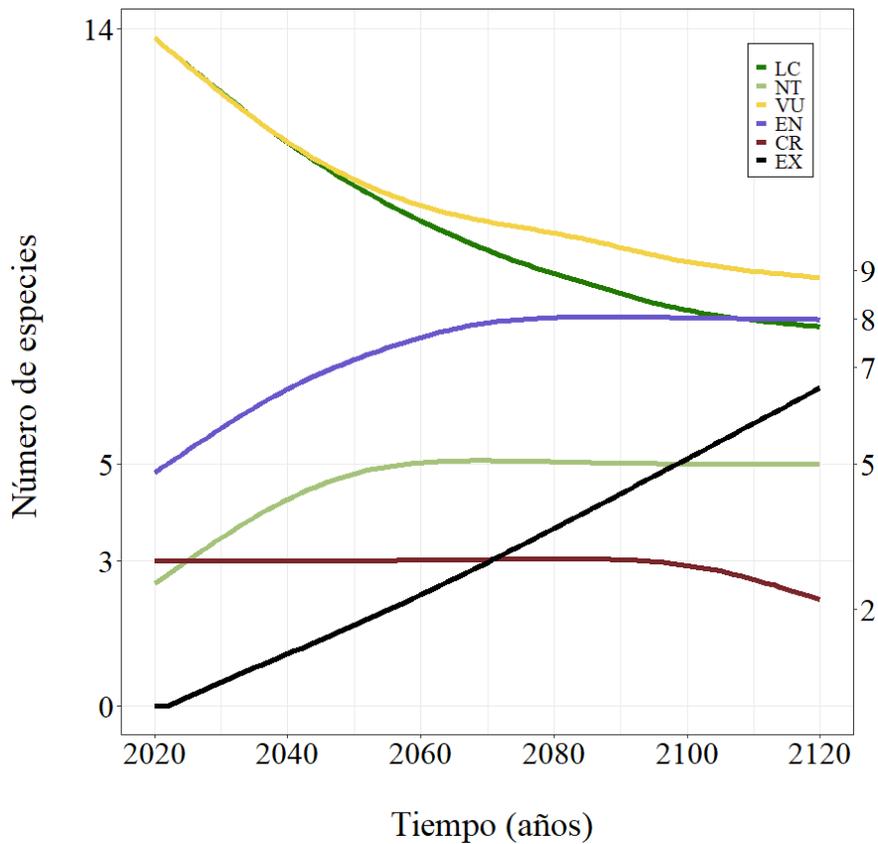


Figura 7. Trayectoria de la diversidad de primates colombianos respecto a las categorías de clasificación de la IUCN

La tasa de extinción específica de especies promedio para los primates colombianos fue de  $1.89 \times 10^{-3}$  extinciones por especie-año (IC 95%:  $1.88 - 1.91 \times 10^{-3}$ ). Esta tasa puede interpretarse como la tasa promedio de extinción de primates colombianos, que se espera durante los próximos 100 años. Las especies con mayor tasa de extinción estimada fueron *Saguinus oedipus* con  $1.01 \times 10^{-2}$  (IC 95%:  $0.99 - 1.04 \times 10^{-2}$ ), *Plecturocebus caquetensis* con  $9.08 \times 10^{-3}$  (IC 95%:  $8.85 - 9.30 \times 10^{-3}$ ) y *Ateles hybridus* con  $6.01 \times 10^{-3}$  (IC 95%:  $5.84 - 6.19 \times 10^{-3}$ ). Las demás tasas de extinción se presentan en formato de lista en el Anexo A.

De acuerdo con las tasas de extinción y las correspondientes simulaciones de extinción futura, se presenta en la Figura 8 las trayectorias estimadas de los tres grupos de especies de primates, la agrupación se realizó de acuerdo con sus movimientos entre categorías a lo largo

del periodo simulado. Estas agrupaciones, corresponden a un nivel de riesgo respecto a cuan cerca se encuentran de la categoría EX dentro de la simulación, y a los tiempos de extinción de la Figura 5. El gráfico comprende los taxones *Saguinus oedipus*, *Plecturocebus caquetensis*, *Ateles hybridus*, *Cebus malitiosus*, *Saguinus geoffroyi*, *Aotus zonalis*, *Cheracebus lucifer*, *Sapajus apella* y *Cebus albifrons*.

Al comparar la trayectoria general de la Figura 7, y las trayectorias específicas de especies en la Figura 8, puede parecer que los eventos de cambio suceden en frecuencias y momentos distintos. Esto se debe a que la trayectoria general, es dibujada tomando en cuenta una primera muestra estocástica de eventos a partir de las tasas de cambio y de extinción de las especies del grupo objetivo. A diferencia de las trayectorias específicas, las cuales corresponden a una segunda muestra de valores por especie, que bien pueden ser mayores o menores a los reportados de manera general.

La primera extinción de las especies de primates colombianos, observada a nivel general en la Figura 7 se estima se presente en los primeros 20 años. Para *Saguinus oedipus* específicamente, la primera especie que se prevé extinta, el cambio de categoría hacia EX ocurriría algunos años después según lo explicado anteriormente. A pesar de la presencia de estos eventos de cambio, no significa que dichos procesos, sucedan sin poder detenerse. Se está claro, que el proceso de extinción no depende de las estimaciones per se, sino que estas, son una causa de las dinámicas destructivas sobre los ecosistemas a lo largo de los años. También, es importante mencionar que las estimaciones aquí presentadas no incluyen procesos de restauración o conservación que se estén llevando a cabo. Por estas razones, es recomendable que la información aquí presentada sea tomada de forma cautelosa y no exclusivamente como una afirmación.

Hasta el presente, instituciones como la Unidad de Parques Nacionales Naturales (PNN) han evaluado la toma de acciones para proteger algunas de estas especies (Defler, 2013), acciones que van desde la realización de estudios e investigaciones, hasta la creación de nuevos parques nacionales naturales. Otros esfuerzos de conservación importantes, se han plasmado en

rigurosos planes de trabajo, priorizando estrategias de educación que involucran las comunidades locales (Feilen et al., 2018; Maynard et al., 2021; Uribe, 2017). Con esto, se espera concientizar y formar a los pobladores en el cuidado y protección de estas especies, sobre todo cuando no se encuentran en áreas protegidas.

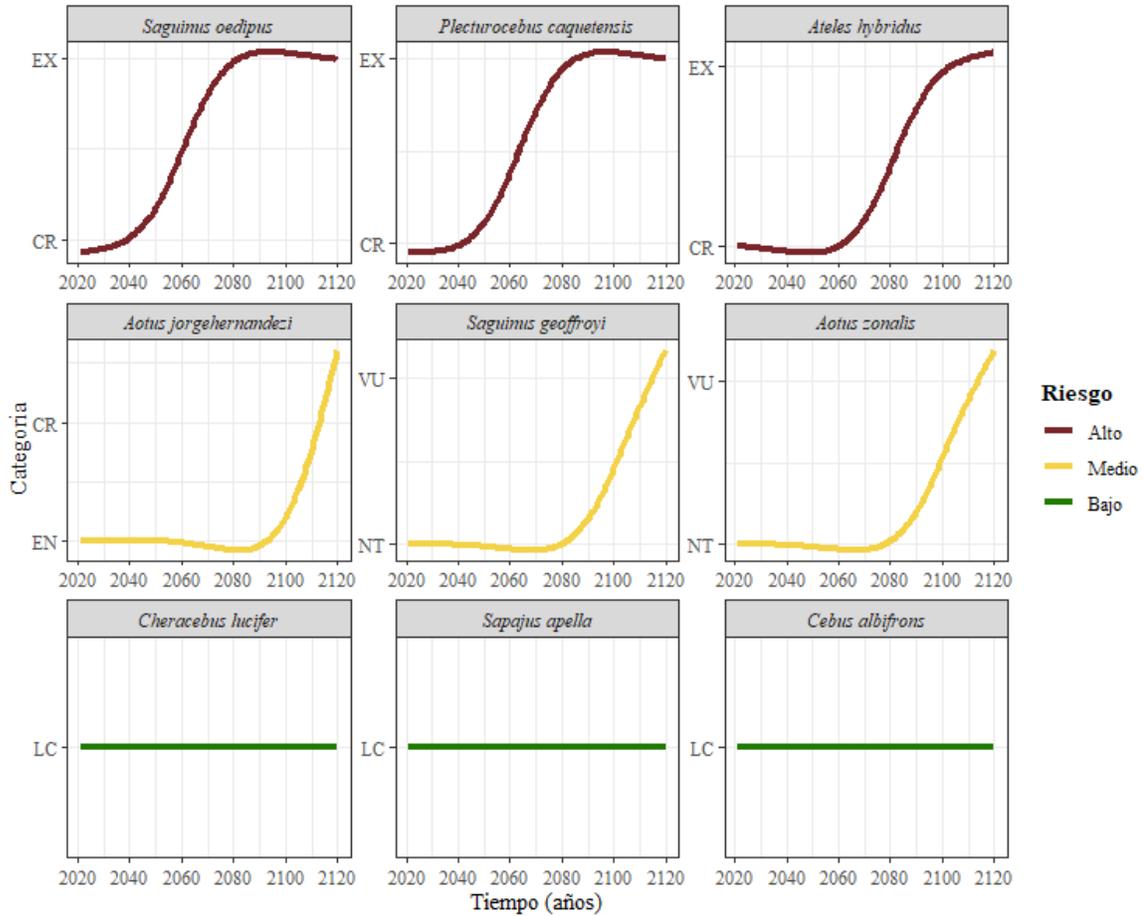


Figura 8. Trayectoria de especies en las categorías de la IUCN a lo largo del tiempo.

Conforme los resultados de las trayectorias de especies en las categorías de clasificación de la IUCN a través del tiempo, es decir la Figura 8, se establece entonces una relación lineal con los tiempos hasta la extinción expuestos en las Figuras 4 y 5, y las tasas de extinción (Anexo A). Esto directamente representa que los niveles de riesgo para la extinción son elevados en especies cuyo historial de la IUCN se ha caracterizado por numerosas presencias en las categorías EN y CR o que se han venido sumando a la categoría VU. Estas especies se listan a continuación: *Aotus brumbacki*, *Aotus griseimembra*, *Aotus lemurinus*, *Aotus nancymae*,

*Ateles belzebuth, Ateles fusciceps, Ateles hybridus, Callimico goeldii, Cebuella pygmaea, Cebus albifrons, Cebus capucinus, Cebus leucocephalus, Cebus malitiosus, Cebus versicolor, Cheracebus medemi, Lagothrix lagothricha, Pithecia milleri, Plecturocebus caquetensis, Plecturocebus ornatus, Saguinus leucopus, Saguinus oedipus.*

#### 4.5 Evaluación

Los resultados de precisión de las estimaciones en la simulación de extinción futura de los primates colombianos mostraron un comportamiento esperado de acuerdo con lo interpuesto como condiciones mínimas en el estudio de Andermann et al. (2021), los valores de configuración para llevar a cabo la simulación en este estudio se definieron en un grupo de referencia de más de 1000 especies y al menos 10000 réplicas durante la simulación de extinción futura. En consecuencia, las Figuras 9 y 10 presentan el rendimiento de las tasas de cambio y tasas de extinción estimadas frente a nuevas estimaciones obtenidas a partir de un duplicado muy cercano al historial de la IUCN usado originalmente. Estas últimas se denominan aquí “estimaciones del historial duplicado”.

Tomando como medida de calidad la recta en color rojo dibujada sobre los gráficos, el rendimiento más bajo fue obtenido en las estimaciones de las tasas de cambio que se observan en la Figura 9, debido a la alteración de la base sobre la que se calculan dichas tasas, es decir, el historial de la IUCN. Aunque se partió del historial original para duplicarlo, no es exactamente el mismo. No obstante, las diferencias en las tasas son mínimas y esto puede observarse en sus escalas de medida. Adicionalmente, las repercusiones de estas en las tasas de extinción, o en su defecto, en las simulaciones de extinción futura fueron mínimas.

Por otra parte, las estimaciones de las tasas de extinción mostradas en la Figura 10, obtuvieron un rendimiento bastante óptimo que puede verse claramente al seguir la recta roja. Este resultado, no solo refuerza las pruebas realizadas en Andermann et al. (2021) sobre el número de réplicas para la simulación, sino que reafirma la calidad de las estimaciones aquí presentadas.

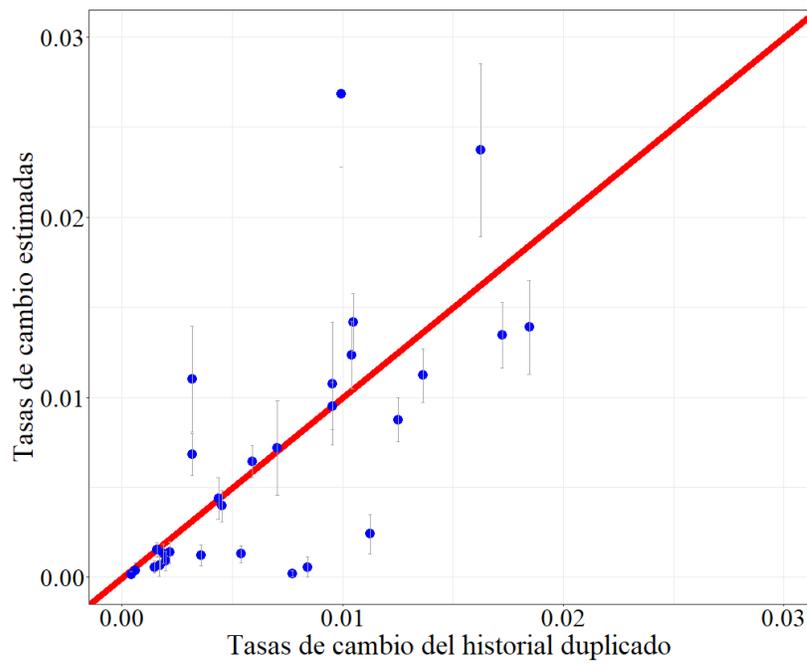


Figura 9. Precisión de la estimación de tasas de cambio

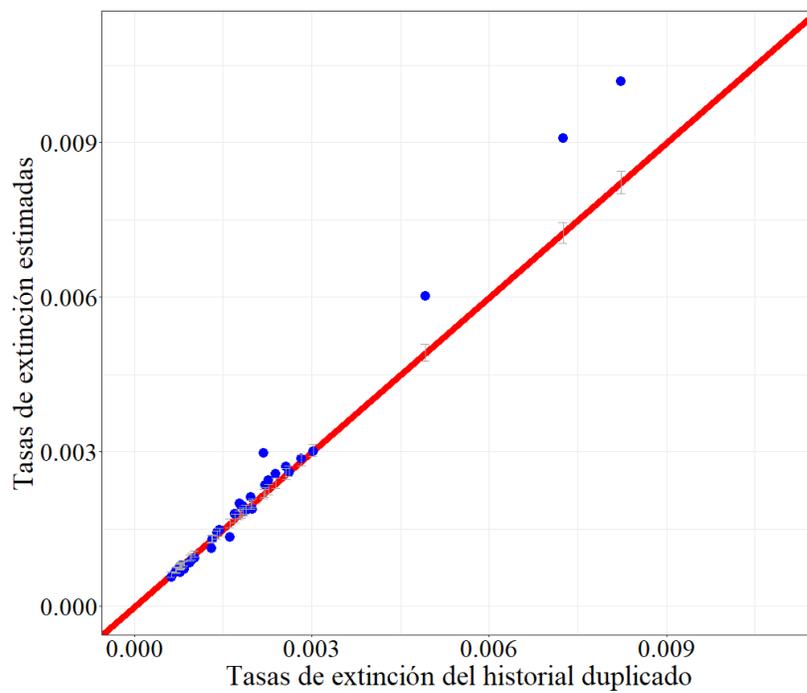


Figura 10. Precisión de la estimación de tasas de extinción

## CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 Conclusiones

Este estudio ha revelado valores concretos y categorías específicas sobre la velocidad esperada para la extinción de las especies colombianas en un periodo de 100 años junto con intervalos de confianza que incrementan paulatinamente. Así mismo, se ha identificado y ratificado, la relación existente entre el historial de la IUCN y el nivel de riesgo de extinción. A su vez, esta se encuentra ligada a las dinámicas de pérdida de biodiversidad ya identificadas por los expertos y sobre las cuales se hace especial mención.

Las autoridades ambientales, entes y grupos de conservación ecológicos, pueden encontrar en este estudio información relevante para determinar las prioridades de conservación en el grupo de primates colombianos. *Saguinus oedipus*, *Plecturocebus caquetensis*, *Ateles hybridus*, *Ateles belzebuth*, *Ateles fusciceps*, *Cebus malitiosus* y *Cebus versicolor* se catalogan como los taxones a los que se debe prestar mayor atención y sobre los cuales se deben tomar prontas medidas para garantizar su supervivencia.

La incorporación de valores complementarios como GL y BM, han hecho posible la estimación robusta de las tasas de cambio de categoría, y en su defecto, de los tiempos y tasas de extinción. Adicionalmente, los métodos de imputación aplicados de forma rigurosa permitieron la completitud de estos, incidiendo directamente en los resultados. Resultados que exponen que los mecanismos de imputación pueden ser herramientas muy útiles para inferir valores ausentes, sobre todo cuando las relaciones establecidas son claras.

Sin importar las predicciones realizadas por este o por cualquier otro modelo, es importante que las autoridades competentes tomen acciones de peso para la conservación de la diversidad. Esta vez, no solo para los primates colombianos, sino para todas las especies dentro de los

ecosistemas de bosques. Se deben implementar medidas que protejan sus áreas de distribución y de esta manera, frenar la incommensurable pérdida de vida silvestre en nuestro país. Hacerlo, beneficiará a todas las especies que habitan esta clase de hábitats y les garantizará un futuro mucho mejor del que en la actualidad se espera.

## 5.2 Recomendaciones

Como se ha hecho mención, se recomienda la adopción de estas estimaciones con especial cuidado, evitando en todo caso las aseveraciones o afirmaciones sobre el futuro de los primates colombianos. Las estimaciones aquí expuestas, son una representación para el futuro, con base en el historial de la IUCN y algunas características de especies con las cuales se relacionan. Por ende, las estimaciones únicamente pretenden advertir sobre los posibles riesgos de extinción de algunas especies de primates colombianos, dadas las actividades y categorías históricas que se han presentado durante su historia natural.

Teniendo en cuenta lo anterior, se recomienda a los usuarios que consulten esta investigación, para monitorear y dar seguimiento a las especies que presentaron mayor probabilidad de extinción. En esos casos, además de indicar su posible extinción de acuerdo con los patrones históricos, se está advirtiendo sobre su respectivo nivel de vulnerabilidad.

Para futuras investigaciones que pretendan establecer categorías de clasificación de riesgo concretas, se recomienda la incorporación de variables asociadas a la demografía de las especies y que para el presente estudio no se incluyeron. Variables como el número de individuos registrado, las dimensiones de las áreas de distribución actual o si existen medidas o áreas especiales de protección para estos, ya que pueden mejorar el asertividad de las estimaciones.

Otros aspectos no incluidos en esta investigación y que podrían ser un tema de discusión, es el tipo de modelo o algoritmo para realizar las estimaciones futuras. En este grupo biológico y temática, aún quedan varios modelos por aplicar y comparar.

De acuerdo con lo anterior, también se recomienda la aplicación de otros mecanismos de validación para las estimaciones, que bien podrían ser estudios prospectivos que validen las estimaciones aquí presentadas, o si se prefiere, la realización de un análisis de sensibilidad mucho más amplio.

Finalmente, se recomienda la toma de medidas en pro de la protección del hábitat de los primates colombianos, y sobre las cuales se pueden aplicar los resultados de esta investigación, bien sea para definir esquemas de priorización o simplemente como un soporte bibliográfico más, para enfatizar la necesidad de conservación de este grupo taxonómico.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akaike, H. (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19(6), 716-723. <https://doi.org/10.1109/TAC.1974.1100705>
- Akaike, H. (1980). Likelihood and the Bayes procedure. *Trabajos de Estadística Y de Investigación Operativa*, 31(1), 143-166. <https://doi.org/10.1007/BF02888350>
- Akçakaya, H. R., Butchart, S. H. M., Mace, G. M., Stuart, S. N., & Hilton-Taylor, C. (2006). Use and misuse of the IUCN Red List Criteria in projecting climate change impacts on biodiversity. *Global Change Biology*, 12(11), 2037-2043. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01253.x>
- Alvarez, V. B. (2022). *¿Qué nos enseñan los monos sobre evolución humana?* Editorial Universitaria (Cuba).
- Andermann, T., Faurby, S., Cooke, R., Silvestro, D., & Antonelli, A. (2021). iucn\_sim: A new program to simulate future extinctions based on IUCN threat status. *Ecography*, 44(2), 162-176. <https://doi.org/10.1111/ecog.05110>
- Anyango-van Zwieten, N., Lamers, M., & van der Duim, R. (2019). Funding for nature conservation: A study of public finance networks at World Wide Fund for nature (WWF). *Biodiversity and Conservation*, 28(14), 3749-3766. <https://doi.org/10.1007/s10531-019-01848-y>
- APC. (2020). *Asociación Primatológica Colombiana*. Asociación Primatológica Colombiana. <https://www.asoprimatologicacolombiana.org/>

- Aquino, R., Arévalo, I., Pezo, E., López, L., Aquino, R., Arévalo, I., Pezo, E., & López, L. (2021). Estado actual de *Cheracebus* sp. (Primates: Pitheciidae) y de su hábitat entre los ríos Tigre y Nanay, Amazonía peruana. *Revista Peruana de Biología*, 28(2). <https://doi.org/10.15381/rpb.v28i2.20463>
- Aramburo Jaramillo, F. (2021). *Efectividad de dispersión de semillas por monos churucos (Lagothrix lagothricha)* [Universidad de los Andes]. <https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/51682>
- Bautista Plazas, S. (2019). *Patrones de productividad de frutos y dispersión de semillas en diferentes bosques de Colombia, y su relación con la biomasa de primates* [Universidad de los Andes]. <https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/44173>
- Betts, J., Young, R. P., Hilton-Taylor, C., Hoffmann, M., Rodríguez, J. P., Stuart, S. N., & Milner-Gulland, E. J. (2020). A framework for evaluating the impact of the IUCN Red List of threatened species. *Conservation Biology*, 34(3), 632-643. <https://doi.org/10.1111/cobi.13454>
- Braat, L., & Ten Brink, P. (2010). The cost of policy inaction. *The case of not meeting the*.
- Butchart, S. H. M., Akçakaya, H. R., Chanson, J., Baillie, J. E. M., Collen, B., Quader, S., Turner, W. R., Amin, R., Stuart, S. N., & Hilton-Taylor, C. (2007). Improvements to the Red List Index. *PLOS ONE*, 2(1), e140. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0000140>
- Carretero, X. (2021). IUCN Red List of Threatened Species: *Pithecia hirsuta*. *IUCN Red List of Threatened Species*. <https://www.iucnredlist.org/species/70606542/206548831>
- Castillo Ayala, C. I. (2016). *Conservation planning for non-human primates in Colombia (South America)* [University of Alberta]. <https://doi.org/10.7939/R3ZW1935C>

- Castro-Avendaño, K., Gil Carrasco, R., Granados-Barrantes, K., & Moya-Gutiérrez, A. (2020). *Modelos predictivos para la distribución de las especies de primates en Costa Rica*.
- Chapman, C. A., & Dunham, A. E. (2018). Primate Seed Dispersal and Forest Restoration: An African Perspective for a Brighter Future. *International Journal of Primatology*, 39(3), 427-442. <https://doi.org/10.1007/s10764-018-0049-3>
- Cooke, R. S. C., Eigenbrod, F., & Bates, A. E. (2019). Projected losses of global mammal and bird ecological strategies. *Nature Communications*, 10(1), 2279. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-10284-z>
- Cooke, R. S. C., Gilbert, T. C., Riordan, P., & Mallon, D. (2018). Improving generation length estimates for the IUCN Red List. *PLOS ONE*, 13(1), e0191770. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0191770>
- Cortes-Ortíz, L., Rosales-Meda, M., Williams-Guillén, K., Solano-Rojas, D., Méndez-Carvajal, P. G., de la Torre, S., Moscoso, P., Rodríguez, V., Palacios, E., Canales-Espinosa, D., Link, A., Guzman-Caro, D. C., & Cornejo, F. M. (2015). IUCN Red List of Threatened Species: *Alouatta palliata*. *IUCN Red List of Threatened Species*. <https://www.iucnredlist.org/species/39960/190425583>
- Davis, M., Faurby, S., & Svenning, J.-C. (2018). Mammal diversity will take millions of years to recover from the current biodiversity crisis. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(44), 11262-11267. <https://doi.org/10.1073/pnas.1804906115>
- De La Ossa, J., Galván-Guevara, S., & Fajardo-Patiño, A. (2013). Densidad, composición de grupo y distribución vertical de primates simpátricos en un bosque de galería fragmentado, Colosó, Sucre-Colombia. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 16(1), 185-192.

- De La Ossa V, J., Galván-Guevara, S., & Fajardo-Patiño, A. (2013). DENSIDAD, COMPOSICIÓN DE GRUPO Y DISTRIBUCIÓN VERTICAL DE PRIMATES SIMPÁTRICOS EN UN BOSQUE DE GALERÍA FRAGMENTADO, COLOSÓ, SUCRE - COLOMBIA. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 16(1), 185-192.
- de la Torre, S., Shanee, S., Palacios, E., Calouro, A. M., Messias, M. R., & Valença-Montenegro, M. M. (2015). IUCN Red List of Threatened Species: *Cebuella pygmaea*. *IUCN Red List of Threatened Species*.  
<https://www.iucnredlist.org/species/136926/200203263>
- de Luna, A. G., & Link, A. (2018). Distribution, population density and conservation of the critically endangered brown spider monkey (*Ateles hybridus*) and other primates of the inter-Andean forests of Colombia. *Biodiversity and Conservation*, 27(13), 3469-3511.  
<https://doi.org/10.1007/s10531-018-1611-1>
- Defler, T. R. (2003). *Primates de Colombia*. Conservación Internacional Colombia.
- Defler, T. R. (2010). *Historia natural de los primates colombianos*. Universidad Nacional de Colombia.
- Defler, T. R. (2013). Aspectos sobre la conservación de los primates colombianos:¿Cuál es el futuro? En *PRIMATES COLOMBIANOS en Peligro de Extinción* (T. R. Defler, P. R. Stevenson, M. L. Bueno&D. C. Guzmán-Caro (Eds.), p. 2). Asociación Primatológica Colombiana.  
[https://www.asoprimatologicacolombiana.org/uploads/1/1/4/7/11474090/defler\\_2013\\_-\\_pcpe\\_capítulo\\_1.pdf](https://www.asoprimatologicacolombiana.org/uploads/1/1/4/7/11474090/defler_2013_-_pcpe_capítulo_1.pdf)

- Defler, T. R., Bueno, M. L., & García, J. (2010). Callicebus caquetensis: A New and Critically Endangered Titi Monkey from Southern Caquetá, Colombia. *Primate Conservation*, 2010(25), 1-9. <https://doi.org/10.1896/052.025.0101>
- Defler, T. R., García, J., Almario, L., Acero, A., Bueno, M. L., Bloo, P., Hoyos, M., Arciniegas, S., & Ibáñez, C. (2016). Plan de Conservación de Callicebus caquetensis. *Bogotá, DC: Universidad Nacional de Colombia*.
- Edwards, P. J., & Abivardi, C. (1998). The value of biodiversity: Where ecology and economy blend. *Biological Conservation*, 83(3), 239-246. [https://doi.org/10.1016/S0006-3207\(97\)00141-9](https://doi.org/10.1016/S0006-3207(97)00141-9)
- 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. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2010.00725.x>
- Faurby, S., Pedersen, R. Ø., Davis, M., Schowanek, S. D., Jarvie, S., Antonelli, A., & Svenning, J.-C. (2020). *MegaPast2Future/PHYLACINE\_1.2: PHYLACINE Version 1.2.1*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3690867>
- Feilen, K. L., Guillen, R. R., Vega, J., & Savage, A. (2018). Developing successful conservation education programs as a means to engage local communities in protecting cotton-top tamarins (*Saguinus oedipus*) in Colombia. *Journal for Nature Conservation*, 41, 44-50. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2017.10.003>
- Feng, C., Cao, M., Wang, W., Wang, H., Liu, F., Zhang, L., Du, J., Zhou, Y., Huang, W., & Li, J. (2021). Which management measures lead to better performance of China's protected areas in reducing forest loss? *Science of The Total Environment*, 764, 142895. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142895>

- Franco-E., L., Gómez-R., D. A., Peñuela, S. M., Roncancio-D, N., Franco-E., L., Gómez-R., D. A., Peñuela, S. M., & Roncancio-D, N. (2019). Nuevo registro de Mono araña negro colombiano (*Ateles fusciceps*) en el Parque Nacional Natural Las Orquídeas. *Caldasia*, 41(2), 433-435. <https://doi.org/10.15446/caldasia.v41n2.71185>
- Gardner, T. A., Von Hase, A., Brownlie, S., Ekstrom, J. M. M., Pilgrim, J. D., Savy, C. E., Stephens, R. T. T., Treweek, J., Ussher, G. T., Ward, G., & Ten Kate, K. (2013). Biodiversity Offsets and the Challenge of Achieving No Net Loss. *Conservation Biology*, 27(6), 1254-1264. <https://doi.org/10.1111/cobi.12118>
- Goolsby, E. W., Bruggeman, J., & Ané, C. (2017). Rphylopars: Fast multivariate phylogenetic comparative methods for missing data and within-species variation. *Methods in Ecology and Evolution*, 8(1), 22-27. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12612>
- Green, R. E., Balmford, A., Crane, P. R., Mace, G. M., Reynolds, J. D., & Turner, R. K. (2005). A Framework for Improved Monitoring of Biodiversity: Responses to the World Summit on Sustainable Development. *Conservation Biology*, 19(1), 56-65. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2005.00289.x>
- Henao Diaz, F., Stevenson, P., Carretero-Pinzón, X., Castillo-Ayala, C., Chacón Pacheco, J., Defler, T., García-Villalba, J., Guzmán Caro, D. C., Link, A., Maldonado, Á. M., Moreno, M. I., Palacios, E., Rodríguez Rodríguez, A., Roncancio Duque, N. J., Soto Calderón, I. D., Soto, L., Velásquez-Tibatá, J., Olaya-Rodríguez, M. H., Noguera-Urbano, E., ... Cruz Rodríguez, C. (2020). *Atlas de la biodiversidad de Colombia. Primates*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. <http://repository.humboldt.org.co/handle/20.500.11761/35544>

- Hirt, M. R., Barnes, A. D., Gentile, A., Pollock, L. J., Rosenbaum, B., Thuiller, W., Tucker, M. A., & Brose, U. (2021). Environmental and anthropogenic constraints on animal space use drive extinction risk worldwide. *Ecology Letters*, 24(12), 2576-2585. <https://doi.org/10.1111/ele.13872>
- Hisano, M., Searle, E. B., & Chen, H. Y. H. (2018). Biodiversity as a solution to mitigate climate change impacts on the functioning of forest ecosystems. *Biological Reviews*, 93(1), 439-456. <https://doi.org/10.1111/brv.12351>
- IUCN. (2020). *Summary statistics – Table 9: Possibly extinct species*. IUCN Red List of Threatened Species. [www.iucnredlist.org/resources/summary-statistics](http://www.iucnredlist.org/resources/summary-statistics)
- IUCN. (2021). *The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2021-3*. The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2021-3. <https://www.iucnredlist.org/en>
- IUCN. (2022a). *Guidelines for Using the IUCN Red List Categories and Criteria Ver. 15*. IUCN Red List of Threatened Species. <https://www.iucnredlist.org/resources/redlistguidelines>
- IUCN. (2022b). *Planned Red List Updates—How often is The IUCN Red List updated?* IUCN Red List of Threatened Species. <https://www.iucnredlist.org/assessment/updates>
- IUCN. (2022c). *The IUCN Red List of Threatened Species*. IUCN Red List of Threatened Species. <https://www.iucnredlist.org/en>
- IUCN Species Survival Commission (SSC). (2001). *IUCN Red List categories and criteria, version 3.1*. IUCN. <https://portals.iucn.org/library/node/7977>
- Kindvall, O., & Gärdenfors, U. (2003). Temporal Extrapolation of PVA Results in Relation to the IUCN Red List Criterion E. *Conservation Biology*, 17(1), 316-321.
- Link, A., de Luna, G., & Burbano-Girón, J. (2013). Estado de conservación en Colombia de uno de los primates más amenazados con la extinción: El mono araña café (*Ateles hybridus*).

- En *PRIMATES COLOMBIANOS en Peligro de Extinción* (T. R. Defler, P. R. Stevenson, M. L. Bueno & D. C. Guzmán-Caro (Eds.), p. 87). Asociación Primatológica Colombiana. [https://www.researchgate.net/profile/Thomas-Defler-2/publication/333458034\\_PRIMATES\\_COLOMBIANOS\\_EN\\_PELIGRO\\_DE\\_EXTINCCION/links/5ceefae0299bf1fb18494755/PRIMATES-COLOMBIANOS-EN-PELIGRO-DE-EXTINCCION.pdf#page=102](https://www.researchgate.net/profile/Thomas-Defler-2/publication/333458034_PRIMATES_COLOMBIANOS_EN_PELIGRO_DE_EXTINCCION/links/5ceefae0299bf1fb18494755/PRIMATES-COLOMBIANOS-EN-PELIGRO-DE-EXTINCCION.pdf#page=102)
- Link, A., Guzmán-Caro, D. C., Roncancio, N., Mittermeier, R. A., & Rodríguez, V. (2020). IUCN Red List of Threatened Species: *Saguinus leucopus*. *IUCN Red List of Threatened Species*. <https://www.iucnredlist.org/species/19819/192550769>
- Link, A., Luna, A. G. de, Alfonso, F., Giraldo-Beltran, P., & Ramirez, F. (2010). Initial effects of fragmentation on the density of three neotropical primate species in two lowland forests of Colombia. *Endangered Species Research*, 13(1), 41-50. <https://doi.org/10.3354/esr00312>
- Marsh, L. K., Link, A., Palacios, E., Stevenson, P. R., de la Torre, S., & Moscoso, P. (2015). IUCN Red List of Threatened Species: *Pithecia milleri*. *IUCN Red List of Threatened Species*. <https://www.iucnredlist.org/species/17407/192446875>
- Maynard, L., Savage, A., Vega, J., DeWan, A., Díaz, L., Gezon, Z., & Guillen, R. (2021). Can creating sustainable livelihoods with communities impact cotton-top tamarin (*Saguinus oedipus*) conservation in Colombia? *Conservation Science and Practice*, 3(8), e476. <https://doi.org/10.1111/csp2.476>
- McConkey, K. R. (2018). Seed Dispersal by Primates in Asian Habitats: From Species, to Communities, to Conservation. *International Journal of Primatology*, 39(3), 466-492. <https://doi.org/10.1007/s10764-017-0013-7>

- Miller, L., Savage, A., & Giraldo, H. (2004). Quantifying remaining forested habitat within the historic distribution of the cotton-top tamarin (*Saguinus oedipus*) in Colombia: Implications for long-term conservation. *American Journal of Primatology*, *64*(4), 451-457. <https://doi.org/10.1002/ajp.20091>
- Monroe, M. J., Butchart, S. H. M., Mooers, A. O., & Bokma, F. (2019). The dynamics underlying avian extinction trajectories forecast a wave of extinctions. *Biology Letters*, *15*(12), 20190633. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2019.0633>
- Mooers, A. Ø., Faith, D. P., & Maddison, W. P. (2008). Converting Endangered Species Categories to Probabilities of Extinction for Phylogenetic Conservation Prioritization. *PLOS ONE*, *3*(11), e3700. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0003700>
- Moscoso, P., Link, A., Defler, T. R., de la Torre, S., Cortes-Ortíz, L., Méndez-Carvajal, P. G., & Shanee, S. (2020). IUCN Red List of Threatened Species: *Ateles fusciceps*. *IUCN Red List of Threatened Species*. <https://www.iucnredlist.org/species/135446/191687087>
- Münkemüller, T., Lavergne, S., Bzeznik, B., Dray, S., Jombart, T., Schiffrers, K., & Thuiller, W. (2012). How to measure and test phylogenetic signal. *Methods in Ecology and Evolution*, *3*(4), 743-756. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2012.00196.x>
- Oliveira, B. F., Scheffers, B. R., & Costa, G. C. (2020). Decoupled erosion of amphibians' phylogenetic and functional diversity due to extinction. *Global Ecology and Biogeography*, *29*(2), 309-319. <https://doi.org/10.1111/geb.13031>
- Ortiz-Moreno, M. L., Rojas, N., Aguilar, L., Lopes, L. E., Ferreira, P. A., Carretero-Pinzón, X., & Pires, J. S. R. (2022). PRESENCE OF AN ENDANGERED ENDEMIC PRIMATE IN AN EVER-CHANGING LANDSCAPE IN THE EASTERN PLAINS OF

- COLOMBIA. *Acta Biológica Colombiana*, 27(2), Article 2.  
<https://doi.org/10.15446/abc.v27n2.91023>
- Pacifici, M., Santini, L., Marco, M. D., Baisero, D., Francucci, L., Marasini, G. G., Visconti, P., & Rondinini, C. (2013). Generation length for mammals. *Nature Conservation*, 5, 89-94. <https://doi.org/10.3897/natureconservation.5.5734>
- Pagel, M. (1997). Inferring evolutionary processes from phylogenies. *Zoologica Scripta*, 26(4), 331-348. <https://doi.org/10.1111/j.1463-6409.1997.tb00423.x>
- Pagel, M. (1999). Inferring the historical patterns of biological evolution. *Nature*, 401(6756), 877-884. <https://doi.org/10.1038/44766>
- Pereira, V. (2010). *Primatología en Colombia avances al Principio del Milenio*.
- Pereira-Bengoa, V., Stevenson, P. R., Bueno, M., & Nassar-Montoya, F. (2010). *Primatología en Colombia: Avances al principio del milenio*. Gráficas San Martín. Fundación Universitaria San Martín.
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3), 231-259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>
- Piedrahita-Cortés, J., & Soler-Tovar, D. (2016). Geographical distribution of the red howler monkey (*Alouatta seniculus*) and yellow fever in Colombia. *Biomédica*, 36, 116-124. <https://doi.org/10.7705/biomedica.v36i0.2929>
- Powers, R. P., & Jetz, W. (2019). Global habitat loss and extinction risk of terrestrial vertebrates under future land-use-change scenarios. *Nature Climate Change*, 9(4), 323-329. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0406-z>

- Puppim de Oliveira, J. A., Balaban, O., Doll, C. N. H., Moreno-Peñaranda, R., Gasparatos, A., Iossifova, D., & Suwa, A. (2011). Cities and biodiversity: Perspectives and governance challenges for implementing the convention on biological diversity (CBD) at the city level. *Biological Conservation*, 144(5), 1302-1313. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2010.12.007>
- Ramis, L., Álvarez-Solas, S., & Peñuela, M. (2018). DIAGNÓSTICO PRELIMINAR DE LA PRESENCIA DE PRIMATES QUE HABITAN EL PIEDEMONTE DE LA RESERVA BIOLÓGICA COLONSO-CHALUPAS. *Revista de Investigación Talentos*, 5(2), 1-11. <https://doi.org/10.33789/talentos.5.78>
- Razafindratsima, O. H., Sato, H., Tsuji, Y., & Culot, L. (2018). Advances and Frontiers in Primate Seed Dispersal. *International Journal of Primatology*, 39(3), 315-320. <https://doi.org/10.1007/s10764-018-0047-5>
- Reddy, C. S. (2021). Remote sensing of biodiversity: What to measure and monitor from space to species? *Biodiversity and Conservation*, 30(10), 2617-2631. <https://doi.org/10.1007/s10531-021-02216-5>
- Reed, M. G. (2016). Conservation (In)Action: Renewing the Relevance of UNESCO Biosphere Reserves. *Conservation Letters*, 9(6), 448-456. <https://doi.org/10.1111/conl.12275>
- Revell, L. J., Harmon, L. J., & Collar, D. C. (2008). Phylogenetic Signal, Evolutionary Process, and Rate. *Systematic Biology*, 57(4), 591-601. <https://doi.org/10.1080/10635150802302427>
- Ricciardi, A., & Rasmussen, J. B. (1999). Extinction Rates of North American Freshwater Fauna. *Conservation Biology*, 13(5), 1220-1222. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1999.98380.x>

- Robinson, J. G. (2012). Common and Conflicting Interests in the Engagements between Conservation Organizations and Corporations. *Conservation Biology*, 26(6), 967-977. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2012.01914.x>
- Rodríguez-Bolaños, A., González-Caro, S., Etter, A., & Stevenson, P. R. (2013). Modelos predictivos de distribución para los micos atelinos (*Lagothrix* y *Ateles*) en Colombia. En *PRIMATES COLOMBIANOS en Peligro de Extinción* (T. R. Defler, P. R. Stevenson, M. L. Bueno & D. C. Guzmán-Caro (Eds.), p. 194). Asociación Primatológica Colombiana. [https://www.asoprimatologicacolombiana.org/uploads/1/1/4/7/11474090/rodríguez-bolaños\\_et\\_al\\_2013\\_-\\_pcpe\\_capítulo\\_13.pdf](https://www.asoprimatologicacolombiana.org/uploads/1/1/4/7/11474090/rodríguez-bolaños_et_al_2013_-_pcpe_capítulo_13.pdf)
- Rondinini, C., Di Marco, M., Visconti, P., Butchart, S. H. M., & Boitani, L. (2014). Update or Outdate: Long-Term Viability of the IUCN Red List. *Conservation Letters*, 7(2), 126-130. <https://doi.org/10.1111/conl.12040>
- Rylands, A. B., Mittermeier, R. A., & Rodríguez-Luna, E. (1997). Conservation of Neotropical Primates: Threatened Species and An Analysis of Primate Diversity by Country and Region. *Folia Primatologica*, 68(3-5), 134-160. <https://doi.org/10.1159/000157243>
- Semper-Pascual, A., Decarre, J., Baumann, M., Busso, J. M., Camino, M., Gómez-Valencia, B., & Kuemmerle, T. (2019). Biodiversity loss in deforestation frontiers: Linking occupancy modelling and physiological stress indicators to understand local extinctions. *Biological Conservation*, 236, 281-288. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.05.050>
- Shiiba, N., Maekawa, T., & Vegh, T. (2022). *Tracking International Aid Projects for Ocean Conservation and Climate Action* (Indonesia, Philippines). Asian Development Bank. <https://www.adb.org/publications/tracking-international-aid-projects-for-ocean-conservation-and-climate-action>

- Silvestro, D., Salamin, N., Antonelli, A., & Meyer, X. (2019). Improved estimation of macroevolutionary rates from fossil data using a Bayesian framework. *Paleobiology*, 45(4), 546-570. <https://doi.org/10.1017/pab.2019.23>
- Soares, N. F. de J. (2021). *Predicting IUCN conservation status through machine learning: A case study on reptiles*. <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/139425>
- Stevenson, P. R., Guzmán, D. C., & Defler, T. R. (2010). Conservation of Colombian Primates: An Analysis of Published Research. *Tropical Conservation Science*, 3(1), 45-62. <https://doi.org/10.1177/194008291000300105>
- Thomas, G. H., & Freckleton, R. P. (2012). MOTMOT: Models of trait macroevolution on trees. *Methods in Ecology and Evolution*, 3(1), 145-151. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2011.00132.x>
- Tirira, D. G. (2021). *Primates del ecuador: Aportes al conocimiento de su diversidad, distribución y conservación* (p. 1) [[Http://purl.org/dc/dc/type/Text](http://purl.org/dc/dc/type/Text), Universidad de Salamanca]. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=304713>
- Uribe, A. G. de L. (2017). *Ecología, densidades poblacionales y estado de conservación de los Primates del Magdalena medio colombiano con énfasis en uno de los primates más amenazados con la extinción en el mundo, el mono araña café (Ateles hybridus)* [[Http://purl.org/dc/dc/type/Text](http://purl.org/dc/dc/type/Text), Universidad Complutense de Madrid]. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=134056>
- Veron, S., Penone, C., Clergeau, P., Costa, G. C., Oliveira, B. F., São-Pedro, V. A., & Pavoine, S. (2016). Integrating data-deficient species in analyses of evolutionary history loss. *Ecology and Evolution*, 6(23), 8502-8514. <https://doi.org/10.1002/ece3.2390>

- Villota, J., Delgado-Bermeo, G., Ruiz, A., García-Villalba, J. E., & Ramírez-Chaves, H. E. (2022). Actualización de la distribución e historia natural de *Plecturocebus caquetensis* (Mammalia: Pitheciidae) en Colombia. *Biota Colombiana*, 23(1), e1007-e1007. <https://doi.org/10.21068/2539200X.1007>
- Welch, J. N., & Beaulieu, J. M. (2018). Predicting Extinction Risk for Data Deficient Bats. *Diversity*, 10(3), 63. <https://doi.org/10.3390/d10030063>
- Worm, B., Barbier, E. B., Beaumont, N., Duffy, J. E., Folke, C., Halpern, B. S., Jackson, J. B. C., Lotze, H. K., Micheli, F., Palumbi, S. R., Sala, E., Selkoe, K. A., Stachowicz, J. J., & Watson, R. (2006). Impacts of Biodiversity Loss on Ocean Ecosystem Services. *Science*, 314(5800), 787-790. <https://doi.org/10.1126/science.1132294>
- Zilio, M. I. (2019). El impacto económico de las invasiones biológicas en Argentina: Cuánto cuesta no proteger la biodiversidad. *LIV Reunión Anual de la Asociación Argentina de Economía Política*.

## ANEXO A: MATERIAL SUPLEMENTARIO

La información suplementaria corresponde a varios conjuntos de datos, que por su tamaño solo pueden compartirse a través de una web de datos como Zenodo.

A través del siguiente enlace, se puede acceder al material suplementario y los respectivos anexos:

<https://zenodo.org/record/6544842#.Yn358KfPzIU>

Anexo 1. GL resultantes - Imputación filogenética

Anexo 2. Muestra - Tasas de cambio

Anexo 3. Tasas de extinción