

Efectos del cambio climático en la distribución de dos especies de monos nocturnos en Colombia

Trabajo de grado para optar al título de Biólogo

Autor: David Esteban Borja Acevedo^{1*}
Director: Daniel Osorio Dominguez, PhD²

1 Programa de Biología, Facultad de Ingeniería y Ciencias, Pontificia Universidad Javeriana Cali, Colombia.

2 Afiliación del director de tesis (en el caso de los profesores del programa, esta afiliación es: Departamento de Ciencias Naturales y Matemáticas, Facultad de Ingeniería y Ciencias, Pontificia Universidad Javeriana Cali, Colombia.)

3 Afiliación del codirector de tesis

* Correo electrónico: davidborja@javerianacali.edu.co - desteborja1@gmail.com

Resumen. El modelamiento geoespacial resulta ser una poderosa herramienta disponible para los biólogos de la conservación en cuanto estimar los rangos de distribución de las especies. Ante la creciente amenaza que representa el cambio climático, especialmente para los primates, se emplea el uso de Modelos de Distribución de Especies (MDE) para determinar la posible distribución de *Aotus griseimembra* y *Aotus lemurinus* en Colombia ante diferentes escenarios de cambio climático. Al comparar los modelos actuales con los futuros para ambas especies, se evidencian cambios en su distribución, expansiones y contracciones. Para el caso del escenario SSP 5-8.5 para el período 2081-2100, se espera una contracción de la distribución de ambas especies, limitada a relictos en torno a las cordilleras andinas. Sin embargo, para los escenarios SSP 1-2.6 en los periodos de tiempo 2011-2040 y 2081-2100 y SSP 5-8.5 para 2011-2040, se identificaron dos regiones importantes que podrían tener las condiciones climáticas idóneas para la subsistencia de ambas especies de monos. Una región se ubica al norte del departamento de Norte de Santander y coincide con el PNN Catatumbo Barí. La otra región coincide con el piedemonte andino amazónico que se solapa con algunas Áreas Protegidas. La posibilidad de dispersión para ambas especies dependerá de la existencia de rutas adecuadas y de la configuración del paisaje. Es así como la gestión estratégica de los corredores ecológicos y el mantenimiento y establecimiento de Áreas Protegidas son componentes clave en la conservación de *Aotus griseimembra* y *Aotus lemurinus*. Los resultados aquí presentados no tienen en cuenta relaciones bióticas ni patrones de destrucción de hábitat de origen antropogénico.

Palabras clave: Cambio climático, Modelos de distribución de especies, Mono nocturno, Primates amenazados, Variables ambientales.

Abstract. Geospatial modeling is a powerful tool available to conservation biologists to estimate species distribution ranges. Given the growing threat that climate change represents, especially for primates, the use of Species Distribution Models (SDM) is used to determine the possible distribution of *Aotus griseimembra* and *Aotus lemurinus* in Colombia under different climate change scenarios. When comparing current models with future ones for both species, shifts in their distribution, expansions and contractions are evident. In the case of the SSP 5-8.5 scenario for the period 2081-2100, a contraction of the distribution of both species is expected, limited to relicts around the Andean mountain ranges. However, for the SSP 1-2.6 scenarios in the time periods 2011-2040 and 2081-2100 and SSP 5-8.5 for 2011-2040, two important regions were

identified that could have ideal climatic conditions for the subsistence of both monkey species. A region is located north of the department of Norte de Santander and coincides with the PNN Catatumbo Barí. The other region coincides with Piedemonte andino amazónico that overlaps with some Protected Areas. The possibility of dispersal for both species will depend on the existence of suitable routes and the configuration of the landscape. This is how the strategic management of ecological corridors and the maintenance and establishment of Protected Areas are key components in the conservation of *A. griseimembra* and *lemurinus*. The results presented here do not take into account biotic relationships or patterns of habitat destruction of anthropogenic origin.

Keywords: Climate change, Environmental variables, Night monkey, Species distribution models, Threatened primates.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático, tanto de origen antrópico como natural, afecta a la biodiversidad (Scheffers et al. 2016; Pinto et al. 2023), teniendo consecuencias en la distribución, el comportamiento, la fisiología, fenología y morfología de las especies (Hughes 2000; Pinto et al. 2023). Cambios en las variables climáticas y en el área de los hábitats influyen directamente en la disponibilidad de alimento o sitios reproductivos, generando migración, aumento, disminución o extinción de las especies (Hughes 2000; Ochoa-Ochoa et al. 2012). Se espera que algunas especies pierdan la disponibilidad de condiciones climáticas idóneas dentro de su rango de distribución actual (Hickling et al. 2006), además su idoneidad de hábitat y distribución geográfica pueden reducirse (Virkkala et al. 2008). Atributos intrínsecos a las especies como su capacidad de dispersión, preferencia de hábitat, amplitud de dieta y tiempo generacional determinan su respuesta a los cambios de las condiciones climáticas (Dawson et al. 2011; Schloss et al. 2012; Pacifi et al. 2017).

Los Modelos de distribución de especies (MDE) comúnmente utilizan variables abióticas para predecir las áreas que tienen condiciones adecuadas para una especie, con el supuesto de que las condiciones abióticas donde una especie se encuentra actualmente determinan dónde podrá persistir (Araujo & Peterson 2012; Kamilar y Beaudrot 2018). Mediante la generación de Modelos de distribución de especies para 57 especies de primates en Madagascar, Brown y Yoder (2015) determinaron que el 60% de estas especies tendrá áreas de distribución significativamente menores debido al cambio climático futuro. Por su parte, Struebig y colegas (2015) mediante MDE predijeron que el hábitat idóneo para el orangután de Borneo (*Pongo pygmaeus*) disminuirá en un 63% para el año 2080 teniendo en cuenta únicamente el cambio climático.

Dentro del grupo de los mamíferos, los primates y los topos son los que sufrirán las pérdidas más significativas en términos de la distribución de idoneidad climática debido a la velocidad del cambio climático y su capacidad de dispersión (Schloss et al. 2012). Algunos estudios globales recientes destacan la vulnerabilidad de los primates a los cambios proyectados de temperatura y precipitación (Graham et al. 2016) y a los fenómenos meteorológicos extremos (Zhang et al. 2019). Estrada y colaboradores indican que el 75% de las especies de primates están en declive poblacional, y el 60% de especies de primates están amenazadas de extinción (Estrada et al. 2017). En una investigación hecha por Fernandez et al. (2022), se determinó que las principales

amenazas de los primates a nivel global están asociadas al uso de los recursos biológicos. Sin embargo, la capacidad predictiva del modelo utilizado fue baja debido a que otras amenazas, especialmente el cambio climático afecta más a las especies que lo indicado por la IUCN. El cambio climático es una fuente clave de estrés ambiental para los primates, especialmente cuando se combina con otros factores de estrés antropogénicos contemporáneos (Kamilar & Beaudrot 2018). Adicionalmente, los primates pueden ser particularmente vulnerables a experimentar efectos adversos del cambio climático por diferentes razones como: (1) Experimentan fluctuaciones estacionales relativamente leves en la temperatura al ser especies predominantemente tropicales, por lo que presentan una alta sensibilidad a condiciones climáticas, (2) Muchos primates no migran y ocupan rangos de distribución estables en el tiempo (Meyer & Pie 2022), (3) El tener largos tiempos generacionales limita su habilidad de acumular adaptaciones beneficiosas lo suficientemente rápido para mitigar los efectos perjudiciales del cambio climático (Bernard & Marshall 2020; Meyer & Pie 2022). La capacidad de los primates para dispersarse y seguir los cambios en su hábitat es limitada (Schloss et al. 2012; Carroll et al. 2015;), que sumado a la fragmentación del hábitat implica confiar fuertemente en la flexibilidad de su comportamiento (Kalbitzer 2018), en la plasticidad fenotípica y en nuevas adaptaciones para evitar la extirpación, incluyendo poblaciones que ocupan gradientes altitudinales (Bernard & Marshall 2020).

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) define el cambio climático como un “cambio en el estado del clima que puede identificarse por cambios en la media y/o la variabilidad de sus propiedades, y que persiste durante un período prolongado, normalmente décadas o más” (IPCC 2013). Es así como el Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP por sus siglas en inglés) es una iniciativa que ha permitido una mejor comprensión del sistema climático y sus respuestas a las actividades humanas (Meehl et al. 2013). La última fase, el CMIP6, incluye los desarrollos más recientes en modelización climática global (Taylor y Meehl 2012; Eyring 2016; Arias et al. 2021). En el CMIP6 también se planteó el uso de escenarios denominados Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP por sus siglas en inglés) que buscan incorporar las dimensiones del cambio social esperado que podrían afectar tanto los niveles de emisiones como la mitigación y la adaptación al cambio climático (Escoto et al. 2017). Los SSP se combinaron con los antiguos RCP utilizados en el CMIP5 para cubrir el aspecto tanto ambiental, como social que pueden afectar el clima en un futuro (Ruiz et al. 2022); siendo el escenario SSP 1-2.6 el más optimista y el escenario SSP 5-8.5, por el contrario, el más pesimista en términos de uso energético (Riahi et al. 2017).

Aunque la mayoría de los primates existentes viven en ecosistemas de tierras bajas, algunos taxones han tenido un éxito particular en colonizar mayores altitudes (Montilla et al. 2021). En América, sólo unas pocas especies de primates se encuentran en altitudes elevadas, entre las que se destacan varias especies de monos nocturnos (*Aotus spp.* Illiger, 1811) (Defler 2010; Grow et al. 2014). Además, son el único género de primates haplorrhini que está activo principalmente durante la noche. Este grupo cuenta con al menos 11 especies y un amplio rango altitudinal que supera los 3000 m.s.n.m. (Defler 2010; Shanee et al. 2015). El norte de Sudamérica, y más específicamente Colombia (APC 2015), contiene la mayor diversidad de especies de monos nocturnos, entre los que se encuentran el mono nocturno andino (*Aotus lemurinus* I. Geoffroy Saint-Hilaire, 1843) y el mono nocturno del Caribe (*Aotus griseimembra* Elliot, 1912). *A. lemurinus* habita en los bosques andinos de Colombia, Ecuador y Venezuela entre 1000 y 3200 m.s.n.m. y *A. griseimembra* habita en bosques tropicales húmedos y secos de Colombia y

Venezuela entre los cero y 1000 m.s.n.m. En Colombia, *A. lemurinus* está presente en las dos vertientes de las tres cordilleras, habitando casi todos los tipos de bosques que van desde bosques considerablemente conservados, hasta bosques secundarios, guaduales y plantaciones de café, exceptuando las tierras inundadas por manglares (Castaño y Cardona 2005; Camargo 2009; Castaño et al. 2010; Defler 2010). Por su parte, *A. griseimembra* se encuentra especialmente hacia la costa Caribe, donde puede habitar en bosques densos, fragmentados y abiertos (Defler 2010; Link et al. 2019a, 2019b; Lozano 2021).

Los monos nocturnos cumplen un importante papel como dispersores de semillas, ya que su dieta se basa en frutos, y es complementada en menor proporción por hojas, flores y artrópodos (Camargo 2009; Defler 2010; Castaño et al. 2010, Guzmán et al. 2016), dedicando la mayor parte de su tiempo a desplazarse en busca de diferentes fuentes de alimento, recorriendo el bosque (Fleage y Brown 1983; Castaño et al. 2010). Los estudios sobre la ecología en *A. lemurinus* silvestres son escasos (Castaño et al. 2010; Guzmán et al. 2016) e inexistentes hasta donde se sabe para *A. griseimembra* (Montilla et al. 2021). Ambas especies están categorizadas como Vulnerables (VU) por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) debido a la destrucción de su hábitat como resultado de la deforestación y la transformación del paisaje en campos agrícolas (Link et al. 2021a, 2021b), además, la caza de subsistencia y el comercio de mascotas representan otras amenazas para las poblaciones silvestres (Link et al. 2021a; Lozano 2021). Ante la emergente amenaza que el cambio climático representa para los primates, los análisis geoespaciales, como los Modelos de distribución de especies, pueden utilizarse para pronosticar la direccionalidad y magnitud de los cambios en los hábitats y, por lo tanto, plantear posibles escenarios de la distribución futura de la biodiversidad. Así, los biólogos especializados en conservación y las autoridades gubernamentales afectadas pueden entonces hacer referencia a estas predicciones para implementar estrategias de conservación proactivas (Heller y Zavaleta 2009; Rakotomanana et al 2013).

Recientemente, las nuevas herramientas analíticas y la disponibilidad de datos han permitido a los investigadores el Modelos de distribución de especies que ofrece la opción de combinar la información geográfica relacionada con los registros de presencia/ausencia de las especies, con variables que caractericen los requerimientos ambientales de las mismas para mantener poblaciones viables (Soberón & Peterson 2005; Peterson et al. 2018). Entre sus aplicaciones se encuentra el estudio de los patrones de diversidad, posibles efectos del cambio climático, diseños de reservas y localización de corredores óptimos para la distribución de especies (Mateo et al. 2011; Martínez 2022). Dentro de los Modelos de distribución de especies se encuentra MaxEnt que resulta ser uno de los métodos más acertados y accesibles al momento de modelar la posible distribución de especies (Martínez 2022).

También es importante mencionar que a nivel mundial, el instrumento de política ambiental con mayor definición jurídica para la conservación *in situ* de la biodiversidad, son las Áreas Protegidas, sobre las cuales se ha fundamentado la conservación de la diversidad biológica (Chape et al. 2005). La efectividad de conservación de la biodiversidad que presentan las Áreas protegidas de una región, depende de los siguientes factores primordiales: Representar adecuadamente los elementos de la biodiversidad, en todos sus niveles de organización y Permitir su permanencia en el tiempo (Arias 2022). Algunas investigaciones advierten que las relaciones actuales entre los rangos de distribución de las especies y los límites establecidos de las Áreas Protegidas, se verán modificados en el futuro cercano como consecuencia del potencial

desplazamiento de las especies en respuesta a cambios en los patrones climáticos del planeta (Hannah et al. 2007; Rodrigues et al. 2004).

Por lo tanto, el objetivo de esta investigación es evaluar los efectos de escenarios de cambio climático sobre la distribución potencial del nicho climático de *Aotus lemurinus* y *Aotus griseimembra* en Colombia. De esta forma se pretende identificar zonas, dentro o fuera de su área de distribución actual que cumplan con las condiciones climáticas idóneas y que además estén incluidas dentro de Áreas Protegidas, buscando así que los resultados puedan ser integrados a estrategias de conservación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio comprende todo el territorio continental de Colombia equivalente a 1141748 km². Especialmente el área de distribución actual para *A. lemurinus* y *A. griseimembra* en torno a los Andes colombianos y la costa caribe (Fig. 1). Colombia exhibe un amplio rango de ciclos diurnos y nocturnos de precipitación (Poveda et al. 2006) con un ciclo anual de precipitación fuertemente modulado por la localización meridional de la Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ por sus siglas en inglés) (Álvarez et al. 2011; Poveda 2004), por su topografía y por fenómenos como El Niño (Arias et al. 2021). En Colombia casi todos los regímenes de distribución de la lluvia son unimodales bi-estacionales, aunque se presentan excepciones con regímenes bimodales-tetra-estacionales, especialmente en áreas cercanas a mesetas o macizos (Rangel Ch., 2015).

El clima de los Andes Colombianos se ve influenciado por los alisios y la ITCZ, además sus rangos altitudinales son bastante amplios y presenta una alta variedad de su orografía. Las temperaturas pueden oscilar entre los 26 - 28°C en los lugares más bajos hasta temperaturas por debajo de 0°C en sus partes más altas (Rodríguez et al. 2010). En los Andes Colombianos predominan los ecosistemas de bosque denso alto de tierra firme, pastos limpios, mosaico de cultivos, mosaico de pastos y vegetación secundaria (IDEAM 2018). Por su parte, las precipitaciones del Caribe reciben influencia en gran medida por las altas presiones generadas por el cinturón anticiclones subtropicales. La mayor parte de la región registra temperaturas medias que oscilan entre 26 - 28°C, exceptuando La Sierra Nevada de Santa Marta, que presenta su propio régimen característico de alta montaña (IDEAM 2017). En el caribe se encuentran variedad de ecosistemas como bosques tropicales y ciénagas (Rodríguez 2013).

Ocurrencia de las especies

Los registros de las especies fueron obtenidos de las bases de datos de biodiversidad de libre acceso “Global Biodiversity Information Facility” (GBIF) <https://www.gbif.org/es/> (GBIF.org 2024a) para *A. lemurinus* (GBIF.org 2024b) y *A. griseimembra* (GBIF.org 2024c). Los datos se procesaron y filtraron, eliminando los duplicados y los puntos de ocurrencia sin georreferenciación, además de eliminar las columnas con datos innecesarios para el estudio. Para las bases de datos de ambas especies solo se usaron las columnas Specie, Latitude y Longitude.

El software seleccionado para el manejo de la cartografía digital y análisis espaciales fue QGIS Desktop 3.38.1. (QGIS.org 2024).

Variables bioclimáticas

Del portal Worldclim (<http://www.worldclim.org>) se descargaron las 19 variables bioclimáticas del CMIP6 disponibles para el Modelo de Circulación Global MIROC6 por ser uno de los que mejor se ajustan a las zonas tropicales (Shiogama et al. 2019) (Tabla 1). Para evitar la colinealidad y un sobreajuste de los modelos, se hizo una correlación de las variables, dejando las variables que sean potencialmente explicativas (Hirzel & Lay 2008); que muestran una variabilidad significativa en la zona de estudio; finalmente, que sean independientes o, al menos, no estén excesivamente correlacionadas entre sí, especialmente si se busca una interpretación biológica de los resultados (Graham 2003, Muñoz & Felicísimo 2004). Del análisis de correlación inicial se seleccionaron 8 variables (Fig. 1). Para cada una de estas se eligieron dos escenarios SSP: 1-2.6 y 5-8.5, para los periodos de tiempo: (2011-2040; 2081-2100); además de los históricos correspondientes a 1981-2010. Los escenarios SSP 2-4.5 y SSP 3-7.0 no fueron considerados ya que corresponden a fases de estabilización entre SSP 1-2.6 y SSP 5-4.5 (Echeverry et al. 2021). Al ser modelos globales, se cortaron mediante el software QGIS Desktop 3.38.1 para la geometría de Colombia mediante la herramienta Ráster>Por capa de máscara y se almacenaron en formato .asc para ser compatibles con MaxEnt.

Tabla 1. Variables bioclimáticas disponibles en el CMIP6 obtenidas de Worldclim (<http://www.worldclim.org/>). En negrita las variables seleccionadas a partir del análisis de correlación.

Variables	Descripción
bio1	Temperatura media anual
bio2	Rango promedio de temperaturas diarias (Tmax-Tmin)
bio3	Isotermalidad (bio2/bio7) * 100
bio4	Estacionalidad de temperatura (Desviación estándar * 100)
bio5	Temperatura máxima del mes más cálido
bio6	Temperatura mínima del mes más frío
bio7	Rango anual de la temperatura (bio5-bio6)
bio8	Temperatura media del trimestre más húmedo
bio9	Temperatura media del trimestre más seco
bio10	Temperatura media del trimestre más cálido
bio11	Temperatura media del trimestre más frío
bio12	Precipitación anual
bio13	Precipitación del mes más húmedo
bio14	Precipitación del mes más seco
bio15	Estacionalidad de la precipitación
bio16	Precipitación del trimestre más húmedo
bio17	Precipitación del trimestre más seco
bio18	Precipitación del trimestre más cálido

Modelación de Idoneidad Climática

El modelo estadístico se construyó utilizando el algoritmo de máxima entropía implementado en el software de MaxEnt (versión 3.2.1) (Phillips et al., 2004). Este algoritmo se utilizó debido a su alta precisión al estimar áreas de distribución, permitiendo calibrar los modelos a través de conjuntos de datos de diferentes tamaños, determinando la contribución de cada variable ambiental en las estimaciones realizadas; puede ser utilizado para predicciones en múltiples escalas espaciales y temporales y sólo requiere datos de presencia para realizar las estimaciones (Echeverry et al. 2021). Para calcular la probabilidad de presencia promedio de las dos especies de primates, se corrieron diez réplicas. MaxEnt genera un modelo consenso entre las diez réplicas que se usaron como distribución potencial de los hábitats apropiados para las especies. En todos los casos se utilizó el 25% de los datos para la prueba del modelo y 5.000 permutaciones. También se usó un formato de salida logístico, este incluyó un rango de 0 a 1 de probabilidad de presencia y se desactivaron los parámetros “Do Clamping” y “Extrapolation” para evitar extrapolaciones en los valores extremos de las variables bioclimáticas. A su vez, se usó el AUC como una medida de desempeño estadístico del modelo, donde el máximo valor es 1 y disminuye hasta 0. Un modelo con AUC cerca de 0.9 se consideran muy bueno, un modelo con AUC de 0.7 a 0.9 es bueno; menores a 0.7 con poca información y cercanos o menores a 0.5 se considera como una distribución aleatoria (Swets, 1988).

De los 10 modelos obtenidos (2 históricos y 8 escenarios futuros), mediante el procesamiento de datos ráster en QGIS Desktop 3.38.1, se extrajeron los datos correspondientes a un umbral por encima del 70% de sus valores, planteadas como las áreas más idóneas para su distribución actual y futura. Por otro lado, se solaparon los umbrales de los modelos de distribución seleccionados con el mapa de áreas protegidas en Colombia para identificar cuáles de estas soportan potencialmente las dos especies de martejas (Rodríguez 2010).

RESULTADOS

Ocurrencia de las especies

En total se obtuvieron 199 registros de ocurrencias debidamente georreferenciados para *A. lemurinus* y 266 registros de ocurrencias para *A. griseimembra* (Fig 1.) *A. lemurinus* ocurre en el occidente y suroccidente de Colombia incluyendo una porción del oriente de los Andes (Ford 1994). *A. griseimembra* se extiende desde la costa norte de Colombia hasta el extremo noroccidental de Venezuela, y muy posiblemente una porción muy estrecha en el sur a lo largo del valle del río Magdalena (Ford 1994) a menos de 1000 m.s.n.m. (Camargo 2009). Ambas especies frecuentan bosques secundarios, al igual que las plantaciones sombreadas de café y

bosques degradados. También frecuentan bosques de crecimiento primario y bosques de galería (Camargo 2009).

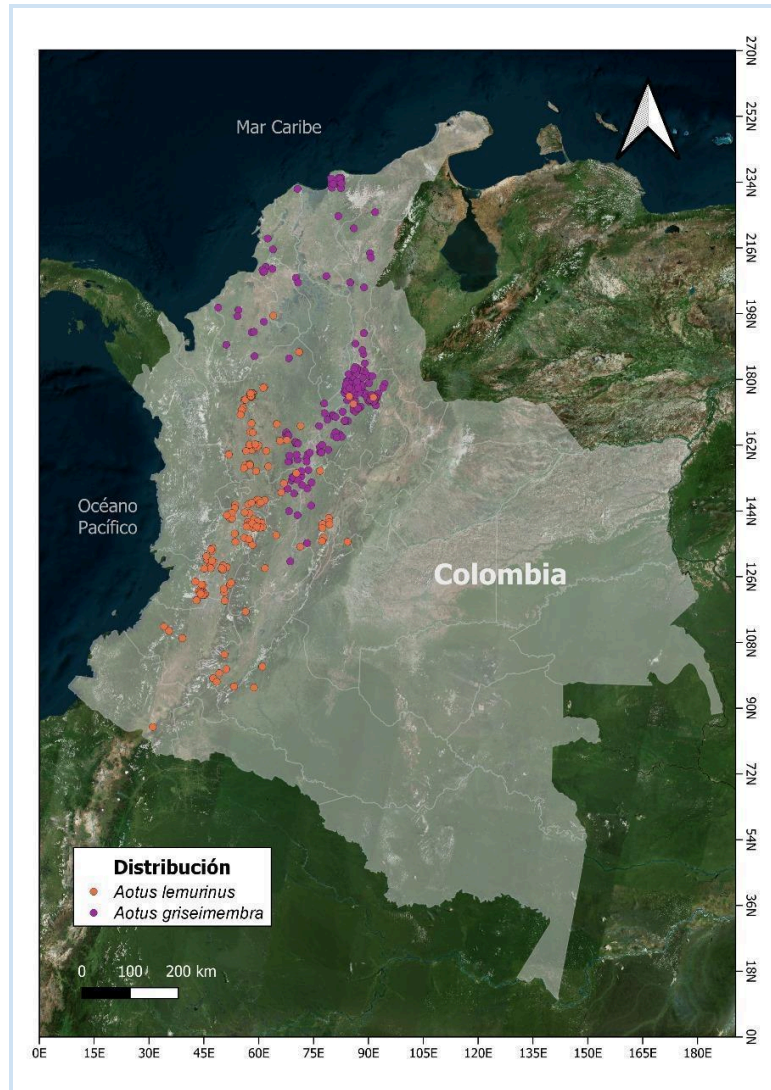


Figura 1. Registros de *Aotus lemurinus* (naranja) y *Aotus griseimembra* (fucsia). Tomado de GBIF.

Desempeño del modelo para *Aotus griseimembra*

El AUC promedio para *A. griseimembra* (Fig. 2) de 0.954 indicando que el modelo tiene un muy buen desempeño estadístico.

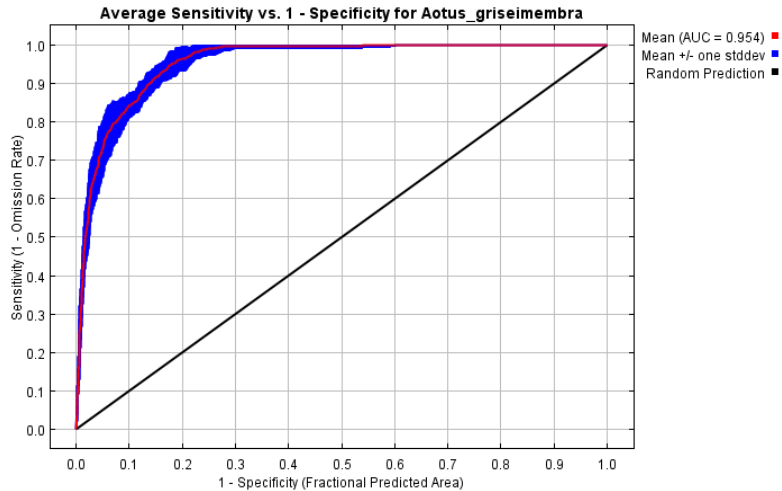


Figura 2. AUC promedio para *A. griseimembra*

Las variables con mayor contribución para explicar el modelo para *A. griseimembra* son bio11 (Temperatura media del trimestre más frío), bio3 (Isotermalidad (bio2/bio7) * 100), bio2 (Rango promedio de temperaturas diarias (Tmax-Tmin)), bio15 (Estacionalidad de la precipitación), bio12 (Precipitación anual), bio10 (Temperatura media del trimestre más cálido), bio9 (Temperatura media del trimestre más seco) y bio8 (Temperatura media del trimestre más húmedo). De las anteriores bio11 con un porcentaje de contribución de 36.5%, bio 3 con 27.5% y bio2 con 12.7% se ubican como las de mayor representatividad (Tabla 2).

Tabla 2. Porcentaje de contribución de las variables bioclimáticas elegidas para *Aotus griseimembra*.

Variable	Porcentaje de contribución
bio11	36.5%
bio3	27.5%
bio2	12.7%
bio15	9.7%
bio12	6.5%
bio10	3.5%
bio9	2.7%
bio8	0.9%

Para las variables de mayor representatividad se analizan sus curvas de respuesta promedio (Fig. 3), para bio11 los valores de idoneidad están entre 24-30°C. Para bio 3 se explican la mayoría de sus valores por encima de 95 en un alto nivel de idoneidad (entre 0.7 y 0.8). La curva para bio 2 sugiere que el rango promedio de temperaturas diarias varía especialmente entre 12 y 13°C con idoneidad media.

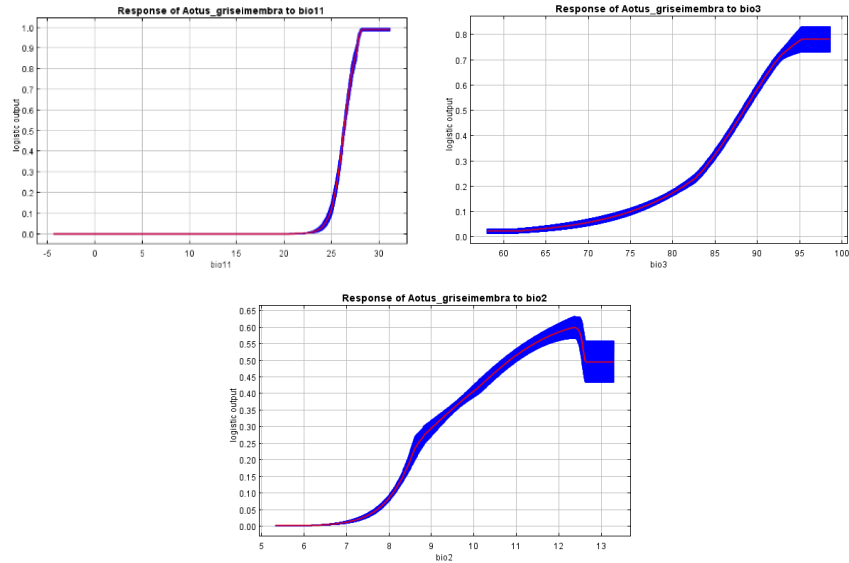


Figura 3. Curvas de respuesta de las variables ambientales de *Aotus griseimembra*.

Desempeño del modelo para *Aotus lemurinus*

El AUC promedio para *A. lemurinus* (Fig. 4) de 0.918 indica que el modelo tiene un muy buen desempeño estadístico.

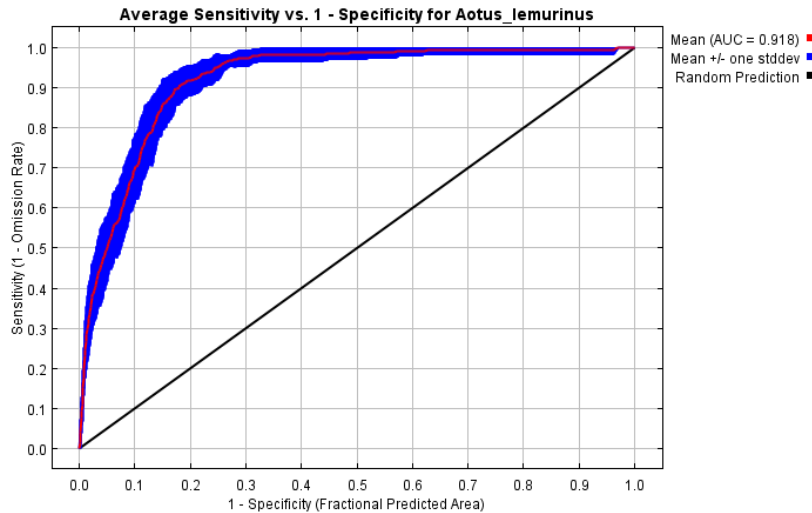


Figura 4. AUC promedio para *A. lemurinus*

Se obtuvo que las variables con mayor contribución para explicar el modelo para *A. lemurinus* son bio9 (Temperatura media del trimestre más seco), bio3 (Isotermalidad (bio2/bio7) * 100), bio15 (Estacionalidad de la precipitación), bio12 (Precipitación anual), bio8 (Temperatura media del trimestre más húmedo), bio10 (Temperatura media del trimestre más cálido), bio2 (Rango promedio de temperaturas diarias (Tmax-Tmin)) y bio11 (Temperatura media del trimestre más frío) como se observa en la Tabla 3. De las anteriores bio9 con un porcentaje de contribución de 40.5%, bio3 con 38.1% y bio15 con 8% se ubican como las de mayor representatividad.

Tabla 3. Porcentaje de contribución de las variables bioclimáticas elegidas para *Aotus lemurinus*.

Variable	Porcentaje de contribución
bio9	40.5%
bio3	38.1%
bio15	8%
bio12	4.2%
bio8	3.7%
bio10	2.2%
bio2	2.1%
bio11	1.3%

Para las variables de mayor representatividad se analizan sus curvas de respuesta promedio (Fig. 5), para bio9 los valores de idoneidad superior a la media (0.5) están entre 17-27°C. Para bio3 se explican la mayoría de sus valores por encima de 95 unidades en un nivel de idoneidad medio alto (entre 0.5 y 0.7). La curva para bio15 sugiere que hay una idoneidad alta (0.6-0.8) con valores de estacionalidad de la precipitación entre 80 y 120 unidades.

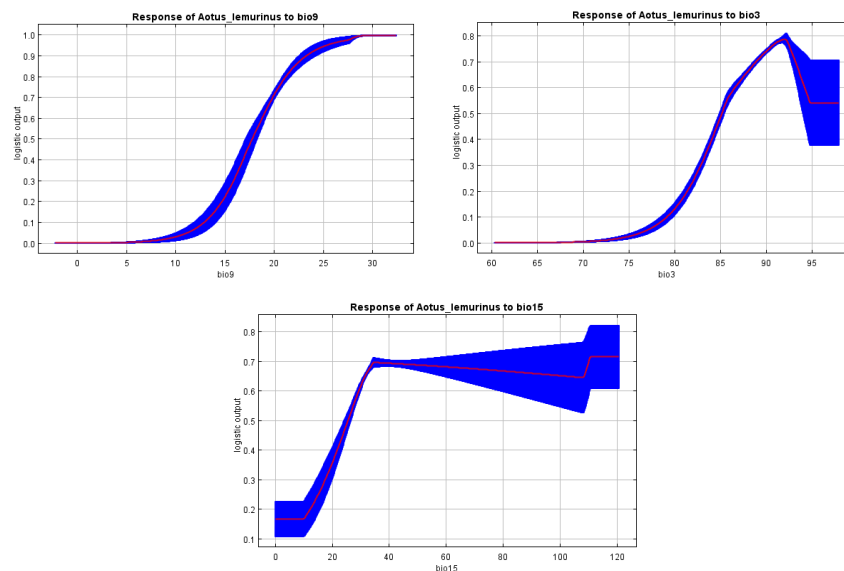


Figura 5. Curvas de respuesta de las variables ambientales de *A. lemurinus*.

Modelación de la idoneidad climática para *Aotus griseimembra*

La idoneidad climática actual sugerida en los modelos indica que *A. griseimembra* podría habitar estas áreas teniendo en cuenta únicamente las variables bioclimáticas de este estudio; así

mismo para los escenarios futuros. Es así como la IC Actual sugiere que *A. griseimembra* podría habitar en el valle alto y medio del río Magdalena, en medio de la cordillera central y oriental; especialmente en el departamento de Santander, oriente del departamento del Magdalena y sur del Cesar. También se observan áreas idóneas al occidente del departamento de Magdalena, así como de Córdoba.

Ante escenarios de cambio climático, las poblaciones de primates pueden sufrir expansión, contracción o estabilidad (Brown y Yoder 2015). Los escenarios futuros sugieren un desplazamiento de la IC para *A. griseimembra* hacia el sur del país, especialmente el Piedemonte Andino Amazónico, a excepción del escenario SSP 5-8.5 para el año 2100 que sufre una contracción limitada a algunas zonas aisladas en los valles de baja altitud en medio de las cordilleras andinas. La complejidad biogeográfica y topográfica entre las áreas con IC Actual y los escenarios futuros, representa una importante barrera para la dispersión y desplazamiento de *A. griseimembra*, lo que podría sugerir la extirpación de poblaciones incluso para escenarios optimistas como SSP 1-2.6 para el 2040. En el escenario SSP 5-8.5 para 2040 y SSP 1-2.6 para 2100 se observa una expansión de la IC, pero en términos generales la mayor parte de esta área corresponde al Piedemonte Andino Amazónico de difícil acceso para la especie (Fig. 6).

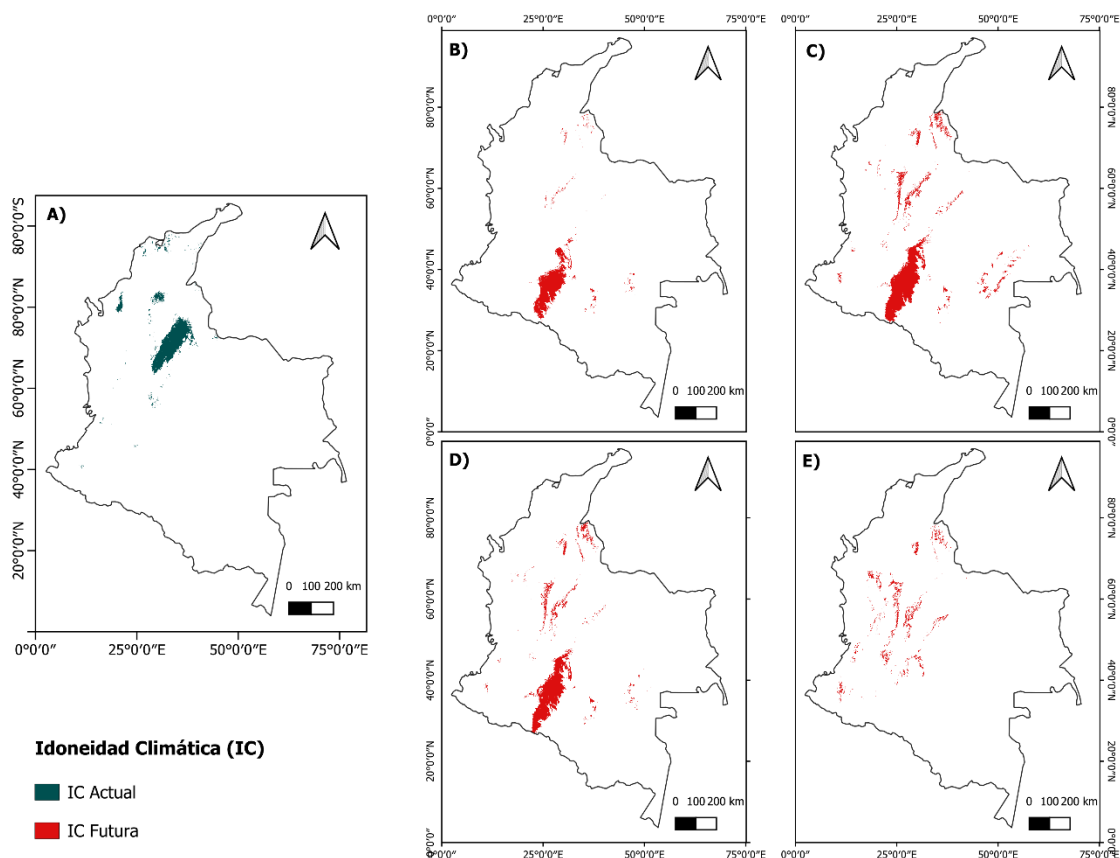


Figura 6. Modelo de Idoneidad Climática (IC) Actual (verde) y Futura (rojo) para *A. griseimembra*. (A) IC Actual (B) IC para el intervalo de tiempo 2011-2040 bajo SSP 1-2.6 (C) IC para el intervalo de tiempo 2011-2040 bajo SSP 5-8.5 (D) IC para el intervalo de tiempo 2081-2100 bajo SSP 1-2.6 (E) IC para el intervalo de tiempo 2081-2100 bajo SSP 5-8.5.

Modelación de la idoneidad climática para *Aotus lemurinus*

A. lemurinus presenta una IC Actual que coincide con regiones montañosas de elevado gradiente altitudinal en las tres cordilleras, abarcando los departamentos de la región Andina. Ante los escenarios SSP 1-2.6 y SSP 5-8.5 para el 2040 y SSP 1-2.6 para el 2100 se observa una contracción de las áreas con IC con respecto al Actual. En semejanza con *A. griseimembra*, el área idónea más representativa coincide con el Piedemonte Andino Amazónico, al centro de los departamentos de Putumayo y Caquetá y sur del Meta. También se observan algunos relictos aislados distribuidos en las faldas montañosas de los valles interandinos del río Magdalena. Para SSP 5-8.5 para el año 2100 se espera una contracción de las áreas con IC limitada a zonas montañosas próximas a los valles interandinos (Fig. 7).

En todos los escenarios futuros se evidencia una importante área con IC al norte del departamento de Norte de Santander, que no se presenta como idónea ni coincide con la distribución de *A. lemurinus* en la actualidad.

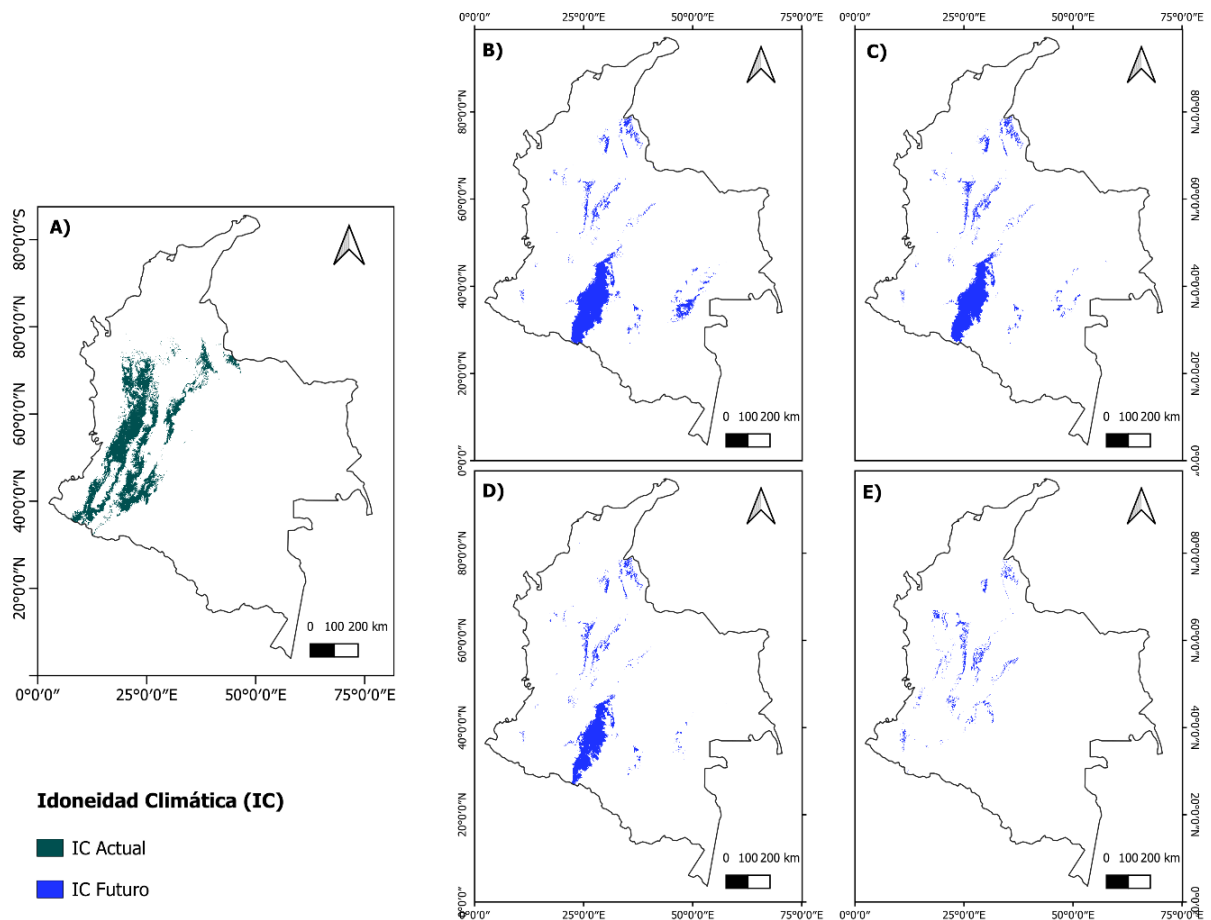


Figura 7. Modelo de Idoneidad Climática (IC) Actual (verde) y Futura (azul) para *A. lemurinus*.

(A) IC Actual (B) IC para el intervalo de tiempo 2011-2040 bajo SSP 1-2.6 (C) IC para el intervalo de tiempo 2011-2040 bajo SSP 5-8.5 (D) IC para el intervalo de tiempo 2081-2100 bajo SSP 1-2.6 (E) IC para el intervalo de tiempo 2081-2100 bajo SSP 5-8.5

Coincidencia de las áreas con Idoneidad Climática (IC) para *Aotus griseimembra* con las Áreas Protegidas (AP)

Los Áreas con IC actuales para *A. griseimembra* coinciden con AP (Fig. 8) como los DRMI Serranía de los Yariguies, Humedal San Silvestre y del PNR (Parque Natural Regional) Serranía de las quinchas. Para los escenarios futuros, aunque se planteen áreas idóneas en PNN al sur del país como Serranía de Chiribiquete, Tinigua y Serranía de la Macarena, son áreas de acceso imposible para la especie. En ninguno de los escenarios futuros, las condiciones climáticas idóneas coinciden con AP en la región Caribe. Adicionalmente, se proyecta el PNN Catatumbo Barí en los Andes Nororientales como AP que potencialmente podría tener las condiciones climáticas favorables para la especie en todos los escenarios futuros.

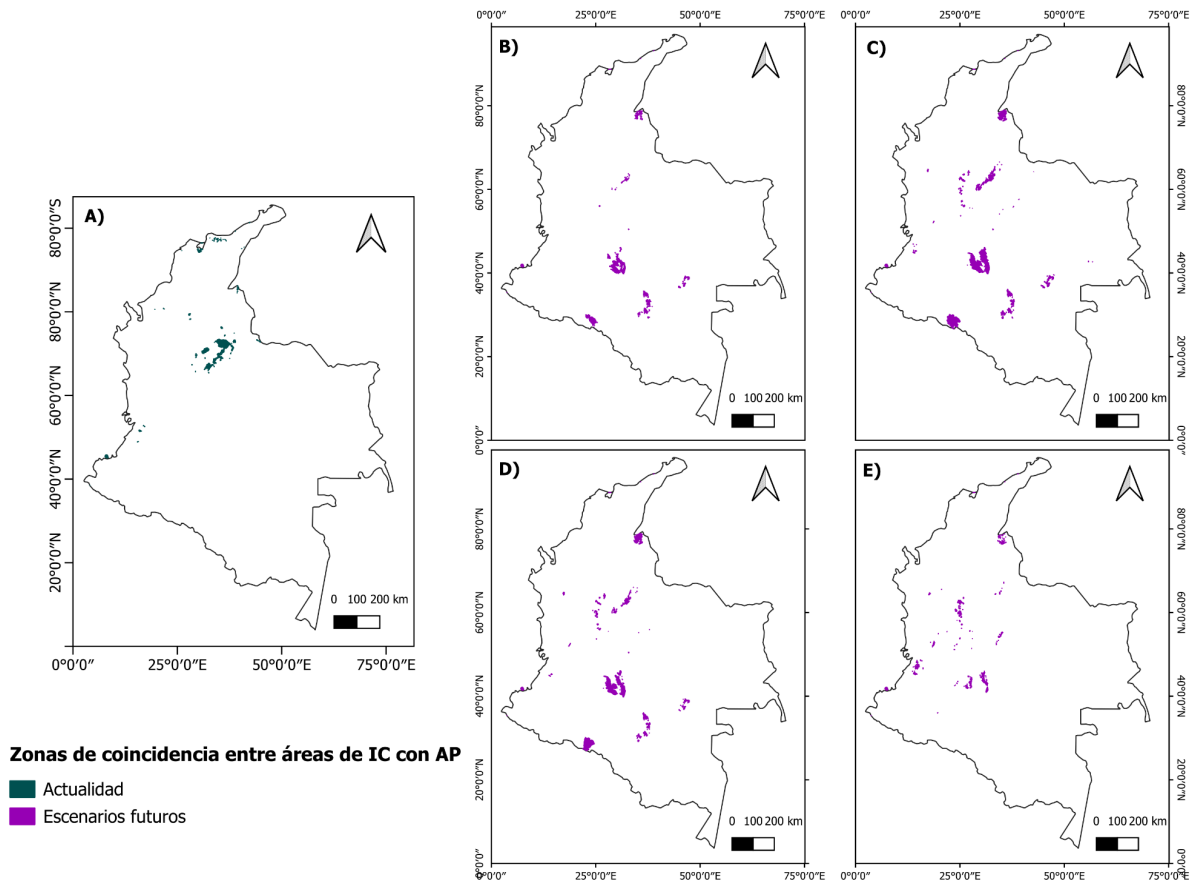


Figura 8. Zonas de coincidencia entre las áreas con Idoneidad Climática (IC) actual (verde) y futura (fucsia) con las Áreas Protegidas (AP) para *A. griseimembra*. (A) Zonas de coincidencia entre las AP y la Áreas con IC en la actualidad. Zonas de coincidencia entre las AP y las áreas con IC para: B) el intervalo de tiempo 2011-2040 bajo SSP 1-2.6 (C) el intervalo de tiempo

2011-2040 bajo SSP 5-8.5 (D) el intervalo de tiempo 2081-2100 bajo SSP 1-2.6 y (E) para el intervalo de tiempo 2081-2100 bajo SSP 5-8.5.

Coincidencia de las áreas con Idoneidad Climática (IC) para *Aotus lemurinus* con las Áreas Protegidas (AP)

Las zonas de coincidencia entre las áreas con IC actuales respecto a las AP para *A. Lemurinus* (Fig. 9) están concentradas en los valles interandinos, especialmente en la cordillera occidental y central y el macizo colombiano. Algunas AP de vital importancia son los PNN Farallones de Cali, Munchique, Serranía de los Churumbelos, Nevado del Huila, Los Nevados, Serranía de los Yariguíes, Alto Fragua Indi Wasí, Parque de Florencia y Las Orquídeas; Algunos PNR como Páramo del duende, Santa Emilia, Las Áreas Naturales La Siberia y Parte de la Cuenca Alta del Río Las Ceibas; Reservas Forestales Protectoras Nacionales como Farallones del Citará, Río Amaime, De Urrao y la Serranía del Pinche; Distrito Regional de Manejo Integrado (DRMI) como Sistemas de bosques y páramos andinos del noroccidente medio Antioqueño y Cuchilla Cerro Plateado Alto San José.

Para el caso de los escenarios futuros se destacan 4 regiones de importancia en el centro sur del país que coinciden con PNN como Tinigua, Cordillera de los Picachos, Sierra de la Macarena, Serranía de Chiribiquete y La Playa; Reserva Natural (RN) como Nukak. También se destacan zonas aisladas en los departamentos de Santander, Antioquia, Caldas y Tolima; estas coinciden con AP como la Reserva Forestal Protectora Regional Cuchillas del Tigre, el Calon y la Osa, Cuchilla del Minero, Carauta y De Urrao; PNN como Serranía de los Yariguíes, Las Orquídeas; PNR como Serranía de las Quinchas, DRMI como Serranía de los Chariguíes; Reserva Natural de la Sociedad Civil como Hacienda El Triunfo. Adicionalmente una importante área con IC a futuro en el departamento del Norte de Santander en el PNN Catatumbo Barí.

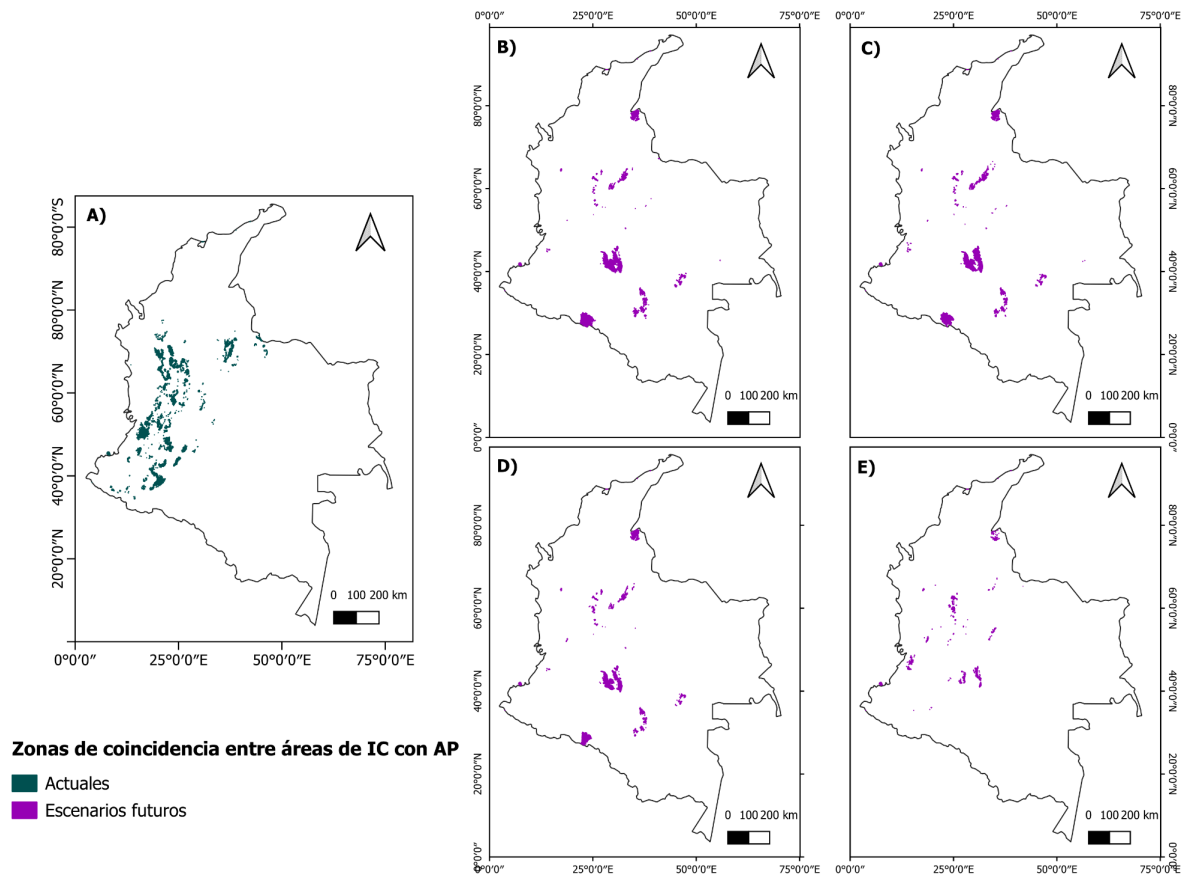


Figura 9. Zonas de coincidencia entre las áreas con Idoneidad Climática (IC) actual (verde) y futura (fucsia) con las Áreas Protegidas (AP) para *A. lemurinus*. (A) Zonas de coincidencia entre las AP y las áreas con IC en la actualidad. Zonas de coincidencia entre las AP y las áreas con IC para: B) el intervalo de tiempo 2011-2040 bajo SSP 1-2.6 (C) el intervalo de tiempo 2011-2040 bajo SSP 5-8.5 (D) el intervalo de tiempo 2081-2100 bajo SSP 1-2.6 y (E) para el intervalo de tiempo 2081-2100 bajo SSP 5-8.5.

DISCUSIÓN

Las variables de mayor representatividad para ambas especies de martejas están asociadas principalmente a la temperatura, y en menor proporción a la precipitación. La temperatura resulta ser de los aspectos ambientales de mayor importancia en especies de primates nocturnos e impone retos adicionales de termorregulación debido a que las temperaturas más bajas se presentan en la noche (Orozco 2019). Dentro de los factores ecológicos, la disponibilidad de recursos alimenticios es el factor más importante, pues influye directamente en cambios energéticos en los individuos a partir del consumo de diferentes ítems en función de su disponibilidad. Dichos cambios energéticos afectan distintos aspectos del comportamiento de los primates, como por ejemplo el patrón de actividad y el rango de hogar (Doran 1996; Marshall et al. 2009). A medida que la elevación aumenta, puede haber variación en la temperatura media, sumada a una alta fluctuación en las temperaturas diarias, lo que se asocia con una menor diversidad de árboles, estructura forestal y disponibilidad de recursos en los bosques de montaña

(Buitrón & Ramírez 2014; Schmitt et al. 2010). Es así como los primates que han podido adaptarse a ecosistemas de gran altitud probablemente han desarrollado una mayor flexibilidad dietética para hacer frente a estos entornos hostiles (Montilla et al. 2021).

Los resultados empíricos indican que las condiciones cada vez más secas pueden ser particularmente problemáticas para los primates. La producción de alimentos tiende a ser menor en la estación seca (Chapman et al. 2006; Pichon y Simmen 2015), también se ha reportado reducción de las tasas de fertilidad (Meyer y Pie 2022). Aunque también se ha demostrado que el aumento de la estacionalidad de las precipitaciones se correlaciona con una mayor calidad de las hojas (van Schike 2005). Los fenómenos climáticos extremos también son un importante factor de cambio para varios primates. Un análisis reciente mostró que el 16 % y el 22 % de todos los primates son vulnerables a los ciclones y las sequías, respectivamente (Zhang et al., 2019), y estas cifras pueden aumentar a medida que se predice que los eventos extremos se volverán más frecuentes y/o intensos (Meyer y Pie 2022). Es así como, ante el escenario más pesimista para el año 2100, se estima una contracción en el área de idoneidad climática de ambas especies de *Aotus*, limitada a algunos relictos en la región andina.

La factibilidad de la dispersión dependerá de la presencia y conexión de hábitats entre la distribución actual y la futura; muchos ecosistemas son usados en actividades humanas como la agricultura, minería o vivienda, modificando las matrices del paisaje, aislando a las especies en pequeños remanentes de bosque (Roach et al. 2020). El proceso de dispersión en los monos nocturnos puede ser una etapa crítica de alta mortalidad, especialmente en poblaciones que habitan bosque aislados en matrices agrícolas con alto grado de fragmentación. En ese caso, los individuos que abandonan los grupos pueden verse obligados a atravesar zonas de cultivos en busca de otros fragmentos de bosque. Si no existen corredores de bosque o rutas de dispersión a través de árboles, los monos se verían obligados a descender al suelo, donde pueden ser presa fácil de los predadores tanto silvestres como domésticos (Castaño et al. 2010). Recientemente, sin embargo, se han encontrado poblaciones naturales de este primate en hábitats que comprenden no sólo extensiones considerables de bosques, sino también, pequeños fragmentos inmersos en matrices agrícolas y semiurbanas (Castaño & Cardona 2005). Este descubrimiento abre posibilidades para su conservación (Castaño et al. 2010). Es así como para *A. lemurinus* se propone fortalecer la conectividad entre AP y ecosistemas de bosque a lo largo de las cordilleras andinas y en torno al piedemonte andino amazónico; región en la cuál se recomienda aumentar las AP al presentar las condiciones climáticas idóneas según el modelo. Para el caso de *A. griseimembra*, aunque se estimen posibles escenarios climáticos idóneos en el sur del país, son de acceso imposible para la especie. Por ello, se recomienda centrar los esfuerzos en el PNN Catatumbo Barí en Norte de Santander y en la conectividad de este, que puede albergar las condiciones climáticas idóneas para *A. griseimembra* y *A. lemurinus*.

La utilización de MDE de esta investigación, proporciona información relevante sobre la distribución de *Aotus lemurinus* y *Aotus griseimembra*. Estas líneas de investigación permiten el desarrollo de estudios de calidad sin la necesidad de establecer costosas infraestructuras, ya que básicamente necesitan bases de datos biológicos fácilmente accesibles y unos medios computacionales nada sofisticados (Mateo et al. 2011). A pesar del creciente reconocimiento de la influencia combinada de múltiples amenazas ambientales sobre la biodiversidad, la mayoría de los estudios que proyectan la distribución de las especies en el futuro basan sus proyecciones en gran medida en el clima y mantienen constantes las variables de cobertura del suelo. Esto puede

deberse a que normalmente se considera que el clima cambie más rápidamente que la cubierta terrestre (Streubig et al. 2015). Es necesario precisar que estos modelos son aproximaciones a la realidad y son altamente dependientes de la calidad y la cantidad de información con la que se construyen y de la correcta aplicación de los supuestos que exigen los métodos (Roncancio et al. 2013). Así, los MDE presentan limitaciones al no tener en cuenta posibles interacciones bióticas como la competencia, la dispersión o eventos históricos que también explican la distribución (Rodríguez 2012). Algunas de estas limitaciones se pueden evitar mediante estrategias como: (1) añadir la presencia de especies competidoras o facilitadoras como una variable más en el análisis, (2) introducir interacciones bióticas diversas, (3) introducir parámetros auxiliares como distancia de dispersión, fragmentación del terreno o poder reproductivo, (4) elaborar modelos basados en datos fisiológicos de las especies y de la interacción de éstas con el medio, una estrategia novedosa y con gran futuro en la modelización (Mateo et al. 2011). Finalmente, estos modelos son adaptativos y pueden ser potencialmente refinados a la luz de nueva y mejor información (Roncancio et al.2013).

REFERENCIAS

- Álvarez-Villa O. D., Vélez J. I., and Poveda G. (2011). "Improved long-term mean annual rainfall fields for Colombia," *International Journal of Climatology* , vol. 31, no. 14, Nov. 30, 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/joc.2232>.
- Araujo MB, Peterson AT. (2012) Uses and misuses of bioclimatic envelope modeling. *Ecology* 93:1527–39
- Arias P. A., Ortega G., Villegas L. D. and Martínez J. A. (2021) "Colombian climatology in CMIP5/CMIP6 models: Persistent biases and improvements", *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, no. 100, pp. 75-96, Jul-Sep 2021. [Online]. Available: <https://www.doi.org/10.17533/udea.redin.20210525>
- Asociación Primatológica Colombiana (APC). (2015). Colombia: un país de mono nocturnos. Bogotá, Colombia, <http://www.asoprimatologicacolombiana.org>.
- Bernard, A. B., & Marshall, A. J. (2020). Assessing the state of knowledge of contemporary climate change and primates. *Evolutionary Anthropology: Issues, News, and Reviews*, 29(6), 317-331.
- Brown, J. L., & Yoder, A. D. (2015). Shifting ranges and conservation challenges for lemurs in the face of climate change. *Ecology and Evolution*, 5(6), 1131-1142.
- Buitrón-Jurado, G., & Ramírez, N. (2014). Dispersal spectra, diaspore size and the importance of endozoochory in the equatorial Andean montane forests. *Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 209, 299–311. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2014.03.009>.
- Camargo Acosta, E. Análisis filogenético de diferentes especies del género *Aotus* utilizando el gen mitocondrial citocromo *ii* oxidasa. (2009).
- Carroll C, Lawler JJ, Roberts DR, et al. (2015) Biotic and climatic velocity identify contrasting areas of vulnerability to climate change. *PLoS One* 10:e0140486.
- Castaño, J. H. & Cardona D. M. . 2005. Presencia del mono nocturno andino (*Aotus lemurinus* I. Geoffroy-St. Hilaire, 1843) en fragmentos de bosque de la cuenca del río Cauca. *Boletín Científico del Museo Historia Natural Universidad Caldas* 9:111-117.
- Castaño, J. H., Cardona, D., & Botero, J. E. (2010). Ecología del mono nocturno andino (*Aotus lemurinus*) en fragmentos de bosque subandino en Colombia. In V.

- Pereira-Bengoa, P. R. Stevenson, M. L. Bueno, & F. Nassar-Montoya (Eds.), *Primatología en Colombia: Avances al principio del milenio* (pp. 69–90). Bogotá, Colombia: Fundación Universitaria San Martín.
- Ch, R., & Orlando, J. (2015). *La biodiversidad de Colombia: significado y distribución regional*.
- Chape, S., Harrison, J., Spalding, M., & Lysenko, I. (2005). Measuring the extent and effectiveness of protected areas as an indicator for meeting global biodiversity targets. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 360(1454), 443-455.
- Chapman CA, Chapman LJ, Zanne AE, et al. 2006. A 12-year phenological record of fruiting: Implications for frugivore populations and indicators of climate change. In: JL Dew, JP Boubli, editors. *Tropical fruits and Frugivores*, Dordrecht: Springer. p 75–92.
- Dawson, T. P., Jackson, S. T., House, J. I., Prentice, I. C. & Mace, G. M. (2011) Beyond predictions: Biodiversity conservation in a changing climate. *Science* <https://doi.org/10.1126/science.1200303>.
- Defler, T. R. (2010). *Historia Natural de los Primates Colombianos*. Bogotá, Colombia: Conservación Internacional Colombia, Universidad Nacional de Colombia.
- Doran, (1996). Comparative positional behavior of the African apes. En McGrew, W, C., Marchant, L. F. y Nishida, T. (Ed.) *Great ape societies* (pp. 216–222), Cambridge, Inglaterra: Cambridge University Press.
- Echeverry Cardenas E, López Castañeda C, Carvajal Castro JD, Aguirre Obando OA (2021) Potential geographic distribution of the tiger mosquito *Aedes albopictus* (Skuse, 1894) (Diptera: Culicidae) in current and future conditions for Colombia. *PLoS Negl Trop Dis* 15(5): e0008212. <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0008212>
- Escoto, C. A., Sánchez, P. L., Gachuz, D.S. (2017). Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP): nuevas maneras de comprender el cambio climático y social. *Estudios Demográficos y Urbanos*. 32(3): 669-693. doi: <http://dx.doi.org/10.24201/edu.v32i3.1684>.
- Estrada, A., Garber, P. A., Rylands, A. B., Roos, C., Fernandez-Duque, E., Di Fiore, A., ... & Li, B. (2017). Impending extinction crisis of the world's primates: Why primates matter. *Science advances*, 3(1), e1600946.
- Eyring, V. (2016) “Overview of the Coupled Model Intercomparison Project phase 6 (CMIP6) experimental design and organization,” *Geoscientific Model Development*, vol. 9, no. 5, May. 26, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
- Fernández, D., Kerhoas, D., Dempsey, A., Billany, J., McCabe, G., & Argirova, E. (2022). The current status of the world's primates: Mapping threats to understand priorities for primate conservation. *International Journal of Primatology*, 43(1), 15-39.
- Fleagle JC, and Brown TM. (1983) New primate fossils from late Oligocene (Colhuehuapian) localities of Chubut Province, Argentina. *Folia Primatol* 41:2403266.
- Ford, S. M. (1994). Taxonomy and distribution of the owl monkey. In *Aotus: the owl monkey* (pp. 1-57). Academic Press.
- GBIF (2024) Global Biodiversity Information Facility. <https://www.gbif.org/>
- GBIF.org (2024^a). GBIF.org. <https://www.gbif.org/es/>
- GBIF.org. (2024b) (09/09/2024)GBIF occurrence download
- GBIF.org. (2024b) (09/09/2024)GBIF occurrence download
- Graham MH (2003) Confronting multicollinearity in ecological multiple regression. *Ecology* 84: 2809-2815.

- Graham, T. L., Matthews, H. D., & Turner, S. E. (2016). A global-scale evaluation of primate exposure and vulnerability to climate change. *International Journal of Primatology*, 37, 158-174.
- Grow, N. B., Gursky-Doyen, S., & Krzton, A. (2014). *High altitude primates*. New York: Springer.
- Guzmán, A., Link, A., Castillo, J. A., & Botero, J. E. (2016). Agroecosystems and primate conservation: Shade coffee as potential habitat for the conservation of Andean night monkeys in the northern Andes. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 215, 57–67. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.09.002>.
- Hannah, L., Midgley, G., Anđelman, S., Araújo, M., Hughes, G., Martinez-Meyer, E., ... & Williams, P. (2007). Protected area needs in a changing climate. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5(3), 131-138.
- Heller, N. E., and E. S. Zavaleta. (2009) Biodiversity management in the face of climate change: a review of 22 years of recommendations. *Biol. Conserv.* 142: 14–32.
- Hickling, R., Roy, D. B., Hill, J. K., Fox, R. & Thomas, C. D. (2006) The distributions of a wide range of taxonomic groups are expanding polewards. *Glob. Change Biol.* 12(3), 450–455.
- Hirzel AH & GL Lay (2008) Habitat suitability modelling and niche theory. *Journal of Applied Ecology* 45: 1372-1381.
- Hughes, L. (2000). Biological consequences of global warming: is the signal already apparent?. *Trends in ecology & evolution*, 15(2), 56-61.
- IPCC. 2013. Fifth assessment report of the Intergovernmental panel on climate change, New York: Cambridge University Press.
- IDEAM. 2017. Atlas climatológico de Colombia. Bogotá D.C., Colombia.
- IDEAM. 2021. “Mapa de Coberturas de La Tierra Corine Land Cover 1:100.000 2018.” Bogotá D.C.
- Kalbitzer U, Chapman CA. (2018) Primate responses to changing environments in the anthropocene. In: U Kalbitzer, KM Jack, editors. *Primate Life Histories, Sex Roles, and Adaptability: Essays Honour of Linda M. Fedigan*, Cham, Switzerland: Springer. p 283–310.
- Kamilar, J. M., & Beaudrot, L. (2018). Effects of Environmental Stress on Primate Populations. *Annual Review of Anthropology*, 47(1). doi:10.1146/annurev-anthro-102317-045949
- (a) Link, A., Urbani, B. & Mittermeier, R.A. (2021) *Aotus griseimembra* (amended version of 2019 assessment). The IUCN Red List of Threatened Species 2021: e.T1807A190452803. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2021-1.RLTS.T1807A190452803.en>. Accessed on 25 October 2024.
- (b) Link, A., de la Torre, S. & Moscoso, P. (2021) *Aotus lemurinus*. The IUCN Red List of Threatened Species 2021: e.T1808A17922601. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2021-1.RLTS.T1808A17922601.en>. Accessed on 25 October 2024.
- Lozano Frías, M. F. (2021) Dieta de un grupo de martejas (*Aotus griseimembra*) y su relación con la disponibilidad de frutos en un fragmento de bosque en San Juan de Carare, Santander (Colombia).

Marengo JA, Chou SC, Torres RR, Giarolla A, Alves LM, Lyra A. Climate change in central and south America: recent trends, future projections, and impacts on regional agriculture [Internet]. Copenhagen, Denmark; 2014. Report No.: 73. www.ccafs.cgiar.org

Marshall, A. J., Boyko, C. M., Feilen, K. L., Boyko, R. H. y Leighton, M. (2009). Defining fallback foods and assessing their importance in primate ecology and evolution. *American Journal of Physical Anthropology*, 140(4), 603–614.

Martínez Caballero, Y. (2022). Uso de los modelos de distribución de especies como herramienta para la conservación en Colombia [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

Mateo, Rubén G, Felícísimo, Ángel M, & Muñoz, Jesús. (2011). Modelos de distribución de especies: Una revisión sintética. *Revista chilena de historia natural*, 84(2), 217-240. <https://dx.doi.org/10.4067/S0716-078X2011000200008>

Meehl G. et al., (1997)“Intercomparison makes for a better climate model,” *EOS*, vol. 78, no. 41, Oct. 14, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1029/97EO00276>

Meyer, A.L.S., Pie, M.R. (2022) Climate Change Estimates Surpass Rates of Climatic Niche Evolution in Primates. *Int J Primatol* 43, 40–56. <https://doi.org/10.1007/s10764-021-00253-z>

Montilla, S.O., Mopán-Chilito, A.M., Murcia, L.N.S. et al. (2021) Activity Patterns, Diet and Home Range of Night Monkeys (*Aotus griseimembra* and *Aotus lemurinus*) in Tropical Lowland and Mountain Forests of Central Colombia. *Int J Primatol* 42, 130–153 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10764-020-00192-1>

Muñoz J & AM Felícimo (2004) A comparison between some statistical methods commonly used in predictive modeling. *Journal of Vegetation Science* 15: 285-292.

Ochoa-Ochoa, L. M., Rodríguez, P., Mora, F., Flores-Villela, O., & Whittaker, R. J. (2012). Climate change and amphibian diversity patterns in Mexico. *Biological Conservation*, 150(1), 94-102

Orozco Montilla, J. S. (2019). Retos de vivir en ecosistemas de tierras altas y bajas: factores ecológicos y ambientales que influyen sobre el comportamiento de monos nocturnos en Colombia.

Pacifici, M. et al. (2017) Species’ traits influenced their response to recent climate change. *Nat. Clim. Change* 7, 205–208.

Peterson, A. T., Cobos, M. E., & Jiménez-García, D. (2018). Major challenges for correlational ecological niche model projections to future climate conditions. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1429(1), 66-77.

Phillips, S. J., Dudík, M., & Schapire, R. E. (2004, July). A maximum entropy approach to species distribution modeling. In *Proceedings of the twenty-first international conference on Machine learning* (p. 83).

Pichon C, Simmen B. 2015. Energy management in crowned sifakas (*Propithecus coronatus*) and the timing of reproduction in a seasonal environment. *Am J Phys Anthropol* 158: 269–278.

Pinto, M.P., Beltrão-Mendes, R., Talebi, M. et al. (2023) Primates facing climate crisis in a tropical forest hotspot will lose climatic suitable geographical range. *Sci Rep* 13, 641. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-26756-0>

Poveda G. (2004). “La hidroclimatología de Colombia: Una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna,” *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* , vol. 28, no. 107, Jun. 2004.

Poveda G., Waylen P. R., and Pulwarty R.S., (2006). “Annual and inter-annual variability of the present climate in northern South America and southern Meso America,” *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, vol. 234, no. 1, May. 3, 2006. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2005.10.031>

QGIS Development Team. QGIS Geographic information system [Internet]. Open Source Geospatial Foundation Project; 2024.(<https://www.qgis.org>)

Rakotomanana, H., R. Jenkins, and J. Ratsimbazafy. (2013) Conservation challenges for Madagascar in the next decade. Pp. 33–39 in N. S. Sidhi, L. Gibson, P. H. Raven, eds. *Conservation biology: voices from the tropics*. John Wiley & Sons, Oxford, UK.

Riahi et al. (2017) The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview, *Global Environmental Change* 42 153–168, doi:10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009

Roach, Nicolette S., Nicolas Urbina-Cardona, y Thomas E. Lacher. (2020). “Land Cover Drives Amphibian Diversity across Steep Elevational Gradients in an Isolated Neotropical Mountain Range: Implications for Community Conservation.” *Global Ecology and Conservation* 22: e00968. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e00968>.

Rodrigues, A. S., Akcakaya, H. R., Andelman, S. J., Bakarr, M. I., Boitani, L., Brooks, T. M., ... & Yan, X. (2004). Global gap analysis: priority regions for expanding the global protected-area network. *BioScience*, 54(12), 1092-1100.

Rodríguez-Eraso, Nelly, José Daniel, Pabón-Caicedo Néstor, Ricardo Bernal-Suárez, y Jorge Martínez-Collantes. (2010). “Cambio Climático y Su Relación Con El Uso Del Suelo En Los Andes Colombianos.”

Rodríguez Bolaños, A. (2012). Modelos predictivos de distribución para los micos Atelinos (*Lagothrix* y *Ateles*) en Colombia. Uniandes. Disponible en: <http://hdl.handle.net/1992/11601>

Rodríguez Gómez, M. (2013). Perfil ambiental de la Región Caribe colombiana.

Roncancio, N., Castañeda, A. A., Loaiza, L. M. G., & Franco, C. A. R. (2013). 14 Distribución potencial y disponibilidad de hábitat actual del tití gris (*Saguinus leucopus*): un primate endémico de Colombia y en peligro de extinción. *PRIMATES COLOMBIANOS*, 213.

Ruiz García, Patricia & Monterroso Rivas, Alejandro Ismael & Conde, Cecilia & Sanchez-Torres, Gerardo & Vargas-Castilleja, Rocío & Báez-Vásquez, Juan. (2022). Guía de Escenarios de Cambio Climático CMIP6. Tres Estudios de Caso.. 10.13140/RG.2.2.20064.15369.

Scheffers, B. R. et al. (2016) The broad footprint of climate change from genes to biomes to people. *Science* <https://doi.org/10.1126/science.aaf7671>

Schloss, C. A., Nuñez, T. A. & Lawler, J. J. (2012) Dispersal will limit ability of mammals to track climate change in the Western Hemisphere. *PNAS* 109(22), 8606–8611.

Schmitt, C. B., Denich, M., Demissew, S., Friis, I., & Boehmer, H. J. (2010). Floristic diversity in fragmented Afrotropical rainforests: Altitudinal variation and conservation importance. *Applied Vegetation Science*, 13, 291–304.

Shanee, S., Allgas, N., Shanee, N., & Campbell, N. (2015). Distribution survey, ecological niche modelling and conservation assessment of the Peruvian Night Monkey: *Aotus Miconax* Thomas, 1927 (Mammalia: Primates: Aotidae) in north-eastern Peru, with notes on the distributions of *Aotus* spp. Gray, 1870. *Journal of Threatened Taxa*, 7, 6947–6964. <https://doi.org/10.11609/JoTT.o4184.6947-64>.

Shiogama, Hideo; Abe, Manabu; Tatebe, Hiroaki (2019). MIROC MIROC6 model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP. Version YYYYMMDD[1].Earth System Grid Federation. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.898>

Soberón, J., & Peterson, A. T. (2005). Interpretation of models of fundamental ecological niches and species distributional areas. *Biodiversity Informatics*, 2, 1-10.

Struebig MJ, Fischer M, Gaveau DLA, Meijaard E, Wich SA, et al. (2015) Anticipated climate and land-cover changes reveal refuge areas for Borneo's orang-utans. *Glob. Change Biol.* 21:2891–904

Swets J.A. (1988) Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science* 1988, 240, 1285-1293

Taylor, K. ; Stouffer, R. and Meehl G. (2012)“An overview of CMIP5 and the experiment design,” *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 93, no. 4, Apr. 1, 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>

van Schaik CP, Madden R, Ganzhorn J. 2005. Seasonality and primate communities. In: DK Brockman, CP Schaik, editors. *Seasonality in primates: Studies of living and extinct human and non-human primates*, Cambridge: Cambridge University Press. p 445–463.

Virkkala, R., Heikkinen, R. K., Leikola, N. & Luoto, M. (2008) Projected large-scale range reductions of northern-boreal land bird species due to climate change. *Biol. Conserv.* 141(5), 1343–1353.

Zhang L, Ameca EI, Cowlshaw G, et al. (2019) Global assessment of primate vulnerability to extreme climatic events. *Nat Clim Chang* 9: 554–561.