



FUNDACIÓN  
UNIVERSITARIA  
DE POPAYÁN



FUNDACION UNIVERSITARIA DE POPAYAN  
FACULTAD CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRARIAS  
PROGRAMA DE ECOLOGIA

**ACTA DE SUSTENTACIÓN PRIVADA**

Siendo las 2 pm, del día **03 de octubre del 2022** fueron convocados por (google meet) los jurados: Anderson Muñoz Quintero y Julieth Alexandra Chacón Paja, en calidad de pares evaluadores del proyecto de grado denominado: **"Modelado de nicho de *Escallonia myrtilloides* L.f. y aportes para su conservación en Colombia."**, presentado por la estudiante Pilar Fernanda Alfonso, bajo la dirección del docente Luis Gerardo Chilito López, codirección de la docente María Cristina Ordoñez y asesorado por el biólogo Felipe Toro Cardona de la Universidad de Antioquia.

El trabajo se considera: **APROBADO**

- *Nota: De acuerdo a la importancia, a los aportes al conocimiento científico, y la excelencia académica. Los pares evaluadores consideran que debe otorgarse a este trabajo el reconocimiento de **Meritorio**.*

*Para constancia se firma a los 03 días del mes de octubre del 2022.*

**Anderson Muñoz Quintero**

**Julieth Alexandra Chacón Paja**

Sede administrativas: Claustro San José Calle 5 No. 8-58 - Los Robles Km 8 vía al sur  
Sede Norte del Cauca: Carrera 13 # 1sur-51, Santander de Quilichao - Cauca

Popayán, Cauca, Colombia  
PBX [57-2] 8320225 | www.fup.edu.co | Fundación Universitaria de Popayán

## Modelado de nicho de *Escallonia myrtilloides* L.f. y aportes para su conservación en Colombia.

Pilar Fernanda Alfonso<sup>1</sup>, Felipe Toro-Cardona<sup>2</sup>, María Cristina Ordoñez<sup>3</sup>, Luis Gerardo Chilito<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Fundación Universitaria de Popayán. Programa de Ecología. Facultad de Ciencias Ambientales y Agrarias. Popayán, Cauca, Colombia.

<sup>2</sup>Grupo de Ecología y Evolución de Vertebrados, Instituto de Biología. Universidad de Antioquia.

<sup>3</sup>Fundación Universitaria de Popayán. Programa de Ecología. Facultad de Ciencias Ambientales y Agrarias. Popayán, Cauca, Colombia.

---

**Resumen:** Los estudios ecológicos en la alta montaña han puesto en evidencia la vulnerabilidad de sus ecosistemas frente a escenarios inminentes de cambio climático, especialmente en el ecosistema de páramo, en donde se han centrado un mayor número de investigaciones en los últimos años. Sin embargo, aún existe vacíos de información en la zona transicional del páramo hacia el bosque alto andino en Colombia, en la cual persisten actividades antrópicas ligadas a ganadería y agricultura extensiva, provocado modificaciones en los patrones de vegetación en donde se dispersa la especie *Escallonia myrtilloides* L.f. y de la cual se desconoce actualmente su estado de conservación y los cambios en su distribución a lo largo del tiempo. Los modelos de nicho ecológico (MNE) permiten conocer la distribución geográfica de las especies en relación con factores ambientales limitantes como una aproximación a las condiciones que favorecen la presencia de las especies. Los modelos se proyectan a tiempos no censados para superar vacíos de distribución de las especies. La especie *E. myrtilloides* se distribuye desde Costa Rica hasta Venezuela y Norte de Argentina, en la cordillera de los Andes, desde los 2000 a 4500 msnm. Se usó la herramienta de MNE para predecir y pronosticar la distribución idónea de la especie durante el holoceno medio, en la actualidad y en el futuro bajo dos escenarios de cambio climático en Colombia, con el fin de priorizar áreas óptimas para su conservación. El área climáticamente idónea para la especie ha mostrado una contracción desde el holoceno medio a la actualidad, intensificándose su reducción en mayor proporción con la proyección bajo el peor escenario de cambio climático, en donde se presentan áreas completamente fragmentadas y aisladas del continuo ecológico, principalmente sobre la cordillera occidental. Al contrastar las proyecciones de los modelos con las áreas oficialmente declaradas como complejos de páramo, se observa que el 70% de área de los complejos de páramo es considerada como idónea para la especie, en la que se deben enfocar y priorizar estrategias para su conservación.

**Palabras Clave:** modelo de nicho, *Escallonia myrtilloides*, cambio climático, pérdidas de área idónea.

## Introducción

La especie *Escallonia myrtilloides* es un arbusto o árbol pequeño que alcanza los 10 m de altura, que se encuentra comúnmente en las áreas de transición bosque – páramo (Vargas-Ríos, 2022). Se encuentra distribuida en Suramérica en los Andes Tropicales, desde Costa Rica hasta Bolivia y Norte de Argentina, presentándose desde los 2000 a los 4500 msnm (Bernal et al., 2015). Sin embargo, en Colombia se ha registrado entre los 2600 hasta los 3600 msnm, habitando zonas pantanosas en la zona de transición Bosque – Páramo o subpáramo (Mahecha G. et al., 2012). Esta especie presenta fitocenosis con géneros como *Polylepis* (Rangel J.O., 2000).

En la actualidad existen reportes que advierten el grado de deterioro de la zona de arbustales y bosques de páramo (Sarmiento & León, 2015) donde habita y domina la especie *E. myrtilloides* (Rangel J.O., 2005; Cuatrecasas, 2017), esencial en la conformación de bosques de ribera, en el mantenimiento de las fuentes de agua y en la captación de lluvia horizontal que permiten mantener el ciclo hídrico vital para el ecosistema (Rangel J.O., 2000; Vargas et al.; 2012, Sarmiento & León, 2015). Lamentablemente la mayor parte de esta vegetación ha sido deforestada y quemada para dar paso a zonas de pastoreo (Vargas, 2022), sumado a esto, la especie aún no está catalogada en algún criterio de conservación descrito por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) generando aún incertidumbre el estado de conservación de sus poblaciones (Bernal et al., 2015).

Sin embargo, la intensificación de actividades antrópicas no resulta ser la única amenaza para la especie *E. myrtilloides*. Según el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC, 2022), dicho fenómeno, provocará alteraciones en la estructura, los rangos geográficos y los ciclos de vida de las especies de alta montaña, representada en migraciones ascendentes de especies nativas e invasoras, al existir una reducción en el límite climático (Petitpierre et al., 2016). Parte de los impactos climáticos asociados a este fenómeno se encuentran fuertes incrementos en la temperatura con una tendencia en la disminución de las precipitaciones provocando un aumento en sequías, olas de calor y de frío y lluvias torrenciales (Vargas & Ávila, 2018). Aunque la especie *E. myrtilloides* naturalmente está sometida a condiciones ambientales relacionadas con un alto estrés térmico, hídrico y por bajos nutrientes (Sarmiento & León, 2015) posee adaptaciones fisiológicas que le permiten tolerar dichas condiciones (Bouwen, 2019), pese a esto, la incidencia de factores estresantes climáticos y no climáticos repercutirá en pérdidas graves e irreversibles sobre su función en el ecosistema (IPCC, 2022), convirtiendo a esta especie en candidata para la conservación de la zona de transición bosque -páramo.

Los modelos climáticos han permitido detectar futuros riesgos, vulnerabilidades e impactos relacionados con el clima. Del mismo modo, los MNE han sido útiles como aproximaciones para estimar el efecto potencial del cambio climático sobre la biodiversidad (Olvera et al., 2020). El MNE es un conjunto de herramientas analíticas que combina datos de ocurrencias de la especie con variables

ambientales y mediante un método correlativo busca caracterizar las condiciones ambientales para que la especie mantenga sus poblaciones en un lugar y posteriormente realizar proyecciones espaciales (Cobos et al., 2019; Feng et al., 2019). La caracterización de condiciones idóneas para la especie permite predecir los impactos del cambio climático y su influencia en la dinámica de la distribución de la especie si las condiciones varían (Evans, 2012; Cobos et al., 2019).

Si bien el clima determina los rangos de distribución de las especies, sus preferencias y tolerancias climáticas, los efectos del cambio climático está afectando considerablemente el nicho fundamental en respuesta a los cambios en los gradientes térmicos (Araujo et al., 2013; Ashraf et al., 2021). La construcción de los modelos de nicho ecológico involucran una predicción retrospectiva y un pronóstico, definidos bajo la hipótesis de conservadurismo de nicho, en donde los parámetros que definen el nicho de una especie permanecen estables en el espacio y tiempo, por consiguiente, éstos pueden transferirse al pasado o al futuro en base a distribuciones actuales y luego proyectarlos en los espacios ambientales (Barlow et al, 2021).

Se usaron variables climáticas en la predicción del área de distribución idónea para la especie *E. myrtilloides* en Colombia, extrapolando los modelos de área idónea actual a escenarios paleo climáticos, buscando predecir la distribución potencial en el holoceno medio y así mismo se proyectó a escenarios climáticos futuros para los años 2050 y 2070, identificando cambios en el área de distribución a lo largo de estos periodos.

## **Materiales y métodos**

### **Descarga de Registros y variables**

Se obtuvieron los registros de presencia de la especie *E. myrtilloides* de las bases de datos “Global Biodiversity Information Facility (GBIF), SIB Colombia y colecciones de referencia de herbarios y jardines botánicos en Colombia. Se depuraron registros, eliminando duplicados o mal georreferenciados (Chapman, 2005)

Para los modelos de distribución actual para la especie y los escenarios de transferencias se tomaron las variables del portal de datos de WorldClim versión 1.4 (Hijmans et al., 2005; disponible en <http://www.worldclim.org>) a una resolución de 30 segundos (~1 km). Se seleccionaron dos Modelos de Circulación Global (MCG): HadGEM2-es y CCSM4 debido a que simulan de manera más realista la precipitación y la temperatura en el norte de América del Sur (Sierra & Arias & Vieira, 2016). Para la paleo transferencia se tomó como referencia los datos del Holoceno medio (5000 a 7000 años A.P.), periodo en donde se dio un cambio drástico de condiciones más húmedas a secas con alto impacto sobre los ecosistemas, además de que permitió establecer el sistema climático actual (Cook, 2009). Para las transferencias bajo escenarios de cambio climático se tomaron como referente los

periodos de tiempo 2050 y 2070 para las trayectorias representativas de concentración (RCP) 4.5 W/m<sup>2</sup> y 8.5 W/m<sup>2</sup>.

### **Área de Accesibilidad “M” y selección de variables**

Se definió el área de accesibilidad o “M”, usando las Ecorregiones Terrestres del Mundo (Olson, 2020). Para esto se incluyeron aquellas regiones con presencia de la especie y aquellas que permitieran una continuidad en el área de accesibilidad según los planteamientos de Soberón y Peterson (2005). Posteriormente con la delimitación del polígono del área de accesibilidad o “M” se determinaron las variables predictoras importantes para el modelo y para la especie teniendo en cuenta los siguientes criterios: 1) un análisis de correlación de Pearson, estableciendo un umbral de correlación ( $r \leq 0.8$ ), buscando descartar variables con alta correlación y colinealidad (Chapman, 2005; Alves et al., 2020), que puedan redundar dentro del modelo y, por el contrario, aporten significativamente a éste (Dormann et al., 2013)., 2) Teniendo en cuenta la biología de la especie con tolerancia a periodos de sequía y alta radiación (Bouwen, 2019; Buytaert et al., 2006) y 3) Las que mayor aporte tienen al modelo implementando una prueba de Jackknife, para medir el aporte individual de cada una (Shcheglovitova & Anderson, 2013).

### **Modelado de Nicho Ecológico**

Para la calibración y evaluación del modelo se realizó la partición aleatoria de los registros en dos sets: el 70% para entrenamiento y el 30% para prueba (Cobos, Peterson, Barve et al., 2019). Para correr el modelo de nicho ecológico se implementó el paquete de R “Kuenm” usando Maxent como algoritmo de modelado (Cobos et al., 2019). Los modelos fueron generados probando diferentes parametrizaciones (multiplicadores de regularización: 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10; clases de características: lq, q, lqp, lp, qp, p y conjunto de variables ambientales: Set\_1, Set\_2) y niveles de complejidad según los sugerido por Warren and Seifert (2011).

Se evaluaron los modelos en función de tres criterios: 1) Significancia estadística basada en análisis ROC Parciales, 2) Capacidad de Predicción basada en bajas Tasas de Omisión  $\leq 5\%$  y 3) Ajuste y complejidad del modelo haciendo uso de Criterio de Información de Akaike corregido (AICc). Posteriormente para crear el modelo final se seleccionaron 5 réplicas por Bootstrap con formato de salida “Clog log”, seleccionando los modelos sin extrapolación, evitando la estimación de una alta idoneidad en las transferencias, que no sea biológicamente real y representativa (Owens *et al.*, 2013) y se ejecutaron las transferencias tanto al pasado como al futuro. Como se tuvo más de un modelo final, se seleccionó la mediana de todas las réplicas entre los parámetros a fin de consolidar los resultados para la especie.

A través del paquete *Ráster* de R se reclasificaron los modelos con el valor de “10 percentile training presence” tomados del análisis de omisión resultante del modelo final, en donde los pixeles con valores iguales o superiores del valor del umbral

excluyen el 10 por ciento de los registros que tienen valores predichos más bajos (Radosavljevic & Anderson, 2014) y luego, se convirtieron los modelos en mapas binarios a través del software de información geográfica ArcGIS Pro visualizando las áreas idóneas para la especie. Se incluyó una capa de “Complejos de páramos” para Colombia, generando un buffer de 5 km con el fin de analizar y confrontar cambios potenciales en las predicciones de los modelos de nicho generales para Colombia.

## Resultados

### Registros y variables ambientales

Se obtuvo un total de 362 registros de ocurrencia de la especie *E. myrtilloides*.

Partiendo del análisis de la correlación de Pearson, se observa que las variables con menor correlación son bio2 (intervalo medio diurno (temperatura máxima - temperatura mínima)), bio4 (estacionalidad de la temperatura), bio5 (temperatura máxima del mes más cálido) y bio6 (temperatura mínima del mes más frío). Peterson y Nakazawa (2008) sugieren reducir los conjuntos de datos evitando sobre estimaciones o subestimaciones en la distribución de la especie, por esto, estas variables actuarán como un preliminar de selección conforme a los resultados del segundo análisis de correlación con el estadístico Jackknife.

Se incluye como variables ambientales de importancia biológica para la especie la bio12 (precipitación Anual) y bio14 (Precipitación del mes más seco), dado que la precipitación constituye un factor fundamental tanto para la especie como para la zona donde ésta se distribuye (Sarmiento & León, 2015).

Del análisis de la prueba de Jackknife se tiene que las variables ambientales de mayor contribución relativa al modelo son bio2, bio4, bio5, bio6 y bio15 (estacionalidad de la Precipitación). Bajo estos condicionamientos se consolidaron dos sets de variables, útiles en la calibración de los modelos (Cobos *et al.*, 2019) descritos así:

Tabla 1. Set de variables ambientales seleccionadas para el modelo

Sets de Variables	Variables Ambientales
Set_1	Bio 2, Bio 4, Bio 5, Bio 12, Bio 14, Bio 15
Set_2	Bio 2, Bio 4, Bio 6, Bio 12, Bio 14, Bio 15

### Generación de Modelos de Nicho Ecológico

A través de la calibración se generó un total de 216 modelos candidatos (Figura 1) y posteriormente se seleccionó el mejor modelo según los criterios definidos con un

ROC parcial igual a 0, tasa de omisión de 0.028% y para el criterio de delta\_AICc igual a 0. Las variables que mejor predicen la distribución de la especie *E. myrtilloides* corresponden al set\_1 (Tabla 1).

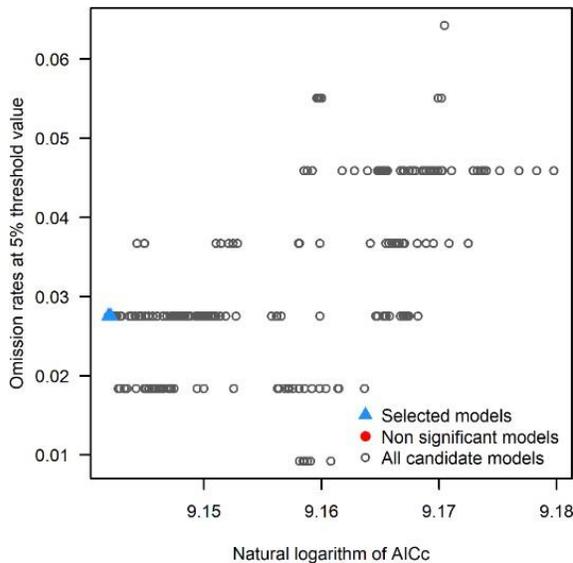


Figura 1. Distribución de los modelos candidatos y modelos seleccionados en función de los criterios definidos.

## Análisis Ambiental y Geográfico

Para el MGC **CCSM4**, el área de distribución de la especie *E. myrtilloides* para el Holoceno medio fue de 153.053 Km<sup>2</sup>. En la transición del Holoceno Medio (Ho) al presente (Pre) se generó una pérdida de área de 15.8 % mientras que del Presente al 2050 para el RCP 4.5 y 8.5 la pérdida ascendió a 24.5 % y 30.6 %, respectivamente. El modelo para el año 2070 muestra pérdida de área idónea para la especie que asciende en relación con el anterior periodo a un 30 % para el RCP 4.5 y 44.3 % para el RCP 8.5. En cuanto al área que permanece estable y adecuada para la especie a lo largo del tiempo, está en promedio en 71% área.

De la misma manera, las pérdidas desde el holoceno al presente se concentran mayormente en departamentos como Nariño, Tolima, Huila, Cauca, Valle del Cauca, Antioquia, Santander y Norte de Santander, representadas en 24.298 Km<sup>2</sup>. Para los pronósticos bajo escenarios de cambio climático en el año 2050, los modelos predicen pérdidas de área adecuada que va desde los 31.900 Km<sup>2</sup> a 39.785 Km<sup>2</sup> para el RCP 4.5 y 8.5 respectivamente, mientras que para el año 2070 las pérdidas de área de distribución incrementarían, partiendo de 38.994 Km<sup>2</sup> a 57.619 Km<sup>2</sup>, representada en departamentos como Antioquia, Nariño, Cauca, Caldas, Cundinamarca, Boyacá, Santander y Bolívar (Figura 2.)

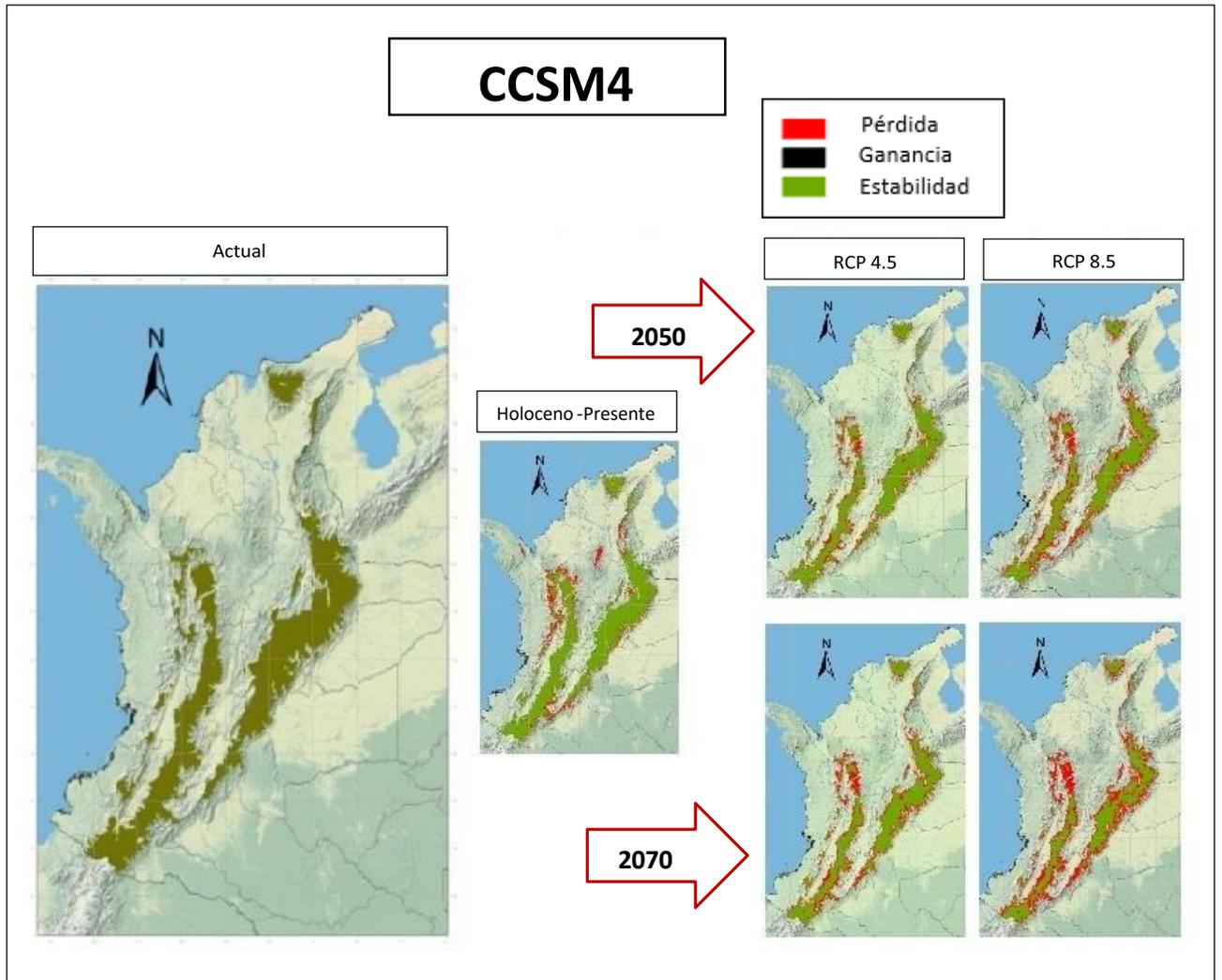


Figura 2. Distribución potencial de los nichos ecológicos actuales y proyectadas para el holoceno, 2050 y 2070 bajo dos escenarios de cambio climático: 4.5 y 8.5 con el modelo global de circulación CCSM4

Para el MGC **HADGEM-ES** en el Holoceno Medio, el área de distribución para la especie fue de 122.636 Km<sup>2</sup>, sin embargo, en la transición de Holoceno medio al Presente, los modelos predijeron una ganancia en área, pasando a 129.870 Km<sup>2</sup> de área idónea, principalmente en departamentos como Nariño, Cauca, Valle del Cauca, Huila, Santander y Norte de Santander, representada en un 6.6 % de área ganada. Aun cuando se produjo una ganancia de área, paralelo a esto se genera una pérdida de área equivalente a 1.437 Km<sup>2</sup> en dicha transición, principalmente en el departamento de Santander, Cauca y piedemonte llanero en el departamento de Casanare equivalente a 1% de área.

En cuanto a los modelos de nicho bajo escenarios de cambio climático, desde el presente al año 2050, la tendencia de pérdida supera la ganancia, estimando que para el RCP 4.5 el área idónea se reducirá a 37.661 Km<sup>2</sup>, representado en 29% de área perdida, mientras que para el RCP 8.5 el área continuará su contracción a 45.485 Km<sup>2</sup>, simbolizada en un 35% de área adecuada. Estas reducciones se ubican en la periferia de los polígonos de área idónea ambiental para la especie.

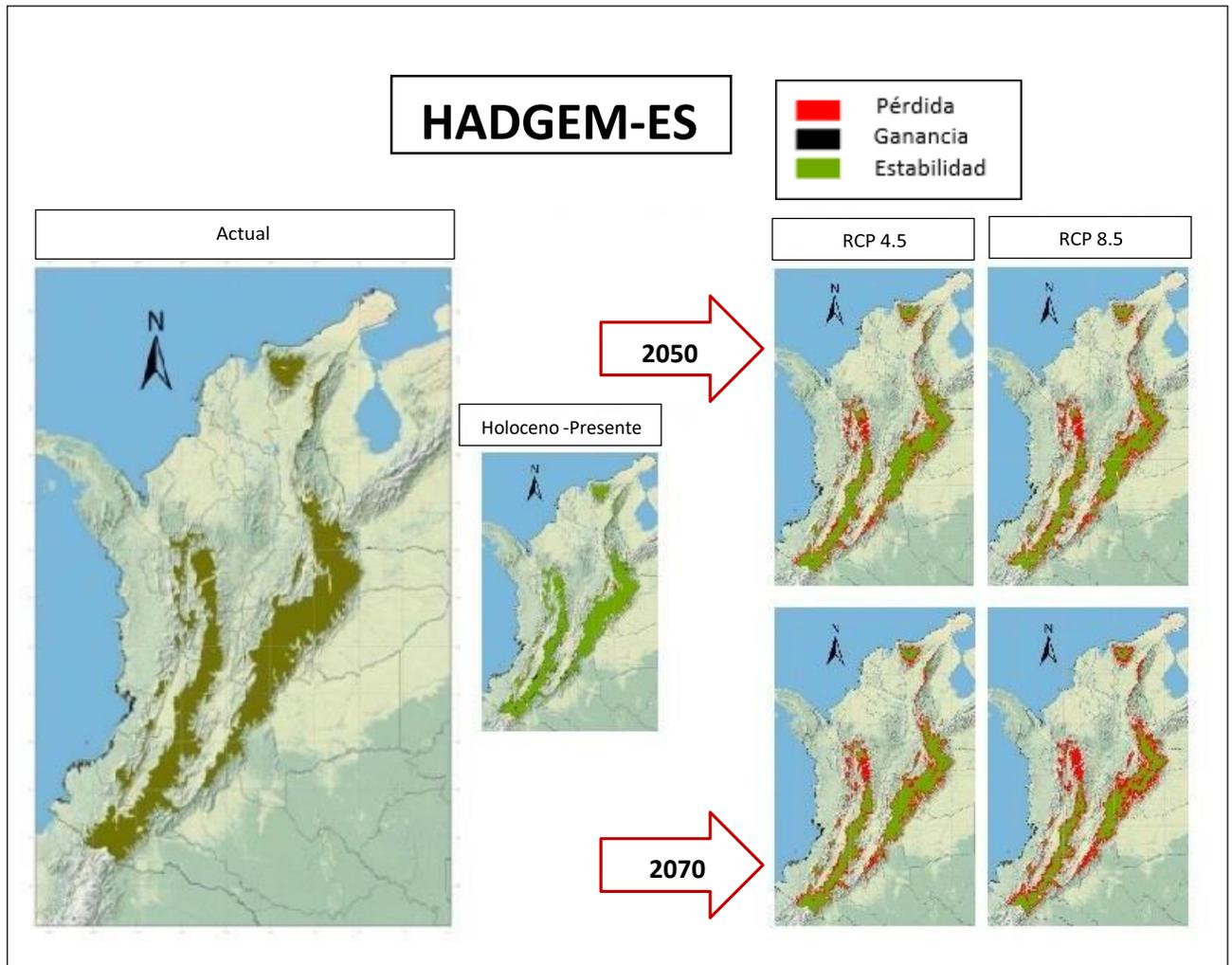


Figura 3. Distribución potencial de los nichos ecológicos actuales y proyectadas para el holoceno, 2050 y 2070 bajo dos escenarios de cambio climático: 4.5 y 8.5 con el modelo global de circulación HADGEM-ES

En lo que respecta a la dinámica de cambio para el año 2070 con respecto al presente, para el escenario menos crítico (4.5) se proyecta una pérdida de área de 43.984 Km<sup>2</sup>, estimada en un 33.8 %, mientras que para la trayectoria de concentración 8.5 se observa una pérdida de área idónea de 61.518 Km<sup>2</sup>, equivalente a 47.3%, principalmente en los departamentos de Antioquia y Boyacá (Figura 3).

En cuanto a la relación de área potencialmente idónea para la especie *E. myrtilloides* en los **Complejos de Páramo en Colombia** con el solapamiento de los modelos de nicho resultantes para el MGC CCSM4, se observa en la proyección, pérdidas estimadas para el año 2050, bajo la incidencia de los dos escenarios de cambio climático (4.5 y 8.5) en promedio de 13.9% de área potencialmente idónea, mientras que para el año 2070, el promedio de área adecuada pérdida para los dos

escenarios, se encuentra sobre el 22 %. Sin embargo, las predicciones apuntan a que el área estable para la especie, a lo largo del tiempo se encuentra en un promedio de 82 %, apuntando como objetivo para estrategias de conservación (Figura 4).

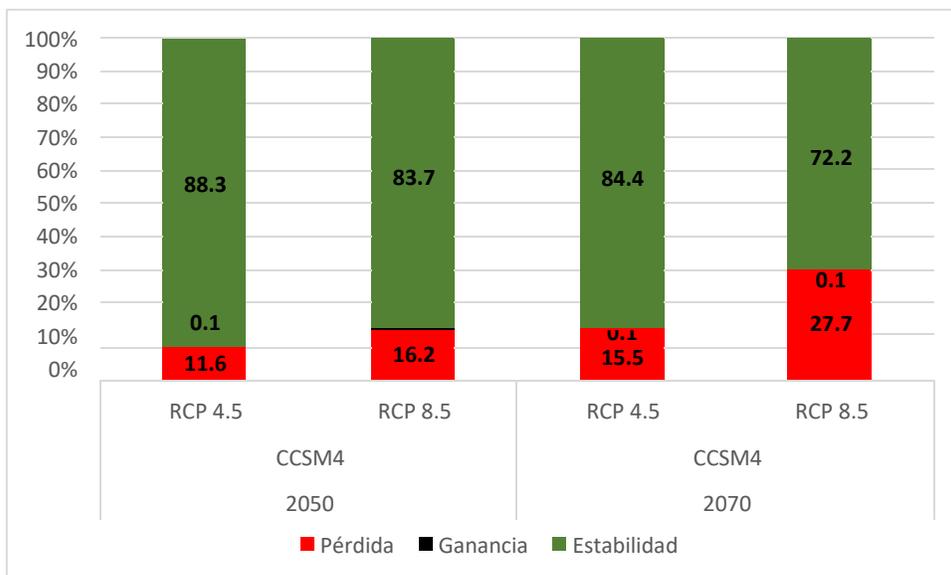


Figura 4. Proyección del área de distribución de la especie *E. myrtilloides* respecto a los complejos de páramo en Colombia para el MGC CCSM4.

Mientras que para el MGC HADGEM-ES, la dinámica en las proyecciones es muy similar con respecto al MGC CCSM4 para los Complejos de páramo en Colombia. La proyección de los modelos de nicho determina que en promedio para el año 2050 se tiene un 16% de área pérdida bajo los efectos del cambio climático en los dos escenarios (4.5 y 8.5), mientras que para el año 2070, la pérdida de área asciende en promedio a un 24% de área idónea para la especie. En lo que respecta a las

áreas de estabilidad en los complejos de páramo se observa que el 80% del área será adecuada para la especie a lo largo del tiempo (Figura 5).

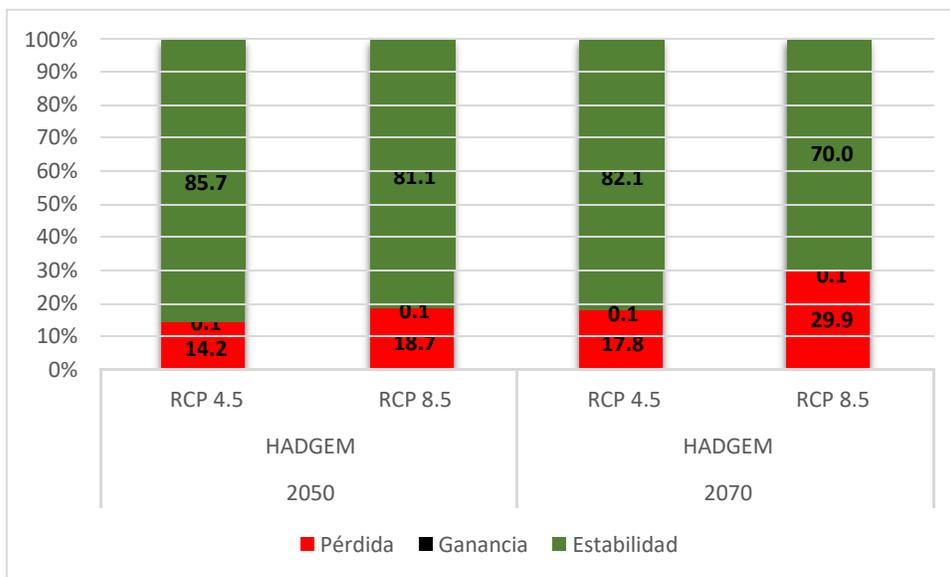


Figura 5. Proyección del área de distribución de la especie *E. myrtilloides* respecto a los complejos de páramo en Colombia para el MGC HADGEM.

De acuerdo con los modelos de nicho para la especie *E. myrtilloides*, las proyecciones a futuro mantendrán un área de estabilidad adecuada para la especie, estimado para el año 2050 en 90.043 Km<sup>2</sup> y para el año 2070 en cerca de 72.246 km<sup>2</sup> para el MGC CCSM4, mientras que el área estable para el MGC HADGEM-ES en el año 2050 se estima en 84.290 Km<sup>2</sup> y para el año 2070 un área alrededor de 68.352 Km<sup>2</sup>, las cuales se mantendrán a lo largo del tiempo y que son consideradas áreas prioritarias para enfoque en estrategias de conservación.

## Discusión

En la producción de los modelos de nicho, desde el holoceno medio hasta los años 2050 y 2070, se identificaron tendencias de cambio en el área idónea para la especie *E. myrtilloides*, que conducen a pérdidas de hábitat adecuado a lo largo del tiempo.

La paleo transferencia mostró que el área adecuada de distribución estuvo disponible durante el holoceno medio como lo sugiere Van der Hammen (1991), y Hooghiemstra et al. (2006) al registrar poblaciones de *Quercus* y *Escallonia* en la cordillera Oriental sobre los 2.600 msnm, las cuales lograron su dispersión sobre las tres cordilleras, con algunas áreas fragmentadas o discontinuas al suroccidente de Colombia, en lo que corresponde a departamentos de Nariño, Cauca y Valle del Cauca. Aun así, parte de estas áreas persisten inclusive en escenarios de cambio climático, brindando un importante refugio para la especie. Algunas áreas totalmente aisladas ubicadas en los departamentos de Chocó y al sur del

departamento de Bolívar, en la transición hacia la actualidad se perdieron completamente, debido en gran medida a la relativa ocupación humana que fue fomentando la deforestación (Gómez et al., 2007), mientras que el área ubicada al norte del departamento de Atlántico, correspondiente en la actualidad a la Sierra Nevada de Santa Marta, se perpetuó a través del tiempo, por efecto de proximidad a la cordillera Oriental, a través de la serranía del Perijá, aportando elementos de la zona andina en combinación con elementos de tierras bajas de clima cálido, permitiéndole su evolución (Carbono & Lozano, 1997).

En la predicción al pasado es posible que el área climáticamente idónea y disponible haya sido más amplia como lo indica el modelo de nicho para la especie, generando vacíos por las limitaciones del modelo que se explican mediante la hipótesis de conservadurismo de nicho, en donde los parámetros que determinan el nicho de una especie se mantienen estables a lo largo del tiempo y del espacio, al inferir las paleo transferencias de las distribuciones actuales de la especie, las cuales están interferidas por modificaciones ambientales antrópicas (Stigall, 2012).

La información que proporcionan las proyecciones para el cambio climático y sus tendencias de cambio en el área idónea para *E. myrtilloides*, registraron pérdidas significativas que se localizan sobre la vertiente oriental de la cordillera oriental, correspondiente a parte del piedemonte Orinocense y Amazónico y en la vertiente occidental de la cordillera Occidental correspondiente al departamento de Chocó, lo que podría estar fuertemente influenciado por el fenómeno de cambio climático acrecentado en los últimos años y los cambios en el uso de la tierra promovidos por fenómenos como políticas inconsistentes y problemáticas sociales relacionadas con desplazamientos y colonización (Llambí et al., 2019). Los modelos de nicho advierten una pérdida considerable de área potencial sobre el departamento de Antioquia, con una reducción gradual dramática para el año 2070 en el peor de los escenarios, lo que podría fomentar un paisaje fragmentado, generando progresivamente un aislamiento, que al final resultaría en una extinción local de la especie y por ende una alteración en la continuidad ecológica representada en la reducción de un hábitat disponible para ésta (Colorado et al., 2017).

La contracción del nicho a lo largo del tiempo es evidente. Existen otros factores diferentes a las variables climáticas que influyen en la distribución de la especie y que de este modo podrían presentar subestimación en las condiciones ambientales que la especie puede tolerar. Las amenazas antrópicas para la especie pueden reducir la capacidad de ésta para perpetuar en partes del paisaje, provocando tres posibles respuestas: desplazamiento a nuevos nichos climáticos, la capacidad de desarrollar adaptaciones fisiológicas o morfológicas que permitan la tolerancia a estas condiciones, finalmente la extinción o las tres opciones (Armenteras et al., 2017, Sarmiento & León, 2015, Buytaert, 2011).

En contraste con los resultados para los complejos de páramo, las pérdidas representan cerca de un 23% de área idónea que se encuentra inmersa en esta figura legal de protección, se localizan y concentran mayormente sobre la cordillera Oriental, en departamentos como Boyacá, Santander, Norte de Santander,

Casanare, y Putumayo y en el flanco oriental de la cordillera Central, en departamentos como Nariño y Cauca, respondiendo en parte a los procesos de degradación por actividades antrópicas, intensificadas en los últimos años como la deforestación, la exploración y explotación minera, la colonización (Fundación Grothendieck, 2021)

Sin embargo, la proyección consensuada para todos los tiempos indica una alta proporción de área idónea adecuada para la distribución de la especie, tanto en el análisis general para Colombia de los modelos como para las áreas que se encuentran inmersas dentro de los límites de complejos de páramo, encontrándose en la mayor parte de escenarios por encima del 80% de área.

## **Conclusiones**

Los modelos de nicho ecológico se consideran una fuente de pronósticos frente a eventos de cambio, una vez más se reafirman como herramienta que permite anticipar de alguna manera los efectos de ciertos fenómenos que pueden comprometer la conservación de la biodiversidad. Por esto, las predicciones resultantes pueden incidir significativamente en la toma de decisiones en planes de manejo y estrategias de conservación de las especies. Los análisis de los modelos de nicho resultantes para la especie *E. myrtilloides* pueden proporcionar un enfoque en esfuerzos de control y regulación dentro de un marco legal que proponga medidas con alcances sociales, que se direccionen en la conservación de la especie y del área donde habita y se distribuye. Si bien el objetivo de la investigación estuvo concentrado en resaltar áreas idóneas, pérdidas para los diferentes escenarios temporales y espaciales, cabe destacar que son mayores las áreas de estabilidad ecológica en donde deben concentrarse y planificarse estrategias de conservación.

## **Referencias bibliográficas**

Agudelo Rico, C. (2017). Modelo Espacialmente Explícito de la Transición Bosque - Páramo en Colombia [Tesis de Maestría. Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/24425>

Aguilar-Garavito M. y Ramírez W. (Eds.) (2021). Evaluación y seguimiento de la restauración ecológica en el páramo andino. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.

Alves de Andrade A, Elías Velazco S. & Júnior P. 2020. ENMTML: An R package for a straightforward construction of complex ecological niche models, Environmental Modelling & Software. Volume 125, 104615. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104615>.

Arboleda D. (2018). Reconstrucción de la vegetación, clima y ambiente sedimentario en el norte de la cordillera Oriental de Colombia durante el Holoceno, a partir de un análisis multi-proxy. Universidad Nacional de Colombia. Tesis de Maestría.

<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/76320/22217658.2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Armenteras D, Espelta J.M., Rodríguez N., Retana J. Deforestation dynamics and drivers in different forest types in Latin America: three decades of studies (1980 – 2010). *Global Environ. Chang.*, 46 (2017), pp. 139-147, DOI [10.1016/j.gloenvcha.2017.09.002](https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.09.002)

Bacca, P. & Burbano, D. (2018). Restauración ecológica de disturbios antrópicos presentes en la zona alto andina. *Revista de Ciencias Agrícolas*. 35(2): 36-50. doi:<http://dx.doi.org/10.22267/rcia.183502.90>

Bernal, R., S.R. Gradstein & M. Celis (eds.). 2015. Catálogo de plantas y líquenes de Colombia. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. <http://catalogoplantasdecolombia.unal.edu.co>

Bouwen K. (2019). How resilient are *Polylepis reticulata* and *Escallonia myrtilloides* to drought?. Ghent University. [https://libstore.ugent.be/fulltxt/RUG01/002/791/195/RUG01-002791195\\_2019\\_0001\\_AC.pdf](https://libstore.ugent.be/fulltxt/RUG01/002/791/195/RUG01-002791195_2019_0001_AC.pdf)

Buytaert, W., Célleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., & Hofstede, R. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth - Science Reviews*, 79(1), 53–72. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002>

Buytaert, W., Cuesta-Camacho, F. and Tobón, C. (2011), Potential impacts of climate change on the environmental services of humid tropical alpine regions. *Global Ecology and Biogeography*, 20: 19-33. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00585.x>

Cabrera, M. y W. Ramirez (Eds). 2014. Restauración ecológica de los páramos de Colombia. Transformación y herramientas para su conservación. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH). Bogotá, D.C. Colombia. 296 pp.

Castañeda I. (2013). Paleoecología de Alta Resolución del Holoceno (11000 Años), en el Páramo de Belmira, Antioquia (Colombia). Universidad Nacional de Colombia. Tesis de Maestría. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/21042/43250394.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Castaño C. (2002). Páramos y Ecosistemas Altoandinos de Colombia en Condición HotSpot and Global Climatic Tensor. ISBN 8067-05-7

Castro Méndez, C. E., Agualimpia Dualiby, Y. del C., & Sánchez Sánchez, F. (2016). Modelo climático de los páramos de la Cordillera Oriental colombiana aplicado a

regímenes de temperatura del suelo. *Perspectiva Geográfica*, 21(1), 33–62.  
<https://doi.org/10.19053/01233769.4541>

Carbono E & Lozano – Contreras G. (1997). Endemismos y otras singularidades de la Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia. Posibles causas de origen y necesidad de conservarlos. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 21(81). Págs 409-419. ISSN 0370 3908

Cobos ME, Peterson AT, Barve N, Osorio-Olvera L. 2019. kuenm: un paquete R para el desarrollo detallado de modelos de nichos ecológicos utilizando Maxent . *PeerJ* 7 : e6281 <https://doi.org/10.7717/peerj.6281>

Colorado Zuluaga, G. J., Vásquez Muñoz, J. L., & Mazo Zuluaga, I. N. (2017). Modelo de conectividad ecológica de fragmentos de bosque andino en Santa Elena (Medellín, Colombia). *Acta Biológica Colombiana*, 22(3), 379–393.  
<https://doi.org/10.15446/abc.v22n3.63013>

Cook, Kerry. (2009). South American Climate Variability and Change: Remote and Regional Forcing Processes. 10.1007/978-90-481-2672-9\_8.

Dormann, C.F., Elith, J., Bacher, S., Buchmann, C., Carl, G., Carré, G., Marquéz, J.R.G., Gruber, B., Lafourcade, B., Leitão, P.J., Münkemüller, T., McClean, C., Osborne, P.E., Reineking, B., Schröder, B., Skidmore, A.K., Zurell, D. and Lautenbach, S. (2013), Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography*, 36: 27- 46.  
<https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2012.07348.x>

Fundación Grothendieck. 2021. Informe 2: Deforestación Y Vulnerabilidad Climática De La Región Orinoquia.

Galvis-Hernández, M. y Ungar, P. M. (Eds.). 2021. Páramos Colombia: biodiversidad y gestión. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, Colombia.

Aguilar-Garavito M. y Ramírez W. (Eds.) (2021). Evaluación y seguimiento de la restauración ecológica en el páramo andino. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.

Garibello, J., Riaño, L., Cuellar, J., Barrera-Cataño, J. I. y Ramírez, W. (2021). Identificación de vacíos de investigación aplicada para restaurar ecosistemas terrestres en Colombia. *Colombia Forestal*, 24(1), 88-107  
<http://www.scielo.org.co/pdf/cofo/v24n1/0120-0739-cofo-24-01-88.pdf>

Gargiullo, M., & Magnuson, B. (2008). A field guide to plants of Costa Rica. Oxford University Press

GBIF.org (14 September 2021) GBIF Occurrence  
Download <https://doi.org/10.15468/dl.4khu5e>

Gil-Leguizamón, P.A., Morales-Puentes, M. E., & Jácome, J. (2020). Estructura del bosque altoandino y páramo en el Macizo de Bijagual, Boyacá, Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 68(3), 765-776. <https://dx.doi.org/10.15517/rbt.v68i3.34912>

Gil Mora, J. E., Sánchez-Valenzuela, G., Baca-Flores, J. A., & Gil-Rodríguez, E. F. (2021). Oferta de leña en bosques nativos altoandinos de la Cordillera del Vilcanota-Cusco. *Cantua*, 17, 17-26. <https://doi.org/10.51343/cantu.v17i0.756>

Gómez A, Berrío J C, Hooghiemstra H, Becerra M, Marchant R. (2007). A Holocene pollen record of vegetation change and human impact from Pantano de Vargas, an intra-Andean basin of Duitama, Colombia. *Review of Palaeobotany and Palynology* 145, págs 143–157. DOI [10.1016/j.revpalbo.2006.10.002](https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2006.10.002)

Gonzalez S. (2019). Diversidad de mariposas diurnas (Lepidoptera: Papilionoidea) y su relación con la transformación de un ecosistema de alta montaña en la zona suroccidental del complejo de Páramos de Guerrero (Subachoque, Cundinamarca). Trabajo de Pregrado. [http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/bitstream/20.500.12744/821/1/Gonzales\\_2019\\_TG.pdf](http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/bitstream/20.500.12744/821/1/Gonzales_2019_TG.pdf)

Gutierrez Rey F. 2020. Zisumaparque Nacional Natural El Cocuycuenca Alta Del Río Nevado. Convenio Interadministrativo de Investigación Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC) Parques Nacionales Naturales de Colombia (PNN) 2017-2020. 322 p. ISBN 978-958-660-373-7.

Hooghiemstra H., Wijninga Vincent M., and Antoine M. Cleef (2006). "The Paleobotanical Record of Colombia: Implications for Biogeography And Biodiversity," *Annals of the Missouri Botanical Garden* 93(2), 297-325, (23 August 2006). [https://doi.org/10.3417/0026-6493\(2006\)93\[297:TPROC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.3417/0026-6493(2006)93[297:TPROC]2.0.CO;2)

Huwasquiche, Janeth & Kometter, Roberto. (2018). El aporte de los saberes comunales andinos en la regeneración de bosques andinos. <https://www.cooperacionsuiza.pe/wp-content/uploads/2018/01/rescate-de-saberes-07-bosques-andinos.pdf>

IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

IAvH y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2012). Cartografía de Páramos de Colombia Esc. 1:100.000. Proyecto: Actualización del Atlas de Páramos de Colombia. Convenio Interadministrativo de Asociación 11-103. <http://www.humboldt.org.co/images/pdf/CartografiaParamos/1-Mapa%20General-Horizontal.pdf>

IDEAM - UNAL, Variabilidad Climática y Cambio Climático en Colombia, Bogotá, D.C., 2018.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. (2012). EVALUACIÓN DE LAS SIMULACIONES DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA DE LOS MODELOS CLIMÁTICOS GLOBALES DEL PROYECTO CMIP5 CON EL CLIMA PRESENTE EN COLOMBIA. Subdirección de Meteorología. <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Evaluacion+CMIP5+%28Leon+Rodriguez%29.pdf/239e890f-4105-47c0-a054-a65ae2767903>

IPCC, 2014: Anexo II: Glosario [Mach, K.J., S. Planton y C. von Stechow (eds.)]. En: Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza, págs. 127-141.

IPCC. 2022. Climate Change 2022 Impacts, Adaptation and Vulnerability. Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for Policymakers. Switzerland.

Körner C. (2004). "Biodiversidad de montaña, sus causas y función", *AMBIO: Revista del medio ambiente humano* 33 (sp13), 11-17, (13 de noviembre de 2004). <https://doi.org/10.1007/0044-7447-33.sp13.11>

Körner, C., Jetz, W., Paulsen, J., Payne, D., Rudmann-Maurer, K., & M. Spehn, E. (2017). A global inventory of mountains for bio-geographical applications. *Alpine Botany*, 127(1), 1-15. <https://doi.org/10.1007/s00035-016-0182-6>

Llambí, L. D., Becerra, M. T., Peralvo, M., Avella, A., Baruffol, M., & Díaz, L. J. (2019). Construcción de una Estrategia para el Monitoreo Integrado de los Ecosistemas de Alta Montaña en Colombia. *Biodiversidad En La Práctica*, 4(1), 150–172. Recuperado a partir de <http://revistas.humboldt.org.co/index.php/BEP/article/view/699>

Marchant R., Behling H., Berrio J. C., Cleef A., Duivenvoorden J., Hooghiemstra H., Kuhry P., Melief B., Van Geel, B., Van der Hammen T., Van Reenen G., Wille M. (2001). Mid- to Late-Holocene pollen-based biome reconstructions for Colombia. *Quaternary Science Reviews*. Volume 20, Issue 12. Pages 1289-1308. doi.org/10.1016/S0277-3791(00)00182-7.

Marchant R., Hooghiemstra H. (2004). Rapid environmental change in African and South American tropics around 4000 years before present: a review, *Earth-Science Reviews*, Volume 66, Issues 3–4. Pages 217-260. ISSN 0012-8252. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2004.01.003>.

Olson, D.M. 2020. Terrestrial ecoregions of the world, V1. Harvard Dataverse. <https://doi.org/10.7910/DVN/WTLNRG>

Owens Hannah L., Campbell Lindsay P., Dornak L. Lynnette, Saupe Erin E., Barve Narayani, Soberón Jorge, Ingenloff Kate, Lira-Noriega Andrés, Hensz Christopher M., Myers Corinne E., Peterson A. Townsend. Constraints on interpretation of ecological niche models by limited environmental ranges on calibration areas. *Ecological Modelling*. Volume 263. 2013. Pages 10-18. ISSN 0304-3800. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.04.011>.

Payne, D., Spehn, E. M., Snelhage, M., & Fischer, M. (2017, December). Opportunities for research on mountain biodiversity under global change. *Current Opinion in Environmental Sustainability*. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2017.11.001>

Peterson, A.T., Cobos, M.E. and Jiménez-García, D. (2018), Major challenges for correlational ecological niche model projections to future climate conditions. *Ann. N.Y. Acad. Sci.*, 1429: 66-77. <https://doi.org/10.1111/nyas.13873>

Peterson, A.T. and Nakazawa, Y. (2008), Environmental data sets matter in ecological niche modelling: an example with *Solenopsis invicta* and *Solenopsis richteri*. *Global Ecology and Biogeography*, 17: 135-144. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2007.00347.x>

Peterson A. Townsend, Papeş Monica, Soberón Jorge. Rethinking receiver operating characteristic analysis applications in ecological niche modeling. *Ecological Modelling*. Volume 213, Issue 1, 2008, Pages 63-72, ISSN 0304-3800, <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.11.008>.

Peterson, A.T., Cobos, M.E. and Jiménez-García, D. (2018), Major challenges for correlational ecological niche model projections to future climate conditions. *Ann. N.Y. Acad. Sci.*, 1429: 66-77. <https://doi.org/10.1111/nyas.13873>

Petitpierre, B., McDougall, K., Seipel, T., Broennimann, O., Guisan, A. and Kueffer, C. (2016), Will climate change increase the risk of plant invasions into mountains?. *Ecol Appl*, 26: 530-544. <https://doi.org/10.1890/14-1871>

Phillips, S., Anderson, R. y Schapire, R. (2013). Maximum Entropy Modeling of Species Geographic Distribution. *Ecological Modelling*, 190, 231-259. DOI 10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026.

Rangel-Ch., J.O. 2000. Amenazas sobre la flora, la vegetación y los ecosistemas de Colombia. *Pérez-Arbelaezia* 5(11): 20-29 Rangel-Ch. (2000). LA REGIÓN PARAMUNA Y FRANJA ALEDAÑA EN COLOMBIA.

Radosavljevic, A. & Anderson, R. P. (2014). Making better MAXENT models of species distributions: complexity, overfitting and evaluation. *J. Biogeogr.* 41: 629-643

Romoleroux K, Tandalla D, Eler R, Navarrete H. (2016). Plantas vasculares de los bosques de Polylepis en los páramos de Oyacachi. Quito, Ecuador. ISBN: 978-9978-77-273-7

Sarmiento, C., y León, O. (eds.). 2015. Transición bosque–páramo. Bases conceptuales y métodos para su identificación en los Andes colombianos. Bogotá: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. 156 págs.

Shcheglovitova, M., & Anderson, R.P. (2013). Estimating optimal complexity for ecological niche models: A jackknife approach for species with small sample sizes. *Ecological Modelling*, 269, 9-17. DOI:[10.1016/J.ECOLMODEL.2013.08.011](https://doi.org/10.1016/J.ECOLMODEL.2013.08.011)

Sierra, J., Arias, P. & Vieira, S. (2016). Sobre la representación de la precipitación en el Norte de Suramérica por los modelos del CMIP5. Sociedad Colombiana de Ingenieros XXII Seminario Nacional de Hidráulica E Hidrología.

Sistema de Información Ambiental de Colombia. 2015. Páramos. [http://181.225.72.78/Portal-SIAC-web/faces/Dashboard/Biodiversidad2/eco\\_import\\_ambiental/eco\\_import\\_ambiental.xhtml](http://181.225.72.78/Portal-SIAC-web/faces/Dashboard/Biodiversidad2/eco_import_ambiental/eco_import_ambiental.xhtml)

Soberón, Jorge. (2008). Grinnellian and Eltonian niches and geographic distributions of species. *Ecology letters*. 10. 1115-23. 10.1111/j.1461-0248.2007.01107.x.

Soberón, Jorge & Peterson, Andrew. (2020). What is the shape of the fundamental Grinnellian niche? *Theoretical Ecology*. 13. DOI:[10.1007/s12080-019-0432-5](https://doi.org/10.1007/s12080-019-0432-5)

Steffen, W., Persson, A., Deutsch, L., Zalasiewicz, J., Williams, M., Richardson, K., Crumley, C., Crutzen, P., Folke, C., Gordon, L., Molina, M., Ramanathan, V., Rockström, J., Scheffer, M., Schellnhuber, HJ y Svedin, U. (2011). El antropoceno: del cambio global a la administración planetaria. *Ambio*, 40 (7), 739– 761. <https://doi.org/10.1007/s13280-011-0185-x>

Stigall, A.L., 2012. Using ecological niche modelling to evaluate niche stability in deep time. *J. Biogeogr.* 39, 772–781. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2011.02651.x>.

Van der Hammen T. (2000). Aspectos de historia y ecología de la biodiversidad norandina y amazónica. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 24(91). Págs 231 – 245. ISSN 0370 – 3908

Vargas, O. (2007). Guía Metodológica para la Restauración Ecológica del bosque altoandino. ISBN: 978-958-701-908-7

Vargas, O., Insuasty, J., Rojas-Zamora, O., Castro, P. & Flórez, N. (2012). Programa para la Restauración Ecológica en Áreas del Parque Nacional Natural Chingaza.

Vergara Buitrago, P. A. (2019). Estrategias Implementadas por el Sistema Nacional de Áreas Protegidas de Colombia para Conservar los Páramos. *Revista de Ciencias Ambientales Tropical Journal of Environmental Science*, 54(1): 167-176. DOI: <https://doi.org/10.15359/rca.54-1.9>

Villanueva-Bonilla, G., García-García, A., Brescovit, A. & Vasconcellos-Neto, J. (2017). Abundance and Richness of Orb-Web Spiders (Arachnida: Araneae) in a Secondary High-Andean Forest of Colombia. *Revista Ibérica de Aracnología*. 30. 53-60.