



**Distribución potencial del bagre rayado (*Pseudoplatystoma magdaleniatum* Buitrago-Suárez
& Burr 2007) en condiciones actuales y bajo un escenario de cambio climático**

Daniela Bedoya Giraldo

Código: 11792114270

Universidad Antonio Nariño

Especialización en Sistemas de Información Geográfica

Facultad de Ingeniería Ambiental e Ingeniería Civil

Bogotá D.C, Colombia

2023

Distribución potencial del bagre rayado (*Pseudoplatystoma magdaleniatum* Buitrago-Suárez & Burr 2007) en condiciones actuales y bajo un escenario de cambio climático.

Daniela Bedoya Giraldo

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Especialista en sistemas de información geográfica (SIG)

Director (a): Doctor Andrés Felipe Carvajal Vanegas

Codirector (a): MSc. Daniel Valencia Rodríguez

Universidad Antonio Nariño

Especialización en Sistemas de Información Geográfica

Facultad de Ingeniería Ambiental e Ingeniería Civil

Bogotá D.C, Colombia

2023

NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado

_____, Cumple con

los requisitos para optar

Al título de _____.

Firma del Tutor

Firma Jurado

Firma Jurado

Ciudad, Día Mes Año.

Contenido

	Pág.
Preliminares.....	<u>V</u>
Resumen.....	<u>7</u>
Abstract.....	<u>8</u>
Introducción.....	<u>9</u>
Marco Teórico.....	<u>12</u>
2.1. Peces de la cuenca hidrográfica Magdalena-Cauca.....	<u>12</u>
2.2. Generalidades del bagre rayado.....	<u>13</u>
2.3. Modelos de distribución y modelos de nicho ecológico de las especies.....	<u>14</u>
2.4. Efecto del cambio climático en la distribución de las especies.....	<u>18</u>
2.5. Estado del conocimiento.....	<u>20</u>
Objetivos.....	<u>24</u>
Metodología.....	<u>25</u>
4.1. Área accesible.....	<u>25</u>
4.2. Datos de ocurrencias.....	<u>25</u>
4.3. Variables ambientales.....	<u>26</u>
4.4. Modelado de nicho ecológico.....	<u>28</u>
Resultados y Discusión.....	<u>31</u>
5.1. Áreas protegidas.....	<u>49</u>
Conclusiones.....	<u>53</u>
Anexos.....	<u>54</u>
Referencias Bibliográficas.....	<u>73</u>

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 01 : Bagre rayado (<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>).....	14
Figura 02 : Esquema de flujo de trabajo para la realización y validación de modelos de distribución de especies.....	30
Figura 03 : Mapa de los registros de la especie de bagre rayado (<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>) en la cuenca hidrográfica del río Magdalena.....	32
Figura 04 : Mapa binario de distribución potencial actual de la especie <i>P. magdaleniatum</i> en la cuenca hidrográfica del Magdalena; A) variables WoldClim y B) Predictores propios de los cuerpos de agua (EarthEnv).....	35
Figura 05 : Mapa continuo de la distribución potencial actual de la especie <i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i> en la cuenca hidrográfica del Magdalena.....	40
Figura 06 : Mapas de la distribución potencial de la especie <i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i> en la cuenca hidrográfica del Magdalena en el escenario de cambio climático SSP1-2.6.....	42
Figura 07 : Mapas de la distribución potencial de la especie <i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i> en la cuenca hidrográfica del Magdalena en el escenario de cambio climático SSP5-8.5.....	43
Figura 08 : Área de distribución potencial del bagre rayado en condiciones actuales y de cambio climático.....	44
Figura 09 : Área de estabilidad, ganancia y pérdida entre el modelo de distribución actual y los dos escenarios de cambio climático para la especie de bagre rayado.....	46
Figura 10 : Mapas del área de estabilidad, ganancia y pérdida entre el modelo de distribución actual y los escenarios de cambio climático.....	47
Figura 11 : Área interceptada entre el modelo de distribución potencial actual y las áreas protegidas existentes.....	51
Figura 12 : Área interceptada entre el MNE en el escenario de cambio climático menos optimista (SSP5-8.5) y las áreas protegidas existentes en la actualidad.....	52

Lista de tablas

Pág.

Tabla 1 : Parámetros seleccionados para escoger el modelo de nicho ecológico (MNE) de la especie de <i>P. magdaleniatum</i> en condiciones actuales y de cambio climático.....	<u>33</u>
Tabla 2 : Porcentaje de contribución de las variables más informativas en el modelo.....	<u>38</u>

Resumen

El bagre rayado (*P. magdaleniatum*) es endémico de la cuenca del Magdalena, es migratorio y tiene un alto valor comercial. Una de sus amenazas es el cambio climático, sin embargo, no se ha documentado el efecto de este sobre la distribución potencial de la especie, información que es necesaria para su conservación. Por tal razón se planteó como objetivo analizar la distribución potencial de esta especie en condiciones actuales y de cambio climático. Se descargaron registros de GBIF y variables predictoras de WorldClim y EarthEnv, y el modelamiento de nicho ecológico se realizó con el software MAXENT. La distribución potencial actual es coincidente con los datos de ocurrencia, la especie prefiere zonas bajas, caudal intermedio, sustrato de limo y rocas. Por otro lado, el cambio climático tiene un efecto negativo sobre esta, ya que reduce su distribución geográfica y posiblemente alterará sus ciclos reproductivos y de desarrollo.

Palabras claves: bagre rayado, cambio climático, peces de agua dulce, modelamiento de nicho ecológico.

Abstract

The Bagre rayado (*P. magdaleniatum*) is an endemic species to the Magdalena basin of Colombia. This species is known to have a migratory behavior and a high commercial value in the market. Unfortunately, one of its largest threats is climate change, however, the effect of this phenomenon on the species potential distribution has not been evaluated. Thus, this results in valuable information that is necessary for the conservation of this species. For this reason, the aim of this study was to analyze the potential distribution of the specie under current and climate change conditions. Records were obtained from GBIF and the predictors climatic variables from WorldClim and EarthEnv. The ecological niche model was performed with the MAXENT software. Our results show that the current potential distribution is consistent with the occurrence data and that this species prefers low elevation areas with intermediate flow along with a silt and rock substrate. On the other hand, we also found that the climate change has a negative effect on the species, because reducing its geographical distribution and possibly altering its reproductive and development cycles.

Keywords: Bagre rayado, climate change, freshwater fish, ecological niche modelling

1. Introducción

La región Neotropical es considerada una de las regiones con mayor diversidad de peces de agua dulce con cerca de 6 300 especies (Albert et al., 2020). Dado a esta alta riqueza se han desarrollado múltiples estudios principalmente en ramas de la taxonomía, ecología y evolución, sin embargo, temas claves y de mucha importancia como es la distribución potencial de las especies y el uso de esto para generar planes de conservación ha sido poco explorado, apenas existen algunos casos aislados de modelos predictivos de zonas de conservación para peces de agua dulce en la cuenca amazónica (Frederico et al., 2016; Jézéquel et al., 2020) y los Andes tropicales (Tognelli et al., 2019; Valencia-Rodríguez et al., 2022).

Comparado con Brasil, Colombia es el segundo país a nivel mundial con mayor número de peces de agua dulce, lo cual lo hace llamativo para documentar estos patrones de distribución de las especies y poder implementar acciones adecuadas para su preservación y conservación. En el territorio colombiano se registran diferentes cuencas hidrográficas, dentro de estas se encuentra la cuenca del Magdalena, conformada por los ríos Magdalena y Cauca, allí se albergan cerca de 236 especies (DoNascimento et al., 2023) de las cuales casi el 70% son endémicas para Colombia, muchas de estas especies han sido utilizadas ampliamente para uso ornamental y pesquero, causando un detrimento importante en sus poblaciones naturales (García-Alzate et al., 2020). Un ejemplo de ello ocurre con el pez comúnmente conocido como bagre rayado (*Pseudoplatystoma magdaleniatum* Buitrago-Suárez & Burr, 2007), el cual tiene una alta importancia por ser único para la cuenca Magdalena; además, es una especie culturalmente representativa para las comunidades ribereñas y ha sido aprovechada para autoconsumo y venta,

generando seguridad alimentaria y beneficio económico para el gremio de los pescadores en la cuenca del Magdalena (Hernández 2008; Mojica et al., 2012).

En la década de 1970 esta especie fue la más registrada y consumida, representando casi el 50% de las capturas durante la subienda, sin embargo, en la actualidad sus capturas son mínimas. Adicionalmente, se encuentra catalogada en el libro rojo de peces de agua dulce de Colombia como en peligro crítico (CR) y en la IUCN como en peligro (EN) y sus principales amenazas son la degradación del hábitat, sobreexplotación pesquera, creación de hidroeléctricas, entre otros (Mojica et al., 2012).

Son muchos los estresores que pueden estar afectando las comunidades ícticas, por ejemplo, la regulación y represamiento de los cuerpos de agua, las especies introducidas y la contaminación producto de la urbanización (Salgado et al., 2022, García-Alzate et al., 2020), no obstante, el cambio climático también se cree que es uno de los factores que afectan aspectos como la fisiología, ecología, reproducción y comportamiento de los peces (Brander 2010, Habibullah et al., 2022, Prakash 2021). Lo anterior puede indicar que, si las poblaciones de Bagre rayado en condiciones futuras próximas (20 o más años) son sometidas a los efectos del cambio climático, sumado a todas las demás presiones a la que es sometido actualmente, la especie podría estar en camino a la extinción como lo planteado por Zárata et al. (1988) hace unos años.

Se ha documentado que el cambio climático genera un impacto sobre la distribución geográfica de las especies, y por esta razón ha aumentado el número de estudios enfocados en evaluar este efecto (Pörtner & Peck 2010), Con los insumos de ocurrencias de las especies y las variables ambientales predictoras se puede realizar un modelamiento de nicho ecológico para conocer el área geográfica potencial de estas bajo escenarios pasados, actuales y futuros

(Rijnsdorp et al., 2009).

La creación de bases de datos y el uso exponencial del sistema global de información sobre biodiversidad (GBIF) y el sistema de información sobre biodiversidad de Colombia (SiB Colombia), permiten tener información de las ocurrencias de las especies. Por otro lado, bases de datos de variables ambientales como WorldClim o EarthEnv (Hijman et al., 2005; Domisch et al., 2015; Barbarosa et al., 2018), permiten tener información sobre variables predictoras útiles en el momento de hacer estos modelamientos de nicho ecológico.

El bagre rayado ha sido objeto de estudio a nivel taxonómico, ecológico y genético (Buitrago-Suárez y Burr 2007; Atencio-García 2000; Rojas Muñoz 2014) y se ha documentado ampliamente sobre los factores que han generado una disminución considerable en sus poblaciones (Mojica et al., 2012), sin embargo, no hay estudios donde se evalúen los posibles efectos del cambio climático en la distribución geográfica de la especie, insumos que podrían ser relevantes y necesarios para la preservación y conservación de la misma.

Por lo anterior, en este estudio se planteó como objetivo analizar la distribución potencial del bagre rayado del Magdalena (*P. magdaleniatum*) en condiciones actuales y de cambio climático, con el fin de conocer los efectos que puede tener el cambio climático en la distribución geográfica de la especie y proporcionar insumos necesarios para la creación de planes de conservación de la especie.

2. Marco teórico

2.1) Peces de la cuenca hidrográfica Magdalena-Cauca.

Colombia tiene una alta diversidad de peces de agua dulce con un total de 1 616 especies, las cuales lo posicionan en el segundo puesto a nivel del mundo, superado únicamente por Brasil (DoNascimento et al., 2023). Esta gran diversidad de peces se distribuye a lo largo de cinco grandes cuencas hidrográficas: Caribe, Magdalena, Pacífico, Amazonas y Orinoquía (IDEAM, 2015).

El inventario de la ictiofauna de la cuenca del Magdalena es una de las más completas en comparación con otras cuencas hidrográficas del país (García-Álzate et al., 2020), dado posiblemente a que los estudios ictiológicos se han centrado en esta área donde se concentra el 77% de la población humana y es el eje económico, social e industrial del territorio colombiano (Jiménez-Segura et al., 2016).

Allí se registran 236 especies de peces que corresponden al 14,5% del listado total de peces de Colombia, de ellas el 68,1% son endémicas para Colombia, cifra destacable que demuestra la importancia de seguir estudiando y protegiendo los peces de esta cuenca hidrográfica (García-Álzate et al., 2020).

Del total de especies endémicas en esta cuenca hidrográfica, se destaca que el 25% se encuentran en alguna categoría de amenaza según la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN): el bagre rayado (*P. magdaleniatum*), el pataló (*Ichthyoelephas longirostris*) y el bagre cazón (*Notarius bonillai*) en peligro (EN), el bocachico (*Prochilodus magdalenae*), el capaz (*Pimelodus grosskopfii*), la dorada (*Brycon moorei*) y entre otros, en

categoría de vulnerable (VU), la raya (*Potamotrygon magdalenae*) y el chango (*Cynopotamus magdalenae*) en categoría de casi amenazados (NT).

Adicional a lo anterior, 46 especies tienen algún tipo de uso (sea ornamental o para consumo humano), siendo coincidente que la mayoría de estas especies, que son utilizadas para algún beneficio humano se encuentran en alguna categoría de amenaza; lo cual se debe a que a lo largo de los años se ha ejercido una presión constante en las poblaciones de estas especies, ya que su extracción ha sido desmedida, superando la capacidad reproductiva de las mismas (Mojica et al., 2012).

Una de las especies más importantes en esta cuenca hidrográfica es el bagre rayado, ya que es endémica, se usa para consumo humano, es la segunda especie en importancia comercial de toda la cuenca del Magdalena (Valderrama et al., 2011), está en peligro (EN) según la IUCN (Mojica et al., 2016) y en peligro crítico (CR) según el libro rojo de peces dulceacuícolas de Colombia (Mojica et al., 2012), por estas razones fue escogida como especie modelo para el respectivo estudio.

2.2) Generalidades del bagre rayado

El bagre, emblemático del Magdalena, es conocido popularmente como bagre rayado o pintadillo, su nombre científico es *Pseudoplatystoma magdaleniatum*, pertenece al orden de los Siluriformes y a la familia Pimelodidae (Figura 1). Se encuentra distribuido en el río Magdalena hasta la ciudad de Neiva, en el río Cauca hasta Cáceres, y en el río San Jorge en su parte baja (Maldonado-Ocampo et al., 2005). Se caracteriza por ser la especie de mayor envergadura en

esta cuenca hidrográfica con hasta 1,5 m de longitud estándar y 20 kg de peso (Buitrago-Suárez y Burr, 2007; Mojica et al., 2012).

Esta especie se caracteriza por ser alargada, su cabeza es deprimida dorsoventralmente y su cuerpo es fusiforme, tiene ojos pequeños ubicados en posición dorsal, barbicelos que no sobrepasan la aleta dorsal, la maxila superior sobrepasa la inferior y su coloración es particular (Maldonado-Ocampo et al., 2005). Su cuerpo es gris oscuro, la parte ventral es blanquecina y tiene bandas horizontales a lo largo de todo el cuerpo, de tamaños irregulares.

Figura 1.

Bagre rayado (*Pseudoplatystoma magdaleniatum*). Fuente: CavFish.



Con relación a la ecología trófica se ha documentado que es una especie oportunista, predatoria e ictiófaga, se puede alimentar de cangrejos, macroinvertebrados y camarones, pero su alimento de preferencia son los cardúmenes de peces principalmente de las familias Characidae, Curimatidae (Cortés Millán 2003, Guarnizo 2007, Barreto y Borda 2008), Triportheidae y Pimelodidae (Rojas Muñoz 2014).

En los aspectos reproductivos se registra que recorre grandes distancias en grupos o cardúmenes (Atencio-García 2000), realiza dos migraciones anuales durante las épocas más secas y los juveniles durante épocas de lluvias se quedan en las ciénagas alimentándose y

aumentando de tamaño corporal (Valderrama et al., 2011). Es una especie semélpara, es decir, que tiene un único episodio reproductivo antes de morir, la fecundidad efectiva varía entre 900 000 y 1 062 000 ovocitos y el diámetro promedio de los ovocitos es de 0,70 mm (Arce-Zúñiga et al., 2014).

Actualmente esta especie tiene un declive importante en sus poblaciones, en el año 1960 tenía el valor comercial más alto de toda la cuenca del Magdalena, lo que conllevó a una fuerte presión pesquera que generó una disminución considerable en sus capturas, hoy las capturas correspondan a menos del 5% de las registradas para esta cuenca hidrográfica (Mojica et al., 2012).

2.3) Modelos de distribución y modelos de nicho ecológico de las especies

Entender la distribución geográfica de las especies ha sido un reto y un tema estudiado a lo largo de los años, principalmente porque responde preguntas relacionadas con la ecología y biogeografía (Gámez 2011). En efecto, las especies solo se encuentran en ciertos ambientes y no todas pueden ser encontradas en todas partes, ya que existen diferentes requerimientos para que se puedan establecer.

Se ha documentado que, en resumen, los factores que permiten la identificación de la distribución geográfica de una especie son: 1) condiciones ambientales óptimas para poder establecerse (temperatura, suelo, elevación, entre otros), 2) lugar donde la interacción con otras especies permita su coexistencia (depredación, competencia por alimento) y 3) rangos geográficos donde la especie haya encontrado lugares alcanzables en tiempos evolutivos y geológicos para poder colonizar (Soberón y Peterson, 2005; Barve et al., 2011).

Sin embargo, aunque estos tres factores son los que explican la distribución geográfica de las especies, factores abióticos como el clima (temperatura, humedad relativa, precipitación) y la topografía (elevación, suelos), son los más sencillos e informativos de usar a la hora de explicar estas distribuciones (Grinnell 1924, Peterson et al., 2019). Por la anterior razón es que la mayoría de los modelamientos de las áreas de distribución de las especies se basan únicamente en variables bioclimáticas y topográficas (variables escenopoéticas), ya que representan el área que la especie tolera y donde puede vivir óptimamente (Grinnell 1924, Peterson et al., 2019).

Es importante resaltar que, no solamente la manera de conocer la distribución geográfica de una especie es por medio de muestreos científicos, monitoreos participativos y avistamientos, estos resultan importantes y necesarios pero requiere de muchos esfuerzos económicos y logísticos (Fernández 2023), pues las áreas geográficas por donde se pueden desplazar los organismos son muy amplias y esperar muestrear todas las áreas de Colombia, por ejemplo, puede tardar muchos años dado que se requieren múltiples profesionales y grandes cantidades de dinero; sumado a las problemáticas sociales y complicaciones de desplazamiento que limitan la exploración del territorio, entre otros.

Por tal razón, en los últimos años se ha acudido a identificar la distribución potencial de las especies por medio de los modelos de distribución de especies y modelos de nicho ecológico (Guisan y Zimmermann, 2000; Soberón y Peterson 2005; Gámez 2011), lo cual ha permitido el avance en muchos campos como: diseño y ejecución de planes de conservación, evaluación del impacto ambiental, riesgo de especies invasoras, incidencia del calentamiento global en la distribución de las especies, entre otros (Gil, 2017).

Es de resaltar que los términos de modelos de distribución de especies y modelos de nicho ecológico se han utilizado como sinónimos en muchos estudios, pero últimamente se ha considerado que responden a diferentes preguntas (Elith y Graham, 2009; Soberon y Peterson, 2017; Melo-Merino et al., 2020).

El modelo de distribución de especies (MDS, por sus siglas en español) se refiere únicamente a la estimación de la distribución de la especie en un espacio geográfico; mientras que, el modelo de nicho ecológico (MNE, por sus siglas en español) estima los nichos fundamentales de las especies, es decir, se utiliza cuando se desea conocer la distribución potencial de la especie bajo algún escenario, por ejemplo, cuando hay un potencial invasor, cuando se quiere evaluar el efecto del cambio climático en la distribución de la especie, o cuando se requieren hacer proyecciones en el tiempo de la distribución de la especie (Peterson y Soberón, 2012, Soberón et al., 2017; Melo-Merino et al., 2020). Como el objetivo del estudio es estimar la distribución de esta especie en la actualidad y bajo un escenario de cambio climático, se debe tener en cuenta esta terminología a lo largo del documento.

El incremento en el uso de los sistemas de información geográfica (SIG) junto con la disponibilidad de datos ambientales recopilados durante escalas temporales amplias (imágenes satelitales, plataformas nacionales, estaciones meteorológicas, entre otros), han permitido el aumento en el uso de de especies de manera exponencial en los últimos años (Guisan et al., 2013).

Para realizar la modelación del nicho ecológico y el cálculo del área de distribución de la especie es necesario contar con dos tipos de datos geográficos, uno que hace referencia a la localidad de registros de las especies (coordenadas geográficas), y el otro a las variables

ambientales (archivo digital con las variables ambientales en formato raster) que actúan como predictoras (Elith et al., 2006).

En el caso de los datos de localidad de las especies se pueden adquirir de diversas fuentes como: 1) colecciones científicas, 2) muestreos y observaciones directas, 3) literatura especializada y 4) bases de datos en internet como GBIF disponible en <https://www.gbif.org/>, FishNet2 disponible en <http://www.fishnet2.net/search.aspx> y sp+ disponible en <https://specieslink.net/search/index> (Mota Vargas et al., 2020).

En el caso de las variables ambientales, estas pueden ser descargadas de WoldClim, la cual es una base de datos espacial de alta resolución a nivel global que tiene información sobre el clima tanto histórico como futuro de la superficie terrestre (en total 19 variables relacionadas a temperatura y precipitación) (Hijman et al., 2005). En el caso de los organismos acuáticos, han surgido nuevas bases de datos que constan de capas de alta resolución sobre variables ambientales relacionadas a la cuenca hidrográfica, tanto a escala espacial como temporal, como tipo de suelo, cobertura, elevación, flujo de agua, caudal, entre otros (Domisch et al., 2015; Barbarosa et al., 2018).

Existen múltiples métodos para hacer el modelamiento de nicho ecológico como lo son la regresión, modelos adaptativos multivariados, algoritmos genéricos, máxima entropía (MaxEnt), entre otros (Fernández 2023). Sin embargo, hasta el momento no existen bases sólidas para elegir un modelo en las investigaciones, solo se recomienda revisar cual se ajusta mejor a nivel estadístico al objetivo del estudio, el tipo de datos biológicos a usar y las particularidades del trabajo (Qiao et al., 2015).

2.4) Efecto del cambio climático en la distribución de las especies

El clima es un patrón de variación meteorológica en temperatura, presión atmosférica, precipitación y vientos, en un área geográfica determinada y en tiempos largos como años, décadas, siglos y milenios (Prakash 2021). Cuando las condiciones ambientales empiezan a sufrir cambios importantes y perduran durante periodos largos de tiempo (décadas o más tiempo), se determina como un fenómeno de cambio climático, el cual puede ser originado por causas naturales y/o por actividades de tipo antropogénico (Huang et al., 2021).

Se ha registrado en múltiples estudios que el cambio climático genera cambios en los ecosistemas, disminución de la biodiversidad y afectación en los servicios ecosistémicos proporcionados a los humanos (Guo et al., 2017; Habibullah et al., 2022). Por tal razón, se ha intentado estudiar en diferentes áreas geográficas, tanto en fauna terrestre como acuática, los efectos del cambio climático sobre la ecología, distribución, fisiología, entre otros, de algunas especies o comunidades.

En un estudio realizado por Nunez et al., (2019) se recopilaron datos a nivel mundial para realizar un metaanálisis de la respuesta de las especies al cambio climático, encontraron que al aumentar entre 1 y 2°C la temperatura media global, la reducción en el número de especies era del 14% y la reducción en la disponibilidad de biomas era del 35%. Adicional a lo anterior, se encontró que el efecto del cambio climático era diferente entre todos los organismos vivos y entre los biomas existentes.

En el grupo de aves, se ha reportado que las especies pequeñas que son migrantes pueden tener más riesgo ante el calentamiento global que las especies de tamaños grandes, dado a que estas tienen más susceptibilidad fisiológica (Simmons et al., 2004). Además, las especies de aves que tienen hábitos alimenticios muy especializados también podrían estar en un alto riesgo en

comparación con aquellas que son más oportunistas y plásticas a nivel trófico (Simmons et al., 2004). Adicionalmente, en un estudio realizado sobre el efecto del cambio climático en la composición y estructura de las comunidades de aves, se encontró que el atributo ecológico de la estructura fue el que evidenció cambios significativos (Lindström et al., 2013).

Con relación a los posibles efectos del calentamiento global en las poblaciones de peces marinos se han resumido en los siguientes ítems: 1) cambios fisiológicos ante las variaciones en temperatura y oxígeno disuelto del mar, 2) cambios de distribución de las especies, 3) cambios a nivel de las cadenas tróficas establecidas, ya que algunas especies disminuirán considerablemente dado a la reducción en sus poblaciones o migración a microhábitats diferentes en búsqueda de mejores condiciones (Pörtner y Peck 2010).

En el estudio de Brander (2010) se hizo una revisión de los impactos del cambio climático en las pesquerías, para esto se revisaron taxones de los cuales dependen los peces, como por ejemplo el fitoplancton, el krill, peces utilizados como presas alimenticias, entre otros. En el caso del plancton se evidenció un aumento en zonas más frías y un decrecimiento en zonas más cálidas, lo cual generó un cambio en la disponibilidad de este ítem alimenticio para algunos peces que son herbívoros y un desequilibrio en las redes tróficas (Richardson y Schoeman, 2004).

En el caso del popularmente llamado krill (*Euphausia superba*), se ha documentado que es la especie animal más abundante de la tierra y, por tanto, es de las presas alimenticias más consumidas por los animales en el mundo, la disminución de ésta es dado a la reducción en los hielos de la Antártida, lo cual han conllevado a cambios importantes en las cadenas tróficas del ecosistema marino, donde se han afectado peces, pingüinos, albatros, focas, ballenas, entre otros (Brander, 2010).

2.5) Estado del conocimiento

Al realizar la búsqueda de la información a nivel mundial de la utilización de los MNE en peces de agua dulce se encuentran varios estudios, entre los cuales se registra el realizado por Manjarres et al (2021), en donde realiza la predicción del efecto del cambio climático en la distribución geográfica de los peces de agua dulce a nivel mundial. En este trabajo se utilizaron datos de 16 825 especies de peces de agua dulce y se obtuvo como resultado que casi el 50% de las especies de peces de agua dulce presentes actualmente están en riesgo de extinción por el cambio climático; adicionalmente, se resalta que las especies que están en mayor riesgo son las especies tropicales y aquellas que tienen un menor tamaño corporal.

También se publicó una revisión sobre el efecto del cambio climático en la distribución de los peces de agua dulce y algunos de los resultados fueron: 1) desde aproximadamente el año 2 000 empezó a aumentar de manera exponencial el número de artículos relacionados con el tema, 2) los principales enfoques para evaluar los efectos del cambio climático fueron evaluar la fisiología y la distribución geográfica de las comunidades ícticas, 3) en las áreas donde hay un mayor número de estudios es en la zona neártica y paleártica, en climas templados y en arroyos y ríos, 4) las observaciones y predicciones del efecto del cambio climático se correlacionan de manera significativa, apoyando la confiabilidad de las proyecciones futuras y 5) se evidencia de manera cuantitativa que se ha evaluado el efecto del cambio climático en unas pocas especies (183) y que la mayoría son especies de la familia Salmonidae, concentrando los estudios en peces de aguas frías (Comte et al., 2013).

En un estudio publicado por Huang y Frimpong (2015), utilizaron una base de datos histórica de los peces registrados en cuatro cuencas hidrográficas de Estados Unidos para documentar las ausencias confiables y poder modelar el nicho ecológico de 76 especies nativas

con esta información, como resultado se obtuvo que tener la certeza de donde realmente no está la especie aumenta la veracidad de los modelos.

Por su parte, en Centroamérica se realizó un estudio donde evaluaron la distribución potencial de dos peces de agua dulce (*Atractosteus tropicus* y *Petenia splendida*) bajo escenarios de cambio climático, encontrando que el área de distribución de ambas especies aumentaba en las proyecciones futuras, lo cual podría tener implicaciones a nivel genético, poblacional y ecosistémico (Sauz-Sánchez et al., 2021).

En Suramérica, se hizo el modelamiento de nicho ecológico de ocho peces que habitan arroyos y ríos de la cuenca del río Amazonas (*Acestrorhynchus falcatus*, *Pygocentrus nattereri*, *Plagioscion squamosissimus*, *Ageneiosus inermis*, *Crenuchus spilurus*, *Ituglanis amazonicus*, *Helogenes marmoratus* y *Potamoglanis hasemani*), analizando el efecto de las variables ambientales en la distribución espacial de estas (Álvarez et al., 2020). Se obtuvo como resultado que las variables ambientales topográficas y edáficas produjeron resultados más precisos con relación a la distribución de las especies, en comparación con los resultados obtenidos con las variables bioclimáticas (Álvarez et al., 2020).

En el caso puntual de Colombia, se buscaron antecedentes mediante una búsqueda en google académico utilizando las palabras Colombia, Fish y Ecological niche model (“Colombia”AND”Fish”AND”Ecological niche model”) entre los años 2000 y 2023, arrojando como resultado un total de 146 artículos. Al evaluar en detalle los temas tratados en cada uno de ellos, se evidenció que realmente los estudios sobre el modelamiento de nicho ecológico con peces en Colombia son muy escasos.

Se realizó esta misma búsqueda con una aplicación en línea llamada: “Connected papers” y aparecieron únicamente dos artículos, uno relacionado a un pez invasor en Colombia

(Castellanos-Mejía et al., 2021) y otro a un pez nativo de la cuenca Magdalena (Valencia-Rodríguez et al., 2022). Conectados a estos dos artículos había múltiples estudios, sin embargo, todos se trataban de temas generales como: teorías de nicho ecológico, software y metodologías empleadas para realizar el modelamiento de nicho ecológico, listados de especies de peces, distribución potencial de peces en la Amazonía, entre otros, más no de estudios de caso sobre el modelamiento de nicho ecológico de peces en Colombia.

El estudio realizado por Valencia-Rodríguez et al., (2021) tuvo como objetivo caracterizar el nicho ecológico de la Sabaleta (*Brycon henni*), con el fin de predecir su distribución geográfica y comparar los resultados con la hipótesis de distribución de la especie de la IUCN. Se obtuvo como resultado relevante que la utilización del modelamiento de nicho ecológico es una buena herramienta para predecir la distribución geográfica de esta especie y que puede servir como insumo para planes de conservación de la misma. Por otra parte, el estudio realizado con el pez invasor tuvo como objetivo evaluar la distribución potencial del pez basa (*Pangasianodon hypophthalmus*) en la cuenca del Magdalena (Castellanos-Mejía et al., 2021) y compararla con la distribución potencial de algunas especies nativas, con el fin de discutir las posibles implicaciones de este pez en las poblaciones de peces. Se encontró que existen condiciones ambientales adecuadas en la cuenca Magdalena para el establecimiento de esta especie y un solapamiento del 80% con la distribución geográfica de especies nativas, lo cual representa un alto riesgo para la ictiofauna colombiana (Castellanos-Mejía et al., 2021).

Finalmente, se encontró un artículo en donde utilizan una especie nativa de Colombia (*Brycon henni*) como modelo para implementar metodologías en la priorización de áreas para la conservación de especies de agua dulce. En éste se utilizaron cuatro criterios: representatividad, viabilidad, complementariedad y conectividad, y se obtuvo como resultado que se deben proteger

nueve subcuencas hidrográficas y corredores fluviales estratégicos para la protección de esta especie, se propone esta metodología como potencial herramienta para el diseño de las áreas protegidas (Valencia-Rodríguez et al., 2022).

3. Objetivos

3.1 Objetivo general:

Analizar los cambios en la distribución potencial del bagre rayado (*Pseudoplatystoma magdaleniatum*) en condiciones actuales y bajo escenarios de cambio climático.

3.2 Objetivos específicos:

- 3.2.1 Modelar el nicho ecológico de la especie *P. magdaleniatum* en un clima actual y en condiciones de cambio climático.
- 3.2.2 Identificar los cambios en las áreas de distribución potencial actual y bajo los escenarios de cambio climático SSP1-2.6 y SSP5-8.5, para el *P. magdaleniatum*.

4. Metodología

4.1 Área accesible

El área accesible de las especies es el espacio geográfico que ha sido alcanzable por ellas a lo largo del tiempo (Barver et al., 2011), en este caso, el bagre rayado (*P. magdaleniatum*) se ha distribuido en la zona alta, media y baja del río Magdalena y la zona media y baja del río Cauca, y por tanto se define como área de estudio la cuenca hidrográfica del Magdalena, la cual está compuesta por los ríos Magdalena y Cauca. Esta cuenca se caracteriza por tener una historia geológica interesante y destacable a nivel de Sudamérica, sus dos grandes ríos fluyen en dirección Sur-Norte, están rodeados por tres cordilleras andinas (occidental, central y oriental), y tienen un régimen de precipitación bimodal de lluvias, lo cual genera diversidad en microhábitats a lo largo del ciclo hidrológico (Jiménez-Segura et al., 2020).

Adicionalmente, esta cuenca cubre el 24% del territorio continental del país y alberga más del 77% de la población colombiana, lo que ha conllevado a que tenga múltiples presiones

de tipo antrópico como contaminación, deforestación, vertimientos domésticos e industriales, entre otros, que están afectando a la comunidad de peces que allí habita (Gutiérrez-Moreno y De la Parra-Guerra, 2020).

4.2 Datos de ocurrencias

Los datos de ocurrencias de la especie fueron obtenidos de GBIF, donde se encontraron 23 554 registros, este conjunto de datos fue depurado siguiendo los siguientes criterios: 1) los datos duplicados fueron removidos, 2) datos con inconsistencias en las coordenadas geográficas fueron retirados, 3) para evitar la autocorrelación espacial también fueron eliminados aquellos registros con un mínimo de distancia de 5 km entre ellos y 4) los registros que estaban fuera de la delimitación de la cuenca Magdalena.

Adicionalmente, los registros que no coincidían con los cuerpos de agua fueron reubicados a la celda más cercana, tomando como criterio que estuviera a una distancia máxima de 3 km, por medio del paquete raster y gdal en R (R Core Team, 2022) y los puntos que excedieran el límite establecido fueron removidos. Finalmente, se obtuvieron un total de 149 registros distribuidos sobre la cuenca del Magdalena.

4.3 Variables ambientales

Para realizar el MNE actual se utilizaron las variables disponibles en WorldClim versión 2.1 (<https://www.worldclim.org/>), las cuales corresponden a variables bioclimáticas promediadas desde el año 1970 al 2000 (19 en total), que hacen referencia a valores de temperatura y precipitación de la superficie terrestre (Hijmans et al., 2005). En este sentido, se descargaron las variables a una resolución espacial de 30 segundos (aproximadamente de 1 km²) para obtener

mejores resoluciones espaciales (Anexo 1).

En el caso del estudio de animales acuáticos es conveniente e informativo utilizar variables que sean relacionadas a ecosistemas de agua dulce (Castañeda, 2022, Valencia-Rodríguez et al., 2022), las cuales están disponibles desde el año 2015 con el proyecto de EarthEnv (Domisch et al., 2015), sin embargo, cabe aclarar que estas variables únicamente están disponibles para hacer las modelaciones de distribución geográfica de las especies en tiempos actuales más no en escenarios de cambio climático, por esta razón solo fueron utilizadas para la primera parte del proyecto.

Dentro de las variables del proyecto de EarthEnv se contempla variables como topografía, tipo de suelo, flujo del agua, temperatura y precipitaciones de la zona de aguas arriba de los cuerpos de agua a una resolución de 1 km aproximadamente (Domisch et al., 2015). También fue descargada la capa de caudal de Barbarossa et al., (2018), la cual contempla el máximo, mínimo, y el promedio anual del flujo de agua desde 1960 hasta el 2015 a una resolución de 1 km (Anexo).

Debido al alto número de variables ambientales (en total 150) se hizo un primer filtro por medio del factor de inflación de la varianza (VIF) en cada uno de los grupos de las variables (1: variables de WoldClim y 2: variables de EarthEnv), el cual consiste en cuantificar la multicolinealidad que puede existir entre las variables usadas, y se deben eliminar aquellas que tienen una correlación alta, ya que pueden generar errores al realizar el MNE (del Valle Moreno y Guerra, 2012). El análisis se realizó por medio del software R (R Core Team, 2022) usando la librería usdm (Naimi et al., 2014), los valores del VIF superiores a 10 indican una correlación muy elevada, valores del VIF de 5 a 10 correlación elevada y VIF hasta 5 indica una correlación débil, por tanto, se eliminaron todas aquellas variables con $VIF > 10$.

Posteriormente, se hizo un nuevo filtro con las variables obtenidas (12 variables de WoldClim y 29 variables de EarthEnv), eliminando aquellas que tenían valores altos de correlación ($r > 0.7$). Cabe resaltar que algunas variables no cumplían con los filtros, pero tenían un alto significado a nivel biológico para la especie, por lo que fueron incluidas en el análisis (Arce-Zúñiga et al., 2014). En total fueron utilizadas 41 variables para realizar el modelamiento de nicho ecológico de la especie.

En el caso del modelado de nicho ecológico en escenarios de cambio climático, las variables ambientales elegidas fueron las del período del 2021 al 2040, estas fueron descargadas de la página de Worldclim a una resolución espacial de 30 segundos ($\sim 1 \text{ km}^2$). El modelo elegido fue MPI-ESM1-2-LR debido a que según fuentes bibliográficas es el que más se ajusta a Colombia (Arias et al., 2021), fueron escogidos únicamente dos escenarios de cambio climático, el más optimista (SSP1-2.6) y el más negativo (SSP5-8.5) y las variables descargadas fueron las 19 variables bioclimáticas relacionadas a temperatura y precipitación.

Finalmente, todas las variables ambientales a usar tanto en escenarios actuales como futuros fueron recortadas y acopladas al área de estudio (es decir, cuenca Magdalena), esta capa fue descargada del IGAC (<https://geoportal.igac.gov.co/>) y el procedimiento se realizó por medio del paquete ráster (Hijmans 2023) en el software estadístico R (R Core team, 2022).

4.4 Modelado de nicho ecológico

Para realizar el MNE se utilizó la aplicación Wallace que está conectada a R por medio de la librería wallace (R Core Team, 2022) y el software de máxima entropía (MAXENT). Con la base de datos de ocurrencia de la especie (149 registros) y el pool de variables seleccionadas, se identificó el área de distribución potencial y las variables más representativas y explicativas

(Figura 02).

Con el fin de construir el modelo, se procedió a realizar la calibración de las ocurrencias, el 80% de ellas se utilizaron para la fase calibración y el 20% para la fase de evaluación, se hicieron 10 repeticiones en donde se incluyeron todos los parámetros o clases (lineal, cuadrático, bisagra, umbral, producto y la combinación de ellas) y un rango de parámetros de regularización amplio (0,5 - 3,5).

El mejor modelo fue seleccionado teniendo en cuenta los siguientes criterios: 1) el valor del AUC (área bajo la curva) cercano a 1, ya que esto indica que no es un modelo aleatorio, 2) criterio de Akaike (AICc) indica que tanto se ajusta el modelo y que tan complejo es y se escogieron los valores más altos, 3) el delta del criterio de Akaike (Delta AICc) con valores cercanos a 0, 6) número de parámetros, si estos son menores al número de variables utilizadas, me indica un buen modelo (Figura 02). Adicional a lo anterior, se seleccionó el método de 10 percentil de las ocurrencias de entrenamiento (10 percentile training presence) para determinar el umbral y así mismo construir los mapas de idoneidad de la especie.

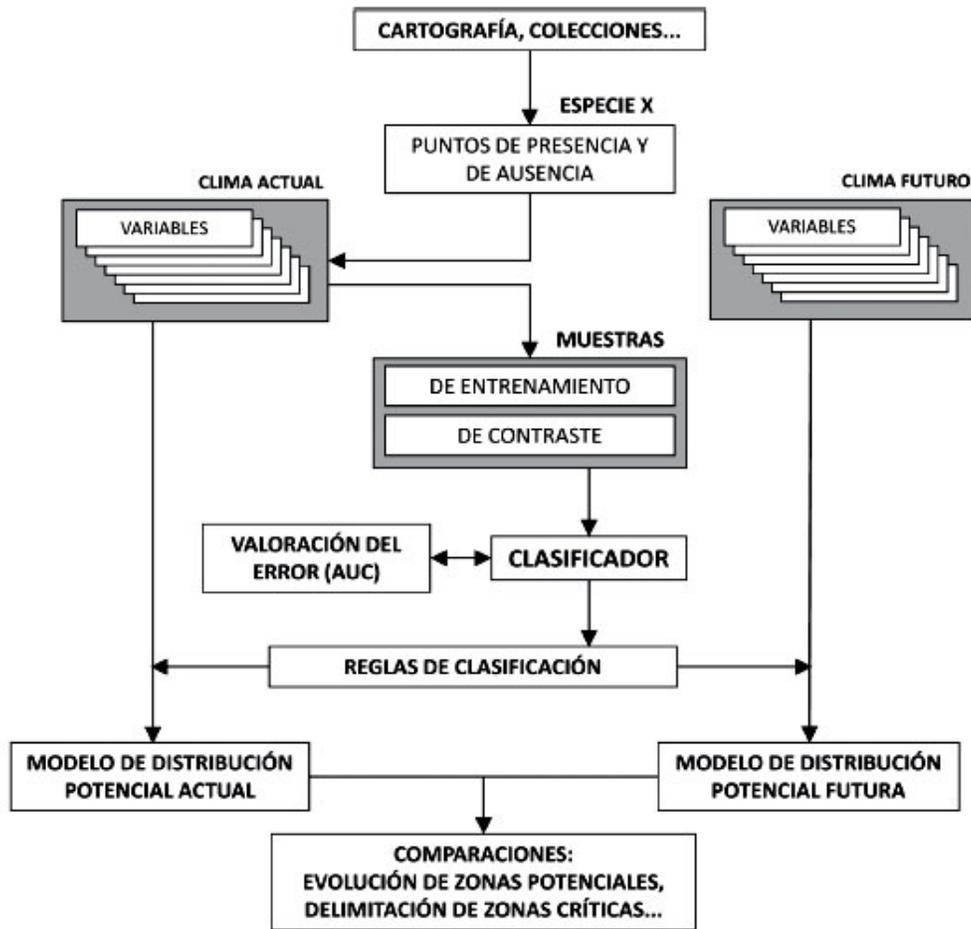
Por último, se escogieron los cuatro mejores modelos, uno de la distribución potencial actual de la especie teniendo en cuenta las variables de WoldClim, otro de la distribución potencial actual con las variables de EarthEnv y los otros dos de la distribución potencial en los escenarios de cambio climático SSP1-2.6 y SSP5-8.5. Se descargaron los mapas resultantes, se convirtieron a formato tiff, luego se reclasificaron según el umbral del “10 percentile training presence” para obtener los mapas binarios de idoneidad del hábitat para la especie (valores de 1: presencias y valores de 0: ausencias) y finalmente se vectorizaron estas capas.

Estos mapas binarios se proyectaron a coordenadas planas y se calculó el porcentaje de los cambios del área de distribución de la especie entre el escenario actual y cada uno de los

escenarios de cambio climático (Figura 02). Finalmente se descargó un shape de las áreas protegidas de Colombia del portal del IGAC, se realizó un clip con la zona de estudio (cuenca Magdalena) y se interseccionaron las áreas de idoneidad del hábitat de la especie en la actualidad y en el escenario menos optimista de cambio climático (SSP5-8.5), esto con el fin de conocer cuántos ríos y afluentes que son hábitat del bagre rayado están siendo conservados.

Figura 02.

Esquema de flujo de trabajo para la realización y validación de modelos de distribución de especies.
Fuente: Mateo et al., 2011.

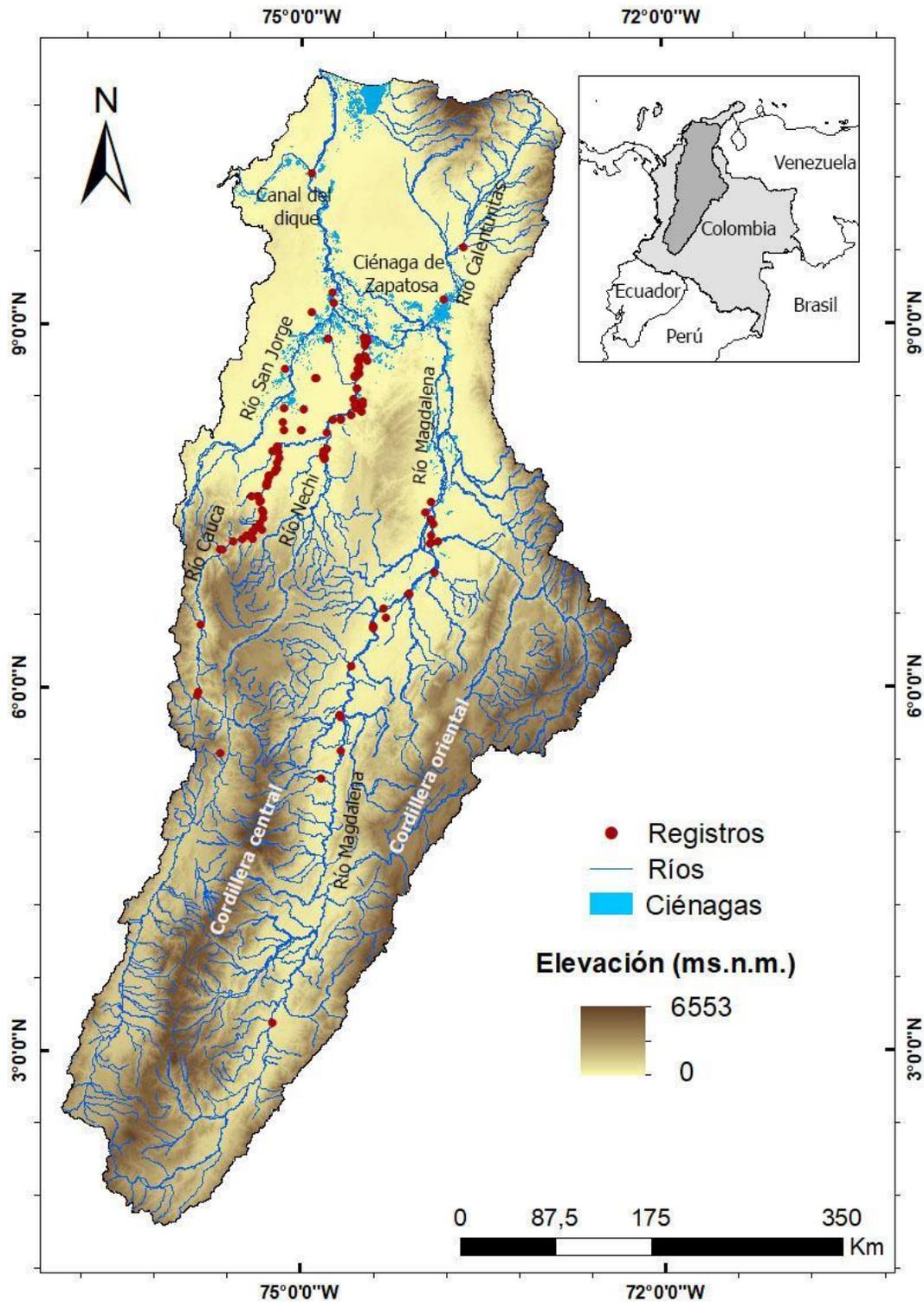


5. Resultados y discusión

En el proceso de recopilación de información obtuvimos un total de 23 903 registros, de los cuales descartamos 23 754 que estaban duplicados o que se consideran inconsistentes con el conocimiento actual de la distribución de la especie (por ejemplo, georreferencias por fuera de la cuenca Magdalena). Finalmente obtuvimos un total de 149 registros de presencia para *P. magdaleniatum*, los cuales se distribuyen específicamente en ríos de grande y mediana envergadura como el río Magdalena (parte alta, media y baja del afluente principal), río Cauca (zona media y baja del afluente principal, río Nechí y complejo cenagoso de Ayapel), río San Jorge, río Calenturitas y complejo cenagoso del medio y bajo Magdalena (ciénaga de la Zapatosa) (Figura 03).

Figura 03.

Mapa de los registros de la especie de bagre rayado (*Pseudoplatystoma magdaleniatum*) en la cuenca



hidrográfica del río Magdalena. Fuente: Elaboración propia 2023.

El mejor modelo obtenido para representar la distribución potencial actual de la especie a partir de los predictores ambientales obtenidos de WoldClim fue un modelo tipo bisagra (H), con un parámetro de regularización de 2 y un AUC de 0,914, en el caso del modelo actual utilizando las variables de EarthEnv, se obtuvo que la mejor representación de la distribución para la especie era a partir de un modelo bisagra (H), pero con un parámetro de regularización de 1,5 y un AUC mayor de 0,986. En el caso de los escenarios de cambio climático se obtuvo un AUC de 0,914 y 0,88 para los escenarios SSP1-2,6 y SSP5-8,5, respectivamente (Tabla 01).

De manera general, los mejores modelos según el AIC incluyeron características de tipo bisagra y un parámetro de regularización entre 1,5 y 2. Adicionalmente, los modelos registraron valores altos en el área bajo la curva ($AUC > 0,8$) lo cual indica que estos tienen una alta confiabilidad y no fueron construidos de manera aleatoria (Tabla 01).

Tabla 01.

Parámetros seleccionados para escoger el modelo de nicho ecológico (MNE) de la especie de *P. magdaleniatum* en condiciones actuales y de cambio climático.

Escenario	Modelo	Parámetro de regularización	AUC	AICc (Akaike)	DeltaAICc	Número de parámetros
Actual con variables de WoldClim	H	2	0.914	2735	0	12
Actual con variables de EarthEnv	H	1.5	0.986	2206	10.03	6
Escenario SSP1-2,6	H	2	0.914	2721	2.191	14

Escenario SSP5-8,5	H	2	0.88	2817	0	2
--------------------	---	---	------	------	---	---

Fuente: Elaboración propia 2023.

Los resultados de este estudio sugieren que la herramienta utilizada del modelamiento de la distribución de las especies (MDS) es útil y confiable a la hora de predecir la distribución potencial del bagre rayado. El modelo realizado con las variables de WorldClim sugieren una distribución de la especie en las siguientes áreas: 1) zona alta y media del río Magdalena, 2) zona baja y media del río Cauca, 2) quebradas y arroyos andinos que drenan al río Magdalena, 3) complejo cenagoso del medio y bajo Magdalena y 5) el río San Jorge (Figura 4A).

Los lugares que no son aptos para la especie son las zonas altas de la cordillera central y oriental, la Sierra Nevada de Santa Marta, la parte alta del río Cauca, zona baja del río Magdalena, río Cesar y río Ranchería (Figura 4A). Según los resultados anteriores, la zona baja del río Magdalena no es un área idónea para que el bagre rayado habite, sin embargo, se ha registrado la especie en inmediaciones del canal del dique (Figura 4A).

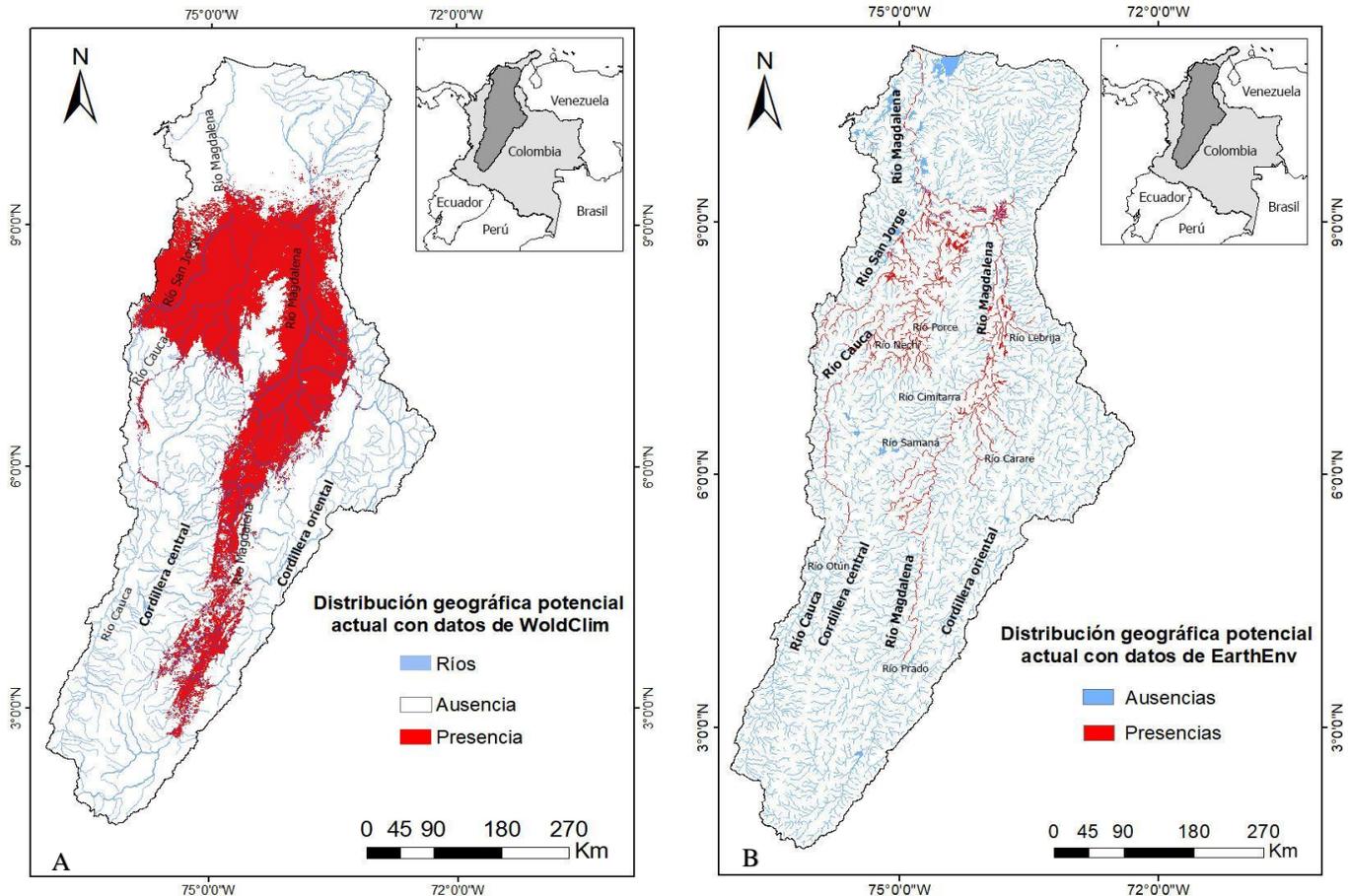
Al realizar comparaciones de la distribución potencial hallada con las variables que caracterizan los cuerpos de agua (Domisch et al., 2015), evidencian que hay una alta similitud entre los dos modelos, sin embargo, este modelo es más preciso dado a que presenta un ajuste a las restricciones fisiológicas para las especies estrictamente acuáticas, es decir, se considera únicamente la red de drenaje, lo cual es acorde con los registros de la especie y a las zonas de preferencia de hábitat del bagre rayado. Es de resaltar que la especie exhibe preferencias por las zonas bajas, áreas inundables como lagunas y ciénagas y el canal principal de los ríos (Mojica et al., 2012; Zapata y Usma 2013). Adicionalmente, el área de idoneidad obtenido a partir de los predictores acuáticos se concentra en los siguientes sitios: 1) principalmente zona media y baja

del río Magdalena y Cauca, 2) una pequeña porción de la zona alta del río Magdalena (hasta el río Prado) y el río Cauca (hasta el río Otún), 3) río San Jorge y 4) zona baja de los afluentes de gran envergadura de los dos principales ríos (Nechí, Porce, Samaná, La Miel, Cimitarra, Opón, Nare, Lebrija) y 5) desembocadura del río Magdalena al mar Caribe (Figura 4B).

Los modelos de distribución de especies (MDS) se han enfocado principalmente en animales terrestres (Prieto-Torres et al., 2018), no obstante, durante los últimos años se ha empezado a implementar el modelado de nicho ecológico para realizar estudios de ecología, biogeografía y conservación de ecosistemas acuáticos (Nori y Rojas-Soto 2019). La iniciativa de Domisch et al., (2015) y Barbarossa et al., (2018) proporcionó información acerca de variables ambientales relacionadas a los cuerpos de agua y se evidencia que es una herramienta útil, informativa y acorde para hacer predicciones acertadas sobre la distribución potencial de las especies dulceacuícolas.

Figura 04

Mapa binario de distribución potencial actual de la especie *P. magdaleniatum* en la cuenca hidrográfica del Magdalena; A) variables WoldClim y B) Predictores propios de los cuerpos de agua (EarthEnv). Fuente: Elaboración propia 2023.



Las variables de WoldClim que tienen una mayor influencia en el modelo de distribución del bagre rayado son la temperatura mínima del mes más frío (Bio 06), la precipitación de la estación más fría (Bio 19), el rango de temperatura anual (Bio 07) (es el cociente entre la temperatura máxima del mes más caliente y la temperatura mínima del mes más frío) y la precipitación del mes más seco (Bio 14) (Tabla 02, Anexo 3). De acuerdo a lo anterior, la especie *P. magdaleniatum* prefiere lugares con un rango de temperatura entre los 16 °C y los 30°C, además la especie presenta una amplia variabilidad en cuanto a la pluviosidad en la cuenca, esto es de suponerse ya que las curvas de respuesta (Anexo 3) evidencian una preferencia por zonas

con precipitaciones entre los 25 y los 1 500 mm.

Por su parte, en el caso de las variables que caracterizan los cuerpos de agua, las que más contribuyeron al modelo de distribución potencial para la especie fueron la fracción de masa de contenido de arena (Min 03), la elevación (ms.n.m.), la precipitación del mes más húmedo en zonas de cabecera (Hydro 13) y el caudal (Tabla 02 y Anexo 4). De acuerdo a lo anterior, el bagre rayado prefiere zonas bajas de elevación entre 0 ms.n.m. y 500 ms.n.m., en este caso corresponde a las zonas medias y bajas de los ríos Magdalena y Cauca, resultado que concuerda con los rangos de elevación reportados para la especie (<https://www.gbif.org/>); cuerpos de agua con fracción de arena baja entre 10% y 30% como lo encontrado en ríos de gran envergadura; precipitación intermedia del mes más húmedo en zonas de cabecera entre ~250 y ~700 mm; y finalmente, un caudal intermedio entre 1 000 m³·s⁻¹ y 5 000 m³·s⁻¹, teniendo en cuenta que la zona más alta de los ríos registra entre ~1 200 y ~2 800 m³·s⁻¹, la zona media del Magdalena entre ~2 800 y ~4 700 m³·s⁻¹ y la zona más baja entre ~4 700 y ~8 000 m³·s⁻¹, lo cual nos confirma la preferencia del bagre por zonas de caudal intermedio de la cuenca hidrográfica (zona media del río Magdalena) (Anexo 4).

Se evidencia que, aunque se utilicen diferentes fuentes de datos para explicar la distribución potencial del bagre rayado, los resultados con respecto al área de idoneidad son similares, y mejor aún, al utilizar diferentes variables podemos documentar a más detalle las características ambientales de preferencia de la especie (Álvarez et al., 2020, McMahan et al., 2020). Nuestros hallazgos establecen que los lugares ideales para el bagre rayado son zonas bajas, de precipitación intermedia y temperatura alta, ríos con caudal intermedio, cuerpos de agua grandes y con sustratos principalmente de limo y poca proporción de arena. Lo anterior ayuda a complementar el conocimiento acerca de la preferencia de hábitat de esta especie

reportado por Jiménez-Segura et al., (2016) donde se establece que esta especie prefiere los canales principales de los ríos y las llanuras de inundación, donde sus aguas tiende a ser de moderadas a fuertes y bien oxigenadas; además estas áreas, por lo general, presentan diferentes profundidades (desde aguas poco profundas hasta aguas profundas).

Adicionalmente, se ha reportado que el bagre rayado parece ser capaz de tolerar una amplia variedad de condiciones ambientales, incluyendo aguas turbias y con bajos niveles de oxígeno. Sin embargo, parece presentar preferencias por lugares con aguas claras y bien oxigenadas, lo que puede estar relacionado con la presencia de su alimento principal, que consiste en otros peces (Rojas Muñoz 2014). En términos de las particularidades del hábitat, los modelos indican que este pez prefiere lugares con fondos limosos, pero también rocosos, lo que indica que esta especie se puede encontrar tanto en zonas de rápidos como en las áreas más tranquilas del río. En resumen, las preferencias ambientales de *P. magdaleniatum* están relacionadas con la elevación, la calidad del agua, el caudal y sustrato; y todas estas a su vez se asocian a múltiples ambientes que son asociados a la presencia de presas adecuadas para su alimentación.

Tabla 02.

Porcentaje de contribución de las variables más informativas en el modelo. Fuente: Elaboración propia 2023.

Nombre de la variable de la base de datos de WoldClim	Porcentaje de contribución para el marco de referencia	Porcentaje de contribución para el escenario futuro ssp126 (año 2040)	Porcentaje de contribución para el escenario futuro ssp585 (año 2040)

Temperatura mínima del mes más frío (Bio 06)	57,1	55,6	61,2
Precipitación de la estación más fría (Bio 19)	30,5	35,3	29,3
Rango de temperatura anual (Bio 07)	7,9	3,5	5,3
Precipitación del mes más seco (Bio 14)	4,4	5,6	4,2
Nombre de la variable de la base de datos de EarthEnv			
Fracción de masa de contenido de arena (Min 03)	59.2		
Elevación	14.8		
Precipitación media del mes más húmedo en zonas de cabecera (Hydro_wavg_13)	10.6		
Caudal	9		
pH del suelo en el agua (Min 02)	6		
Fracción de masa de contenido de Arcilla (Max 05)	0.2		
Temperatura media anual de cabecera (Hydro avg 01)	0.1		

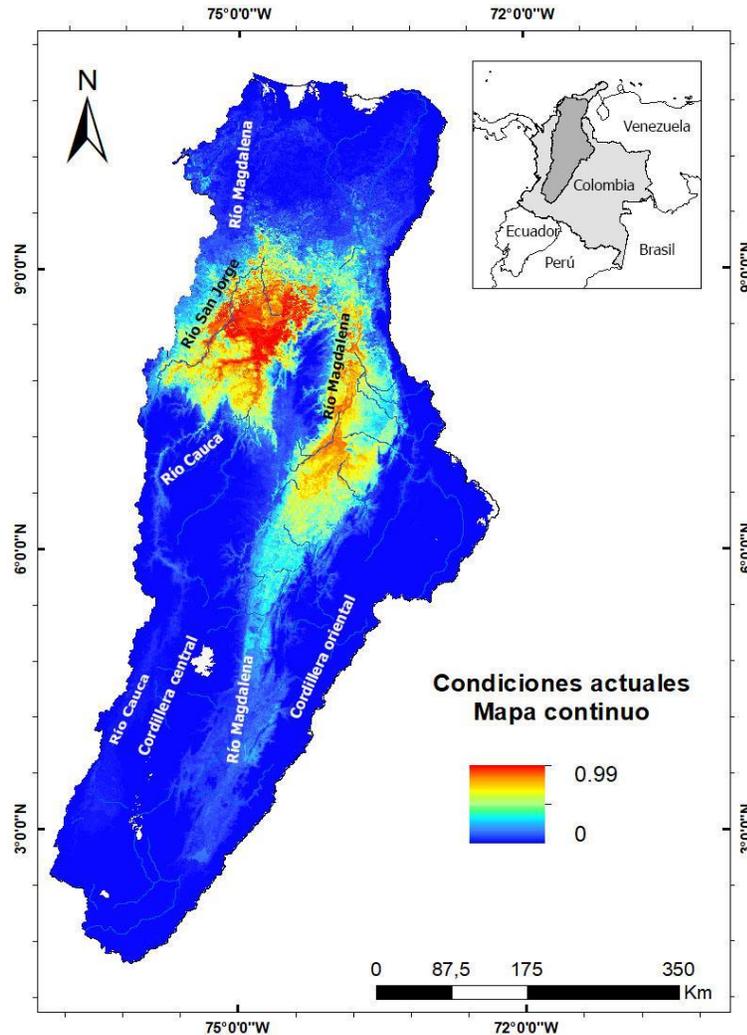
Al analizar el mapa continuo de la distribución potencial actual, se evidencia que, aunque el

bagre rayado registra un área de idoneidad del hábitat amplia (72 573 km²) (Tabla 03 y Figura 04A) la zona con mejores condiciones previstas es de 19 514 km² (colores cálidos) (Figura 05), la cual corresponde al área que más registros tiene (~ 90%) y donde encuentra las mejores condiciones ambientales para vivir (zona media del río Magdalena, zona baja del río Cauca y río San Jorge).

Al realizar comparaciones del área de idoneidad del bagre rayado obtenido con las diferentes variables, se evidencia que el área obtenida con variables de WorldClim es mucho mayor (72 573 km²) que la obtenida con las variables de EarthEnv (5 547 km²) (Figura 04B), aunque tengan una distribución potencial muy similar. Lo anterior se debe a que el área hallada con variables de WorldClim corresponde en gran medida a zonas terrestres y no únicamente a la red hidrológica (ríos, quebradas, arroyos, ciénagas), y esta es una de las problemáticas que surgen al utilizar variables climáticas de la superficie terrestre en la modelación de especies acuáticas, sin embargo, se ha reportado que aunque las áreas en términos numéricos no arrojan resultados confiables, si se puede hacer análisis acerca de la distribución potencial de las especies (Sauz Sánchez et al., 2021; McMahan et al., 2020; Tims y Saupe 2023).

Figura 05.

Mapa continuo de la distribución potencial actual de la especie *Pseudoplatystoma magdaleniatum* en la cuenca hidrográfica del Magdalena.



Los resultados del MNE en escenarios de cambios climático registraron una reducción en el área de idoneidad ambiental de la especie, cambiando de 72 573 km² en el presente a 67 207 km² en el escenario SSP1-2.6 y 67 185 km² en el escenario SSP5-8.5 para el año 2040 (Figura 06, 07 y 08). Esta pérdida en el área potencial de distribución de la especie en ambos escenarios se resalta en la desconexión de las condiciones ambientales idóneas entre la zona alta y media del río Magdalena y el Cauca, y aunque estos cambios parecieran no ser abruptos y drásticos, pueden llegar a afectar de manera negativa y significativa algunos aspectos de la especie (reproducción,

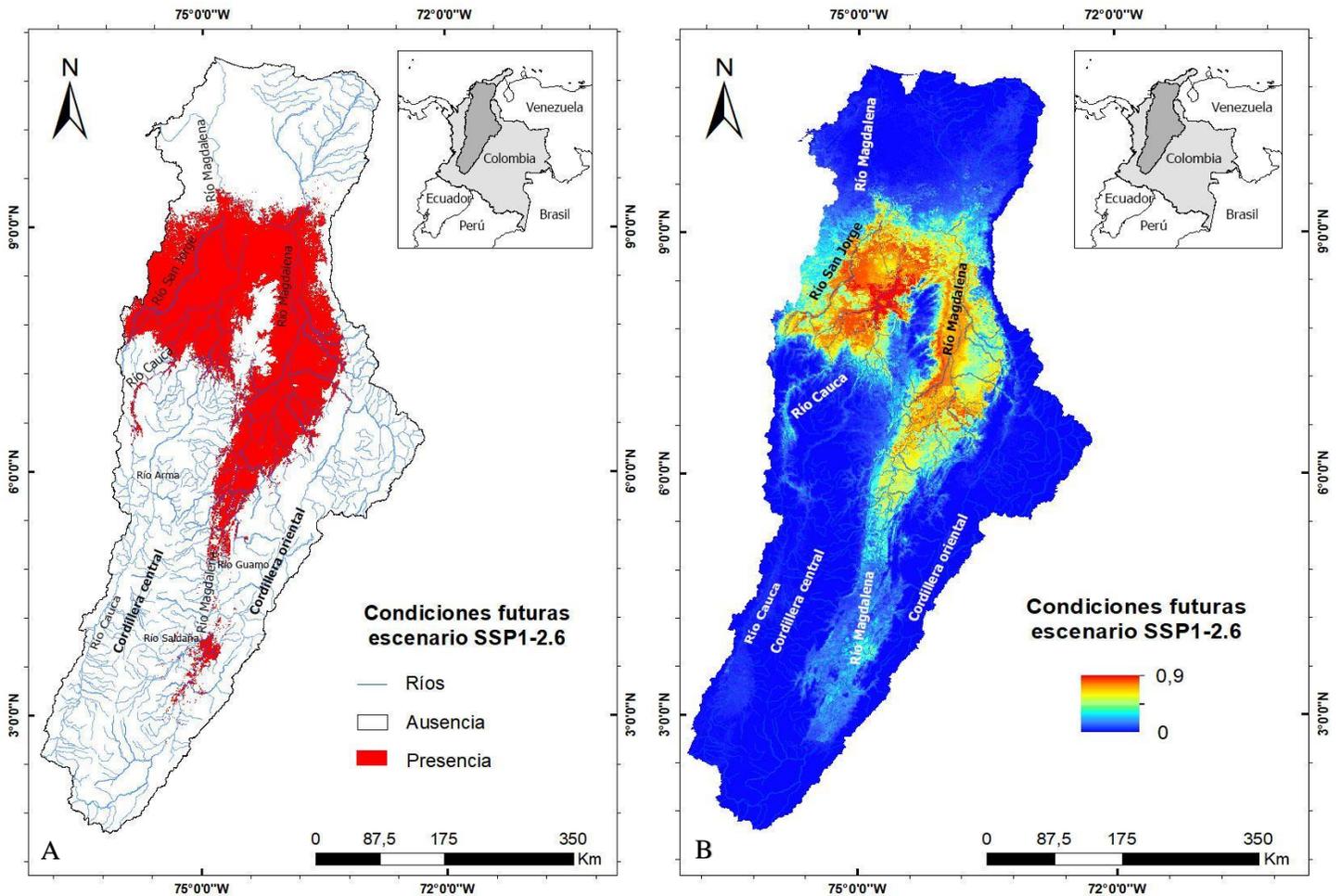
épocas migratorias, alimentación, entre otros).

En el caso del escenario de cambio climático más “optimista” (SSP1-2.6) se registra que la temperatura mínima del mes más frío aumenta 1,1°C (24,1 °C) en comparación con lo registrado en la actualidad (23 °C), la precipitación del mes más seco aumenta 16 mm (237 mm) en comparación con lo registrado actualmente (221 mm) y la precipitación del cuarto de año más frío también aumenta en 90 mm (en la actualidad 1 557 mm y en el escenario de cambio climático 1 647 mm) (Anexo 5). Estas condiciones de aumento tanto en temperatura como en precipitación generan una disminución del área de idoneidad ambiental para el bagre rayado y una concentración de su potencial distribución futura en la zona del medio Magdalena y el bajo Cauca.

La reducción de esta área de idoneidad se ve reflejado de manera negativa en los siguientes casos: 1) posible desaparición de la especie en el río Arma, el cual es un afluente del río Cauca en la zona media y 2) desconexión del río Magdalena entre el río Guamo y el río Saldaña, lo cual significa que el desplazamiento de esta especie entre el alto y el medio Magdalena podría verse afectado (Figura 06A).

Figura 06.

Mapas de la distribución potencial de la especie *Pseudoplatystoma magdaleniatum* en la cuenca hidrográfica del Magdalena en el escenario de cambio climático SSP1-2.6. A) Mapa binario y B) mapa continuo.



En el caso del escenario de cambio climático “menos optimista” (SSP5-8.5) se evidencia una reducción pequeña con respecto al área de idoneidad del escenario más optimista (SSP1-2.6) (Figura 07) y una distribución muy similar, sin embargo, al comparar los mapas continuos de ambos escenarios, se evidencia que el área con mejores condiciones previstas (colores cálidos) del escenario SSP5-8.5 empieza a tener una pequeña reducción en ciertos extremos, como por ejemplo en la zona alta y baja del río San Jorge, río Opón y río Carare (zona media del río

Magdalena) (Figura 06B y 07B).

Figura 07.

Mapas de la distribución potencial de la especie *Pseudoplatystoma magdaleniatum* en la cuenca hidrográfica del Magdalena en el escenario de cambio climático SSP5-8.5. A) Mapa binario y B) mapa continuo

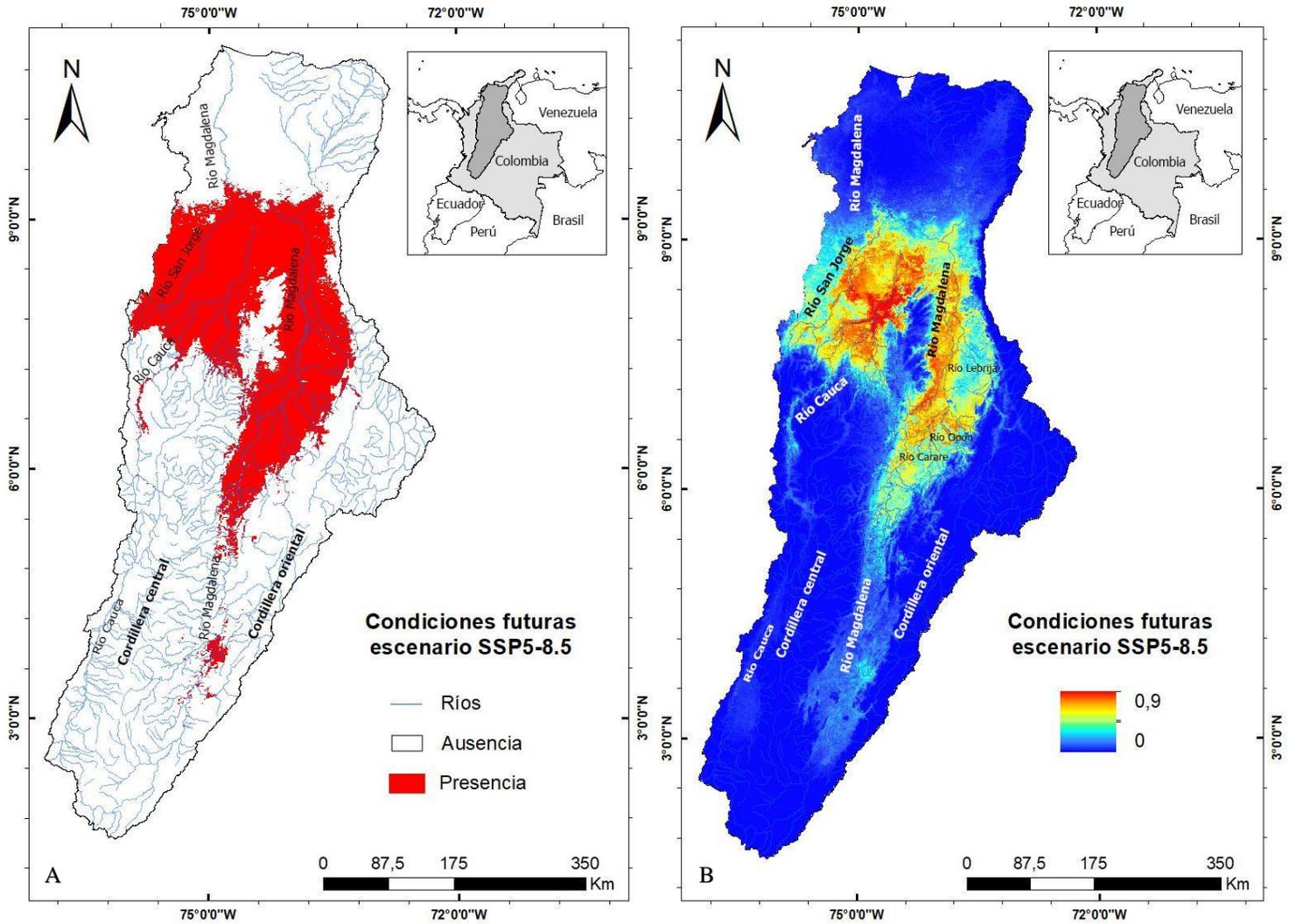
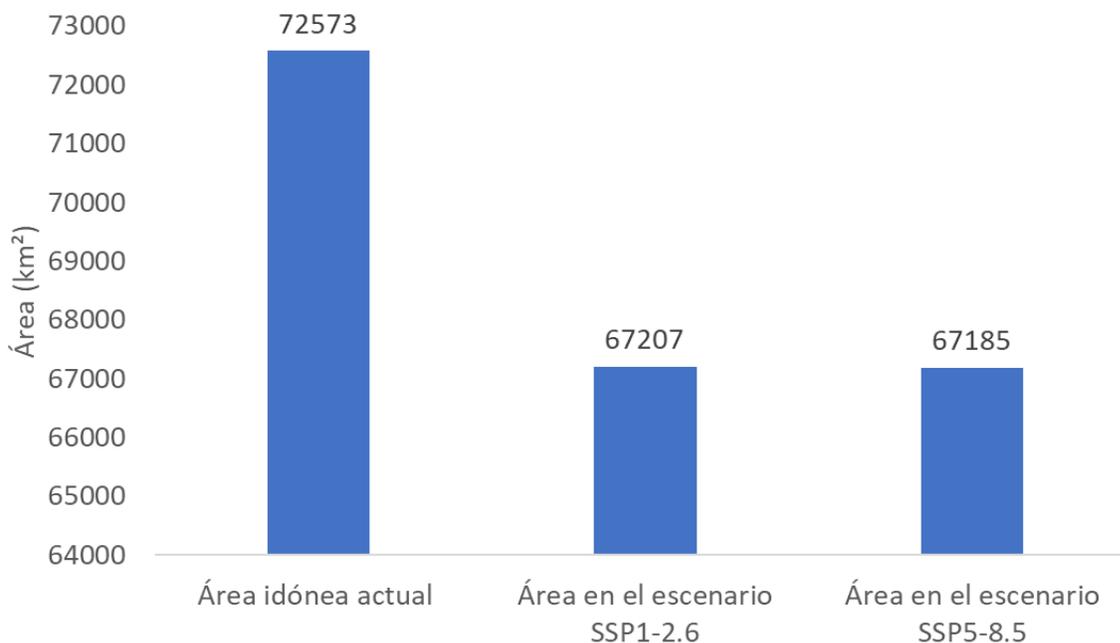


Figura 08.

Área de distribución potencial del bagre rayado en condiciones actuales y de cambio climático.



De igual manera, al evaluar las áreas de estabilidad, ganancia y pérdida entre el escenario actual y los dos escenarios futuros, se evidencia un efecto negativo del cambio climático sobre la distribución potencial de la especie (Figura 09). El área de estabilidad para el escenario SSP1-2.6 es de 63 178 km² y para el escenario SSP5-8.5 es de 62 779, el cual representa un cambio de 399 km², reflejando que entre más agresivas las condiciones ambientales hay más cambios en la distribución potencial de la especie.

El área de estabilidad para ambos escenarios de cambio climático con respecto a la distribución actual es muy similar y se encuentra principalmente en la zona media del río Magdalena (hasta la desembocadura del río Lagunilla sobre el Magdalena), río San Jorge, zona baja del río Cauca y una zona aislada del alto Magdalena (río Prado, Saldaña, Aipe, Cabrera,

Cucuana) (Figura 10A y Figura 10B). De igual forma, el área de ganancia para ambos escenarios es muy similar, de 4 022 km² para el escenario SSP1-2.6 y de 4 395 km² para el escenario SSP5-8.5 (Figura 09), la cual se encuentra principalmente en zonas del borde del área de estabilidad y corresponden a zonas altas en las cordilleras central y oriental, donde las condiciones ambientales pueden parecerse un poco más a la condición actual (menor temperatura y precipitación), sin embargo, dado a la biología de la especie, es poco probable que el bagre rayado ascienda por los ríos y quebradas andinos que desembocan en el Magdalena y el Cauca, dado a que es una especie migratoria de tamaño considerable que necesita grandes volúmenes de agua y zonas de poca pendiente para poder desplazarse (Jiménez-Segura et al., 2016) (Figura 10A y B).

Por otra parte, el área de pérdida para ambos escenarios también muestra efectos negativos del cambio climático sobre la distribución de la especie (9 392 km² para el escenario SSP1-2.6 y 9 788 km² para el escenario SSP5-8.5) (Figura 09), esta área se encuentra principalmente entre la desembocadura del río Lagunilla en el Magdalena (norte del Tolima) y el río Luisa y Saldaña (Sur del Tolima), lo cual indica una desconexión importante entre el alto y el medio Magdalena. Adicional a lo anterior, también hay una pérdida en la zona sur del alto Magdalena (entre el río Hilarco, río Frío y río Neiva) y en la zona media del río Cauca (río Arma) (Figura 10 A y B).

Figura 09.

Área de estabilidad, ganancia y pérdida entre el modelo de distribución actual y los dos escenarios de cambio climático para la especie de bagre rayado.

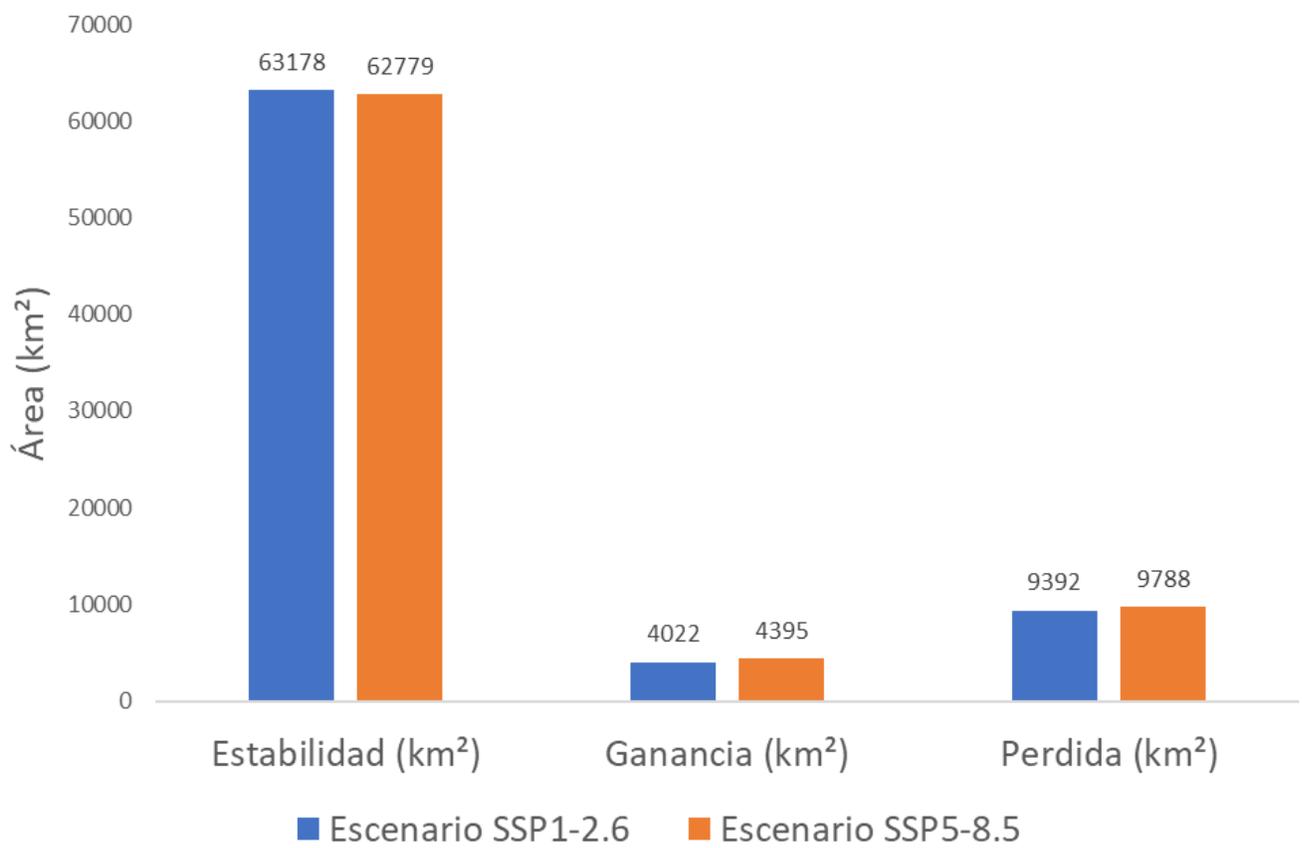
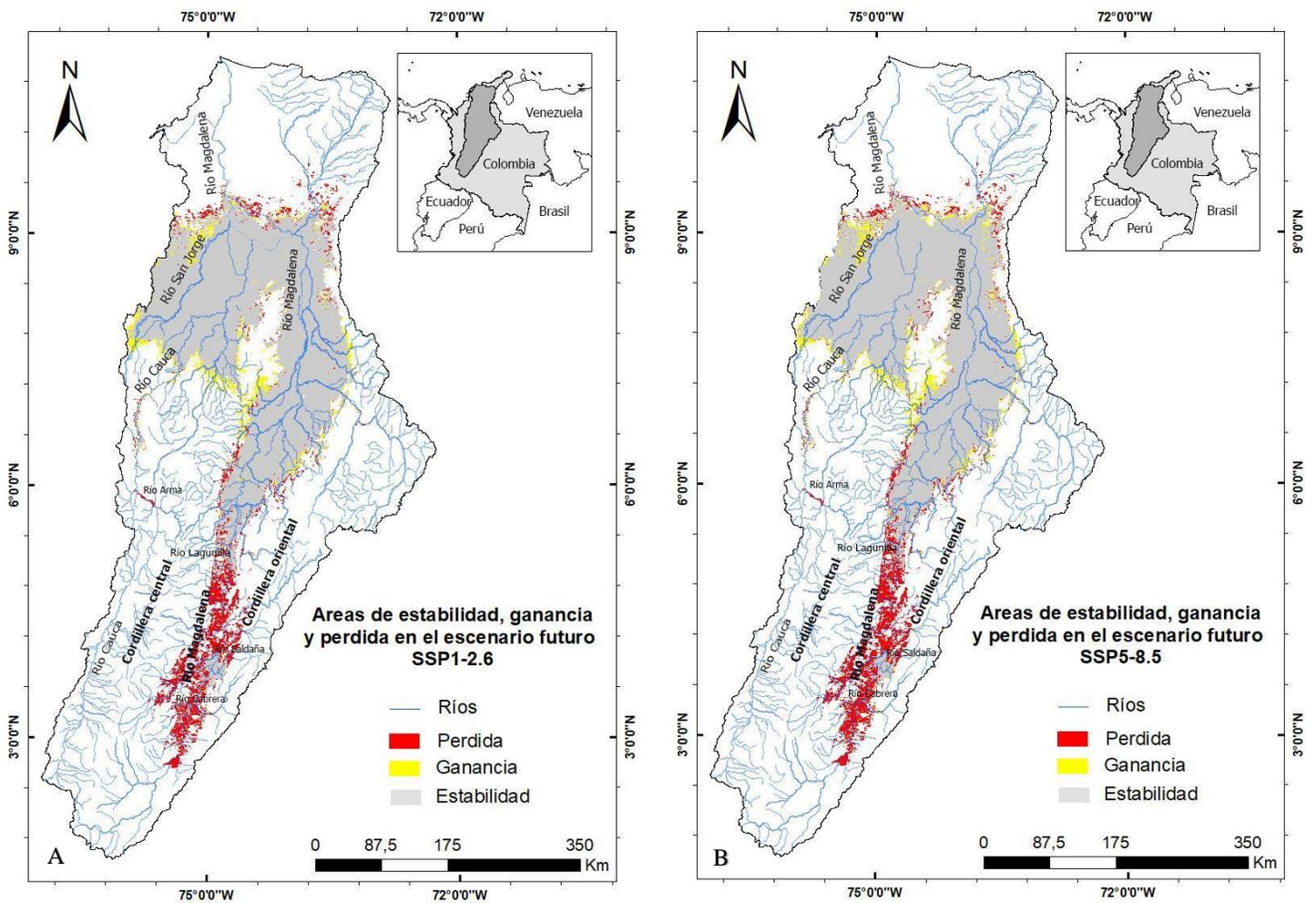


Figura 10.

Mapas del área de estabilidad, ganancia y pérdida entre el modelo de distribución actual y los escenarios de cambio climático A) SSP1-2.6 y B) SSP5-8.5.



5.1. Áreas protegidas

Al cruzar la información obtenida por medio del MNE con las áreas protegidas presentes en la cuenca hidrográfica del Magdalena, se encuentra un patrón claro y evidente de un mayor esfuerzo de conservación en zonas altas de la cordillera central y oriental y un menor esfuerzo en las zonas bajas del valle del río Magdalena y el río Cauca (Figura 11). Cabe aclarar que en estos modelos de distribución de especies la distribución potencial de la especie se expande a zonas terrestres de la cordillera, donde es imposible acceder para el bagre rayado, por tanto, sólo consideraremos las áreas protegidas que se solapan con cuerpos de agua accesibles para la especie.

En el caso de la distribución potencial actual las áreas protegidas en el río Magdalena son: en la zona alta La Tatacoa y Bosque Seco de la Vertiente Oriental del río Magdalena, en la zona media la ciénaga de Chiqueros y ciénaga de Barbacoas y en la zona baja el complejo cenagoso de Zapatosa, y el complejo cenagoso de Zarate Malibú y Veladero. En el río Cauca en la zona baja, se encuentran el complejo de humedales de Ayapel, ciénagas Corrales y El Ocho, ciénagas El Sapo y Hoyo Grande y en la zona media el bosque seco del occidente Antioqueño (Figura 08). En el caso del escenario de cambio climático menos optimista (SSP5-8.5), dado a la reducción en el área potencial de la especie, las áreas protegidas que no estarían intersectadas con la especie sería el Bosque Seco de la Vertiente Oriental del río Magdalena y la Tatacoa, ubicados en la zona alta del río Magdalena (Figura 12).

De manera global se ha prestado poca atención en crear áreas protegidas de manera priorizada para ecosistemas de agua dulce (Dagosta et al., 2020, Albert et al., 2020), lo cual es

coincidente con lo ocurrido en Colombia, y específicamente en la cuenca hidrográfica del Magdalena (Jiménez-Segura y Lasso 2020, Valencia-Rodríguez et al., 2020). Sin embargo, resulta preocupante que los cuerpos de agua y la fauna acuática de la zona tropical no sean conservados, estos generan servicios ecosistémicos (Pelicice et al., 2022), ingresos monetarios a los pescadores artesanales y beneficios para la seguridad alimentaria de las comunidades ribereñas (García-Alzate et al., 2020).

Se sugiere tener en cuenta estos resultados y seguir la propuesta de Valencia-Rodríguez et al., (2020), donde se discute una nueva metodología para la priorización de la conservación espacial de las especies de agua dulce, teniendo en cuenta la representatividad (protección de la distribución de la especie), viabilidad (maximizar la probabilidad de éxito), complementariedad (reconocimiento de las áreas protegidas actuales) y conectividad (promover la conectividad entre áreas protegidas). Lo anterior con el fin de generar un plan de conservación para el bagre rayado y lograr asegurar la permanencia de sus poblaciones ante los efectos del cambio climático y otras presiones.

Figura 11.

Área interceptada entre el modelo de distribución potencial actual de la especie y las áreas protegidas existentes en la cuenca hidrográfica.

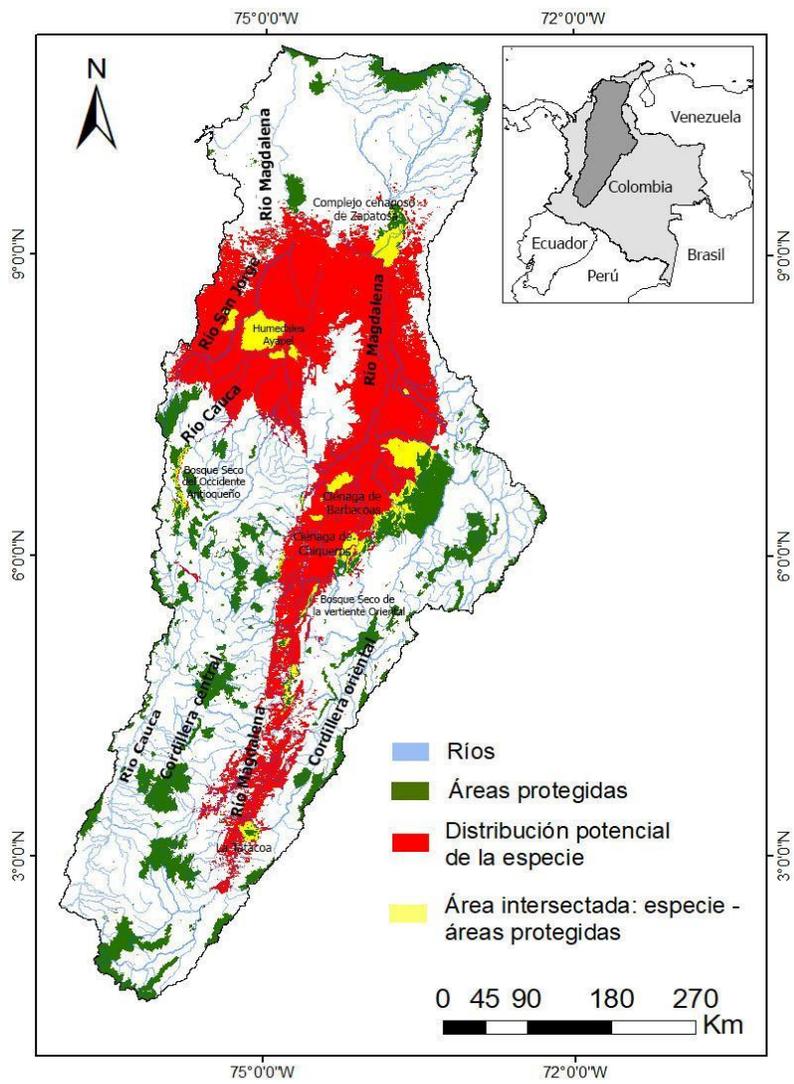
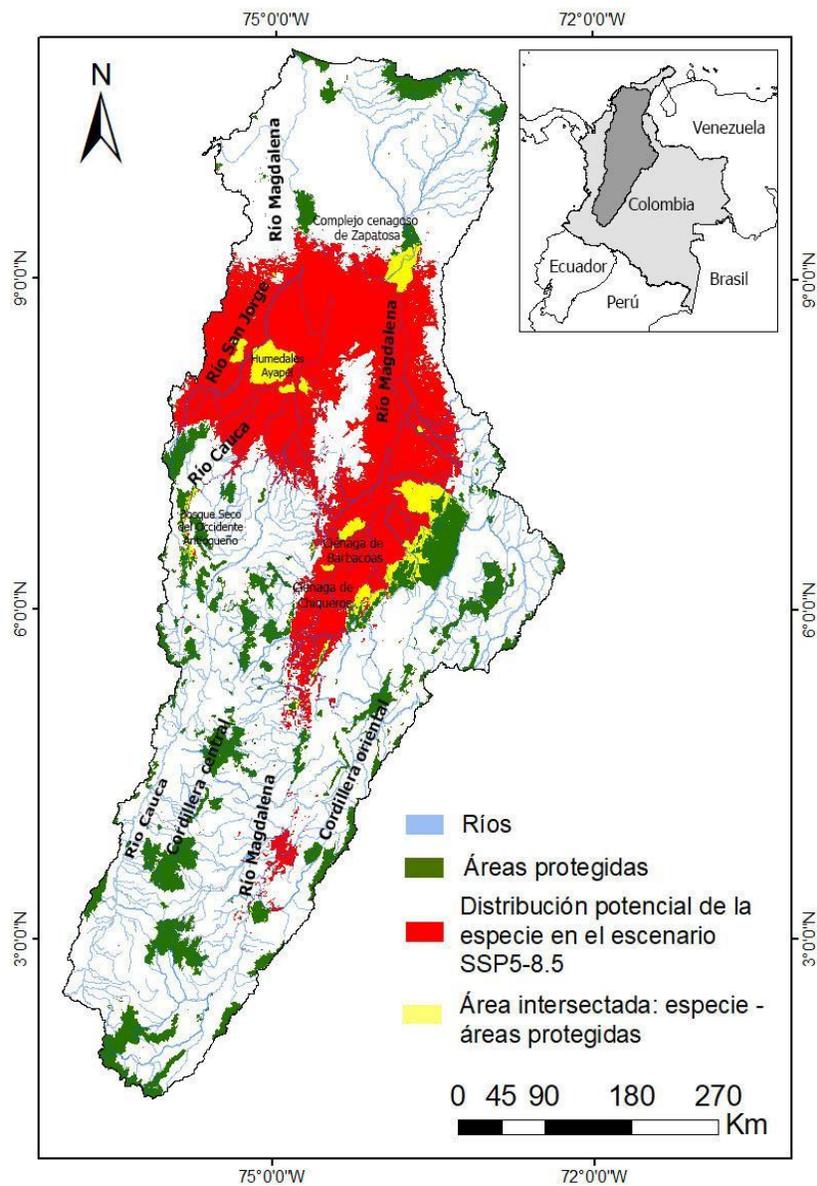


Figura 12.

Área interceptada entre el MNE en el escenario de cambio climático menos optimista (SSP5-8.5) y las áreas protegidas existentes en la actualidad.



6. Conclusiones

El modelo de distribución geográfica actual del bagre rayado (*P. magdaleniatum*) coincide con los registros de la especie hasta la fecha, se encuentra distribuida en el cauce principal del río Magdalena (zona alta, media y baja), del río Cauca (zona media y baja), río San Jorge, ciénagas y zona baja de los afluentes del río Cauca y Magdalena.

La especie de bagre rayado tiene preferencia por los ríos grandes, zonas inundables y ciénagas, hábitats de zonas bajas (entre 0 y 500 ms.n.m.), con temperatura y precipitación variable (entre 16 y 30°C; entre 25 y 1 500 mm, respectivamente), caudal intermedio (1 000 m³·s⁻¹ y 5 000 m³·s⁻¹) y sustratos dominados por limo y roca (lo cual indica que puede asociarse a zonas de rápidos y remansos).

Se registra una reducción en el área de idoneidad ambiental del bagre rayado en los dos escenarios de cambio climático (SSP1-2.6 y SSP5-8.5), la cual se ve representada principalmente por la desconexión de condiciones idóneas entre la zona alta y media del río Magdalena y desaparición de zonas idóneas en la cuenca media del río Cauca, afectando la distribución geográfica de la especie en escenarios futuros. Adicional a lo anterior, los cambios en la temperatura del agua y la alteración de los flujos de ríos y quebradas pueden altera los ciclos migratorios y la disponibilidad de los recursos alimenticios de la especie, lo que podría afectar su desarrollo y reproducción.

Anexos

Anexo 1. Variables climáticas (bioclimáticas, hidroclimáticas, topográficas, tipo de suelo, caudal, cobertura del suelo) obtenidas de diferentes fuentes.

Categoría	Recurso	Nombre de la variable	Unidades de la variable	Número de capas
Climática	WoldClim	Temperatura media anual (Bio1)	C°	1
Climática	WoldClim	Rango diurno medio anual (Bio2)	C°	1
Climática	WoldClim	Isotermalidad (Bio3)	%	1
Climática	WoldClim	Temperatura estacional (Bio4)	C°	1
Climática	WoldClim	Temperatura máxima del trimestre más caliente (Bio5)	C°	1
Climática	WoldClim	Temperatura mínima del trimestre más frío (Bio6)	C°	1
Climática	WoldClim	Rango de temperatura anual (Bio7)	C°	1
Climática	WoldClim	Temperatura media en el trimestre más cálido (Bio10)	C°	1
Climática	WoldClim	Temperatura media en el trimestre más frío (Bio11)	C°	1
Climática	WoldClim	Precipitación anual (Bio12)	mm	1
Climática	WoldClim	Precipitación del mes más lluvioso (Bio13)	mm	1
Climática	WoldClim	Precipitación del mes menos lluvioso (Bio14)	mm	1
Climática	WoldClim	Estacionalidad de la precipitación (Bio15)	%	1

Climática	WoldClim	Precipitación del trimestre más cálido (Bio18)	mm	1
Climática	WoldClim	Precipitación del trimestre más frío (Bio19)	mm	1
Hidroclimática	EarthEnv	Temperatura media anual aguas arriba (Hydro_avg_01 Hydro_wavg_01)	2 (C° C°)	2 (promedio promedio ponderado)
Hidroclimática	EarthEnv	Rango diario de temperatura media aguas arriba (Hydro_avg_02 Hydro_wavg_02)	2 (C° C°)	2 (promedio promedio ponderado)
Hidroclimática	EarthEnv	Isotermalidad aguas arriba (Hydro_avg_03 Hydro_wavg_03)	2 (% %)	2 (promedio promedio ponderado)
Hidroclimática	EarthEnv	Temperatura estacional aguas arriba (Hydro_avg_04 Hydro_wavg_04)	2 (C° C°)	2 (promedio promedio ponderado)
Hidroclimática	EarthEnv	Temperatura máxima aguas arriba del mes más cálido (Hydro_avg_05 Hydro_wavg_05)	2 (C° C°)	2 (promedio promedio ponderado)
Hidroclimática	EarthEnv	Temperatura mínima aguas arriba del mes más frío (Hydro_avg_06 Hydro_wavg_06)	2 (C° C°)	2 (promedio promedio ponderado)
Hidroclimática	EarthEnv	Rango anual de temperatura aguas arriba (Hydro_avg_07 Hydro_wavg_07)	2 (C° C°)	2 (promedio promedio ponderado)
Hidroclimática	EarthEnv	Temperatura media aguas arriba del trimestre más húmedo (Hydro_avg_08 Hydro_wavg_08)	2 (C° C°)	2 (promedio promedio ponderado)
Hidroclimática	EarthEnv	Temperatura media aguas arriba del trimestre más seco (Hydro_avg_09 Hydro_wavg_09)	2 (C° C°)	2 (promedio promedio ponderado)
Hidroclimática	EarthEnv	Temperatura media aguas arriba del trimestre más cálido (Hydro_avg_10 Hydro_wavg_10)	2 (C° C°)	2 (promedio promedio ponderado)
Hidroclimática	EarthEnv	Temperatura media aguas arriba del trimestre más frío (Hydro_avg_11 Hydro_wavg_11)	2 (C° C°)	2 (promedio promedio ponderado)

Hidroclimática	EarthEnv	Precipitación anual aguas arriba (Hydro_avg_12 Hydro_wavg_12)	2 (mm mm)	2 (suma suma ponderada)
Hidroclimática	EarthEnv	Precipitación aguas arriba del mes más lluvioso (Hydro_avg_13 Hydro_wavg_13)	2 (mm mm)	2 (suma suma ponderada)
Hidroclimática	EarthEnv	Precipitación aguas arriba del mes más seco (Hydro_avg_14 Hydro_wavg_14)	2 (mm mm)	2 (suma suma ponderada)
Hidroclimática	EarthEnv	Estacionalidad de la precipitación aguas arriba (Hydro_avg_15 Hydro_wavg_15)	2 (% %)	2 (suma suma ponderada)
Hidroclimática	EarthEnv	Precipitación aguas arriba del trimestre más húmedo (Hydro_16 Hydro_wavg_16)	2 (mm mm)	2 (suma suma ponderada)
Hidroclimática	EarthEnv	Precipitación aguas arriba del trimestre más seco (Hydro_17 Hydro_wavg_17)	2 (mm mm)	2 (suma suma ponderada)
Hidroclimática	EarthEnv	Precipitación aguas arriba del trimestre más cálido (Hydro_18 Hydro_wavg_18)	2 (mm mm)	2 (suma suma ponderada)
Hidroclimática	EarthEnv	Precipitación aguas arriba del trimestre más frío (Hydro_19 Hydro_wavg_19)	2 (mm mm)	2 (suma suma ponderada)
Topografía	EarthEnv	Elevación promedio (elevation_media)	m	1
Topografía	EarthEnv	Pendiente mínima	%	1
Topografía	EarthEnv	Pendiente máxima	%	1
Topografía	EarthEnv	Rango de la pendiente	%	1
Topografía	EarthEnv	Promedio de la pendiente	%	1
Topografía	EarthEnv	Acumulación de flujo (tamaño de la cuenca)	suma(conteo de celdas de cuadrícula)	1
Cobertura del suelo	EarthEnv	Árboles de hoja perenne/caducifolios (lc_avg_01 lc_max_01 lc_range_01 lc_wavg_01)	%	4 (promedio máximo rango promedio ponderado)

Cobertura del suelo	EarthEnv	Árboles de hoja perenne de hoja ancha (lc_avg_02 lc_max_02 lc_range_02 lc_wavg_02)	%	4 (promedio máximo rango promedio ponderado)
Cobertura del suelo	EarthEnv	Árboles de hoja caduca (lc_avg_03 lc_max_03 lc_range_03 lc_wavg_03)	%	4 (promedio máximo rango promedio ponderado)
Cobertura del suelo	EarthEnv	Árboles mixtos/otros (lc_avg_04 lc_max_04 lc_range_04 lc_wavg_04)	%	4 (promedio máximo rango promedio ponderado)
Cobertura del suelo	EarthEnv	Arbustos (lc_avg_05 lc_max_05 lc_range_05 lc_wavg_05)	%	4 (promedio máximo rango promedio ponderado)
Cobertura del suelo	EarthEnv	Vegetación herbácea (lc_avg_06 lc_max_06 lc_range_06 lc_wavg_06)	%	4 (promedio máximo rango promedio ponderado)
Cobertura del suelo	EarthEnv	Vegetación cultivada y manejada (lc_avg_07 lc_max_07 lc_range_07 lc_wavg_07)	%	4 (promedio máximo rango promedio ponderado)
Cobertura del suelo	EarthEnv	Vegetación herbácea/arbustiva regularmente inundada (lc_avg_08 lc_max_08 lc_range_08 lc_wavg_08)	%	4 (promedio máximo rango promedio ponderado)
Cobertura del suelo	EarthEnv	Urbano/construido (lc_avg_09 lc_max_09 lc_range_09 lc_wavg_09)	%	4 (promedio máximo rango promedio ponderado)
Cobertura del suelo	EarthEnv	Nieve/hielo (lc_avg_10 lc_max_10 lc_range_10 lc_wavg_10)	%	4 (promedio máximo rango promedio ponderado)
Cobertura del suelo	EarthEnv	Tierras yermas/vegetación escasa (lc_avg_11 lc_max_11 lc_range_11 lc_wavg_11)	%	4 (promedio máximo rango promedio ponderado)
Cobertura del suelo	EarthEnv	Aguas abiertas (lc_avg_12 lc_max_12 lc_range_12 lc_wavg_12)	%	4 (promedio máximo rango promedio ponderado)

Tipo de suelo	EarthEnv	Carbono orgánico del suelo (min_01 max_01 range_01 avg_01 wavg_01)	g/kg	5 (mínimo máximo rango promedio promedio ponderado)
Tipo de suelo	EarthEnv	pH del suelo en agua (min_02 max_02 range_02 avg_02 wavg_02)	pH * 10	5 (mínimo máximo rango promedio promedio ponderado)
Tipo de suelo	EarthEnv	Fracción de masa de contenido de arena (min_03 max_03 range_03 avg_03 wavg_03)	%	5 (mínimo máximo rango promedio promedio ponderado)
Tipo de suelo	EarthEnv	Fracción de masa de contenido de limo (min_04 max_04 range_04 avg_04 wavg_04)	%	5 (mínimo máximo rango promedio promedio ponderado)
Tipo de suelo	EarthEnv	Fracción de masa del contenido de arcilla (min_05 max_05 range_05 avg_05 wavg_05)	%	5 (mínimo máximo rango promedio promedio ponderado)
Tipo de suelo	EarthEnv	Fragmentos gruesos (fracción > 2 mm) (min_06 max_06 range_06 avg_06 wavg_06)	%	5 (mínimo máximo rango promedio promedio ponderado)
Tipo de suelo	EarthEnv	Capacidad de intercambio catiónico (min_07 max_07 range_07 avg_07 wavg_07)	cmol/kg	5 (mínimo máximo rango promedio promedio ponderado)
Tipo de suelo	EarthEnv	Densidad aparente de la fracción tierra fina (min_08 max_08 range_08 avg_08 wavg_08)	kg/m3	5 (mínimo máximo rango promedio promedio ponderado)
Tipo de suelo	EarthEnv	Profundidad al lecho rocoso (horizonte R) hasta un máximo de 240 cm (min_09 max_09 range_09 avg_09 wavg_09)	cm	5 (mínimo máximo rango promedio promedio ponderado)
Tipo de suelo	EarthEnv	Probabilidad de ocurrencia (0-100%) del horizonte R (min_10 max_10 range_10 avg_10 wavg_10)	%	5 (mínimo máximo rango promedio promedio ponderado)
Caudal	FLOIK	Caudal	m3.s-1	1
TOTAL				150 variables

Anexo 2. Datos de ocurrencias de la especie *Pseudoplatystoma magdaleniatum*.

Especie	Longitud	Latitud
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-73,646	9,638
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-73,816	9,206
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-73,859	7,214
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-73,888	6,954
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-73,904	7,352
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-73,917	7,253
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-73,921	7,388
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-73,921	7,538
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-73,924	7,201
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-73,929	7,188
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-73,963	7,444
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,101	6,782

<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,106	6,768
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,293	6,579
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,313	6,654
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,398	6,497
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,398	6,508
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,401	6,501
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,446	8,704
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,446	8,863
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,449	8,862
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,452	8,883
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,453	8,877
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,453	8,881
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,454	8,879
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,456	8,880
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,462	8,732
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,463	8,821
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,465	8,735
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,466	8,890

<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,470	8,851
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,471	8,871
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,471	8,896
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,474	8,893
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,475	8,894
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,487	8,364
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,488	8,338
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,495	8,333
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,496	8,279
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,513	8,296
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,513	8,654
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,513	8,733
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,518	8,598
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,519	8,318
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,519	8,704
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,520	8,318
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,520	8,632
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,521	8,638

<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,521	8,704
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,523	8,707
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,534	8,467
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,534	8,471
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,538	8,321
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,538	8,346
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,538	8,576
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,546	8,311
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,553	8,569
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,554	8,338
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,557	8,573
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,562	8,386
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,579	6,179
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,579	8,254
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,662	5,760
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,663	5,479
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,663	8,213
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,663	8,221

<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,671	5,771
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,729	9,179
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,732	9,267
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,738	8,213
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,773	8,883
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,773	8,884
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,779	7,971
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,781	8,106
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,796	7,963
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,802	7,891
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,804	7,896
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,813	7,904
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,813	7,913
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,813	7,921
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,813	7,929
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,813	7,954
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,829	5,254
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,874	8,558

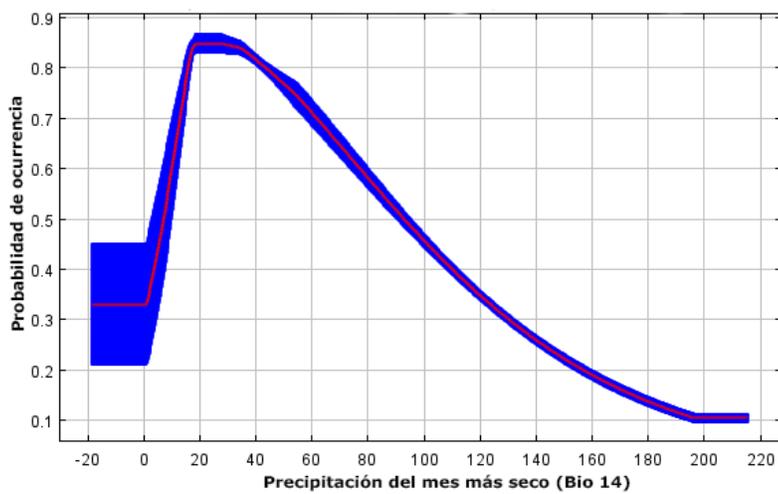
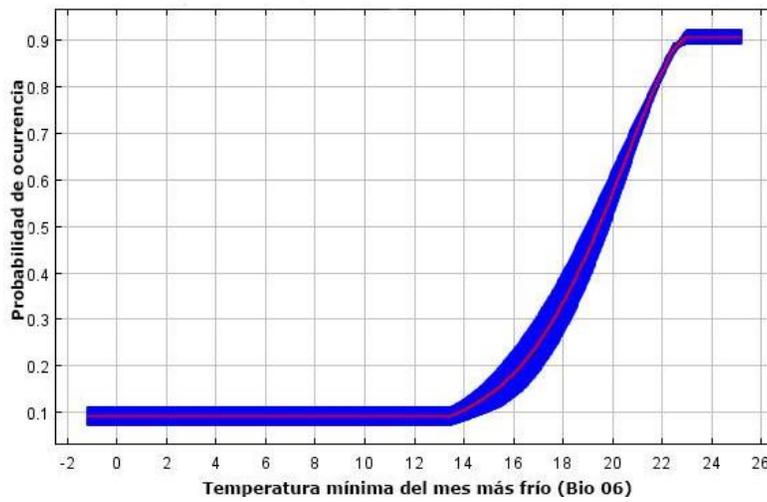
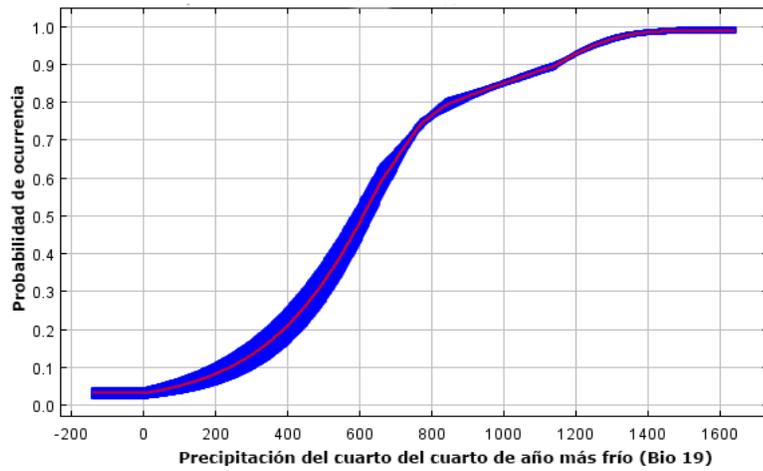
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,875	8,559
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,911	10,25
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,913	9,104
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,976	8,295
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,993	8,129
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-74,996	8,125
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-75,130	8,630
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-75,137	8,312
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-75,138	8,125
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-75,151	8,193
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-75,179	7,896
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-75,184	7,946
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-75,188	7,946
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-75,188	7,988
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-75,191	7,989
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-75,195	7,954
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-75,195	7,963
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-75,196	7,813

<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-75,196	7,863
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-75,198	7,956
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-75,199	7,958
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-75,206	7,798
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-75,208	7,956
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-75,208	7,957
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-75,213	7,779
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-75,221	3,229
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-75,229	7,951
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-75,257	7,748
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-75,258	7,749
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-75,259	7,748
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-75,263	7,746
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-75,272	7,708
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-75,280	7,688
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-75,282	7,669
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-75,283	7,667
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-75,304	7,396

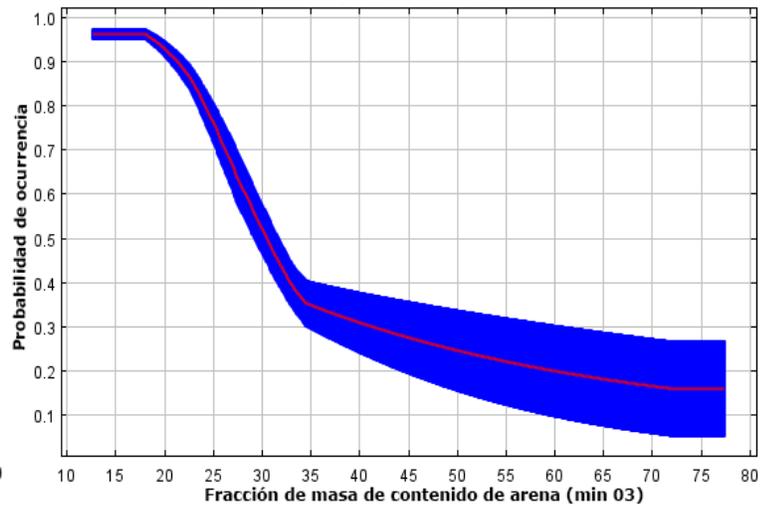
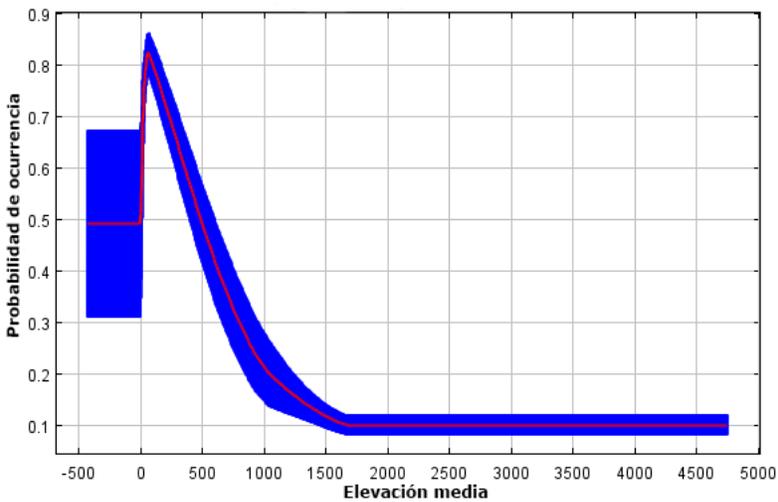
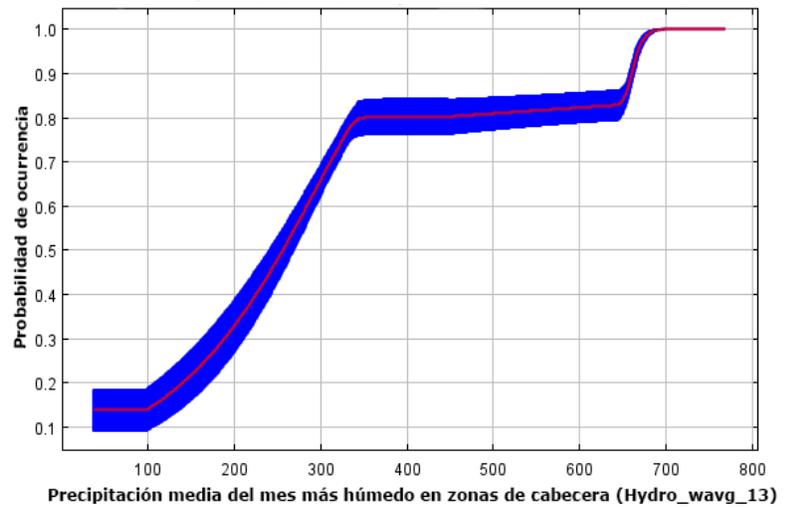
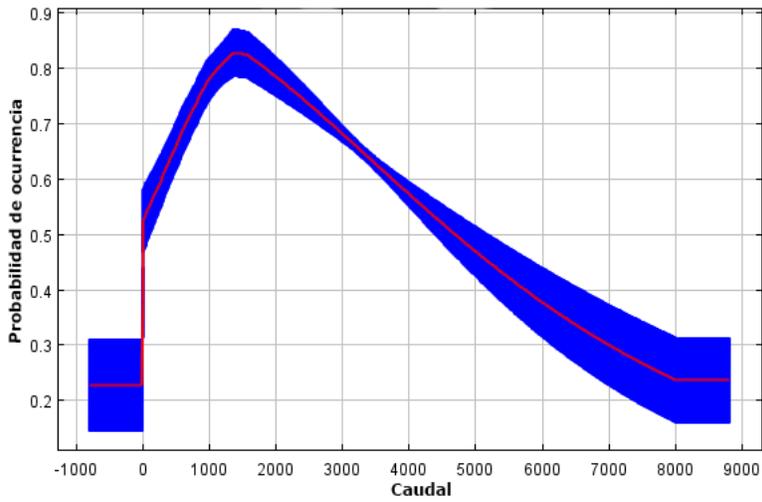
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-75,306	7,443
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-75,321	7,463
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-75,322	7,307
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-75,329	7,538
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-75,335	7,349
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-75,338	7,529
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-75,350	7,582
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-75,354	7,579
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-75,356	7,583
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-75,362	7,322
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-75,362	7,323
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-75,392	7,224
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-75,392	7,291
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-75,395	7,287
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-75,395	7,288
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-75,404	7,579
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-75,439	7,251
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-75,439	7,252

<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-75,442	7,254
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-75,446	7,254
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-75,478	7,224
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-75,552	7,203
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-75,646	7,140
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-75,653	5,459
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-75,660	7,139
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-75,661	7,139
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-75,818	6,514
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-75,841	5,967
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	-75,848	5,935

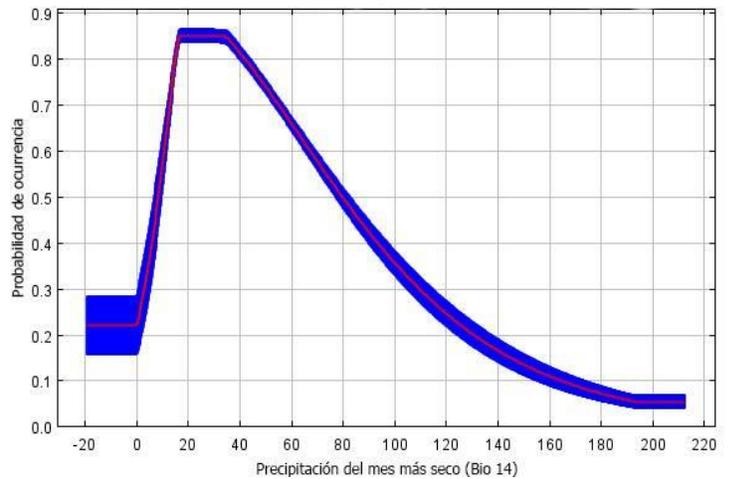
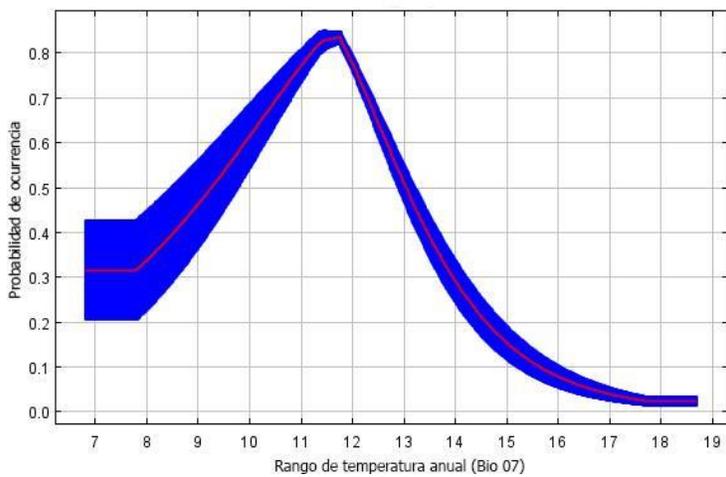
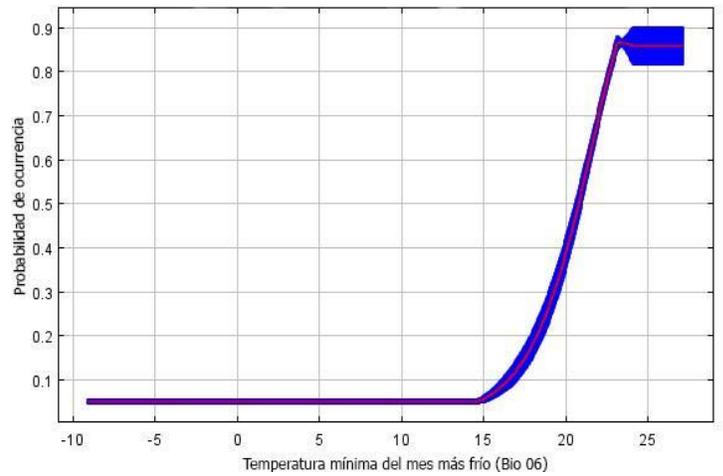
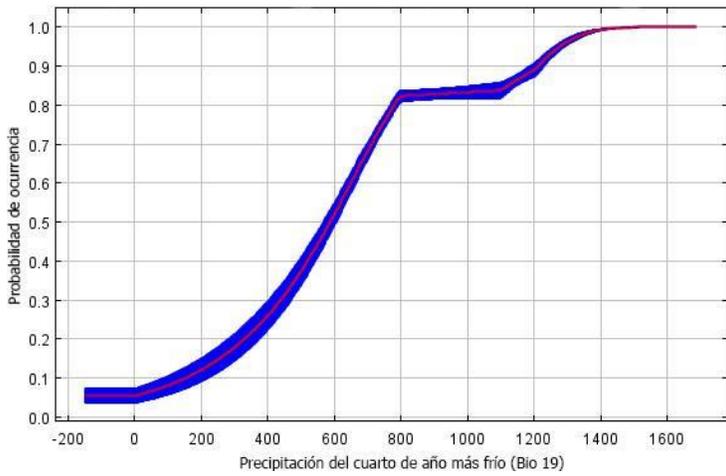
Anexo 3. Curvas de respuesta de las variables más influyentes en la predicción de la distribución actual de *P. magdaleniatum* con variables de WoldClim.



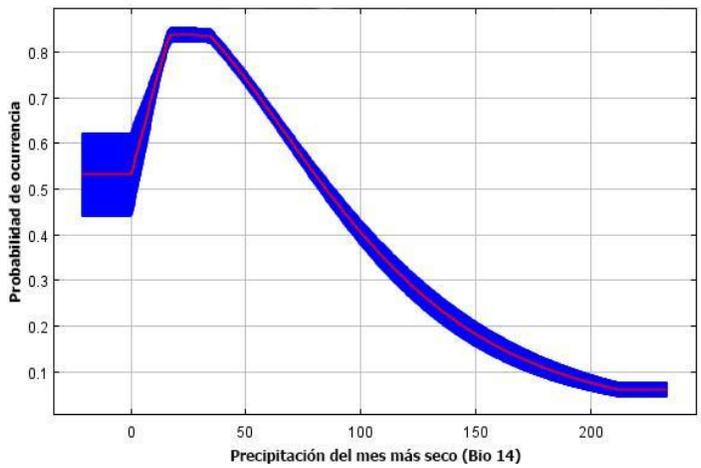
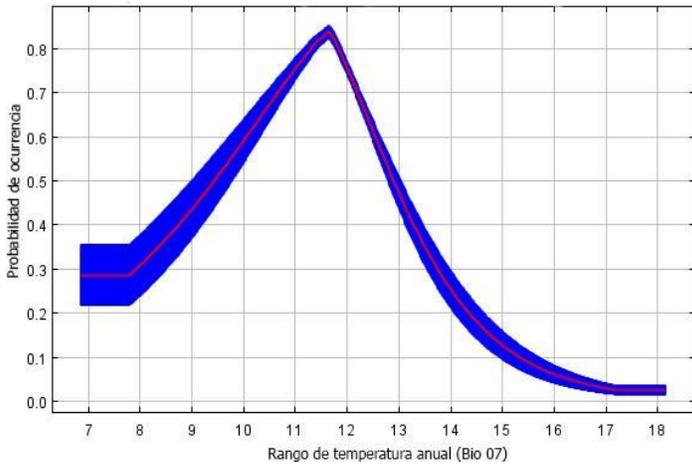
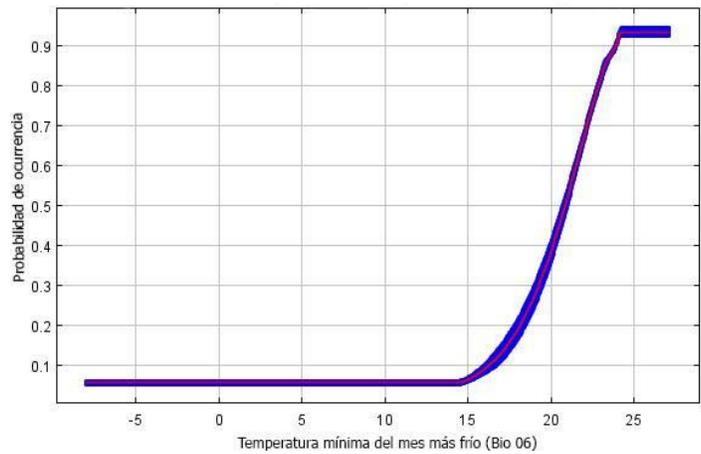
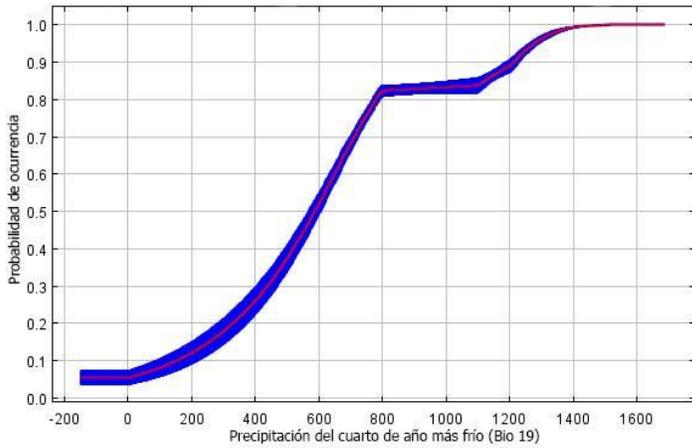
Anexo 4. Curvas de respuesta de las variables más influyentes en la predicción de la distribución actual de *P. magdaleniatum* con variables de EarthEnv.



Anexo 5. Curvas de respuesta de las variables más influyentes en la predicción de la distribución futura de *P. magdaleniatum* en escenario de cambio climático SSP1-2.6.



Anexo 6. Curvas de respuesta de las variables más influyentes en la predicción de la distribución futura de *P. magdaleniatum* en escenario de cambio climático SSP5-8.5.



Referencias bibliográficas

- Albert, J. S., Tagliacollo, V. A., y Dagosta, F. (2020). Diversification of Neotropical freshwater fishes. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 51, 27-53.
- Alvarez, F., Gerhard, P., Paiva Silva, D., Spacek Godoy, B., & Montag, L. F. D. A. (2020). Effects of different variable sets on the potential distribution of fish species in the Amazon Basin. *Ecology of Freshwater Fish*, 29(4), 764-778.
- Arce-Zúñiga, J. W., Alonso-González, J. C., Hernández-Barrero, S., & Valderrama-Barco, M. (2014). Determinación del tipo de desove y nivel de fecundidad del bagre rayado del Magdalena, *Pseudoplatystoma magdaleniatum* Buitrago-Suárez y Burr, 2007 (Siluriformes: Pimelodidae). *Biota Colombiana*, 15(1), 70-82.
- Arias, P. A., Ortega, G., Villegas, L. D., & Martínez, J. A. (2021). Colombian climatology in CMIP5/CMIP6 models: Persistent biases and improvements. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.20210525>.
- Atencio-García, V. J. (2000). Impactos de la hidroeléctrica Urrá en los peces migratorios del río Sinú. *Revista Temas Agrarios* 5 (9): 29-40.
- Barreto C. G., & Borda C. A. (2008). Propuesta Técnica para la definición de Cuotas Globales de Pesca para Colombia, Vigencia 2009. Muñoz S. E., Puentes V., Sanabria, A.I. (Eds.). Documento Técnico concertado en el Comité Técnico Interinstitucional. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Ica, Ministerio de Ambiente y Vivienda y Desarrollo Territorial. 263p.
- Barbarossa, V., Huijbregts, M. A., Beusen, A. H., Beck, H. E., King, H., & Schipper, A. M. (2018). FLO1K, global maps of mean, maximum and minimum annual streamflow at 1 km resolution from 1960 through 2015. *Scientific Data*, 5(1), 1-11.

- Barve, N., Barve, V., Jiménez-Valverde, A., Lira-Noriega, A., Maher, S. P., Peterson, A. T., Soberon, J., & Villalobos, F. (2011). The crucial role of the accessible area in ecological niche modeling and species distribution modeling. *Ecological modelling*, 222(11), 1810-1819.
- Brander, K. (2010). Impacts of climate change on fisheries. *Journal of Marine Systems*, 79(3-4), 389-402.
- Buitrago-Suárez, U. A., & Burr, B. M. (2007). Taxonomy of the catfish genus *Pseudoplatystoma* Bleeker (Siluriformes: Pimelodidae) with recognition of eight species. *Zootaxa*, 1512(1), 1-38.
- Castañeda Guzmán, M., (2022). *Modeling species geographic distributions in aquatic ecosystems using a density-based clustering algorithm* (Doctoral dissertation, Virginia Tech).
- Castellanos-Mejía, M. C., Herrera, J., Noguera-Urbano, E. A., Parra, E., & Jiménez-Segura, L. F. (2021). Potential distribution in Colombia of the introduced fish *Pangasianodon hypophthalmus* (Siluriformes: Pangasiidae) and implications for endangered native fish. *Revista de Biología Tropical*, 69(2), 573-587.
- Cheng, J., Xu, L., Fan, H., & Jiang, J. (2019). Changes in the flow regimes associated with climate change and human activities in the Yangtze River. *River Research and Applications*, 35(9), 1415-1427.
- Comte, L., Buisson, L., Daufresne, M., & Grenouillet, G. (2013). Climate-induced changes in the distribution of freshwater fish: observed and predicted trends. *Freshwater Biology*, 58(4), 625-639.
- Cortés Millán G. A. (2003). Guía para el manejo, cría y conservación del Bagre Rayado *Pseudoplatystoma Fasciatum* (Linnaeus, 1766). Convenio Andrés Bello 2003, pag 56. ISBN 958-698-115-0
- Dagosta, F. C., de Pinna, M., Peres, C. A., & Tagliacollo, V. A. (2021). Existing protected areas provide a poor safety-net for threatened Amazonian fish species. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 31(5), 1167-1189.
- del Valle Moreno, J., & Guerra Bustillo, W. (2012). La multicolinealidad en modelos de regresión lineal

múltiple. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 21(4), 80-83.

Domisch, S., Amatulli, G., & Jetz, W. (2015). Near-global freshwater-specific environmental variables for biodiversity analyses in 1 km resolution. *Scientific data*, 2(1), 1-13.

DoNascimento C., Bogotá Gregory J D., Albornoz Garzón J G., Méndez López A., Villa Navarro F A., Herrera Collazos E E., Agudelo Zamora H., Arce H. M., Herrera-Collazos E E., Maldonado-Ocampo J A. (2023). Lista de especies de peces de agua dulce de Colombia / Checklist of the freshwater fishes of Colombia. Version 2.15. Asociación Colombiana de Ictiólogos. Checklist dataset <https://doi.org/10.15472/numrso> accessed via GBIF.org on 2023-04-14.

Elith, J., Graham, C. H., Anderson, R. P., Dudík, M., Ferrier, S., Guisan, A., Hijmans, R. J., Huettmann, F., Leathwick, J. R., Lehmann, A., Li, J., Lohmann, L. G., Loiselle, B. A., Manion, G., Moritz, C., Nakamura, M., Nakazawa, Y., Overton, J. McC., Peterson, A. T., Phillips, S. J., Richardson, K. S., Scachetti-Pereira, R., Schapire, R. E., Soberón, J., Williams, S., Wisz, M. S. and Zimmermann, N. E. (2006). Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography* 29: 129/151

Elith, J., & Graham, C. H. (2009). Do they? How do they? WHY do they differ? On finding reasons for differing performances of species distribution models. *Ecography*, 32(1), 66-77.

Fernández Barrios, C. M. (2023). Incidencia del cambio climático sobre la distribución espacial de tres de las especies de aves con mayor grado de amenaza en Colombia. Tesis de especialización en sistemas de información geográfica, Universidad Antonio Nariño.

Frederico, R. G., Olden, J. D., & Zuanon, J. (2016). Climate change sensitivity of threatened, and largely unprotected, Amazonian fishes. *Aquatic conservation: marine and freshwater ecosystems*, 26, 91-102.

Gómez, R. (2011). Guía para la elaboración de mapas de distribución potencial. *Retrieved from*

Universidad Veracruzana website: <https://www.uv.mx/personal/mgamez/files/2010/07/guia-version-germoplasma.pdf>.

García-Alzate, C., DoNascimento, C., Villa-Navarro, F. A., García-Melo, J. E., & Herrera-R, G. (2020).

Diversidad de peces de la cuenca del río Magdalena, Colombia. *XIX. Peces de la cuenca del río Magdalena, Colombia: diversidad, conservación y uso sostenible*. Pp, 85-113.

Gil, G. E. (2017). *Modelos de distribución y su aplicación en la conservación de mamíferos terrestres sudamericanos* (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Madrid).

Grinnell, J. (1924). Geography and evolution. *Ecology*, 5(3), 225-229.

Guarnizo Pineda M. (2007). Caracterización seminal y ensayos preliminares de crioconservación de semen de bagre rayado (*Pseudoplatystoma fasciatum* - linnaeus 1766) Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Departamento de Producción Animal. Palmira. 2007. 102 Pág.

Guisan, A., & Zimmermann, N. E. (2000). Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological modelling*, 135(2-3), 147-186.

Guisan, A., Tingley, R., Baumgartner, J. B., Naujokaitis-Lewis, I., Sutcliffe, P. R., Tulloch, A. I., & Buckley, Y. M. (2013). Predicting species distributions for conservation decisions. *Ecology letters*, 16(12), 1424-1435.

Guo, D., Desmet, P.G., Powrie, L.W. (2017). Impact of the future changing climate on the Southern Africa biomes and the importance of geology. *J Geosci Environ Protect* 5:1–9
<http://www.scirp.org/journal/gep>

Habibullah, M. S., Din, B. H., Tan, S. H., & Zahid, H. (2022). Impact of climate change on biodiversity loss: global evidence. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(1), 1073-1086.

Gutiérrez-Moreno, L. C. y A. De la Parra-Guerra. (2020). Contaminación del agua en la cuenca del río

- Magdalena (Colombia) y su relación con los peces. En: Jiménez-Segura, L. y C. A. Lasso (Eds.). Peces de la cuenca del río Magdalena, Colombia: diversidad, conservación y uso sostenible. Pp. 239-263. Serie Editorial Recursos Hidrobiológicos y Pesqueros Continentales de Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, D. C.
- Hernández, M. A. (2008). Evaluación del estado de poblaciones de bagre rayado *Pseudoplatystoma magdaleniatum* en la cuenca media del río Magdalena durante la temporada de subienda del 2004. *Rev. Acad. Colomb. Cienc*, 32(123), 257-266.
- Hijmans R (2023). *_raster: Geographic Data Analysis and Modeling_*. R package version 3.6-14, <<https://CRAN.R-project.org/package=raster>>.
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., & Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 25(15), 1965-1978.
- Huang, J., & Frimpong, E. A. (2015). Using historical atlas data to develop high-resolution distribution models of freshwater fishes. *PLoS One*, 10(6), e0129995.
- Huang M., Ding L., Wang J., Ding C. and Tao J. (2021). The impacts of climate change on growth: A summary of conducted studies and current knowledge. *Ecological Indicators*. 121.10.1016/j.ecolind.2020.106976
- Jézéquel, C., Tedesco, P. A., Darwall, W., Dias, M. S., Frederico, R. G., Hidalgo, M., ... & Oberdorff, T. (2020). Freshwater fish diversity hotspots for conservation priorities in the Amazon Basin. *Conservation biology*, 34(4), 956-965.
- Jiménez-Segura, L. F., Galvis-Vergara, G., Cala-Cala, P., García-Alzate, C. A., López-Casas, S., Ríos-Pulgarín, M. I., Arango, G. A., Mancera-Rodríguez, N. J., Gutierrez-Bonilla, F., & Álvarez-León, R. (2016). Freshwater fish faunas, habitats and conservation challenges in the Caribbean river

basins of north-western South America. *Journal of Fish Biology*, 89(1), 65-101.

Jiménez-Segura, L. y C. A. Lasso (Eds.). 2020. XIX. Peces de la cuenca del río Magdalena, Colombia: diversidad, conservación y uso sostenible. Serie Editorial Recursos Hidrobiológicos y Pesqueros Continentales de Colombia. 434 pp.

Lindström, Å., Green, M., Paulson, G., Smith, H. G., & Devictor, V. (2013). Rapid changes in bird community composition at multiple temporal and spatial scales in response to recent climate change. *Ecography*, 36(3), 313-322.

Maldonado-Ocampo, J. A., Ortega-Lara, A., Usma, J. S., Galvis, G., Villa-Navarro, F. A., Vásquez, L., Prada-Pedrerros, S., & Ardila, C. (2005). Peces de los Andes de Colombia. *Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, DC Colombia.*

Manjarrés-Hernández A, Guisande C, García-Roselló E, Heine J, Pelayo-Villamil P, Pérez-Costas E, González-Vilas L, González-Dacosta J, Duque SR, Granado-Lorencio C, Lobo JM (2021) Predicting the effects of climate change on future freshwater fish diversity at global scale. *Nature Conservation* 43: 1–24. <https://doi.org/10.3897/natureconservation.43.58997>.

Mateo, R. G., Felicísimo, Á. M., & Muñoz, J. (2011). Modelos de distribución de especies: Una revisión sintética. *Revista chilena de historia natural*, 84(2), 217-240.

McMahan, C. D., Fuentes-Montejo, C. E., Ginger, L., Carrasco, J. C., Chakrabarty, P., & Matamoros, W. A. (2020). Climate change models predict decreases in the range of a microendemic freshwater fish in Honduras. *Scientific Reports*, 10(1), 12693.

Melo-Merino, S. M., Reyes-Bonilla, H., & Lira-Noriega, A. (2020). Ecological niche models and species distribution models in marine environments: A literature review and spatial analysis of evidence. *Ecological Modelling*, 415, 108837.

Mojica, J. I.; J. S. Usma; R. Álvarez-León y C. A. Lasso (Eds). 2012. Libro rojo de peces dulceacuícolas

de Colombia 2012. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia, WWF Colombia y Universidad de Manizales. Bogotá, D. C., Colombia, 319 pp.

Mojica, J., Valderrama, M., Jimenez-Segura, L. & Alonso, J. C. 2016. *Pseudoplatystoma magdaleniatum*. *The IUCN Red List of Threatened Species* 2016: e.T58439165A61474168. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2016-1.RLTS.T58439165A61474168.en>. Accessed on 22 April 2023.

Mota Vargas, C., Encarnación Luévano, A., Ortega Andrade, H. M., Prieto Torres, D. A., Peña Peniche, A., & Rojas Soto, O. R. (2020). Una breve introducción a los modelos de nicho ecológico. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

Naimi, B., Hamm, N., Groen, TA, Skidmore, AK., Toxopeus, AG. (2014). “Where is positional uncertainty a problem for species distribution modelling”. *Ecography*, *37*, 191-203. doi:10.1111/j.1600-0587.2013.00205.x. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2013.00205.x>.

Nori, J., & Rojas-Soto, O. (2019). On the environmental background of aquatic organisms for ecological niche modeling: a call for caution. *Aquatic Ecology*, 53(4), 595-605.

Nunez, S., Arets, E., Alkemade, R., Verwer, C., & Leemans, R. (2019). Assessing the impacts of climate change on biodiversity: is below 2° C enough?. *Climatic Change*, 154, 351-365.

Pelicice, F. M., Agostinho, A. A., Azevedo-Santos, V. M., Bessa, E., Casatti, L., Garrone-Neto, D., ... & Zuanon, J. (2022). Ecosystem services generated by Neotropical freshwater fishes. *Hydrobiologia*, 1-24.

Peterson, A. T., & Soberón, J. (2012). Species distribution modeling and ecological niche modeling: getting the concepts right. *Natureza & Conservação*, 10(2), 102-107.

Peterson, A. T., Anderson, R. P., Cobos, M. E., Cuahutle, M., Cuervo-Robayo, A. P., Escobar, L. E.,

- Fernandez, M., Jiménez, D., Lira-Noriega, A., Lobo, J., Machado, F., Martínez, M., Nuñez, C., Nori, J., & Yañez-Arenas, C. (2019). Curso modelado de nicho ecológico, versión 1.0.
- Pörtner, H. O., & Peck, M. A. (2010). Climate change effects on fishes and fisheries: towards a cause-and-effect understanding. *Journal of fish biology*, 77(8), 1745-1779.
- Prakash, S. (2021). Impact of Climate change on Aquatic Ecosystem and its Biodiversity: An overview. *International Journal of Biological Innovations*, 3(2).
- Prieto-Torres, D. A., Nori, J., & Rojas-Soto, O. R. (2018). Identifying priority conservation areas for birds associated to endangered Neotropical dry forests. *Biological Conservation*, 228, 205-214.
- Qiao H, Soberón J, Peterson AT (2015) No silver bullets in correlative ecological niche modelling: insights from testing among many potential algorithms for niche estimation. *Methods in Ecology and Evolution* 6:1126- 1136.
- Richardson, A. J., & Schoeman, D. S. (2004). Climate impact on plankton ecosystems in the Northeast Atlantic. *Science*, 305(5690), 1609-1612.
- R Core Team (2022). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Rijnsdorp, A. D., Peck, M. A., Engelhard, G. H., Möllmann, C., & Pinnegar, J. K. (2009). Resolving the effect of climate change on fish populations. *ICES journal of marine science*, 66(7), 1570-1583.
- Rojas-Muñoz, A., (2014). Caracterización de los hábitos alimenticios del bagre rayado (*Pseudoplatystoma magdaleniatum* sp. *Buitrago, 2007*) en la cuenca del Magdalena (COLOMBIA) (Doctoral dissertation, UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA).
- Tims, A. R., & Saupe, E. E. (2023). Forecasting climate-driven habitat changes for Australian freshwater fishes. *Diversity and Distributions*.
- Tognelli, M.F., Anderson, E.P., Jiménez-Segura, L.F., Chuctaya, J., Chocano, L., Maldonado-Ocampo,

- J.A., Mesa-Salazar, L., Mojica, J.I., Carvajal-Vallejos, F.M., Correa, V., Ortega, H., Rivadeneira Romero, J.F., Sánchez-Duarte, P., Cox, N.A., Hidalgo, M., Jiménez Prado, P., Lasso, C.A., Sarmiento, J., Velásquez, M.A., VillaNavarro, F.A. (2019). Assessing conservation priorities of endemic freshwater fishes in the tropical Andes region. *Aquat. Conserv. Mar. Freshw. Ecosyst.* 29, 1123–1132. <https://doi.org/10.1002/aqc.2971>.
- Valderrama, M., L. F. Jiménez-Segura, R. Álvarez-León, G. González-Cañón, F. Salas, S. Hernández y M. Zarate. (2011). *Pseudoplatystoma magdaleniatum* (Siluriformes, Pimelodidae). Capítulo 7. Pp. 491-496. En: Lasso, C. A., E. Agudelo Córdoba, L. F. Jiménez-Segura, H. Ramírez-Gil, M. Morales-Betancourt, R. E. Ajiaco-Martínez, F. de P. Gutiérrez, J. S. Usma Oviedo, S. E. Muñoz Torres, A. I. Sanabria Ochoa (Eds.) I. Catálogo de los Recursos Pesqueros Continentales de Colombia. Serie Editorial Recursos Hidrobiológicos y Pesqueros continentales de Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH). Bogotá, D. C., Colombia, 715 pp
- Valencia-Rodríguez, D., Jiménez-Segura, L., Rogéliz, C. A., & Parra, J. L. (2022). A simple and extensible framework to identify key areas for the conservation of single vulnerable freshwater species. *Biological Conservation*, 273, 109672.
- Salgado, J., Shurin, J. B., Vélez, M. I., Link, A., Lopera-Congote, L., González-Arango, C., Jaramillo, F., Åhlén, I., & de Luna, G. (2022). Causes and consequences of recent degradation of the Magdalena River basin, Colombia. *Limnology and Oceanography Letters*, 7(6), 451-465.
- Sauz-Sánchez, J. D. J., Rodiles-Hernández, R., Andrade-Velázquez, M., & Mendoza-Carranza, M. (2021). Modelling the potential distribution of two tropical freshwater fish species under climate change scenarios. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 31(10), 2737-2751.
- Simmons, R. E., Barnard, P., Dean, W. R. J., Midgley, G. F., Thuiller, W., & Hughes, G. (2004). Climate

- change and birds: perspectives and prospects from southern Africa. *Ostrich-Journal of African Ornithology*, 75(4), 295-308.
- Sintayehu, D. W. (2018). Impact of climate change on biodiversity and associated key ecosystem services in Africa: a systematic review. *Ecosystem health and sustainability*, 4(9), 225-239.
- Soberón, J., Osorio-Olvera, L., & Peterson, T. (2017). Diferencias conceptuales entre modelación de nichos y modelación de áreas de distribución. *Revista mexicana de biodiversidad*, 88(2), 437-441.
- Soberon, J., & Peterson, A. T. (2005). Interpretation of models of fundamental ecological niches and species' distributional areas. *Biodiversity Informatics*, 2, 2005, pp. 1-10
- Valencia-Rodríguez, D., Jiménez-Segura, L., Rogéliz, C. A., & Parra, J. L. (2021). Ecological niche modeling as an effective tool to predict the distribution of freshwater organisms: The case of the Sabaleta Brycon henni (Eigenmann, 1913). *PLoS One*, 16(3), e0247876.
- Valencia-Rodríguez, D., Jiménez-Segura, L., Rogéliz, C. A., & Parra, J. L. (2022). A simple and extensible framework to identify key areas for the conservation of single vulnerable freshwater species. *Biological Conservation*, 273, 109672.
- Vinagre, C., Leal, I., Mendonca, V., Madeira, D., Narciso, L., Diniz, M. S., & Flores, A. A. (2016). Vulnerability to climate warming and acclimation capacity of tropical and temperate coastal organisms. *Ecological indicators*, 62, 317-327.
- Zapata, L.A. & Usma, J.S. (2013). Guía de las Especies Migratorias de la Biodiversidad en Colombia: Peces. Vol. 2. Bogotá D.C. Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y WWF-Colombia.
- Zárate, M., J. Martínez y P. R. Caraballo. (1988). Captura y esfuerzo pesquero en la cuenca del río Magdalena y su sistema de planos inundables durante la subienda 1987 y estado actual de sus pesquerías. Informe Técnico. INDERENA, San Cristóbal (Bolívar).

