Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), marzo-abril 2025,
Volumen 9, Número 2.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i2

MODELAMIENTO AMBIENTAL PARA EVALUAR LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL ACTUAL Y POTENCIAL DE INIA GEOFFRENSIS, BAJO ESCENARIOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

ENVIRONMENTAL MODELING TO EVALUATE THE CURRENT AND POTENTIAL SPATIAL DISTRIBUTION OF INIA GEOFFRENSIS UNDER CLIMATE CHANGE SCENARIOS

Juan Carlos Caicedo Ballesteros
Instituto Superior Tecnológico Martha Bucaram de Roldós

Milton Abdon Obiedo Jimenez
Instituto Superior Tecnológico Martha Bucaram de Roldós

Veronica Estefania Montenegro Benalcazar
Universidad Politecnica Salesiana

Fernando Alexis Gonzalez Soto
Universidad Nacional de Loja

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i2.17150

Modelamiento ambiental para evaluar la distribución espacial actual y potencial de *Inia geoffrensis*, bajo escenarios del Cambio Climático

Juan Carlos Caicedo Ballesteros[1]
jucacb30@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-0624-2073
Instituto Superior Tecnológico Martha Bucaram de Roldós
Ecuador

Milton Abdon Obiedo Jimenez
Milton.Obiedo@hotmail.com
https://orcid.org/0009-0005-5694-1832
Instituto Superior Tecnológico Martha Bucaram de Roldós
Ecuador

Veronica Estefania Montenegro Benalcazar
vmontenegro@ups.edu.ec
https://orcid.org/0000-0003-4113-1819
Universidad Politecnica Salesiana
Ecuador

Fernando Alexis Gonzalez Soto
fernando.gonzalez@unl.edu.ec
https://orcid.org/0000-0002-2171-6556
Universidad Nacional de Loja
Ecuador

RESUMEN

El cambio climático es uno de los principales factores que afectan la distribución y viabilidad de numerosas especies a nivel global. Inia geoffrensis, el delfín rosado del Amazonas, es una especie clave y un bioindicador crítico de los ecosistemas fluviales, cuya distribución podría verse gravemente afectada por el cambio climático. En este estudio, se aplicó el modelado de nicho ecológico utilizando el algoritmo MaxEnt para evaluar la distribución espacial actual y futura de Inia geoffrensis en la provincia de Sucumbíos, Ecuador. Se utilizaron 65 registros de presencia y siete variables bioclimáticas actuales y proyectadas para el año 2070 bajo dos escenarios de cambio climático: SSP 245 (moderado) y SSP 585 (extremo). Los resultados indican que el hábitat adecuado de Inia geoffrensis en la región, actualmente estimado en 2110 km², se reducirá en un 72.7% bajo el escenario SSP 245 y desaparecerá completamente bajo el escenario SSP 585. En los límites políticos de la provincia de Sucumbios, el área de idoneidad alta para el presente es de 1780.64 km² y en el futuro, escenario SSP 245 tendrá una reducción del 69.67 %. La modelación reveló que la temperatura mínima del mes más frío y la estacionalidad de la temperatura son los principales factores que determinan la distribución de la especie. Estas proyecciones resaltan la vulnerabilidad del delfín rosado frente al cambio climático y la necesidad urgente de implementar estrategias de conservación.

Palabras clave: cambio climático, modelamiento, maxent, inia geoffrensis

[1] Autor principal.
Correspondencia: jucacb30@gmail.com

Environmental modeling to evaluate the current and potential spatial distribution of *Inia geoffrensis* under Climate Change scenarios

ABSTRACT

Climate change is one of the main factors affecting the distribution and viability of numerous species worldwide. Inia geoffrensis, the Amazon river dolphin, is a key species and a critical bioindicator of river ecosystems, whose distribution could be severely impacted by climate change. In this study, ecological niche modeling was applied using the MaxEnt algorithm to evaluate the current and future spatial distribution of Inia geoffrensis in Sucumbíos Province, Ecuador. A total of 65 occurrence records and seven bioclimatic variables, both current and projected for the year 2070, were used under two climate change scenarios: SSP 245 (moderate) and SSP 585 (extreme). The results indicate that the suitable habitat for Inia geoffrensis in the region, currently estimated at 2110 km², will decrease by 72.7% under the SSP 245 scenario and completely disappear under the SSP 585 scenario. Within the political limits of Sucumbíos Province, the current high suitability area is 1780.64 km², which will decrease by 69.67% under the SSP 245 scenario. The modeling revealed that the minimum temperature of the coldest month and temperature seasonality are the primary factors determining the species' distribution. These projections highlight the vulnerability of the pink river dolphin to climate change and the urgent need to implement conservation strategies.

***Keywords*:** climate change, modeling, maxent, inia geoffrensis

Artículo recibido 05 febrero 2026

Aceptado para publicación: 15 marzo 2025

INTRODUCCIÓN

A escala global, la pérdida de biodiversidad se ha intensificado al punto de ser considerada por numerosos investigadores como el sexto gran evento de extinción masiva en la historia de la Tierra. Entre las principales causas de esta problemática figuran la sobreexplotación de especies, la introducción de especies invasoras, la alteración de hábitats, la contaminación ambiental y el cambio climático (Cowie et al., 2022).

Ante estas perturbaciones, la biodiversidad exhibe diversas respuestas de adaptación; sin embargo, los cambios drásticos en el entorno pueden desencadenar la extinción de ciertas especies, lo cual afecta el equilibrio de los sistemas ecológicos y la provisión de servicios ecosistémicos (Pérez Muñoz, 2014).

El clima desempeña un papel fundamental en la distribución geográfica de las especies; en consecuencia, el cambio climático global impulsa alteraciones en las áreas de distribución natural. Dicha distribución no es aleatoria, sino que responde a la interacción de factores ambientales y a la capacidad de tolerancia de los organismos frente a la altitud, la topografía, la temperatura, la precipitación y la humedad (Gutiérrez y Trejo, 2014; López, 2014).

El Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC, 2022) subraya la urgencia de implementar acciones para enfrentar los riesgos asociados al cambio climático, como el incremento de olas de calor, sequías e inundaciones, la pérdida de biodiversidad e infraestructura, el deterioro de la salud humana, y la propagación de plagas y enfermedades en cultivos. Estos efectos amenazan de forma directa la seguridad alimentaria y los medios de subsistencia de millones de personas, en parte debido al uso no sostenible de los recursos naturales, la expansión urbana, las desigualdades sociales, los eventos climáticos extremos y la pandemia de COVID-19 (IPCC, 2022).

En el caso de Ecuador, este país se ubica entre las 17 naciones más megadiversas del planeta, no obstante, si se toma en cuenta el número de especies por unidad de superficie (0.002 especies por kilómetro cuadrado), Ecuador se considera el más diverso, albergando tres veces más especies por kilómetro cuadrado que Colombia y 21 veces más que Brasil (Centro Jambatu, 2020). Dadas sus condiciones geográficas, climáticas, topográficas, económicas y sociales, Ecuador también presenta una alta vulnerabilidad ante los efectos del cambio climático (Barrera y Morejón, 2011).

Inia geoffrensis (delfín rosado) habita en las cuencas de los ríos Amazonas y Orinoco, así como en sus principales afluentes en Bolivia, Brasil, Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela. Se estima que su distribución cubre alrededor de siete millones de kilómetros cuadrados, delimitada principalmente por las aguas marinas, rápidos intransitables, cascadas y tramos fluviales excesivamente someros. No se han encontrado variaciones significativas entre su distribución actual y la estimada en el pasado (Best y da Silva, 1993). Aunque estos delfines son mamíferos acuáticos, factores ambientales atmosféricos relacionados con las cuencas de los ríos que habitan, como la precipitación y la temperatura, resultan determinantes para su ecología, pues inciden directamente en la presencia de la especie en un área concreta.

Para estimar la distribución potencial de la biodiversidad, una de las metodologías más difundidas son los modelos de nicho (Lobo et al., 2010). Estos emplean algoritmos matemáticos que correlacionan los registros de presencia de la especie con datos de variables ambientales entre ellas, topografía, precipitación y temperatura para generar predicciones espaciales (Lobo et al., 2010).

Actualmente, se dispone de una amplia gama de algoritmos que permiten elaborar cartografía de distribución tanto actual como potencial de las especies. Algunos se basan en información de presencia-ausencia, como los Modelos Aditivos Generalizados (GAM) o los Modelos Lineales Generalizados (GLM). Otros, en cambio, utilizan únicamente información de presencia, como Bioclim, Domain y MaxEnt (Rodríguez, 2011), entre otros. Diversas investigaciones destacan a MaxEnt como uno de los enfoques más eficaces en el modelado de nicho ecológico (Toranza, 2011; Elith et al., 2006; Hernández et al., 2006). Sus aplicaciones abarcan la identificación de nuevas áreas de distribución (Pearson et al., 2007), la predicción de invasiones biológicas (Ward, 2007), el diseño de planes de conservación y la evaluación de los posibles impactos del cambio climático (Levinsky et al., 2007).

El objetivo de la presente investigación consiste en evaluar la distribución espacial, tanto actual como potencial, de *Inia geoffrensis* bajo escenarios de cambio climático en la provincia de Sucumbíos, Ecuador. Dado que los estudios específicos sobre su área de cobertura son limitados, se busca entender su comportamiento y viabilidad futura, así como generar información científica que contribuya al diseño de estrategias de conservación para esta especie, esencial para la preservación de la biodiversidad del país.

METODOLOGÍA

Zona de estudio

La presente investigación se ubica en la zona continental del Ecuador (Figura 1), la cual limita al norte con Colombia, al sur y al este con Perú, y al oeste con el océano Pacífico, excluyendo de este estudio las islas Galápagos. Ecuador cuenta con una superficie de 283.791 km², presenta una topografía que oscila entre los 0 y los 6.300 msnm, y un gradiente de temperatura aproximado de 0 a 26 °C. El territorio se divide en cuatro regiones con características geográficas y climáticas diversas: Costa, Sierra, Oriente e Insular. Estas comprenden una amplia gama de condiciones climáticas y de ecosistemas, entre las que destacan climas tropicales, subtropicales, templados, subtemplados y de páramo. Posteriormente, se analizarán los resultados enfocados en el ámbito geográfico de la provincia de Sucumbíos.

Figura 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio.

Especie objetivo *Inia geoffrensis*

Los delfines de río en Sudamérica están representados por los géneros *Inia* y *Sotalia*, con una amplia distribución en los ecosistemas acuáticos de las cuencas del Amazonas, Araguaia-Tocantins y Orinoco (Da Silva, 1994; 2002; Caballero et al., 2007; Da Silva, 2009; Reeves et al., 2011; Secchi et al., 2011; Secchi et al., 2012; Carvajal-Castro et al., 2015; Caballero et al., 2017). Si bien existen rasgos geológicos naturales como rápidos y cascadas, estas formaciones actúan como barreras que influyen de manera significativa en el flujo genético entre diferentes poblaciones de delfines de río, fomentando incluso eventos vicariantes de especiación (Rice, 1998; Gravena et al., 2015).

El delfín rosado, también conocido como tonina o bufeo (*Inia geoffrensis*), es una especie endémica de

Sudamérica y objeto de esfuerzos de conservación (Lasso et al., 2010). Presenta una amplia distribución que abarca las cuencas del Orinoco, tanto en Colombia como en Venezuela, y del Amazonas, en países como Brasil, Colombia, Ecuador, Perú, Guyana y Bolivia, cubriendo cerca de siete millones de kilómetros cuadrados, con ecosistemas marcados por condiciones ambientales muy diversas (Best & Da Silva, 1989a).

Inia geoffrensis es una especie en peligro de extinción de acuerdo a la lista roja de especies amenazas publicada por la Unión Internacional para Conservación de la Naturaleza (UICN) que la categoriza como una especie en peligro crítico.

Modelamiento ambiental

bases de datos globales para la obtención de las variables del modelamiento.

La variable biótica se definió a partir de los registros georeferenciados de presencia de la especie, recopilados en las plataformas GBIF, VertNet e INaturalist, donde se localizaron 907 registros que abarcan desde 1817 hasta la actualidad, distribuidos en las cuencas de los ríos Amazonas y Orinoco, así como en sus principales afluentes en los paises de Brasil, Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela (Figura 2).

Figura 2. Puntos de ocurrencia de *Inia geoffrensis*

Las variables ambientales globales se obtuvieron de la plataforma WorldClim (versión 2.1), que proporcionó 19 variables bioclimáticas (Tabla 1) para condiciones actuales y futuras, con una resolución de 1 km² (30 arcsec). Estos datos representan diversas combinaciones de temperatura y precipitación a lo largo del año, así como proyecciones de mediano y largo plazo (1970-2000) basadas en estaciones meteorológicas de todo el mundo (Hijmans et al., 2017).

Tabla 1. *Variables bioclimáticas.*

CÓDIGO	DENOMINACIÓN
Bio 1	Temperatura Media Anual
Bio 2	Intervalo medio diurno (media mensual (tmáxima - tmínima))
Bio 3	Isotermalidad (BIO2/BIO7) (×100)
Bio 4	Estacionalidad de la temperatura (desviación estándar ×100)
Bio 5	Temperatura máxima del mes más cálido
Bio 6	Temperatura mínima del mes más frío
Bio 7	Rango anual de temperatura (BIO5-BIO6)
Bio 8	Temperatura media del trimestre más húmedo
Bio 9	Temperatura media del trimestre más seco
Bio 10	Temperatura media del trimestre más cálido
Bio 11	Temperatura media del trimestre más frío
Bio 12	Precipitación anual
Bio 13	Precipitación del mes más lluvioso
Bio 14	Precipitación del mes más seco
Bio 15	Estacionalidad de la precipitación (coeficiente de variación)
Bio 16	Precipitación del trimestre más húmedo
Bio 17	Precipitación del trimestre más Seco
Bio 18	Precipitación del trimestre más cálido
Bio 19	Precipitación del trimestre más frío

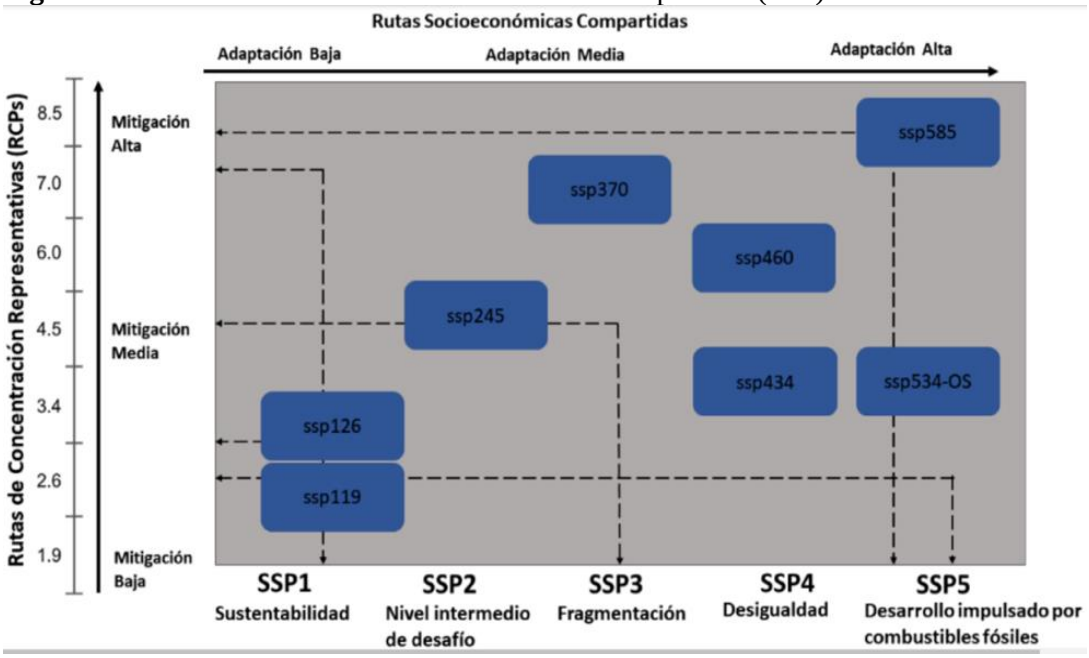
Para las variables climáticas de escenarios futuros, se recurrió a las proyecciones generadas por el Coupled Model Intercomparison Project 6 (CMIP6), las cuales también fueron empleadas en el Sexto Informe del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2022).

Estos modelos permiten simular posibles trayectorias de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (Eyring et al., 2016) e incorporan las Rutas Socioeconómicas Compartidas (SSP, por sus siglas en inglés)

(Grose et al., 2020).

Las SSP (Figura 3) complementan las vías de concentración de Gases deEfecto Invernadero (RCP, por sus siglas en inglés) al considerar la evolución potencial de factores socioeconómicos durante las próximas décadas. Entre ellas destacan la SSP1 - 2.6 “Sostenibilidad”, la SSP2 - 4.5 “Mitad del camino”, la SSP3 - 7.0 “Rivalidad regional” y la SSP5 - 8.5 (O’Neill et al., 2017; Riahi et al., 2017).

Figura 3. Escenarios de las rutas socioeconómicas compartidas (SSP).



Para la presente investigación se seleccionó el modelo de circulación global (GCM) HadGEM3-GC31-LL, desarrollado conjuntamente por el Met Office Hadley Centre (Reino Unido) y el Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales (Brasil). Este modelo proyecta, de manera general, un incremento en las precipitaciones y una reducción en los periodos secos en la región ecuatorial de Sudamérica, especialmente en zonas con régimen estacional definido. Asimismo, Schivo et al. (2019) emplearon previamente el GCM HadGEM2-ES para modelar la distribución y riqueza de anfibios bajo diversos escenarios de cambio climático en Brasil, por lo que se consideró oportuno recurrir a la versión actual de este modelo (HadGEM3-GC31-LL) para simular los escenarios futuros (SSP 245 y SSP 585) al año 2070, con el fin de sustentar el modelamiento de nicho ecológico de la especie.

Preprocesamiento de las variables biológicas y ambientales.

Las variables biológicas se organizaron y procesaron en el software Excel, donde se mantuvieron únicamente las columnas correspondientes a especie, longitud y latitud, necesarias para ejecutar el

modelo. Además, se realizó una depuración de los datos, eliminando registros duplicados que compartían las mismas coordenadas geográficas o carecían de ellas.

Con el uso del software QGIS, se identificaron los puntos de presencia ubicados dentro de una misma celda de píxel, seleccionando un único registro por celda, es decir, un dato de presencia por cada kilómetro cuadrado. Este procedimiento permitió reducir los efectos de la correlación espacial, ya que las variables ambientales estaban definidas con una resolución de 1 km² (Kamilar & Tecot, 2016).

En cuanto a las variables ambientales, estas se procesaron en QGIS para extraer los valores correspondientes a las 19 variables bioclimáticas en función de los puntos de presencia. Posteriormente, se llevó a cabo un análisis de correlación de Pearson mediante el software estadístico Past4, eliminando aquellas variables altamente correlacionadas (con coeficientes superiores a 0.90) (Jane et al., 2010; Qin et al., 2016; Wan et al., 2017). Se seleccionaron únicamente las variables con baja correlación y alta relevancia biológica en la ecología de la especie para su uso en el modelamiento de distribución actual y futura.

Finalmente, considerando la ecología de *Inia geoffrensis*, el área de modelamiento se delimitó en funcion del parteaguas de las cuencas hidrográficas donde se identificaron los puntos de presencia de la especie. Se generó un polígono unico que abarca la cuenca del río Napo y la cuenca del río San Miguel. En esta área, los rásteres de las variables ambientales, junto con la información bioclimática, se ajustaron a la misma proyección, resolución y número de celdas en las dimensiones “x” y “y” de sus propiedades.

Construcción del modelo ambiental.

El modelamiento ambiental se llevó a cabo utilizando el algoritmo de máxima entropía implementado en el software MaxEnt, desarrollado por el Centro para la Biodiversidad y Conservación del Museo Americano de Historia Natural (AMNH) por Phillips y colaboradores. Para la entrada de datos (*INPUT*), se emplearon variables biológicas, incluyendo registros de ocurrencia de la especie en formato CSV (valores separados por comas), así como variables ambientales en formato ASCII (*.asc*), que contienen información bioclimática relevante (Phillips, Aneja, Kang, & Arya, 2006).

El modelo se ejecutó bajo la configuración predeterminada de MaxEnt, con excepción de la activación de las opciones “Create response curves” y “Do jackknife”, las cuales permiten evaluar la importancia de las variables ambientales utilizadas. Adicionalmente, se verificó el rendimiento del modelo a través

del cálculo del área bajo la curva (*AUC*), que mide la relación entre la sensibilidad y especificidad del modelo, con valores que oscilan entre 0 y 1. Se considera que valores cercanos a 1 reflejan un alto desempeño del modelo, mientras que valores inferiores a 0.5 indican un bajo rendimiento. La categorización de desempeño se estableció de la siguiente manera: "excelente" (0.90-1.00), "bueno" (0.80-0.90), "medio" (0.70-0.80) y "pobre" (0.60-0.70) (Allouche et al., 2006; Araújo et al., 2005; Swets, 1988).

Las áreas de idoneidad fueron determinadas con base en los resultados obtenidos tras la ejecución del modelo en MaxEnt para el presente y los escenarios futuros. Los resultados se expresaron en un ráster con valores de píxeles de 0 a 1, clasificándose en cuatro categorías (Merow et al., 2013; Yan et al., 2017):

(a) Ausencia (< 0.25), correspondiente a áreas sin idoneidad, representadas en color celeste (b) Baja idoneidad (0.25 – 0.50), representada en color amarillo.

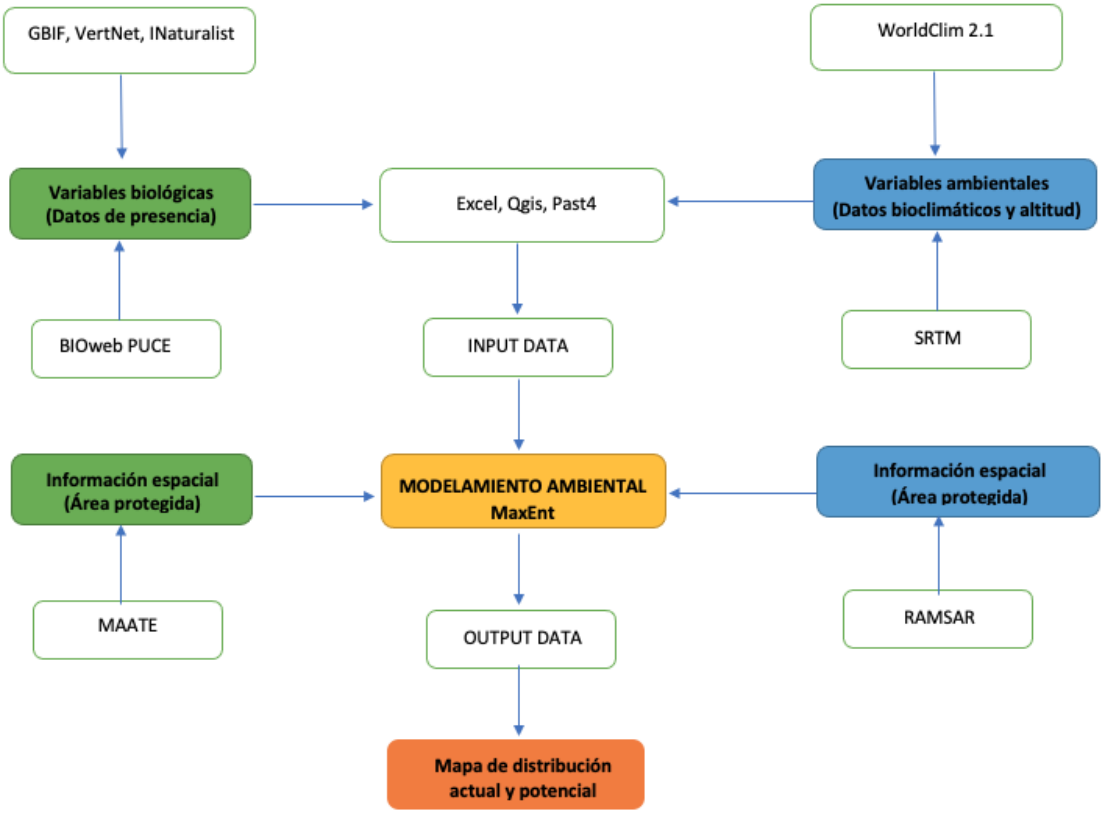
(c) Media idoneidad (0.50 – 0.75), representada en color naranja.

(d) Alta idoneidad (> 0.75), representada en color rojo.

El ráster de idoneidad fue posteriormente procesado en el software QGIS, donde se transformó en curvas de nivel considerando únicamente las áreas clasificadas con "idoneidad alta". Además se tomo en consideración para el analisis, la geoinformación vectorial proporcionada por el Ministerio de Ambiente Agua y Transicion Ecologica (MAATE) que delimita en la zona de estudio, las areas protegidas por el Sistema Nacional de Areas Protegidas (SNAP) y el convenio internacional RAMSAR, este análisis permitió evaluar los cambios en la distribución de *Inia geoffrensis* en función del modelamiento ambiental tanto en el presente como en los escenarios proyectados para evaluar la viabilidad de la especie en el futuro.

La figura 5 muestra el flujo de trabajo desarrollado para la obtencion de la representacion cartografica de las areas de idoneidad baja, media y alta de la especie.

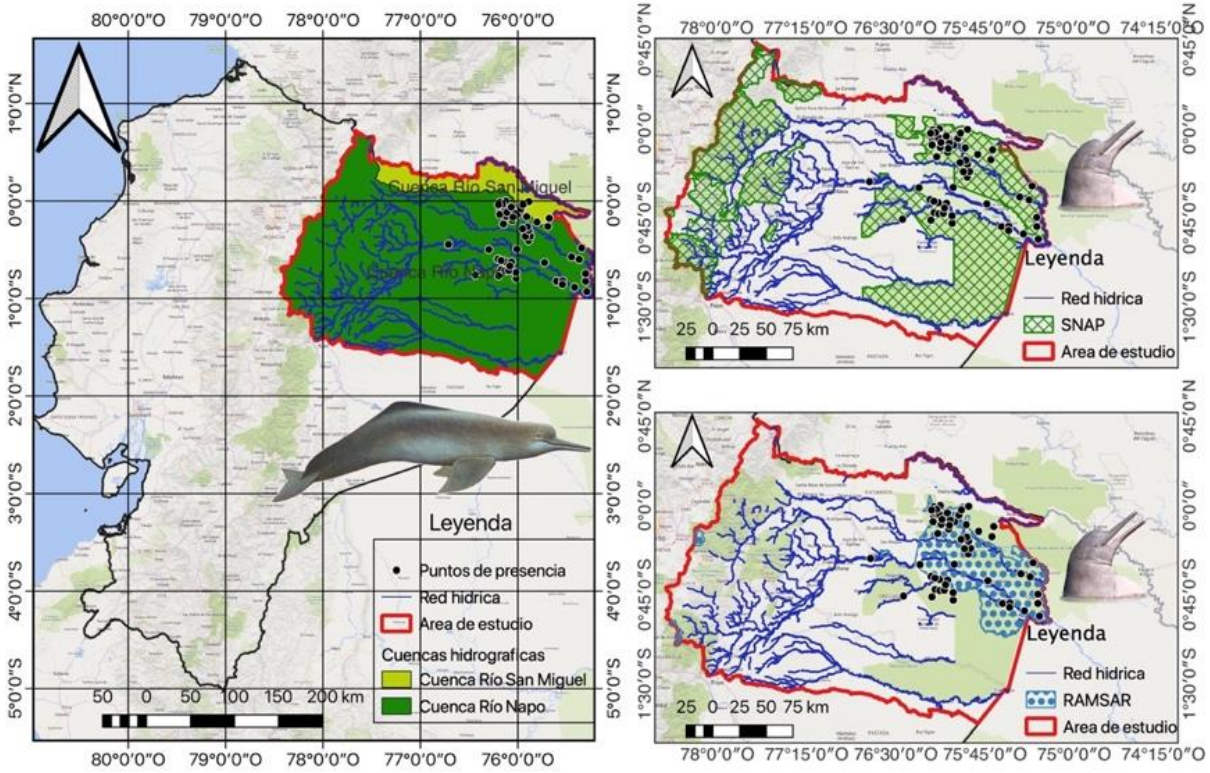
Figura 5. Flujo de trabajo del modelo ambiental.



RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con base en el análisis de los puntos de presencia y la ecología de *Inia geoffrensis*, se establecieron dos unidades hidrológicas funcionales como área de calibración del modelo ambiental: la Cuenca del río Napo y la Cuenca del río San Miguel (figura 6). Dentro de esta región se encuentran importantes zonas protegidas bajo el Sistema Nacional de Áreas Protegidas del Ecuador (SNAP) y la Convención Internacional RAMSAR.

Figura 6. Representación cartografica del área del modelamiento ambiental



Tras el proceso de depuración y limpieza de las variables biológicas, se utilizaron 65 registros georreferenciados de presencia de la especie para el modelamiento. A su vez, las variables ambientales seleccionadas tras el análisis de correlación y relevancia biológica fueron: Bio 2 (“Rango de temperatura promedio diurno”), Bio 4 (“Estacionalidad de la temperatura”), Bio 6 (“Temperatura mínima del mes más frío”), Bio 7 (“Rango anual de temperatura”), Bio 11 (“Temperatura media del trimestre más frío”), Bio 15 (“Estacionalidad de la precipitación”) y Bio 19 (“Precipitación del trimestre más frío”). Estas variables se ingresaron como datos de entrada en el modelo ambiental ejecutado mediante el algoritmo MaxEnt.

Como resultado, el modelo obtuvo un valor AUC de 0.92, lo que indica un alto grado de precisión y ajuste en la predicción de la distribución potencial de *Inia geoffrensis*. Dentro de las variables bioclimáticas empleadas, las que más contribuyeron al modelo fueron Bio 2, Bio 4, Bio 6, Bio 7, Bio 11, Bio 15 y Bio 19, cuyos valores de aportación se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2. Variables ambientales utilizadas en el modelo

Variable Bioclimática	Porcentaje de contribución
Bio 2	5.9
Bio 4	14.4
Bio 6	58.6
Bio 7	0.1
Bio 11	0.8
Bio 15	8.4
Bio 19	11.9

Para el escenario actual, la distribución de *Inia geoffrensis* se determinó a partir de la salida logística del modelo, donde se identificaron áreas de alta, media y baja idoneidad para la especie. En los escenarios futuros, se utilizó el modelo de circulación global (GCM) HadGEM3-GC31-LL, con proyecciones al año 2070, bajo dos rutas socioeconómicas compartidas, SSP 245 (escenario sostenible), plantea un progreso moderado hacia el desarrollo sostenible y SSP 585 (escenario catastrófico), supone un crecimiento económico acelerado con un aumento en el uso de combustibles fósiles. En ambos casos, los modelos predicen la distribución futura de *Inia geoffrensis*, estableciendo áreas de alta, media y baja idoneidad (Figuras 7 y 8).

Figura 7. Cartografía de las áreas de idoneidad presente y futura SSP 245 para *Inia geoffrensis*

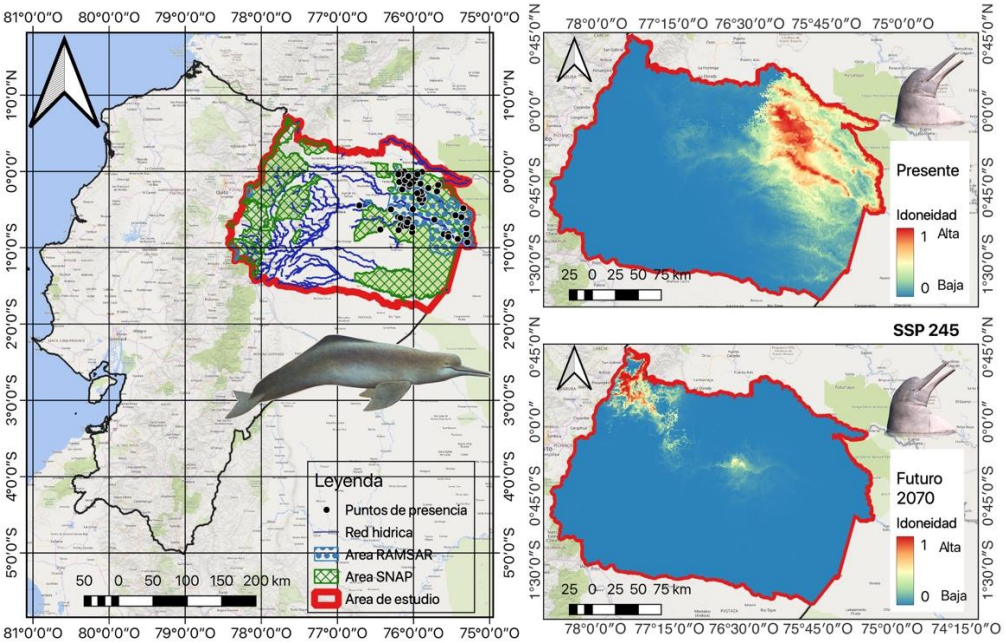
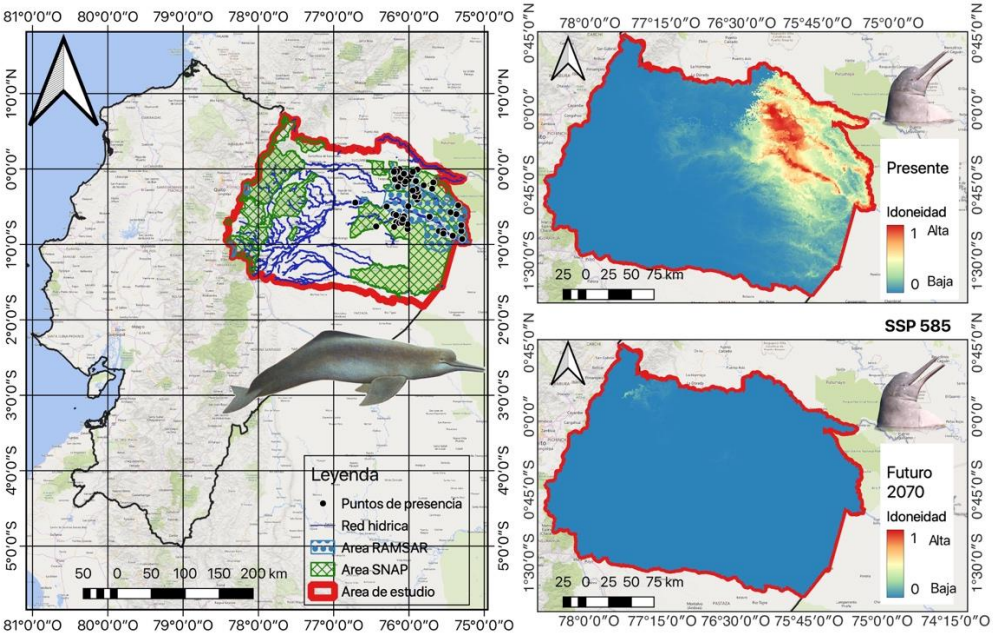


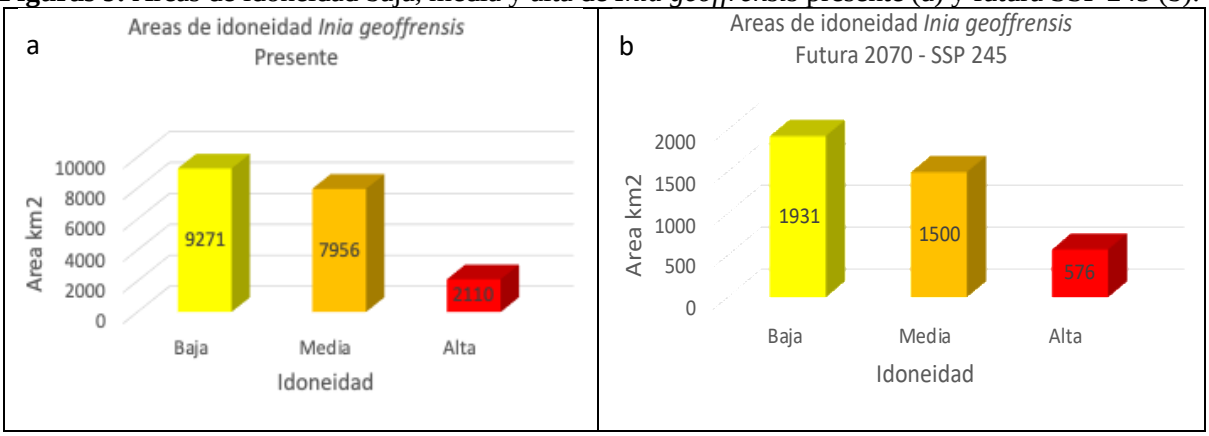
Figura 8. Cartografía de las áreas de idoneidad presente y futura SSP 585 para *Inia geoffrensis*



Tras analizar los resultados del modelamiento ambiental, se observa una notable reducción del área de alta idoneidad para el año 2070, en función de los escenarios proyectados. Actualmente, el modelo indica que *Inia geoffrensis* cuenta con una distribución idónea de aproximadamente 2110 km². Sin embargo, para el escenario sostenible (SSP 245), esta área se reduce en 1534 km², lo que equivale a una pérdida del 72.70%. En el escenario catastrófico (SSP 585), la pérdida es aún más drástica, con una reducción total del 100%, lo que sugiere la desaparición completa de hábitats óptimos para la especie en la región

(Figura 9).

Figuras 9. Áreas de idoneidad baja, media y alta de *Inia geoffrensis* presente (a) y futura SSP 245 (b).



Del analisis realizado en la zona de Sucumbios, podemos apreciar que el area de idoneidad alta modelada en el presente se encuentra mayoriariamente en la parte sureste de la provincia con una extension de 1780.64 km², y el area de idonenidad alta modelada en el futuro (SSP 245) para el año 2070, presenta una area de 540.15 km² lo que equivale una perdida del area de 69.67 % con relacion al area del presente.

Figuras 10. Áreas de idoneidad alta de *Inia geoffrensis* en la provincia de Sucumbios.

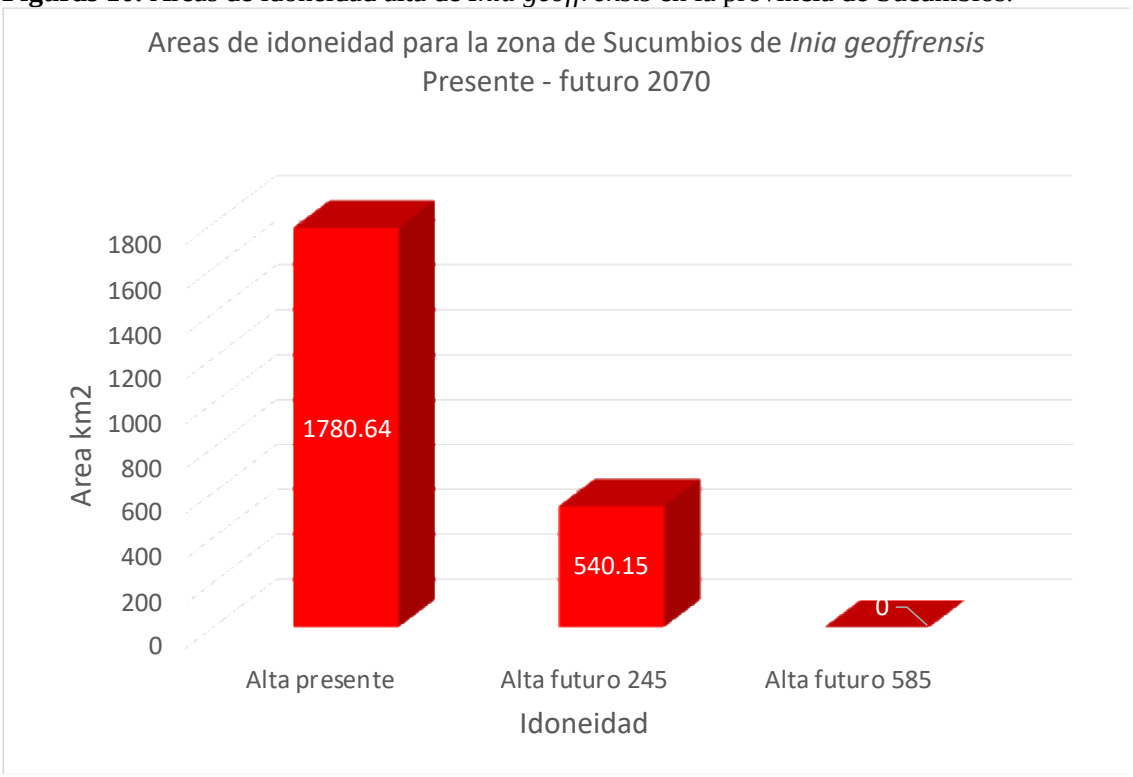
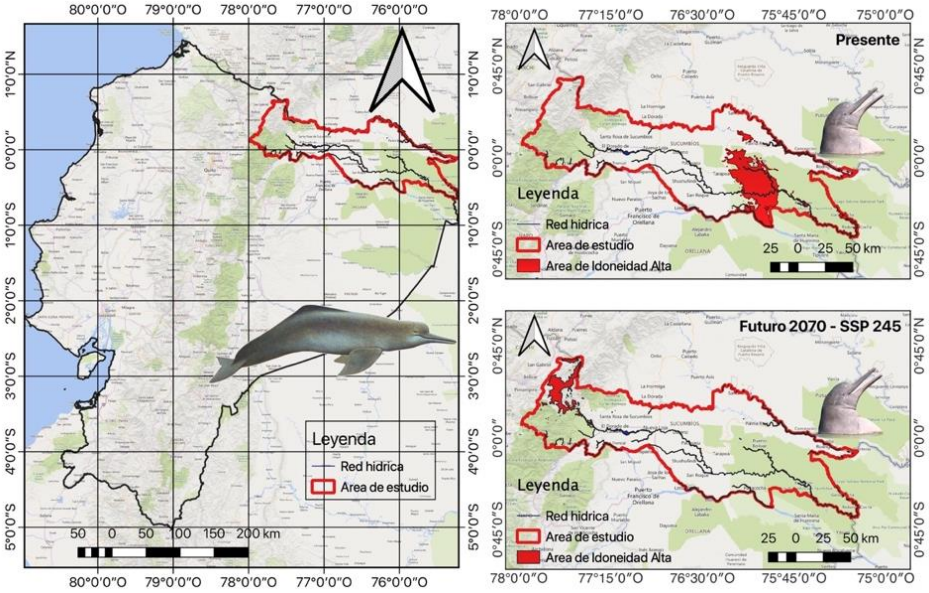
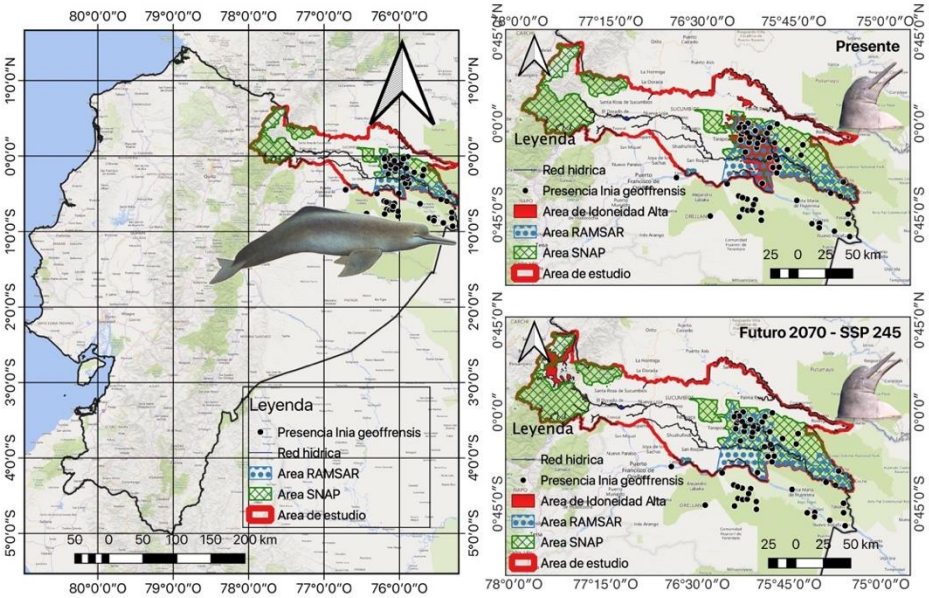


Figura 11. Cartografía de las areas de idoneidad alta SSP 245 para *Inia geoffrensis en Sucumbios*.



En la zona de Sucumbios se encuentran importantes areas protegidas que forman parte del SNAP, como la Reserva de Produccion de Fauna Cuyabeno, el Parque Nacional Cayambe Coca, la Reserva Ecologica Cofan Bermejo y la Reserva Ecologica de Limoncocha, ademas de zonas reconocidas bajo la Convención Internacional RAMSAR, como Cuyabeno-Lagartococha-Yasuni, y Limoncocha, las cuales han insidido en la coservación de la especie.

Figura 11. Cartografía de la zona de Sucumbios y Areas Naturales Protegidas en su perímetro.



CONCLUSIONES

Los resultados de esta investigación evidencian la significativa vulnerabilidad de *Inia geoffrensis* ante los efectos del cambio climático, particularmente en la provincia de Sucumbíos, Ecuador. La

modelación de nicho ecológico mediante MaxEnt ha demostrado que las variables más influyentes en la distribución de la especie son la temperatura mínima del mes más frío y la estacionalidad de la temperatura, lo que sugiere que los cambios térmicos futuros tendrán un impacto directo en su hábitat.

Bajo el escenario SSP 245, se proyecta una reducción del 72.7% del área de idoneidad alta para la especie, mientras que bajo el escenario SSP 585, su desaparición es total. Dentro de los límites de la provincia de Sucumbíos, el hábitat altamente adecuado disminuiría en un 69.67% para el año 2070. Estos datos resaltan la necesidad urgente de implementar estrategias de conservación efectivas.

Las áreas protegidas actuales, como la Reserva de Producción de Fauna Cuyabeno y el Parque Nacional Cayambe Coca, desempeñan un papel crucial en la protección de la especie. No obstante, los resultados sugieren que dichas zonas podrían no ser suficientes para garantizar la supervivencia de *Inia geoffrensis* a largo plazo, por lo que es fundamental fortalecer las políticas de manejo y protección.

Este estudio subraya la importancia del modelado de nicho ecológico como una herramienta clave para la planificación de la conservación de especies vulnerables. La información generada servirá como base para futuras investigaciones y la toma de decisiones orientadas a minimizar los efectos del cambio climático sobre *Inia geoffrensis* y otros organismos que dependen de los ecosistemas fluviales amazónicos.

Se recomienda el monitoreo constante de la especie para evaluar los cambios en su distribución y abundancia, así como la integración de medidas de mitigación y adaptación al cambio climático dentro de los planes de conservación. Además, es necesario fomentar la cooperación entre instituciones científicas, comunidades locales y organismos gubernamentales para la implementación de estrategias basadas en ciencia y sustentabilidad ambiental.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barrera, L., & Morejón, J. (2011). Cambio climático y biodiversidad en Ecuador. Quito: Ministerio del Ambiente del Ecuador.

Best, R. C., & da Silva, V. M. F. (1993). Morphology and growth of the Amazon river dolphin Inia geoffrensis (Cetacea: Iniidae). Mammalia, 57(1), 139-152.

Caballero, S., Trujillo, F., Vianna, J., Barrios-Garrido, H., Montiel-Villalobos, M. G., Beltrán-Pedreros, S., ... & Santos, M. C. (2017). Taxonomic revision of the genus Inia and the description of a

new species of river dolphin from Brazil. Marine Mammal Science, 33(4), 1002-1027.

Cowie, R. H., Bouchet, P., & Fontaine, B. (2022). The Sixth Mass Extinction: fact, fiction or speculation? Biological Reviews, 97(1), 640-663.

Elith, J., Phillips, S. J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y. E., & Yates, C. J. (2006). A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. Diversity and Distributions, 17(1), 43-57.

Gravena, W., da Silva, V. M. F., da Silva, M. N. F., Gatesy, J., & Schneider, H. (2015). Molecular diversity and phylogenetic relationships among Amazon and Orinoco river dolphins (Inia spp.). Marine Mammal Science, 31(2), 615-639.

Grose, M. R., Narsey, S., Brown, J. R., Erwin, T., & Moise, A. F. (2020). Climate projections for the Pacific region under CMIP6. Earth System Dynamics, 11(1), 627-648.

Gutiérrez, G., & Trejo, I. (2014). El papel del clima en la distribución de especies. Revista Mexicana de Biodiversidad, 85(1), 98-112.

Hrbek, T., da Silva, V. M. F., Dutra, N., Gravena, W., Martin, A. R., & Farias, I. P. (2014). A new species of river dolphin from Brazil or: How little do we know our biodiversity. PLoS ONE, 9(1), e83623.

IPCC (2022). Sexto Informe de Evaluación del Cambio Climático. Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático.

Kamilar, J. M., & Tecot, S. R. (2016). Climate and trait evolution in primates: A phylogenetic comparative analysis of life history variability. Scientific Reports, 6, 25607.

Levinsky, I., Skov, F., Svenning, J. C., & Rahbek, C. (2007). Potential impacts of climate change on the distributions and diversity patterns of European mammals. BMC Ecology, 7(1), 22.

Lobo, J. M., Jiménez-Valverde, A., & Hortal, J. (2010). The uncertain nature of absences and their importance in species distribution modeling. Ecography, 33(1), 103-114.

O'Neill, B. C., Kriegler, E., Riahi, K., Ebi, K. L., Hallegatte, S., Carter, T. R., ... & van Vuuren, D. P. (2017). The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. Global Environmental Change, 42, 169-180.

Pérez Muñoz, C. (2014). Cambio climático y sus impactos en la biodiversidad. Revista de Ecología y Conservación, 12(2), 78-93.

Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. Ecological Modelling, 190(3-4), 231-259.

Riahi, K., Van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., ... & Tavoni, M. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. Global Environmental Change, 42, 153-168.

Rodríguez, J. P. (2011). Modelos de distribución de especies y cambio climático. Ecología Aplicada, 10(1), 85-98.

Swets, J. A. (1988). Measuring the accuracy of diagnostic systems. Science, 240(4857), 1285-1293.

Toranza, C. (2011). MaxEnt: una herramienta para modelar la distribución de especies. Revista de Biología Tropical, 59(4), 1323-1331.

Warren, D. L., Wright, A. N., Seifert, S. N., & Shaffer, H. B. (2013). Incorporating model complexity and spatial sampling bias into ecological niche models of climate change risks faced by 90 California vertebrate species. Diversity and Distributions, 20(4), 334-343.