



Publicación Semestral. Vol. 3, No 2, julio-diciembre 2024, Ecuador (p. 1-19). Edición continua

MODELAMIENTO AMBIENTAL DE LA DISTRIBUCIÓN ACTUAL Y POTENCIAL DE *Atelopus bomolochos*, Peters, 1973, BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN ECUADOR

Edison Roberto Suntasig Negrete^{1*}, Nancy Fernanda Fajardo Sarmiento¹, Doris Marisol Sarmiento Castro¹, Juan Carlos Caicedo Ballesteros²

¹Universidad Estatal Amazónica, Facultad de Ciencias de la Vida, Biología, Puyo, Pastaza, Ecuador.

²Universidad Nacional de Chimborazo, Ingeniería Ambiental, Riobamba, Chimborazo, Ecuador

*Dirección para correspondencia: esuntasig@uea.edu.ec

Fecha de Recepción: 25-04-2024

Fecha de Aceptación: 30-05-2024

Fecha de Publicación: 16-07-2024

Resumen

El cambio climático y las presiones antrópicas representan los principales riesgos para la biodiversidad y el desarrollo humano, Ecuador al ser uno de los países megadiversos no es ajeno a esa realidad. Su posición geográfica, corrientes oceánicas y la cordillera de los Andes, crea una gran diversidad de nichos ecológicos que necesitan ser estudiados y evaluados para enfrentar esta problemática. En esta investigación se efectuó la distribución actual y potencial de *Atelopus bomolochos* bajo escenarios del cambio climático en Ecuador, con el fin de contar con información científica que permite analizar el grado de adaptabilidad de la especie y determinar sus nuevas áreas de idoneidad para su desarrollo. El estudio y la conservación de *Atelopus bomolochos*, al ser una especie catalogada en peligro crítico y endémica de Ecuador, es de gran interés e importancia. En el presente trabajo se utilizaron 58 puntos de ocurrencia georreferenciados de la especie y 6 variables bioclimáticas actuales y proyectadas a escenarios futuros para el año 2070, según los nuevos criterios de las rutas socioeconómicas compartidas SSP 245 y SSP 585. En el modelamiento ambiental se utilizó el algoritmo de máxima entropía (MaxEnt), obteniendo un buen desempeño del modelo con un valor de AUC de 0.94, determinando así, las áreas de idoneidad y el rango altitudinal actuales y futuras de la especie. En las áreas de idoneidad alta en el año 2070 se observa una reducción en los escenarios futuros, así para el SSP 245 hay una reducción del 57.48% y para el SSP 585 es de 45.47%, en cuanto a su distribución altitudinal. La especie está migrando a elevaciones mayores, producto de las condiciones climáticas proyectadas al futuro, así en el presente se la encuentra a 3189 msnm, para el año 2070 en el escenario SSP 245 a 3414 msnm y para el escenario SSP 485 a 3468 msnm.

Palabras clave: Cambio climático, modelamiento, MaxEnt, *Atelopus bomolochos*.

IDs Orcid:

Edison Roberto Suntasig Negrete: <https://orcid.org/0000-0002-4908-6795>

Nancy Fernanda Fajardo Sarmiento: <https://orcid.org/0009-0004-7443-6015>

Doris Marisol Sarmiento Castro: <https://orcid.org/0009-0005-4687-6416>

Juan Carlos Caicedo Ballesteros: <https://orcid.org/0000-0002-0624-2073>

Artículo científico: Modelamiento ambiental de la distribución actual y potencial de *Atelopus bomolochos*, Peters, 1973, bajo escenarios de cambio climático en Ecuador.

Publicación Semestral. Vol. 3, No 2, julio-diciembre 2024, Ecuador (p. 1-19)

ENVIRONMENTAL MODELING OF THE CURRENT AND POTENTIAL DISTRIBUTION OF *ATELOPUS BOMOLOCHOS*, PETERS, 1973, UNDER CLIMATE CHANGE SCENARIOS IN ECUADOR

Abstract

Climate change and anthropic pressures represent the main risks to biodiversity and human development, Ecuador, being one of the megadiverse countries, is no stranger to this reality. Its geographical position, ocean currents and the Andes mountain range create a great diversity of ecological niches that need to be studied and evaluated to face this problem. In this research, the current and potential distribution of *Atelopus bomolochos* under climate change scenarios in Ecuador was carried out, in order to have scientific information that allows analyzing the degree of adaptability of the species and determining its new areas of suitability for its development. The study and conservation of *Atelopus bomolochos*, being a critically endangered species and endemic to Ecuador, is of great interest and importance. In the present work, 58 georeferenced points of occurrence of the species and 6 current bioclimatic variables projected to future scenarios for the year 2070 were used, according to the new criteria of the shared socioeconomic routes SSP 245 and SSP 585. In the environmental modeling, the maximum entropy algorithm (MaxEnt) was used, obtaining a good performance of the model with an AUC value of 0.94, thus determining the areas of suitability and the current and future altitudinal range of the species. In the areas of high suitability in the year 2070 a reduction is observed in future scenarios, so for SSP 245 there is a reduction of 57.48% and for SSP 585 it is 45.47%, in terms of its altitudinal distribution. The species is migrating to higher elevations, as a result of the climatic conditions projected into the future, so at present it is found at 3189 meters above sea level, for the year 2070 in the SSP scenario 245 at 3414 meters above sea level and for the SSP scenario 485 at 3468 meters above sea level.

Keywords: Climate change, modeling, MaxEnt, *Atelopus bomolochos*.

1. INTRODUCCIÓN

El clima y los cambios abruptos en los patrones de precipitación y temperatura global junto con el cambio en el uso del suelo y la sobreexplotación de recursos naturales reducirán significativamente la resiliencia de ecosistemas, biodiversidad y servicios ecosistémicos a lo largo de este siglo (IPCC, 2023; Weiskopf et al., 2020). El cambio climático global las obliga a modificar sus áreas de distribución natural (Olano & Peralta, 2001). La distribución de las especies no es aleatoria, sino que depende de su interacción y capacidad de tolerancia a factores ambientales como altitud, topografía, temperatura, precipitación y humedad (Urban, 2015). El IPCC ha advertido que los cambios abruptos en los patrones de precipitación y temperatura global, junto con el cambio en el uso del suelo y la sobreexplotación de recursos naturales, reducirán significativamente la resiliencia de ecosistemas, biodiversidad y servicios ecosistémicos a lo largo de este siglo. El Sexto Informe de Evaluación del IPCC (2022) destaca la urgente necesidad de tomar medidas para enfrentar los riesgos del cambio climático, que incluyen olas de calor, sequías, inundaciones, pérdida de vidas, biodiversidad. En las últimas décadas se ha evidenciado en todo el mundo, cambios en la distribución natural de las especies, cambio en sus hábitats y sistemas ecológicos, resultado del cambio climático (WWF, 2020). Ecuador, a causa de su posición geográfica, condiciones climáticas, de relieve, económicas y sociales, es un país con alta vulnerabilidad al cambio climático, lo cual condiciona en gran medida el grado de adaptación a esta problemática (Azócar et al., 2021). El incremento de la población humana, la deforestación, la explotación excesiva y el creciente impacto climático, representan una creciente amenaza para la biodiversidad (Bellard et al., 2012). Los anfibios son las especies más sensibles en los cambios del clima, sus poblaciones han sufrido un declive alarmante a causa del cambio climático, en total la evaluación realizada por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN), estiman que el 41% de todos los anfibios están en un alto riesgo de extinción, proporción muy relevante en comparación con otras especies como las aves (14%) y los mamíferos (26%), actualmente se han convertido en el emblema de la actual crisis de extinción masiva (Valencia, 2021). Ecuador es uno de los 17 países más megadiversos en el planeta, y a nivel de anfibios, ocupa el cuarto lugar en el mundo (650 especies, 312 endémicas), después de Brasil, Colombia y Perú. Sin embargo, entre estos países megadiversos, Ecuador es el más diverso si se considera su número de especies por

Artículo científico: Modelamiento ambiental de la distribución actual y potencial de *Atelopus bomolochos*, Peters, 1973, bajo escenarios de cambio climático en Ecuador.

Publicación Semestral. Vol. 3, No 2, julio-diciembre 2024, Ecuador (p. 1-19)

unidad de superficie (0.002 sp por km²). Es decir, Ecuador alberga en su territorio 3 veces más sp por km² que Colombia y 21 veces más que Brasil (Freile et al., 2020).

Atelopus es un género de anfibios muy representativo del Neotrópico, con 99 especies descritas y alrededor de 29 aún por describir. A pesar de esto, el género está al borde de la extinción. Las ranas arlequín, pertenecientes a este género, se encuentran en 11 países de Centro y Sudamérica (Valencia, 2021). A pesar de su importancia biológica, ecológica y cultural, un alarmante número de especies de *Atelopus* está en peligro. Actualmente, el 83% de las 94 especies evaluadas por la UICN (2021) están globalmente amenazadas, el 73% están en declive y se estima que hasta el 90% podrían estar en alto riesgo de extinción. La mayoría de las especies de *Atelopus* son microendémicas con poblaciones muy reducidas en áreas restringidas, frecuentemente en ecosistemas montañosos. Esto, junto con sus etapas de vida acuática, las hace especialmente vulnerables a amenazas como enfermedades infecciosas, pérdida y degradación del hábitat, especies invasoras, colección ilegal, contaminación y cambio climático (UICN, 2021).

El cambio climático afecta la distribución de anfibios, bioindicadores clave en los ecosistemas debido a su sensibilidad ambiental, estudios documentan reducciones en su distribución natural (Scotford & Marshall, 2023). Modelos de nicho, utilizando algoritmos matemáticos (Lobo et al., 2010). variables ambientales, estiman su distribución potencial. Algoritmos incluyen GAM, GLM, Grap, Bioclim, Domain y MaxEnt. Sin embargo, varias publicaciones señalan que MaxEnt es uno de los métodos más eficaces para el modelado de nicho (Toranza, 2011; Elith et al., 2006; Hernández et al., 2006). Dentro de sus aplicaciones más importantes pueden mencionarse: detección de nuevas áreas de distribución (Pearson et al., 2007), predicción de invasiones (Ward, 2007), aportes al diseño de planes de conservación (Ferrier, 2002) o estudios sobre impactos potenciales del cambio climático (Levinsky et al., 2007).

Aunque varias especies de *Atelopus* son coloridas y carismáticas, pocas han sido estudiadas en detalle. La ecología, el comportamiento y el estado actual de las poblaciones de la mayoría de estas especies siguen siendo poco conocidos. Muchas especies no han sido vistas en años, numerosas localidades no han sido visitadas recientemente y algunas especies solo se conocen por colecciones de hace varias décadas. En Ecuador, la especie *Atelopus bomolochos* está en peligro crítico debido a diversas amenazas, incluyendo la contaminación en sus áreas de distribución, lo que ha causado una disminución constante de sus poblaciones. En este contexto, el objetivo de esta investigación es modelar la distribución actual y potencial de

Atelopus bomolochos, Peters, 1973, bajo escenarios de cambio climático en Ecuador. Esto proporcionará información científica actualizada que contribuirá a futuros trabajos de conservación de esta especie, fundamental para el mantenimiento y preservación de la biodiversidad en nuestro país.

2. METODOLOGÍA

2.1 Área de estudio

La investigación se realizó en la parte continental de Ecuador, excluyendo las Islas Galápagos por la ausencia de anfibios nativos. Ecuador, con 283.791 km² y altitudes de 0 a 6300 m.s.n.m., presenta un gradiente de temperatura de 0 a 26°C y cuatro regiones geográficas: Costa, Sierra, Oriente e Insular. Estas regiones tienen climas diversos, incluyendo tropical, subtropical, templado, subtemplado y de páramo. Ecuador posee dos cuencas hidrográficas, la Pacífica y la Amazónica, y cuenta con 91 ecosistemas terrestres. A pesar de su tamaño, Ecuador es megadiverso, albergando aproximadamente el 10% de las especies de plantas y animales del mundo (Proaño-Morales et al., 2022). La cordillera de los Andes influye significativamente en su clima, con dos estaciones definidas: una lluviosa, con precipitaciones anuales de hasta 4000 mm en el norte, y una seca, con mínimas de 250 mm al año en la península de Santa Elena (Varela y Ron, 2018). La temperatura promedio durante la estación seca varía entre 23 y 24°C. Estas características hacen de Ecuador un lugar único para estudios ecológicos y biológicos (MAATE, 2023).



Figura 1. Área de estudio Ecuador continental.

Artículo científico: Modelamiento ambiental de la distribución actual y potencial de *Atelopus bomolochos*, Peters, 1973, bajo escenarios de cambio climático en Ecuador.

Publicación Semestral. Vol. 3, No 2, julio-diciembre 2024, Ecuador (p. 1-19)

2.2 Especie objeto de estudio *Atelopus bomolochos*, Peters, 1973.

Las ranas arlequín ocupan una amplia gama de hábitats, desde bosques húmedos tropicales hasta regiones montañosas y páramos en altitudes que van desde el nivel del mar hasta los 4.800 metros. La mayoría de las especies de *Atelopus* prefieren altitudes superiores a 1.500 metros, con algunas especies restringidas a altitudes por encima de los 3.000 metros, un ambiente donde los anfibios tienden a ser menos comunes (Stuar et al., 2004; Young et al., 2001). Según la información de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza, *Atelopus bomolochos* está catalogada como "peligro crítico", lo que la hace especialmente vulnerable al cambio climático y podría afectar su viabilidad en el futuro.

2.3 Modelamiento Ambiental

2.3.1 Primera etapa: recopilación y análisis de las variables biológicas y ambientales.

Se seleccionó la variable biológica basándose en su importancia para la conservación y su estado de peligro de extinción según la UICN. Los registros de presencia de la especie *Atelopus bomolochos* se recopilaron de varias plataformas digitales, incluyendo GBIF con 78 datos, VertNet con 61 datos, iNaturalist con 3 datos y la Bioweb Ecuador de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador con 154 datos, sumando un total de 296 datos desde 1981 hasta 1991. Estos datos están georreferenciados al sur del callejón interandino nacional, como se muestra en la figura 2.



Figura 2. Puntos de presencia de *Atelopus bomolochos*.

Fuente: Bioweb Ecuador, (2022)

Las variables ambientales se obtuvieron de la plataforma digital WorldClim, datos climáticos versión 2.1, la cual proporciono 19 variables bioclimáticas y de altitud (tabla 1) de condiciones actuales y futuras, con una resolución de 1km² (30 arcsec), los datos corresponden a información de la combinación de las variables de temperatura y precipitación en diferentes épocas del año y a proyecciones de mediano y largo plazo (1970-2000) de estaciones meteorológicas de todo el planeta (Hijmans et al., 2017).

Tabla 1. Variables bioclimáticas de la plataforma WorldClim 2.1

| ID | Variable |
|---------------|--|
| Bio 1 | Temperatura Media Anual |
| Bio 2 | Intervalo medio diurno (media mensual (tm _m áxima - tm _m ínima)) |
| 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 Cuarto 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 |
| Alt | Altitud |

Nota. Adaptado de o tomado de. **Fuente:** WorldClim. (2022)

Artículo científico: Modelamiento ambiental de la distribución actual y potencial de *Atelopus bomolochos*, Peters, 1973, bajo escenarios de cambio climático en Ecuador.

Publicación Semestral. Vol. 3, No 2, julio-diciembre 2024, Ecuador (p. 1-19)

Se emplearon proyecciones climáticas del CMIP6 para los escenarios futuros, utilizados también por el IPCC en su sexto informe (IPCC, 2022). Estos modelos simulan cómo nuestras emisiones de gases de efecto invernadero afectarán el clima en el futuro (Eyring et al., 2016) e incluyen las Rutas Socioeconómicas Compartidas (SSP) (Grose et al., 2020). Para reducir la escala y corregir sesgos, se utilizó WorldClim v2.1 como referencia climática para obtener las variables bioclimáticas proyectadas. Los SSP, mostrados en la figura 3, son complementarios a las concentraciones de gases de efecto invernadero (RCP) y consideran los cambios socioeconómicos en el próximo siglo. Estos escenarios son: SSP1 - 2.6 "Sostenibilidad", enfocado en el crecimiento sostenible y la igualdad (bajas emisiones, aumento de temperatura de 1,7-1,8 °C); SSP2 - 4.5 "Mitad del camino", con progreso lento hacia objetivos sostenibles (emisiones promedio, aumento de temperatura de 2,5-2,7 °C); SSP3 - 7.0 "Rivalidad regional", con mayor desigualdad (altas emisiones, aumento de temperatura de 3,8-4,2 °C); y SSP5 - 8,5 "Desarrollo alimentado por combustibles fósiles", con crecimiento económico rápido y altas emisiones (aumento de temperatura de 5,1 °C) (O'Neill et al., 2017; Riahi et al., 2017).

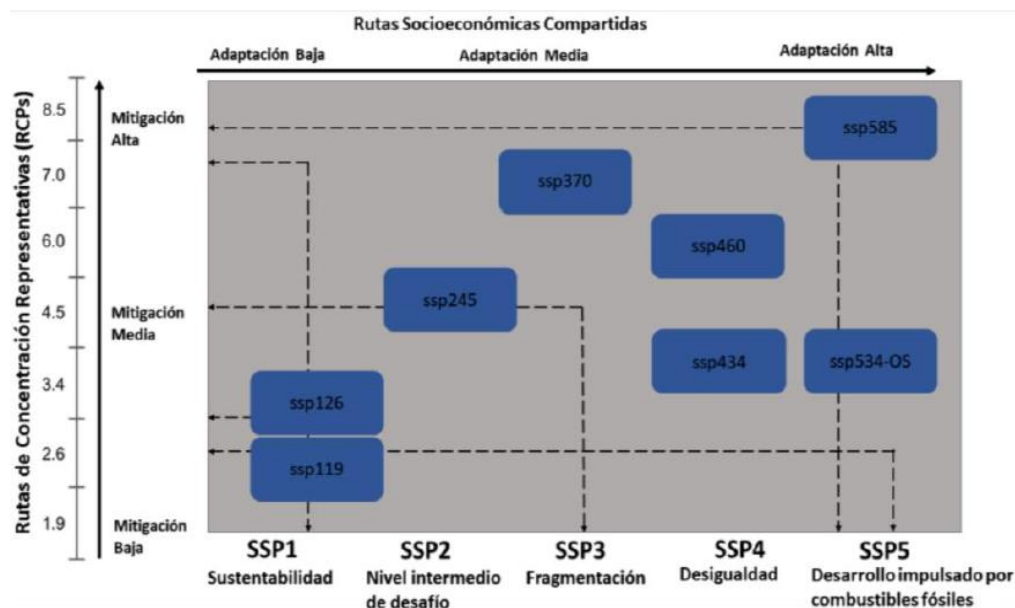


Figura 3. Escenarios (SSP), que resultan de la combinación de una Ruta Socioeconómica Compartida (SSP), y una Ruta de Concentración Representativa (RCP) que indica el forzamiento radiactivo esperado (W/m²). **Fuente:** Reyes *et al.*, (2021)

Para esta investigación se utilizó el modelo global de circulación (GCM) actual HadGEM3-GC31-LL desarrollado por Met Office Hadley Center (Reino Unido) y por el Instituto Nacional de Investigación de Espacios (Brasil), que muestra como tendencia general para la región

ecuatorial de Suramérica un aumento en las precipitaciones y una disminución en los periodos de verano, en áreas con regímenes estacionales delimitados, recientemente Schivo y colaboradores utilizaron el MCG HadGEM2-ES, para modelar distribución y riqueza de anfibios bajo diferentes escenarios de cambio climático en Brasil (Schivo et al., 2019), por lo que se consideró el GCM actual idóneo para representar las condiciones de escenarios futuros del modelo ambiental en las rutas socioeconómicas SSP 245 y SSP 585 para el año 2070.

2.3.2 Segunda etapa: Limpieza, depuración y optimización de las variables biológicas y ambientales.

Las variables biológicas se organizaron en Excel, conservando únicamente las columnas de especie, longitud y latitud necesarias para correr el modelo. Se realizó una limpieza de los datos de presencia, eliminando registros con las mismas coordenadas geográficas o sin coordenadas. Con QGIS, se identificaron los puntos de presencia en una misma celda de píxel, seleccionando un registro por celda (un dato de presencia por kilómetro cuadrado) para reducir los efectos de la correlación espacial (Kamilar & Tecot, 2016).

Las variables ambientales se procesaron en el QGIS para extraer los valores de las 19 variables bioclimáticas de acuerdo a los puntos de presencia y mediante el software estadístico Past4 se realizó un análisis de correlación de Pearson para eliminar las variables altamente correlacionadas con un coeficiente mayor a 0.80 (Jane et al., 2010; Wan et al., 2017), se seleccionaron las variables poco correlacionadas y de alto valor biológico en la ecología de la especie para ser utilizadas en el modelamiento de distribución actual y futuro. Finalmente, las variables ambientales resultantes se recortaron al límite del área de estudio (Ecuador), con la misma proyección, resolución y número de celdas en “x” y en “y” en sus propiedades.

2.3.3 Tercera etapa: Construcción del modelo ambiental actual y potencial, bajo escenarios de cambio climático.

El modelo ambiental se realizó en base al algoritmo de máxima entropía del software MaxEnt, el cual fue desarrollado por el Centro para la Biodiversidad y Conservación del Museo Americano de Historia Natural (AMNH) por Philips y colaboradores, como data de entrada (INPUT), se utilizó las variables biológicas, datos de ocurrencia de la especie en formato de

Artículo científico: Modelamiento ambiental de la distribución actual y potencial de *Atelopus bomolochos*, Peters, 1973, bajo escenarios de cambio climático en Ecuador.

Publicación Semestral. Vol. 3, No 2, julio-diciembre 2024, Ecuador (p. 1-19)

archivo separado por comas (extensión .csv) y las variables ambientales, datos bioclimáticos en formato ASCII (extensión .asc) (Phillips, Aneja, Kang, & Arya, 2006).

El modelo se ejecutó en base a la configuración predeterminada del software MaxEnt, con excepción de la activación de las opciones de “Create response curves” y “Do jackknife”, necesarias para analizar la importancia de las variables ambientales utilizadas en el modelo, además se verificó el rendimiento del modelado observando los resultados del área bajo la curva (AUC), que es la relación entre la sensibilidad y especificidad del modelo que varía de 0 a 1, donde los valores próximos a 1, indican un alto desempeño y los valores menores a 0.5, muestran un bajo desempeño del modelo, categorizándolos de la siguiente manera, “excelente” 0.90-1.00; “bueno” 0.80-0.90; “medio” 0.70-0.80; “pobre” 0.60-0.70. (Allouche et al., 2006; Araujo et al., 2005; Swets, 1988).

Se determinó las áreas de idoneidad mediante los resultados (OUTPUT) para el presente y los escenarios obtenidos de MaxEnt, el cual proporciona un ráster con valores de píxeles de 0 a 1, clasificándolos en cuatro categorías, (a) ausencia (< 0.25), que incluyó áreas de idoneidad nula que se codificó en color celeste; (b) $0.25 - 0.50$, áreas de idoneidad baja de hábitat que se codificó con el color amarillo; (c) $0.50 - 0.75$, áreas de idoneidad media de hábitat que se codificó con el color naranja; (d) > 0.75 , áreas de alta idoneidad de hábitat que se codificó con el color rojo (Merow et al., 2013; Yan et al., 2017).

El ráster de idoneidad fue procesado en el software QGIS, transformando la idoneidad en curvas de nivel, tomando en cuenta solo los valores de idoneidad media y alta para determinar los cambios en las áreas de distribución de *Atelopus bomolochos* en el modelado ambiental del presente y del futuro.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Modelamiento ambiental

Se utilizaron 58 datos de ocurrencias georreferenciadas de la especie estudiada después de depurar y limpiar las variables biológicas. Se seleccionaron las siguientes variables ambientales tras un análisis de correlación: temperatura media anual (Bio 1), rango de temperatura promedio diurno (Bio 2), isothermalidad (Bio 3), estacionalidad de la temperatura (Bio 4), precipitación anual (Bio 12) y estacionalidad de la precipitación (Bio 15). Estas variables se emplearon en el modelado actual y potencial utilizando el algoritmo MaxEnt. El resultado del modelamiento mostró un AUC de 0.94, indicando un ajuste significativamente alto. Las

variables bioclimáticas más influyentes en el modelo fueron Bio 1, Bio 2, Bio 3, Bio 4, Bio 12 y Bio 15, como se detalla en la tabla 2.

Tabla 2. Variables ambientales utilizadas en el modelo

| Variable Bioclimática | Porcentaje de contribución |
|-----------------------|----------------------------|
| Bio 1 | 67.2% |
| Bio 2 | 11.2% |
| Bio 3 | 12.3% |
| Bio 4 | 3.3% |
| Bio 12 | 1.4% |
| Bio 15 | 0.8% |

Nota: Datos tomados de MaxEnt (2022).

Para el escenario actual, la distribución probable de *Atelopus bomolochos*, está determinada por la salida logista del modelo en la cual se puede observar las áreas de idoneidad de la especie alta, media y baja (Figura 4).

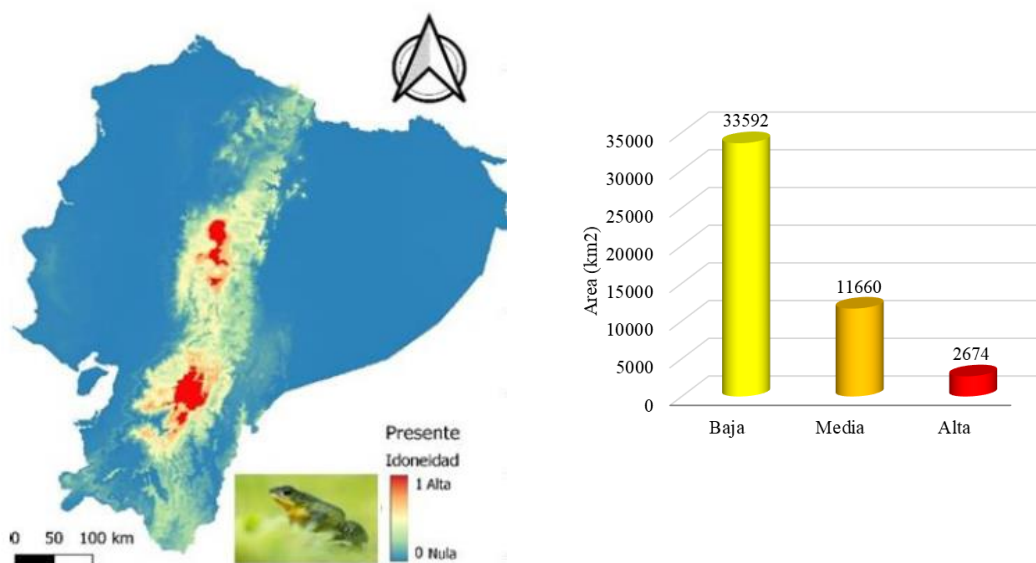


Figura 4. Áreas de idoneidad para el presente de *Atelopus bomolochos*.

En el proceso de modelamiento para escenarios futuros se tomaron en consideración el modelo de circulación global (GCM) HadGEM3-GC31-LL proyectado al año 2070, que para la ruta socioeconómica compartida (SSP) 245, que establece un progreso lento hacia el logro de los objetivos de desarrollo sostenible, dio como resultado las áreas de idoneidad de la especie alta, media y baja (Figura 5).

Artículo científico: Modelamiento ambiental de la distribución actual y potencial de *Atelopus bomolochos*, Peters, 1973, bajo escenarios de cambio climático en Ecuador.

Publicación Semestral. Vol. 3, No 2, julio-diciembre 2024, Ecuador (p. 1-19)

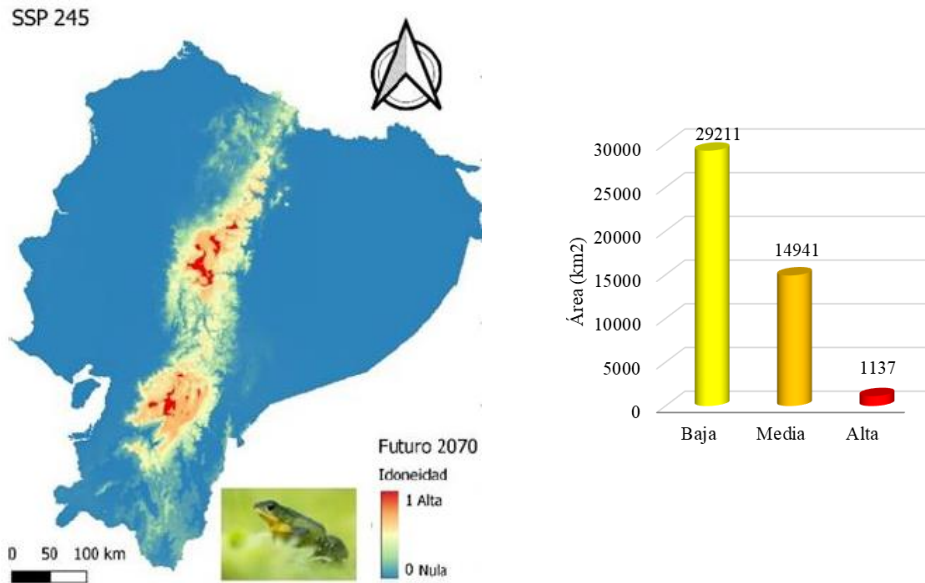


Figura 5. Áreas de idoneidad el desarrollo de *Atelopus bomolochos*, para el futuro SSP245 año 2070.

Para la ruta socioeconómica compartida (SSP) 585, que establece un escenario catastrófico gobernado por el desarrollo económico e incremento del uso de combustibles fósiles, dio como resultado las áreas de idoneidad de la especie alta, media y baja (Figura 6).

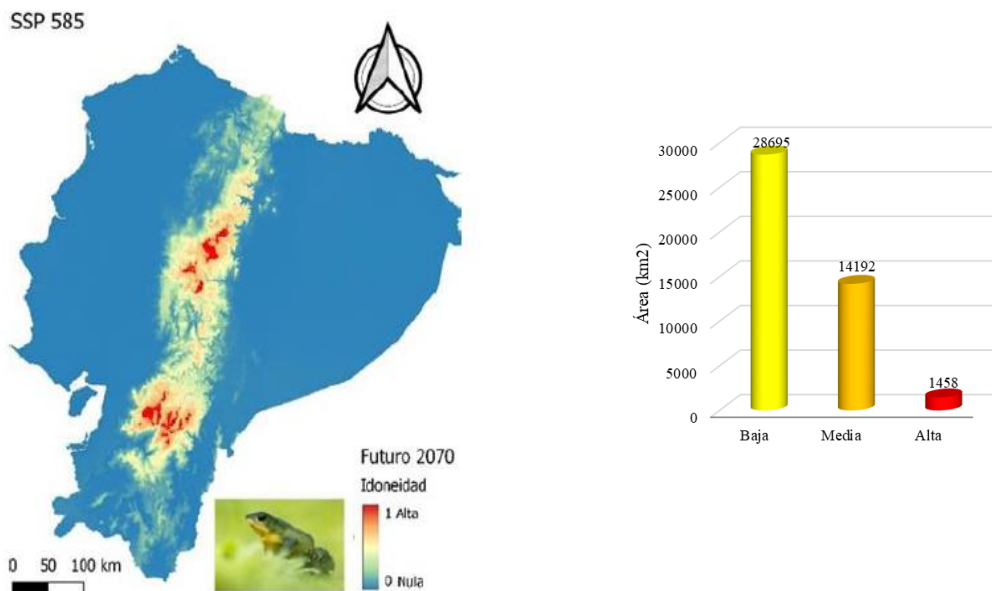


Figura 6. Áreas de idoneidad para el futuro SSP 585 año 2070 de *Atelopus bomolochos*.

De acuerdo con los resultados del modelamiento se puede evidenciar una reducción de las áreas de idoneidad baja (color amarillo en el mapa) proyectadas al año 2070 del 13.04% en el escenario SSP 245 y una disminución del 14.58% en el escenario SSP 585, con un aumento del 1.54% entre

escenarios. En las áreas de idoneidad media (color naranja en el mapa) para el SSP 245 hay aumento del 28.14% y para el SSP 585 es de 21.72%, con una disminución del área del 6.42% entre escenarios, para las áreas de idoneidad alta (color rojo en el mapa) existe una reducción en los escenarios futuros, así para el SSP 245 hay una reducción del 57.48% y para el SSP 585 es de 45.47%, con un aumento del área de 12% entre escenarios, como se observa en la figura 7.

El estudio realizado por Bonilla, (2019) señala que las condiciones climáticas extremas (según el escenario RCP 8.5 para 2050 y 2070) no son propicias para la colonización de anfibios, e incluso muestran una reducción en el área con condiciones adecuadas para su desarrollo. Los análisis del modelo acumulativo indican una clara disminución en las zonas con fuerte adaptabilidad ambiental para esta especie, lo que evidencia una afectación debido a los cambios climáticos, especialmente al comparar los resultados entre los escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5. Este patrón sugiere que las condiciones climáticas podrían limitar el potencial de invasión de la especie, aunque no serán lo suficientemente perjudiciales como para expulsarla, lo que favorecería su permanencia en las áreas donde actualmente se encuentra presente, como Antioquia, Cauca, Huila y Cundinamarca, que tienen un alto potencial de presencia.

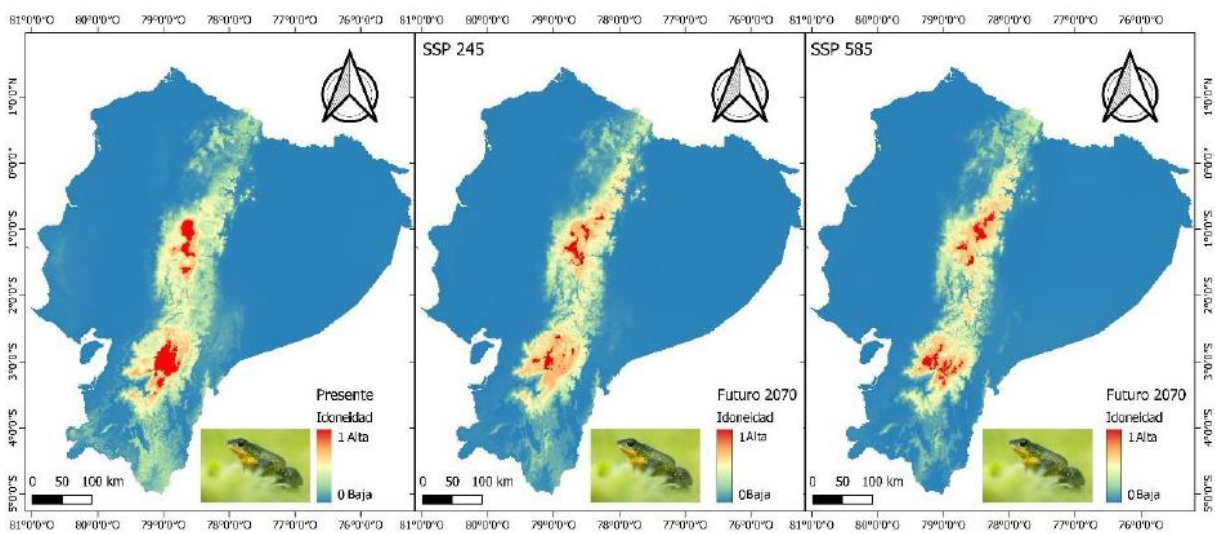


Figura 7. Distribución actual y potencial de *Atelopus bomolochos*.

La especie *Atelopus bomolochos* presenta diferentes comportamientos en relación con los dos escenarios con condiciones climáticas diferentes, se puede observar que se reducen áreas de idoneidad baja, pero que mantienen su posición de distribución geográfica natural, es evidente que en la zona Sur y Sur Este de las estribaciones de la cordillera de los Andes, existe una mayor

Artículo científico: Modelamiento ambiental de la distribución actual y potencial de *Atelopus bomolochos*, Peters, 1973, bajo escenarios de cambio climático en Ecuador.

Publicación Semestral. Vol. 3, No 2, julio-diciembre 2024, Ecuador (p. 1-19)

disminución, lo cual podría perjudicar la viabilidad y adaptabilidad de la especie en el futuro. Las áreas de idoneidad media aumentan en correspondencia del escenario futuro proyectado, así para el escenario sostenible hay un mayor crecimiento de área a diferencia del escenario catastrófico, esto es positivo ya que de acuerdo con las condiciones climáticas favorables la especie presenta mayor espacio geográfico para su distribución y supervivencia, algo tal vez inconsistente pero interesante es el resultado que refleja el modelo en cuanto a las áreas de idoneidad alta, que reflejan una mayor pérdida en el escenario sostenible, en relación con el catastrófico, lo cual podría sugerir que la especie presenta mejores condiciones de adaptabilidad, ante condiciones adversas producto del cambio climático.

En la figura 8 se observa que la especie de *Atelopus bomolochos* están migrando a elevaciones más altas producto de las condiciones climáticas proyectadas hacia el futuro, así en el presente las encontramos a aproximadamente a una altura promedio de 3189 msnm, para el año 2070 en el escenario SSP 245 a 3414 msnm y para el escenario SSP 485 a 3468 msnm. Guzmán en 2015, realizó un estudio similar con el modelamiento a varios anfibios, uno de ellos es la especie *Pristimaantis myersi*, que para el año 2050 mantendrá el 85.9 % de su área de idoneidad intacta. Por tanto, se infiere que la especie únicamente perderá área limitándose así su rango de distribución. Estos cambios en su distribución se dan debido a que las áreas que prestan las condiciones climáticas requeridas por la especie cada vez son menos, esto se traduce en un incremento de la temperatura y precipitación en un futuro, concluyendo que la distribución potencial de todas las especies analizadas evidencia efectos negativos en un futuro, ya que según los resultados todas presentan una disminución en su área de idoneidad, en cualquiera de los escenarios proyectados en futuro. En otro estudio realizado por el mismo autor a *Pristimantis percultus* puede observarse que para el año 2050 mantendrá el 78.6 % de su área intacta, el 19.4 % de su área se perderá, y colonizará un 2 %. Por tanto, se deduce que las áreas que prestan las condiciones idóneas para el desarrollo de la especie se reducirán en un futuro, sin embargo, existirá una pequeña área con condiciones ambientales favorables para ser colonizada.

Los resultados reportados en las diferentes investigaciones sobre modelamiento de distribución potencial son de lo más variado, y dependen mucho de las condiciones bajo las cuales se han llevado los estudios (Wisz *et al.*, 2008), los datos de presencia deben de estar distribuidos lo más homogénea y extensamente posible dentro del espectro de condiciones ambientales del rango geográfico de la especie (Kadmon *et al.*, 2004). En varios estudios se ha constatado que los diferentes softwares presentan distinta precisión a la hora de estimar la distribución del hábitat idóneo para una especie. En general los resultados no son concluyentes, funcionando de modo

diferente los algoritmos según la especie, la cantidad de registros de presencia, o el número de variables predictoras (Benito y Peñas, 2007).

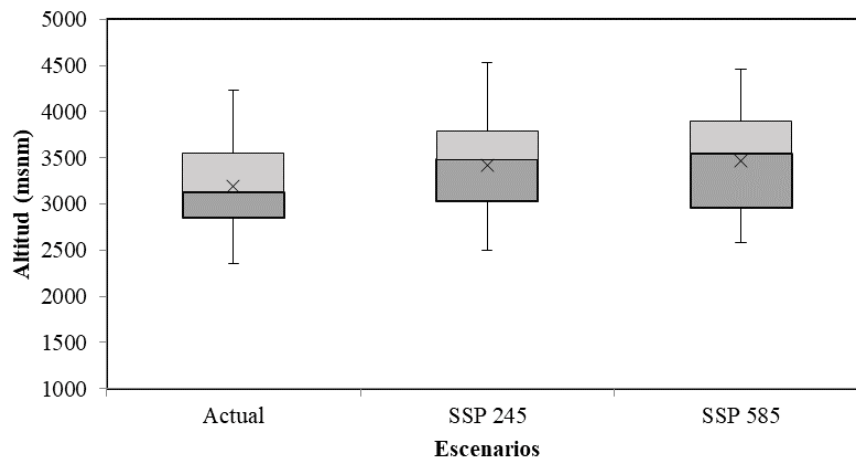


Figura 8. Rango altitudinal para el presente y futuro de *Atelopus bomolochos*.

4 CONCLUSIONES

El anfibio *Atelopus bomolochos* es una especie en peligro de extinción de acuerdo con la lista roja de especies amenazadas publicada por la UICN (Unión Internacional para Conservación de la Naturaleza) que la categoriza como una especie en peligro crítico, a causa de presiones antrópicas como las enfermedades infecciosas, la pérdida y degradación del hábitat, las especies invasoras, la colección ilegal, la contaminación y como se determinó en esta investigación el cambio climático. Además, resulta ser un buen bioindicador ecológico de acuerdo con las respuestas que se obtuvieron del modelamiento, ya que su comportamiento a condiciones favorables y adversas condiciona su adaptabilidad y viabilidad para el futuro.

El modelamiento ambiental realizado para *Atelopus bomolochos* predice que las áreas potenciales de la especie están desplazándose a elevaciones más altas con reducción de sus áreas de idoneidad alta en relación con los escenarios futuros para el año 2070. Así de un área de idoneidad alta en el presente de 2674 km², existe una disminución en el área para el escenario futuro SSP 245 de 1537 km² aproximadamente un 57%, para el escenario futuro SSP 585 existe una reducción del área de 1216 km² que equivale a un 45% aproximadamente. En cuanto al rango altitudinal el modelamiento ambiental predice un desplazamiento que va de los 3189 msnm en el presente, a los 3414 msnm en el escenario futuro SSP 245 y 3468 msnm en el escenario futuro SSP 585, lo cual es preocupante

Artículo científico: Modelamiento ambiental de la distribución actual y potencial de *Atelopus bomolochos*, Peters, 1973, bajo escenarios de cambio climático en Ecuador.

Publicación Semestral. Vol. 3, No 2, julio-diciembre 2024, Ecuador (p. 1-19)

ya que a mayor elevación las condiciones de áreas óptimas para el desarrollo de la especie disminuyen considerablemente, mermando de este modo su viabilidad y supervivencia en el futuro.

El procesamiento de información biológica y ambiental a través de diferentes herramientas y algoritmos de análisis espacio temporal, tiene un alto potencial en la contribución científica de información confiable, precisa y detallada, útil para el estudio en el ámbito ambiental, necesario para la formulación de estrategias de conservación de la biodiversidad y demás casos prácticos aplicados a la academia.

5 REFERENCIAS

- Allouche, O., Tsoar, A., & Kadmon, R. (2006). Assessing the accuracy of species distribution models: Prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). *Journal of Applied Ecology*, 43(6), 1223-1232. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2006.01214.x>
- Araujo, MB., Pearson, RG., Thuiller., W., & Erhard, M. (2005). Validación de modelos de impacto de especies y clima bajo el cambio climático. *Biología del cambio global*, 11 (9), 1504-1513. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-2486.2005.01000.x>
- Azócar, G., Billi, M., Calvo, R., Huneeus, N., Lagos, M., Sapiains, R., & Urquiza, A. (2021). Percepción, vulnerabilidad y preparación ante el cambio climático: variabilidad entre países y patrones emergentes en América Latina. *Revista de Estudios y Ciencias Ambientales*, 11, 23-36. <https://doi.org/10.1007/s13412-020-00639-0>
- Benito, B., & Peñas, J. (2007). Aplicación de modelos de distribución de especies para la conservación de la biodiversidad en el sureste de la Península Ibérica. Enfoque geográfico. *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, (7),100-119. <https://www.geofocus.org/index.php/geofocus/article/view/113>
- Bellard, C., Bertelsmeier, C., Leadley, P., Thuiller, W., & Courchamp, F. (2012). Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology Letters*, 15(4), 365-377. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2011.01736.x>
- Bioweb. (2022). *Bioweb Ecuador*. <https://bioweb.bio/>
- Bonilla, J., (2019). Distribución potencial de la especie *Lithobates catesbeianus* en la región continental de Colombia bajo iteraciones de cambio climático [Tesis de grado, Universidad Militar Nueva Granada, Bogota] Repositorio Documental UMNG. <http://hdl.handle.net/10654/31932>
- Elith J., Graham, C., Anderson, R., Dudick, M., Ferrier, S., Guisan, A. (2006). Novel method improve prediction of species distributions from occurrence data. *Ecography*, 29 (2), 129-151. <https://doi.org/10.1111/j.2006.0906-7590.04596.x>
- Elith, J., Kearney, M. y Phillips, S. (2010), El arte de modelar especies que cambian de área de distribución. *Métodos en ecología y evolución*, 1, 330-342. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2010.00036.x>
- Ferrier, S. (2002). Mapping Spatial Pattern in Biodiversity for Regional Conservation Planning: Where to from Here? *Systematic Biology*, 51(2), 331-363. <https://academic.oup.com/sysbio/article/51/2/331/1670406>
- Freile, J., Coloma, A., Terán, V., Acosta., Tapia, E., & Pazmiño, G. (2020). *Anfibios de Junín*. Publicación Miscelánea del Centro Jambatu 1. Imprenta Mariscal. Quito, Ecuador. 88 pp. http://www.anfibiosecuador.ec/recursos/Anfibios_Junin_Freile_et_al_2020.pdf
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G., Senior, C., Stevens, B., Stouffer, R., & Taylor, K. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), 1937-1958. <https://doi:10.5194/gmd-9-1937-2016>

- Grose, M., Narsey, S., Delage, F., Dowdy, A., Bador, M., Boschat, G., ... & Power, S. (2020). Insights from CMIP6 for Australia's future climate. *Earth's Future*, 8(5), e2019EF001469. <https://doi.org/10.1029/2019EF001469>
- Hernández, P., Graham, C., Master, L., & Albert, D. (2006). The effect of sample size and species characteristics on performance of different species distribution modeling methods. *Ecography*, 29(5), 773-785. <https://doi.org/10.1111/j.0906-7590.2006.04700.x>
- Hijmans, R.J., Phillips, S., Leathwick, J., Elith, J., & Hijmans, MRJ. (2017). Paquete 'dismo'. *Círculos*, 9 (1), 1-68. <https://mirror.linux.duke.edu/cran/web/packages/dismo/dismo.pdf>
- IPCC, (2022, 28 de febrero). *Cambio Climático: Una amenaza para el bienestar de la humanidad y la salud del planeta: Comunicado de prensa del sexto informe del IPCC*. IPCC Sixth Assessment Report. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/resources/press/press-release-spanish/#:~:text=%E2%80%9CEn%20el%20informe%20se%20demuestra,a%20los%20crecientes%20riesgos%20clim%C3%A1ticos%E2%80%9D>.
- IPCC, (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland*. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_FullVolume.pdf
- Kadmon, R., O. Farber, and A. Danin. (2004). Effect of roadside bias on the accuracy of predictive maps produced by bioclimatic models. *Ecological Applications*, 14(2), 401-413. <https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1890/02-5364>
- Kamilar., J, Tecot., S. (2016). Efectos antropogénicos y climáticos en la distribución de especies de Eulemur: un enfoque de modelado de nichos ecológicos. *Revista Internacional de Primatología*, 37, 47-68. <https://doi.org/10.1007/s10764-015-9875-8>
- Levinsky, I., Skov, F., & Svenning, J.C. (2007). Impactos potenciales del cambio climático en las distribuciones y patrones de diversidad de los mamíferos europeos. *Biodiversidad y Conservación*, 16, 3803-3816. <https://doi.org/10.1007/s10531-007-9181-7>
- Lobo, J., Jiménez, V., & Hortal, J. (2010). La naturaleza incierta de las ausencias y su importancia en la modelización de la distribución de especies. *Ecografía*, 33, 103-114. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2009.06039.x>
- MAATE. (2023). *Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático del Ecuador. (2022-2027). Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE)*. Quito, Ecuador. <https://www.adaptacioncc.com/sites/default/files/2023-03/PNA%202022%20Ecuador.pdf>
- Merow, C., Smith, M., & Silander, J. (2013). A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: What it does, and why inputs and settings matter. *Ecography*, 36(10), 1058-1069. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2013.07872.x>
- O'Neill, B., Oppenheimer, M., Warren, R., Hallegatte, S., Kopp, R., Pörtner, H., Scholes, R., Birkmann, J., Foden, W., Licker, R., Mach, K., Marbaix, P., Mastrandea, M., Price, J., Takahashi, K., Ypersele, J.P., Yohe, G. (2017). Razones de preocupación con respecto a los riesgos del cambio climático. *Nature Clim Change*, 7, 28-37. <https://doi.org/10.1038/nclimate3179>
- Olano, J.M., & Peralta, J. (2001). Modelos predictivos de distribución de especies comunes en matorrales basófilos de Navarra: Aplicación en distintos escenarios climáticos. *Cuadernos De La Sociedad Española De Ciencias Forestales*, 12, 47-56. https://secforestales.org/publicaciones/index.php/cuadernos_secf/article/view/9261/9179

Artículo científico: Modelamiento ambiental de la distribución actual y potencial de *Atelopus bomolochos*, Peters, 1973, bajo escenarios de cambio climático en Ecuador.

Publicación Semestral. Vol. 3, No 2, julio-diciembre 2024, Ecuador (p. 1-19)

- Pearson R. G., Raxworthy C. J., Nakamura M. y Peterson A. T. (2007). Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar. *Journal of Biogeography* 34 (2007): 102-117. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2006.01594.x>
- Phillips, S.B., Aneja, V.P., Kang, D., & Arya, S.P. (2006). Modelling and Analysis of the Atmospheric Nitrogen Deposition in North Carolina. *International Journal of Global Environmental Issues*, 6(2/3), 231-252. <https://doi.org/10.1504/IJGENVI.2006.010156>
- Proaño-Morales, A. S., Proaño-Morales, J. J., & Guayasamin, J. M. (2022). Diversidad y distribución altitudinal de anfibios en la cordillera de Toisán, Ecuador: *Ecosistemas*, 31(2), 2137. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2137>
- Reyes, H., Morzaria, H.N., Petatán, D., Vázquez, L., Dorantes, J.M., Torres, J.F., Rojas, B., Torres, L.M., Cisneros, M.A., Pérez, A., Lara, R.E., López, N.A., Díaz, J.G., Ingle de la Mora, G., Jiménez, M.C., Martínez, R., Castro, H. & Calderón, J.M. (2021). *Evaluaciones de vulnerabilidad de las comunidades costeras y de cambio en la disponibilidad de los recursos pesqueros y acuícolas de la costa de México*. EDF de México y UABCS. La Paz Baja California Sur, México. https://www.researchgate.net/publication/361196665_Evaluaciones_de_Vulnerabilidad_de_las_Comunidades_Costeras_y_de_Cambio_en_la_Disponibilidad_de_los_Recursos_Pesqueros_y_Acuicolas_de_la_Costa_de_Mexico
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>
- Ron, S. R., Merino-Viteri, A., Ortiz, D. A. (2023, 6 de junio). *Anfibios del Ecuador*. Versión 2019.0. Museo de Zoología, Pontificia Universidad Católica del Ecuador. <https://bioweb.bio/faunaweb/amphibiaweb>
- Scotford, MA., & Marshall, N. (2023). Impacto del cambio climático en la distribución de especies vegetales y animales en los Alpes. *Revista de estudios ambientales y geográficos*, 2 (1), 54-79. <https://gprjournals.org/journals/index.php/JEGS/article/view/181>
- Schivo, F., Bauni, V., Krug, P., & Quintana, RD. (2019). Distribución y riqueza de anfibios bajo diferentes escenarios de cambio climático en una región subtropical de América del Sur. *Applied Geography*, 103,70-89. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0143622818301838>
- Stuart, S. N., Janice, S., Neil, A., Bruce, E., Ana, SL., Debra, L., Robert, W. (2004). Estado y tendencias de la disminución y extinción de anfibios en todo el mundo. *Science*. (306), 1783-1786. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1103538>
- Swets, J. A. (1988). Measuring the Accuracy of Diagnostic Systems. *Science*, 240 (4857), 1285-1293. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.3287615>
- Toranza, C. (2011). *Riqueza de anfibios de Uruguay: determinantes ambientales y posibles efectos del cambio climático*. [Tesis de Maestría, Universidad de la República del Uruguay]. Repositorio de la Universidad de la República del Uruguay. https://www.researchgate.net/profile/Carolina-Toranza/publication/359442420_Riqueza_de_anfibios_de_Uruguay_Determinantes_ambientales_y_posibles_efectos_del_cambio_climatico/links/623caff728c98054758eb200/Riqueza-de-anfibios-de-Uruguay-Determinantes-ambientales-y-posibles-efectos-del-cambio-climatico.pdf
- Urban, M. C. (2015). Accelerating extinction risk from climate change. *Science*, 348(6234), 571-573. <https://doi.org/10.1126/science.aaa4984>
- UICN. (2021). *Conflicto y conservación*. La Naturaleza en Un Mundo Globalizado, Reporte No. 1. Gland, Suiza: UICN. <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/NGW-001-Es.pdf>
- Valencia, L.M., & Fonte, L.F.M. (2021). Plan de Acción para la Conservación de la Rana Arlequín (*Atelopus*) (2021-2041). *Iniciativa de Supervivencia Atelopus*. https://es.atelopus.org/_files/ugd/9db650_784d7e355020486bafel107f10398886.pdf

- Varela, L., & Ron, S. (2018, 26 de abril). *Geografía y clima del Ecuador*. BIOWEB. Pontificia Universidad Católica del Ecuador. <https://bioweb.bio/geografiaClima.html>
- Wan, J. Z., Wang, C. J., & Yu, F. H. (2017). Spatial conservation prioritization for dominant tree species of Chinese forest communities under climate change. *Climatic Change*, *144*(2), 303-316. <https://doi.org/10.1007/s10584-017-2044-7>
- Ward, D. F. (2007). Modelado de la distribución geográfica potencial de especies de hormigas invasoras en Nueva Zelanda. *Biological Invasions* (9), 723–735 (2007). <https://doi.org/10.1007/s10530-006-9072-y>
- Wisz, M. S., Hijmans, R. J., Li, J., Peterson, A. T., Graham, C. H., & Guisan, A. (2008). Effects of sample size on the performance of species distribution models. *Diversity and Distributions*, *14*(5), 763-773. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2008.00482.x>
- Weiskopf, S. R., Rubenstein, M. A., Crozier, L. G., Gaichas, S., Griffis, R., Halofsky, J. E., Hyde, K. J. W., Morelli, T. L., Morissette, J. T., Muñoz, R. C., Pershing, A. J., Peterson, D. L., Poudel, R., Staudinger, M. D., Sutton-Grier, A. E., Thompson, L., Vose, J., Weltzin, J. F., & Whyte, K. P. (2020). Climate change effects on biodiversity, ecosystems, ecosystem services, and natural resource management in the United States. *Science of The Total Environment*, *733*, 137782. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137782>
- WWF, (2020). Informe Planeta Vivo 2022. Hacia una sociedad con la naturaleza en positivo. WWF, Gland, Suiza. https://wwflpr.awsassets.panda.org/downloads/descarga_informe_planeta_vivo_2022_1_1.pdf
- Yan, D., Chen, W., Liu, L., Li, J., Liu, L. y Wang, Y. (2018). Cambio en las distribuciones geográficas actuales y futuras de *Ulmus lamellosa* en China. *Journal of Forestry Research*, *29*, 1147-1156. <https://doi.org/10.1007/s11676-017-0503-7>
- Young, B. E., Lips, K. R., Reaser, J. K., Ibáñez, R., Salas, A. W., Rogelio Cedeño, J., Coloma, L. A., Ron, S., Marca, E. L., Meyer, J. R., Muñoz, A., Bolaños, F., Chaves, G., & Romo, D. (2001). Population declines and priorities for amphibian conservation in Latin America. *Conservation Biology*, *15*(5), 1213-1223. <https://research.usfq.edu.ec/es/publications/population-declines-and-priorities-for-amphibian-conservation-in->

Artículo científico: Modelamiento ambiental de la distribución actual y potencial de *Atelopus bomolochos*, Peters, 1973, bajo escenarios de cambio climático en Ecuador.

Publicación Semestral. Vol. 3, No 2, julio-diciembre 2024, Ecuador (p. 1-19)