

Universidad Nacional  
Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar  
Instituto Internacional de Conservación y Manejo de Vida Silvestre  
Maestría Profesional en Conservación de Vida Silvestre y Biodiversidad

**Cambios en la idoneidad del hábitat de la salamandra lengua de hongo yucateca (*Bolitoglossa yucatanana*) bajo un escenario 2021-2040 de cambio climático en México.**

Trabajo de graduación en modalidad proyecto para optar al grado de  
Magister en conservación de vida silvestre y biodiversidad

Estudiante: Sergio Abisai Delgadillo Romero

Tutor: Ph.D. Víctor H. Montalvo Guadamuz

Asesora: M. en C. María de los Ángeles Cauich García

II Ciclo 2024.

## **Índice**

Resumen.....	03
Introducción.....	03
Planteamiento del problema.....	05
Justificación.....	05
Antecedentes.....	06
Objetivos.....	07
Marco conceptual.....	07
Metodología.....	08
Análisis.....	11
Resultados y Discusión.....	16
Conclusiones.....	23
Recomendaciones.....	23
Referencias bibliográficas.....	24
Agradecimientos.....	29

## Resumen

La presente investigación se enfocó en generar un modelo de idoneidad del hábitat para la salamandra lengua de hongo yucateca (*Bolitoglossa yucatanana*) para un escenario bioclimático presente así como como un escenario proyectado al periodo 2021-2040; lo anterior, bajo el algoritmo Isolation forest y el uso de otros paquetes asociados al software R. El uso del modelo y su capacidad predictiva, fue utilizada para identificar y estimar la extensión de las zonas que podrían tener una pérdida de idoneidad; y de forma paralela, destacar las áreas críticas para la conservación de la especie. Bajo este contexto, se modeló la idoneidad del hábitat, tomando en cuenta 276 registros de presencia de la especie y destacando que las variables bioclimáticas que mejor explican la distribución de la misma en el área de estudio fueron la bio 11 (Temperatura media del trimestre más frío), bio 9 (Temperatura media del trimestre más seco) y bio 13 (Precipitación del mes más húmedo). Se generaron mapas que representaron visualmente el modelo en el área de estudio logrando identificar la calidad del hábitat idóneo. Por otra parte, el modelo indicó un buen desempeño y métricas estadísticamente representativas. Por último, se estimó una pérdida del 40% de idoneidad del hábitat para el escenario de cambio climático 2021-2040 (MPI-ESM1-2-HR, SSP370), caracterizado por un alto incremento de emisiones contaminantes, fuerte presión sobre los recursos naturales, eventos climáticos extremos más frecuentes e intensos, disminución de la biodiversidad y pérdida de hábitats. En cuanto a las áreas críticas, se destacaron las Áreas Naturales Protegidas de Calakmul, Balam Kú, Sian Ka'an, Bala 'an K'aax y Balam Kin como aquellas zonas geográficas con alta idoneidad del hábitat y mayor superficie estimada para el escenario futuro.

## Introducción.

México es reconocido como uno de los países con mayor diversidad de anfibios en el mundo. Actualmente ocupa el cuarto lugar con aproximadamente 376 especies (Parra-Olea et al. 2014), y una proporción significativa de esta riqueza es endémica.

Sin embargo, cerca del 43% de las especies de anfibios presentes en el país, se encuentran bajo algún estado de amenaza o en peligro de extinción (Frías-Álvarez et al. 2010). Esta situación se refleja en otras latitudes del planeta, por ejemplo, la Plataforma Intergubernamental sobre la Biodiversidad y los Servicios Ecosistémicos (IPBES, 2019) indicó que el 40% de las especies de anfibios a nivel mundial están en riesgo, destacando su vulnerabilidad global a consecuencia de la fragmentación o pérdida del hábitat, sobreexplotación de los recursos naturales, introducción de especies exóticas, contaminación de los ecosistemas (acuáticos y terrestres), crecimiento demográfico no planificado, el tráfico ilegal (Ramírez-Bautista et al, 2017), la aparición de enfermedades emergentes como la quitridiomycosis causada por el hongo del género *Batrachochytrium* y el calentamiento global (García-Padilla et. al, 2021).

Uno de los grupos de anfibios más relevantes en México, es el de las salamandras las cuales tienen un papel ecológico esencial en los ecosistemas (Pounds et al., 2006) ya que constituyen parte importante de las redes tróficas, son presas y depredadores al mismo

tiempo y regulan las poblaciones de insectos que, en algunos casos, pueden ser plagas de cultivos o transmisores de enfermedades a los seres humanos.

En el territorio nacional se han documentado dos familias de salamandras, Ambystomatidae y Plethodontidae; para esta última existen registros de 117 especies y muchas de ellas endémicas al territorio, tal es el caso de la salamandra lengua de hongo yucateca (*Bolitoglossa yucatanana*) (Figura 1) la cual habita en los estados mexicanos de Campeche, Yucatán y Quintana Roo (Flores-Villela y McCoy, 1993).

Como la mayoría de los anfibios, *Bolitoglossa yucatanana* se encuentra estrechamente relacionada con los cuerpos de agua estancada y de poca profundidad, ya sean estacionales o permanentes tales como cuevas, ojos de agua, o lugares con microclimas como la hojarasca, tocones de árboles, en la periferia a cenotes e incluso dentro de bromelias (Bromeliaceae).



Figura 1. Salamandra Lengua de Hongo Yucateca (*Bolitoglossa yucatanana*), (Zozaya, 2023).

En cuanto a su requerimientos ecológicos, la información es escasa, se ha reportado que esta salamandra prefiere los climas cálidos con lluvias en verano y que su rango de distribución altitudinal dentro de la Península de Yucatán puede variar entre los 0 y 150 msnm (Calderón-Mandujano, 2002).

La lista roja de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza indica para la especie una categoría de Preocupación Menor (Least Concern-LC) (UICN, 2020); por otro lado, está catalogada como "Sujeta a Protección Especial" (Pr) de conformidad con la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010 (SEMARNAT, 2010), ya que sus poblaciones podrían verse afectadas en el mediano y largo plazo. El contexto anterior, pone en evidencia la necesidad de medidas adicionales de conservación para la salamandra lengua de hongo yucateca, ya que la información disponible debe aumentar y profundizar aspectos del hábitat, requerimientos ecológicos y estrategias de conservación potenciales para la especie.

En este sentido, el presente estudio, considera un modelo de idoneidad del hábitat y la identificación de los factores ambientales que determinan su distribución a lo largo de la zona de estudio, pero también el objetivo de reconocer áreas críticas y la cuantificación del cambio del hábitat idóneo en un periodo proyectado a futuro con cambio climático.

Es importante mencionar que los modelos predictivos cobran relevancia y se convierten en herramientas clave o representativas para realizar diversos estudios a nivel ecológico. Al respecto, destaca el algoritmo Isolation forest (Liu *et.al*, 2008), originalmente desarrollado para la detección de anomalías en grandes conjuntos de datos, el cual ha sido adaptado para evaluar la idoneidad del hábitat de diversas especies debido a su capacidad para identificar regiones de alta y baja densidad dentro de un espacio de características definidas, lo que puede correlacionarse con la presencia o ausencia de un taxón e incluso identificar áreas que podrían volverse inadecuadas para alguna especie, así como nuevos hábitats potenciales que podrían surgir como refugios climáticos; lo cual se perfila como una herramienta potencialmente aplicable para el presente estudio y generar conocimiento en torno a la conservación de la salamandra lengua de hongo yucateca (*Bolitoglossa yucatanana*).

### **Planteamiento del problema**

Como se hizo mención anteriormente, a pesar de conocerse una distribución de *B. yucatanana* en territorio mexicano, existen vacíos de información y falta de estudios que avalen la presencia o ausencia de la especie a lo largo de la Península de Yucatán, y aun escasa, la disponibilidad de información en cuanto a parámetros que puedan profundizar en aspectos ecológicos, tal como la idoneidad del hábitat o de distribución potencial bajo escenarios de cambio climático.

### **Justificación.**

En la actualidad, *B. yucatanana* enfrenta riesgos asociados con la degradación o pérdida del hábitat, asociado a altas tasas de deforestación registradas en los últimos años en la Península de Yucatán, el emplazamiento de grandes obras de infraestructura con fines turísticos y comerciales, la expansión de la mancha urbana, la introducción de especies exóticas y alteraciones en el ecosistema derivadas del cambio climático.

*B. yucatanana* es una especie con un valor ecológico importante, ya que es una especie bioindicadora del estado de salud del ecosistema, lo cual subraya la importancia de estudios que analicen su distribución, el hábitat y que tan vulnerable puede ser este taxón frente a escenarios climáticos futuros.

Este proyecto, a través de herramientas predictivas, modeló la distribución del hábitat idóneo de la salamandra lengua de hongo yucateca utilizando un algoritmo de distribución de especies (Isolation forest) en el cual se analizó un conjuntos de datos y se evaluó de acuerdo con diversas variables bioclimáticas, además de identificar zonas críticas y prioritarias para la conservación a través de un rango geográfico específico.

Al profundizar investigación científica para detectar la idoneidad del hábitat a partir de distribuciones restringidas, se pueden identificar patrones o escenarios para las condiciones ambientales frente al fenómeno del cambio climático, facilitando la detección de áreas críticas o refugios climáticos con potencial de conservación.

### **Antecedentes.**

De acuerdo con el informe final del Proyecto JM022 “Anfibiofauna endémica frente al cambio climático: Análisis de sensibilidad e incertidumbre (Ochoa-Ochoa y Flores-Villela, 2016), se modelaron distribuciones potenciales de especies de anfibios endémicos de México tanto del presente como para los escenarios 2050 y 2070 bajo simulaciones de cambio climático. Lo anterior utilizando la plataforma BIOMOD (Biodiversity Modelling) (Thuiller *et al.*, 2009, 2013) en el que se utilizaron nueve algoritmos diferentes. Los modelos de nicho ecológico se proyectaron en el futuro utilizando el modelo de cambio climático CMIP5 - Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 HadGEM2-ES (Jones *et al.*, 2011) para generar la distribución potencial en los periodos 2050 (promedio para 2041-2060) y 2070 (promedio para 2061-2080). Se logró modelar 213 de las 252 especies de anfibios endémicas del país. Se destaca que en este informe no se muestran datos para *B. yucatanana*.

Por su parte, Cervantes *et al* (2018), modelaron el nicho ecológico fundamental de *Ennomiophyla miotympanum* a partir del software DIVA-GIS y MaxEnt. Sus resultados de predicción mostraron áreas con condiciones para el desarrollo del nicho de *E. miotympanum* en los estados de Sinaloa, Jalisco, Coahuila, Michoacán, Campeche y Yucatán en México. Dos variables de precipitación, dos de temperatura y la altitud fueron identificadas en el modelo de nicho ecológico y constituyen los requerimientos ecológicos del área de distribución potencial, los cuales son propios, característicos y únicos para la especie modelada (Liria y Navarro 2010). Ambos modelos, el de DIVA-GIS y MaxEnt predijeron características similares de la idoneidad del ambiente donde prospera *E. miotympanum*, haciendo que los resultados de ambos modelos sean fiables en su descripción (Elith *et al.* 2006) y coincidan en un 60% de superficie con idoneidad de hábitat.

En el trabajo de Hernández-Guzmán *et al.* (2019), el objetivo fue proyectar cambios en la distribución de la salamandra de montaña *Ambystoma ordinarium* utilizando diferentes escenarios climáticos. Modelaron la distribución potencial actual y de dos escenarios basados en proyecciones climáticas para el año 2070 con RCP 2.6 y RCP 8.5, usando los algoritmos MaxEnt junto con tres modelos climáticos globales (BCC-CSM1-1, CCSM4 y HadGEM2-ES). La distribución potencial promedio de la especie fue de 5 630 km<sup>2</sup>, 12.3% del área total del estudio (45 876 km<sup>2</sup>). Se estima una disminución a 4 410 km<sup>2</sup> con los escenarios de clima RCP 2.6., y con el modelo de circulación RCP 8.5, se proyectó una disminución estimada a 4 020 km<sup>2</sup>.

Ese mismo año, el informe final del Proyecto JM001 Distribución potencial de las especies de anfibios y reptiles en categoría de riesgo de México (Ramírez-Bautista, 2019) incluyó la historia natural de 103 especies de anfibios y reptiles, de los que se agregan aspectos de características morfológicas, ecología (distribución, hábitat, alimentación) y reproducción. Adicionalmente, se utilizaron algoritmos sobre distribución potencial de las especies para

concluir con el modelado de 78 especies bajo el algoritmo MaxEnt, de las que 18 fueron anfibios y 60 reptiles. De igual forma, en este informe no se muestran datos para *B. yucatanana*

## Objetivos

General:

Analizar la distribución actual y futura del hábitat idóneo de *Bolitoglossa yucatanana* para la identificación de los efectos potenciales del cambio climático en su distribución y áreas críticas de conservación.

Específicos:

I. Evaluar la distribución actual de *Bolitoglossa yucatanana*, en función de variables bioclimáticas y proyectar la distribución futura utilizando un modelo predictivo para los escenarios de cambio climático.

II. Cuantificar las áreas que podrían perder la idoneidad del hábitat así como aquellas que podrían convertirse en zonas prioritarias para la conservación de la especie ante el escenario proyectado 2021-2040.

## Marco Conceptual

El cambio climático está ocasionando variaciones ambientales a nivel global tanto en la temperatura como en la precipitación (Boyd e Ibarrarán, 2010; Useros- Fernández, 2013;). Estos cambios afectan la distribución de fauna especialista de los ecosistemas como los anfibios.

Cuando los límites de tolerancia a estas variables se alteran, las especies no pueden establecerse, crecer o reproducirse (Begon, Townsend y Harper, 2006). Una forma de comprender los impactos del ambiente en la biodiversidad se han desarrollado modelos que asocian variables bioclimáticas a los registros de presencia de las especies y asumen que, para algunas especies, el clima es uno de los factores más importantes en su distribución (Parmesan, 2006; Hof, 2010). Dichos modelos se han constituido como herramientas representativas que al conjuntarse con sistemas de información geográfica (SIG) o algoritmos predictivos, han permitido modelar la distribución presente y futura de diversas especies y ecosistemas (Mateo, Felicísimo y Muñoz, 2011; Martínez-Meyer, Díaz-Porrás, Townsend y Yáñez-Arenas, 2013; Merow, Smith, y Silander, 2013; Osorio-Olvera, Falconi y Soberón, 2016; Navarro-Martínez, Ellis, Hernández-Gómez, Romero-Montero y Sánchez Sánchez, 2018).

Gran parte de estos modelos están basados en el concepto del nicho ecológico (Toranza, 2011), que determina límites de tolerancia de las especies a las variables ambientales más allá de los cuales estas no pueden sobrevivir, crecer o reproducirse (Illoldi-Rangel y Escalante, 2008; Guisan y Zimmermann, 2000). De forma paralela, es posible incorporar las fluctuaciones en las variables climáticas y simular el efecto de cambios en las mismas (Magaña, Conde, Sánchez y Gay, 2003;). Esto permite comprender las posibles respuestas

de las especies al cambio climático, y su distribución futura (Soberón y Peterson, 2005; Bellard, Bertelsmeier, Leadley, Thuiller y Courchamp, 2012).

Investigaciones que emplean los modelos de nicho ecológico (MNE) para determinar la idoneidad del hábitat han sugerido que, en escenarios de cambio climático, las especies experimentarán reducción en su área de distribución (Guisan et al., 2007). Esta problemática ha sido abordada en la anfibiofauna, contribuyendo al entendimiento de la magnitud y dirección de los cambios provocados por el cambio climático en México (Parra-Olea et al., 2005; Ochoa-Ochoa y Flores-Villela, 2016; García et al., 2013; Hernández-Guzmán et al., 2019; Vargas-Jaimes et al., 2021; Flores et al., 2021) y en otras partes del mundo (Pounds et al., 1997, 2006; Vredenburg, 2004; Fellers et al., 2001; Stuart et al., 2004; Mendelson et al., 2006). Lo anterior permite observar un foco de alerta a nivel mundial y hacer recomendaciones en materia de conservación; así como generar acciones de mitigación ante los escenarios futuros, evitando la extinción de las especies.

### Metodología.

Se utilizó el software R para crear un flujo de trabajo que permitiera el manejo e integración de diferentes tipos de datos, además de proporcionar las herramientas (Cuadro 1) para realizar el análisis general y la visualización de los resultados.

Cuadro 1. Paquetería de software

<b>Paquetes de R utilizados</b>	<b>Función</b>
terra (Hijmans, 2024)	Obtención, manipulación y análisis de datos espaciales, tanto vectoriales como ráster.
stars (Pebesma y Bivand, 2023)	Operaciones avanzadas y visualización de datos ráster multitemporales y multidimensionales.
sf (Pebesma, 2018)	Manejo, análisis y transformación de datos espaciales vectoriales con soporte para geometrías complejas.
spocc (Owens et al., 2024)	Descarga y gestión de datos de ocurrencia de especies desde la base de datos GBIF.
itsdm (Song y Estes, 2023),	Implementación del algoritmo Isolation Forest para modelado de hábitat idóneo y predicciones de distribución.
ggplot2 (Wickham et al., 2023)	Creación y personalización de gráficos y mapas de salida
flexsdm (Velazco et al., 2022)	Soporte integral para la implementación de flujos de trabajo en modelos de distribución de especies, con funciones

	para la calibración, evaluación y predicción.
mapview (Appelhans <i>et.al</i> , 2023)	Visualización rápida e interactiva de mapas directamente en el entorno de trabajo de R.

Recopilación de datos y preparación del modelo.

Delimitación del área de estudio

El área de estudio fue delimitada en R, para la zona de la Península de Yucatán, englobando los estados de Campeche, Yucatán y Quintana Roo, con la finalidad de integrar todos las demarcaciones en México donde se distribuye la especie *Bolitoglossa yucatanana*.

En el plano ecológico, la Península de Yucatán, destaca por poseer una gran diversidad de ecosistemas que van desde selvas tropicales hasta arrecifes coralinos, pasando por petenes, manglares, dunas, cenotes, lagos de agua dulce, lagunas costeras, entre otros. En esta extensión territorial se han registrado 168 familias, 970 géneros, 2 327 especies de flora vascular (Duno de Stefano *et.al*, 2018). En cuanto a la fauna, se han identificado aproximadamente 704 especies de vertebrados, de los cuales 118 corresponden a mamíferos, 366 de aves, 89 de reptiles, 16 para anfibios y 115 de peces (INEGI, 2018). Entre esta diversidad destacan especies emblemáticas como el jaguar (*Panthera onca*), el puma (*Puma concolor*), el mono araña (*Ateles geoffroyi*), mono aullador (*Alouatta pigra*), tapir centroamericano (*Tapirella bairdii*), Tortugas carey (*Eretmochelys imbricata*), flamenco rosas del Caribe (*Phoenicopterus ruber*), cocodrilo de pantano (*Crocodylus moreletii*), hocofaisán (*Crax rubra*), pavo ocelado (*Meleagris ocellata*), solo por mencionar algunos.

Obtención de datos de presencias.

Se recopiló la información de registros de presencias de *Bolitoglossa yucatanana* en las base de datos del Global Biodiversity Information Facility (GBIF, 2024). Para lo anterior, se utilizó el paquete spocc de R (Owens, *et.al*, 2024). Los datos de presencias se utilizaron de forma posterior para los modelos de idoneidad del hábitat. Se utilizaron un total de 276 registros de presencia de la especie.

Acceso y descarga de variables bioclimáticas.

Los datos bioclimáticos actuales y el escenario 2021-2040 fueron descargados desde la página de WorldClim (Fick y Hijmans, 2017). En el caso de los datos del presente, fueron consideradas 19 variables bioclimáticas a una resolución espacial de 0,5 minutos de grado.

Por su parte, se obtuvieron los datos climáticos futuros a partir del modelo de circulación general MPI-ESM1-2-HR bajo el escenario socioeconómico SSP370 (Schupfner, *et al.* 2019), ajustado al período 2021-2040, a una resolución de 0,5 minutos de grado.

Una vez descargados los datos bioclimaticos actuales, fueron llevados al entorno de R, ajustados al área de estudio a través del paquete terra (Hijmans, 2024) y se prepararon los

datos para el modelado de idoneidad del hábitat con el paquete stars (Pebesma y Bivand, 2023).

### Modelo de idoneidad del hábitat y mapas predictivos

Se conjuntaron tanto los datos de presencia de *B. yucatanana* y las variables bioclimáticas para integrarse a través del paquete de R *itsdm* y emplear el algoritmo Isolation forest (Liu *et.al*, 2008). Este último se caracteriza por producir una clasificación y una regresión basado en un árbol de decisión con el fin de asegurar que los datos utilizados en el modelo no esté sesgado por anomalías, ayudando así a mejorar la calidad y precisión del mismo (Liu *et.al*, 2008). En este sentido, cuanto más rara sea una observación, más probable será que una división aleatoria en alguna característica coloque los valores atípicos solos en una rama (isolation trees) hasta que las ramas del árbol y cada observación queden aisladas en un nodo terminal (Liu *et.al*, 2008). Por otro lado, se utilizó el paquete “*flexsdm*” (Velazco *et al*, 2022), debido a su capacidad de manipulación y parametrización permiten a los usuarios definir un flujo de trabajo de modelado completo o parcial específico para una situación de modelado (por ejemplo, número de variables, número de registros, diferentes algoritmos, ajuste de algoritmos, métodos de conjunto), con lo cual se construyó y evaluó el modelo de idoneidad del hábitat para *Bolitoglossa yucatanana*.

Una vez obtenido el modelo, se procedió a mapear la idoneidad del hábitat, y la probabilidad de ocurrencia a través del espacio geográfico proyectado a través del paquete de R *ggplot2* (Wickham *et.al* 2023)

### Modelo de idoneidad del hábitat del escenario 2021-2040.

Para proyectar El modelo de idoneidad del hábitat del futuro, se utilizaron los datos bioclimáticos descargados del periodo 2021-2040 del portal de WorldClim y de nueva cuenta se utilizó la herramienta “prediction” del paquete *itsdm* (Song y Estes, 2023), el cual retomó la idoneidad del hábitat del presente para predecir los cambios futuros con base en el componente climático. La cartografía de elaboró con el paquete *ggplot2* (Wickham *et al*, 2023).

### Cuantificación de pérdida entre el escenario presente y futuro.

Para llevar a cabo la pérdida del hábitat idóneo, se estimó la extensión territorial (km<sup>2</sup>) tanto del escenario presente como del futuro. A través del paquete *terra* (Hijmans, 2024) se calculó el área de cada celda raster (en este caso, en km<sup>2</sup>), posteriormente se procedió a asignar un valor por celda (1 o 0), teniendo en cuenta si el valor es mayor a 0.5 representa la presencia del hábitat idóneo, para posteriormente sumar el área de las celdas que representan pérdida.

### Mapas de idoneidad del habitat en áreas críticas

Se consideró realizar un análisis de aquellas Áreas Naturales Protegidas (ANP) de carácter Federal que se encuentran en la Península de Yucatán y por ende, son polígonos que representan superficie de conservación para *Bolitoglossa yucatanana*. Para tal fin, se utilizó la

capa vectorial disponible en el geoportal de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP, 2024), con una actualización a octubre de 2024.

El archivo vectorial fue llevado al entorno de R y se procedió a manipular el archivo para filtrar los polígonos que recaen dentro de la zona de estudio y tener un listado de ANP y estimar la superficie en km<sup>2</sup> de acuerdo al modelo de idoneidad del hábitat proyectado a 2021-2040. Se utilizaron de nueva cuenta los paquetes terra (Hijmans, 2024) y ggplot2 (Wickham *et.al*, 2023) para elaborar el mapa de salida.

## **Análisis**

Recopilación de datos y preparación del modelo

Delimitación del área de estudio

La salamandra lengua de hongo yucateca (*Bolitoglossa yucatanana*), es una especie de anfibio que se distribuye de forma endémica en tres estados de la República Mexicana, por esta razón, se utilizó el paquete sf de R en el cual se delimitó la capa con los límites administrativos del país y posteriormente se realizó un filtrado para seleccionar los estados de Campeche, Yucatán y Quintana Roo. Posteriormente se obtuvo una caja delimitadora (bounding box) en el que se obtuvieron las coordenadas mínimas -92.48614 (xmin), 17.80196 (ymin) y máximas -86.70059 (xmax), 21.62344 (ymax).

Obtención de datos de presencias.

A efecto de contar con todos los registros de *B. yucatanana* hasta el año 2024, se utilizó el paquete spocc (Owens *et.al*, 2024) para ingresar al entorno de R los datos de presencias con datos de coordenadas y dentro de la caja delimitadora creada anteriormente. Al final la búsqueda arrojó 276 registros de presencias de la especie de estudio dentro de la zona geográfica delimitada.

Una vez obtenidos los datos de presencias, se inició con la manipulación del archivo y su transformación en formato tabular, lo que permitió realizar un filtrado en donde se seleccionaron las columnas de longitud y latitud, es decir, las coordenadas de cada registro.

Finalizado el filtro, se convirtió el archivo en un objeto de características simples (paquete sf) para integrar la geometría de cada observación (columna tipo list) y otras posibles variables (denominados atributos de la geometría). Lo anterior se realizó con la finalidad de establecer un sistema de georreferenciación para los datos de presencias (coordenadas geográficas, DATUM: WGS84), corregir geometrías inválidas, identificar diferencias espaciales en geometrías y a través del paquete terra (Hijmans, 2024) eliminar registros duplicados para asegurar una estructura representativa al momento de comenzar con el modelaje del hábitat idóneo. Después, se asignó un identificador único (1) a cada dato de presencia. Al terminar este proceso (Figura 2), permaneció el número de registros originales (276).

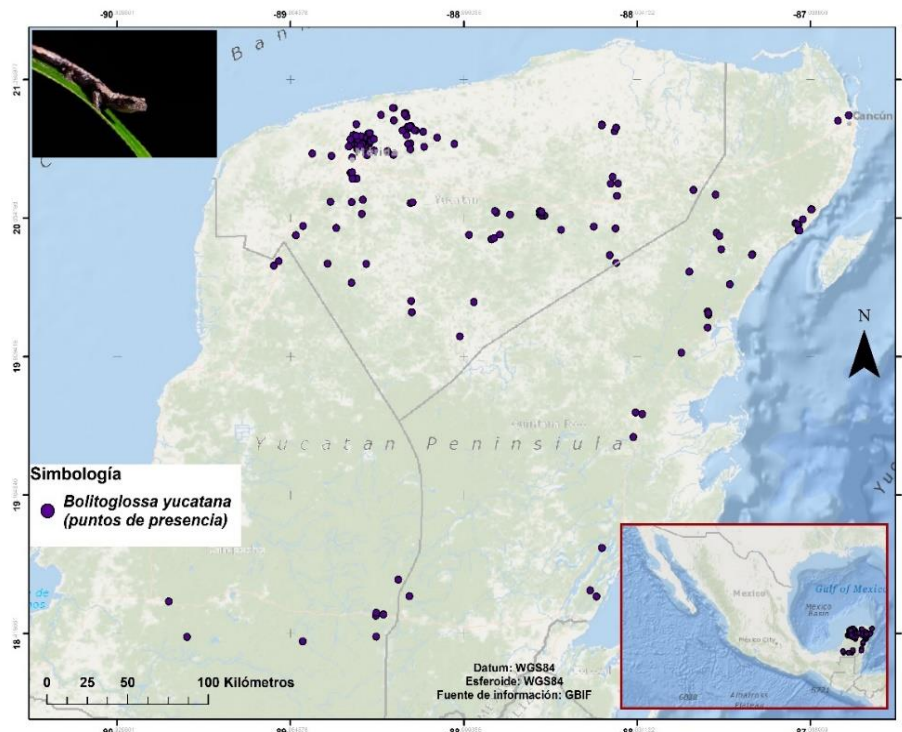


Figura 2. Registros de presencia de *Bolitoglossa yucata*

#### Acceso y descarga de variables bioclimáticas

Las variables bioclimáticas utilizadas, referidas en el cuadro 2, fueron descargadas del portal de WorldClim (Fick y Hijmans, 2017).

Cuadro 2. Datos bioclimáticos utilizados para el modelo de idoneidad del hábitat

<b>Variables bioclimáticas</b>	bio10 = Temperatura media del trimestre más cálido
bio1 = Temperatura media anual	bio11 = Temperatura media del trimestre más frío
bio2 = Rango medio diario (Media mensual (temperatura máxima - temperatura mínima))	bio12 = Precipitación anual
bio3 = Isotermalidad (BIO2/BIO7) (×100)	bio13 = Precipitación del mes más lluvioso
bio4 = Estacionalidad de la temperatura (desviación estándar ×100)	bio14 = Precipitación del mes más seco
bio5 = Temperatura máxima del mes más cálido	bio15 = Estacionalidad de la precipitación (coeficiente de variación)

bio6 = Temperatura mínima del mes más frío	bio16 = Precipitación del trimestre más húmedo
bio7 = Rango anual de temperatura (BIO5-BIO6)	bio17 = Precipitación del trimestre más seco
bio8 = Temperatura media del trimestre más húmedo	bio18 = Precipitación del trimestre más cálido
bio9 = Temperatura media del trimestre más seco	bio19 = Precipitación del trimestre más frío

En lo que respecta a los datos bioclimáticos del escenario 2021-2040, se consideró el modelo de circulación general MPI-ESM1-2-HR, bajo el escenario socioeconómico SSP370 (Schupfner, *et al.* 2019), a una resolución de 0,5 minutos de grado.

Si bien, las variables bioclimáticas del presente y del escenario 2021-2040 se descargaron simultáneamente, se utilizaron en momentos distintos de la investigación, ya que las variables del presente fueron empleadas para generar el modelo de idoneidad del hábitat y aquellas del escenario futuro, para la predicción de idoneidad del hábitat para el término del año 2040.

El flujo de trabajo consistió en cargar las variables bioclimáticas del presente a R y su visualización a través del paquete mapview (Appelhans *et.al*, 2023); una vez en el entorno de trabajo, se procedió a recortar el archivo ráster para que coincidiera con el límite de la región de la Península de Yucatán (estados de Campeche, Yucatán y Quintana Roo) y con el paquete terra (Hijmans, 2024) se aplicó una máscara con para generar un raster donde solo se mantienen valores de celdas que se superponen completamente con el área de estudio. La capa bioclimática se almacenó en formato TIFF (Tagged Image File Format) ya que es un formato de uso representativo y versátil para el manejo de datos geoespaciales. Por último, el archivo ráster con las variables bioclimáticas fue convertido a un objeto stars (Pebesma y Bivand, 2023), útil para manipulaciones geoespaciales y uno de los principales insumos para el modelo de idoneidad del hábitat.

### Modelo de idoneidad del hábitat y mapas predictivos

El modelo de idoneidad de hábitat se obtuvo mediante el algoritmo Isolation forest (Liu *et.al*, 2008). Se utilizaron 276 registros de presencia de *Bolitoglossa yucatanana* y las variables bioclimáticas del escenario presente (19 variables) ajustadas a la zona de estudio.

Para generar el modelo, se estableció en un inicio la reproducibilidad del análisis a partir de la asignación de un número de divisiones y procesos aleatorios cada vez que se ejecute el código (semilla) a través de la función “set.seed” (123). Después, se indicó la partición de los datos de presencia (275) en conjuntos de entrenamiento y prueba (75% y 25% respectivamente) con la función “inicial\_split” para particionar los datos y extraer los mismos con las funciones training y testing. La estructura del modelo indicó las observaciones de entrenamiento, variables ambientales, número de árboles (100), dimensiones del espacio de aislamiento (2) y semilla e aleatoriedad (123). Posteriormente, se graficaron las métricas de evaluación y variables específicas del modelo (respuestas

marginales). Esto último se llevó a cabo para conocer aquellas variables bioclimáticas con más importancia dentro del modelo y a su vez conocer los valores asociados al desempeño del algoritmo, la capacidad del modelo para detectar presencias, y a su vez la similitud o coincidencia entre las áreas predichas y las áreas observadas.

La evaluación del modelo se efectuó bajo los estadísticos True Skills Statistic (TSS) y Area Under the Receiver Operating Curve (AUC) (Hanley y McNeil 1982; Elith *et al.* 2006; Guisan *et al.* 2016). Los valores obtenidos de las métricas permitió identificar y evaluar si los modelos generados fueron significativamente mejores que el azar (Hanley y McNeil 1982). Los valores entre 0.5 y 0.7 son considerados modelos pobres, valores entre 0.7 y 0.9 son predicciones válidas y sobre 0.9 son buenas predicciones (Araújo *et al.*, 2005; Lobo *et al.*, 2008; Guisan *et al.*, 2017).

La proyección espacial (mapa predictivo del escenario presente) fue diseñada una vez obtenido el modelo de idoneidad del hábitat y a través del paquete ggplot2 (Wickham *et al.* 2023). Como resultado, se obtuvo un gradiente de idoneidad con 5 valores, para los cuales se consideró una interpretación (Cuadro 3) bajo las siguientes categorías:

Cuadro 3. Aptitud de la idoneidad del hábitat

<b>Idoneidad del hábitat para <i>Bolitoglossa yucatanana</i></b>	
<b>Valor</b>	<b>Categoría</b>
1.00	Muy alto
0.75	Alto
0.50	Medio
0.25	Bajo
0	Muy bajo

Modelo de idoneidad del hábitat del escenario 2021-2040.

El modelo predictivo para el escenario futuro fue integrado a partir del modelo de idoneidad del hábitat del escenario presente en conjunto con las variables bioclimáticas derivadas del modelo de circulación general MPI-ESM1-2-HR bajo el escenario socioeconómico SSP370 (Schupfner, *et al.* 2019). Este último, proyectado en la Figura 3, es una versión de alta resolución del *Modelo del Sistema Terrestre del Instituto Max Planck* (MPI-ESM) y es capaz de simular procesos climáticos a escalas regionales y globales. El escenario SSP370 se caracteriza por un Crecimiento de emisiones alcanzando una fuerza radiativa de 7,0 W/m<sup>2</sup> a finales del siglo XXI, dificultades de cooperación internacional, bajo crecimiento económico, alta desigualdad, fuerte presión sobre los recursos naturales, eventos climáticos extremos más frecuentes e intensos, desglaciación acelerada, impactos en la productividad agrícola, disminución de la biodiversidad y pérdida de hábitats.

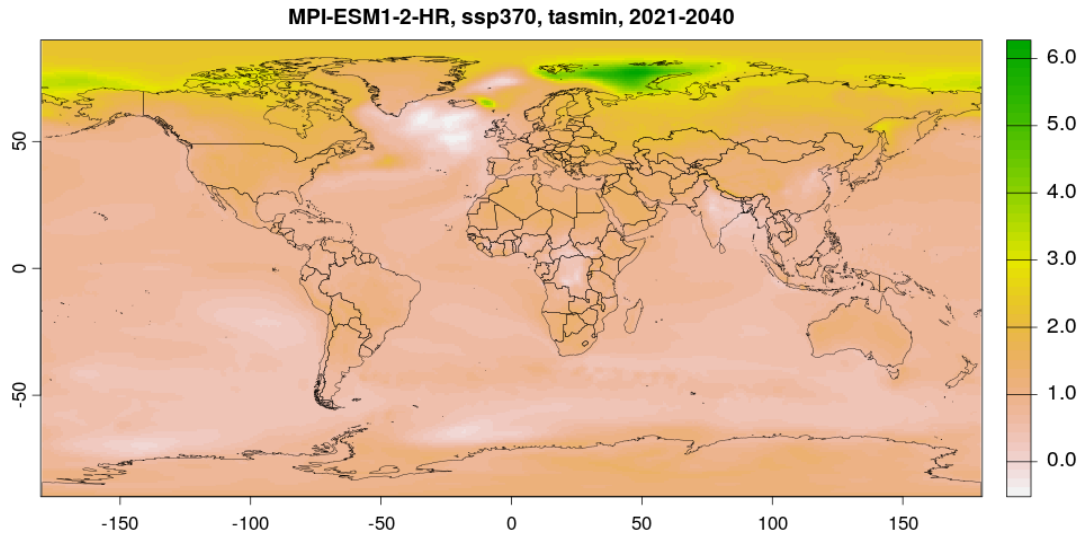


Figura 3. Escenario climático global 2021-2040

No obstante, los datos de la capa raster del escenario futuro sufrieron modificaciones desde el entorno de R, iniciando con la visualización del archivo con el paquete `mapview` (Appelhans *et.al*, 2023); posteriormente se procedió a utilizar la función “`resample`” para ajustar y homologar la resolución del raster del escenario futuro con el del escenario presente; acto seguido, se utilizó la función “`mask`” para aplicar una máscara al área de estudio y asegurar que los valores asociados al raster no se encuentren fuera de la poligonal limítrofe. Terminado el proceso, se procedió a convertir el archivo en un objeto `stars` (Pebesma y Bivand, 2023) para correr la predicción con la función “`probability`” la cual usa el modelo entrenado para predecir la probabilidad de idoneidad en el futuro. Por último, a través del paquete `ggplot2` (Wickham *et.al* 2023) se procedió a generar la predicción cartográfica con valores a través de un gradiente de idoneidad asociado a las categorías indicadas en el modelo del escenario presente.

Cuantificación de pérdida entre el escenario presente y futuro.

Se utilizaron los modelos de idoneidad de hábitat para *Bolitoglossa yucatanana* del presente y el escenario 2021-2040, para lo cual se modificaron los mapas a un entorno binario según el umbral de idoneidad. Las operaciones realizadas compararon cada celda con el valor 0,5 y 1 para áreas, resultando con el valor 1 aquellos con idoneidad a partir de los valores  $> 0,5$  y el valor 0 para idoneidad  $\leq 0,5$ . Posteriormente se procedió a encontrar las celdas que son 1 (idóneas) en los escenarios presentes pero no idóneas en el escenario futuro marcando pérdida de hábitat. Una vez identificadas las celdas se procedió a estimar la superficie de cada celda en kilómetros cuadrados a través de la función “`cellSize`”, ya que permite calcular el área de cada celda en  $\text{km}^2$ , y así continuar con la estimación del área total de pérdida entre un escenario y otro. Para finalizar, se utilizó `ggplot2` (Wickham *et.al* 2023) para elaborar el mapa de predicción de pérdida en cuanto la idoneidad del hábitat para el escenario 2021-2040.

## Mapas de idoneidad del habitat en áreas críticas.

El presente estudio consideró integrar como áreas críticas a las Áreas Naturales Protegidas (ANP) mexicanas de carácter Federal. En este sentido, fue llevado al entorno de trabajo en R, la capa de polígonos de ANP (CONANP, 2024) y una vez recortados al área de estudio se procedió a calcular la superficie de los polígonos mediante el paquete terra (Hijmans, 2024), mismos que fueron ordenados conforme a la mayor área de idoneidad estimada para el escenario futuro. Se utilizó el paquete ggplot2 (Wickham *et.al* 2023) para generar la composición cartográfica y los gradientes de jerarquización de áreas críticas.

## Resultados y Discusión

El modelo de idoneidad del hábitat generado bajo el algoritmo de Isolation forest (Liu *et.al*, 2008), sugiere que las variables bioclimáticas (Figura 4) que mejor explican la distribución de la especie *B. yucatanana* en el área de estudio son la bio 11 (Temperatura media del trimestre más frío), bio 9 (Temperatura media del trimestre más seco) y bio 13 (Precipitación del mes más húmedo). El puntaje en este contexto corresponde al valor medio de Shapley (SHAP) para cada variable, en el que se reitera que los valores indicados muestran la contribución de una variable a las predicciones y con respecto a la interacción con otras en el modelo.

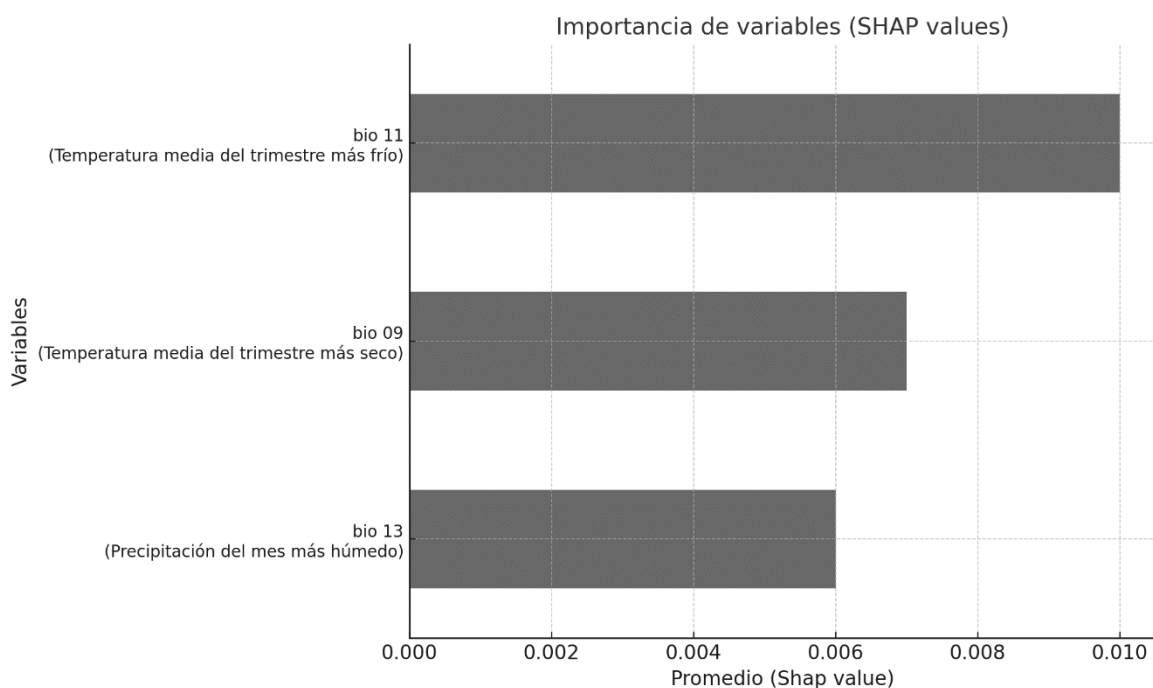


Figura 4. Variables bioclimáticas de mayor importancia en el modelo de idoneidad del hábitat

Por otra parte, las respuestas marginales de las variables que mayormente contribuyen a la hora de modelar la idoneidad del hábitat de *B. yucatanana*, muestran que la **bio 11** (Temperatura media del trimestre más frío) señala una idoneidad máxima cerca de los 23.5 °C; en cambio, la **bio 9** (Temperatura media del trimestre más seco) sugiere que la idoneidad máxima ocurre alrededor de los 25 °C y por último la **bio 13** (Precipitación del mes más húmedo) indica que el hábitat presenta mayor idoneidad para valores de precipitación cercanos a 180-200 mm.

Los datos generados presentan concordancia con la información disponible en cuanto al hábitat actual de *Bolitoglossa yucatanana*, ya que es un taxón con una afinidad tropical, distribuido en zonas influenciadas por patrones de precipitación y una estacionalidad marcada, así como temperaturas promedio arriba de los 20 °C; tal como lo indica Calderón-Mandujano (2002), al referir que es una especie que prefiere los climas cálidos con lluvias en verano y que su rango de distribución altitudinal dentro de la Península de Yucatán puede variar entre los 0 y 150 msnm.

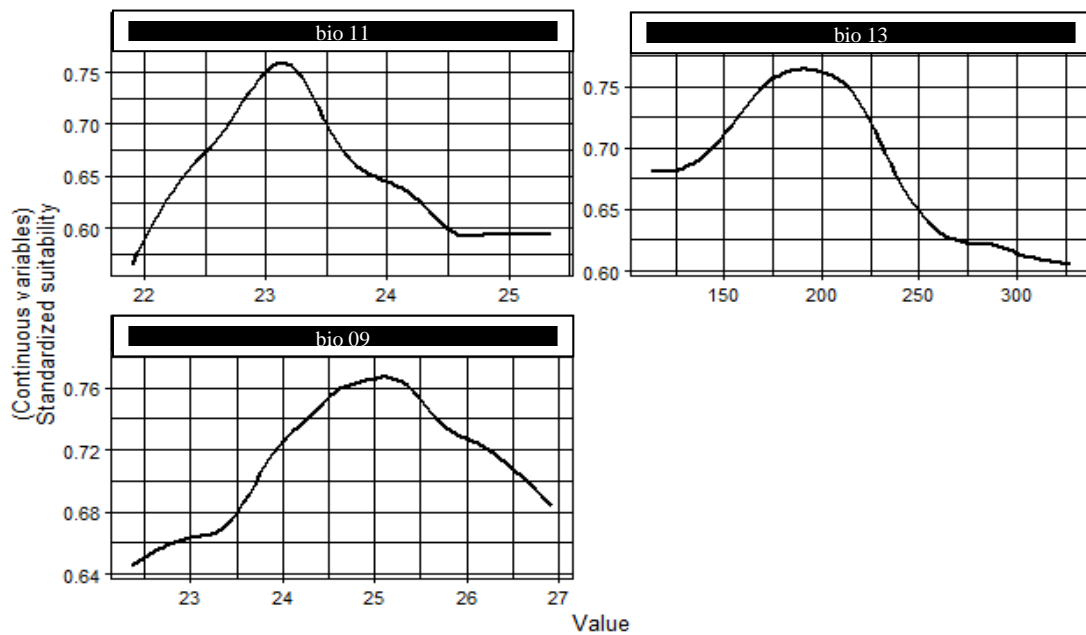


Figura 5. Respuestas marginales del algoritmo Isolation forest

A pesar de que no se han efectuado estudios para *Bolitoglossa yucatanana* que aborden la idoneidad del hábitat y aporten datos representativos sobre su ecología, existen algunos estudios enfocados en determinar el efecto del cambio climático en la distribución de otras especies de salamandras mexicanas. Es así que las variables bioclimáticas de mayor importancia reconocidas en el presente estudio, son similares para la especie de salamandra *Aneides lugubris* de acuerdo con lo reportado por la SEMARNAT (2017). En este estudio también se reportó que los modelos predictivos y datos climáticos (escenarios con las rutas RCP 4.5 y RCP 8.5) utilizados, proyectaron una pérdida en su distribución en un rango del 27 al 99%.

La evaluación del modelo (Cuadro 4) de idoneidad del hábitat indicó valores AUC (Area Under Curve): 0,872; TSS (True Skill Statistic): 0,630; Sensibilidad: 0,700; Especificidad 0,934; los cuales indican un buen desempeño del algoritmo, separación entre presencias y ausencias representativa, buena capacidad del modelo para detectar presencias y alta capacidad para identificar las ausencias. En lo que respecta al índice de Jaccard (0,653) y el índice de Sørensen (0,790), estos muestran una similitud y coincidencia representativa entre las áreas predichas y las áreas observadas.

Cuadro 4. Valores del modelo de idoneidad del hábitat

<b>Métricas de evaluación del modelo de Isolation forest</b>		
<b>Métrica</b>	<b>Training</b>	<b>Test</b>
AUC	0,872	0,922
TSS	0,630	0,740
Sensitivity	0,700	0,870
Specificity	0,934	0,870
Overprediction Rate	0,087	0,130
Underprediction Rate	0,304	0,130
<b>Índices de similitud</b>		
<b>Índice</b>	<b>Training</b>	<b>Test</b>
Jaccard	0,653	0,770
Sørensen	0,790	0,870

El mapa predictivo, mostrado en la figura 6, representa de idoneidad del hábitat de *Bolitoglossa yucatanana* para el escenario presente, en el cual se puede visualizar que la aptitud de la idoneidad es muy alta en la zona norte de la Península de Yucatán y va decreciendo conforme se desplaza a la zona sur, excepto en una franja central, que corresponde geográficamente a la Reserva de la Biósfera de Calakmul, estado de Campeche.

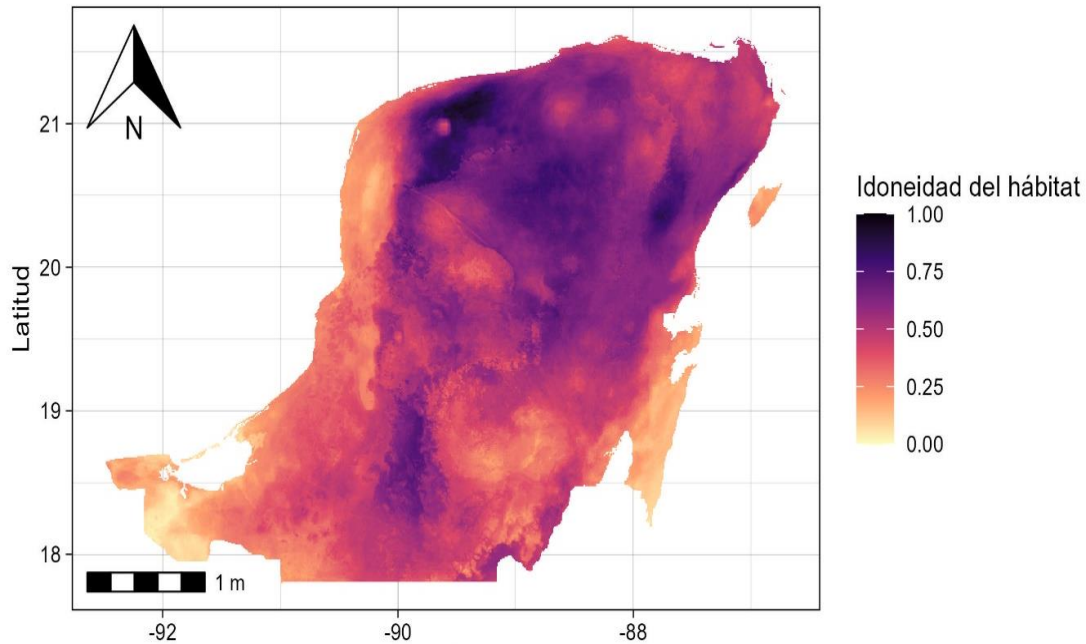


Figura 6. Idoneidad del hábitat de *Bolitoglossa yucatanana* en la zona de estudio

#### Modelo de idoneidad del hábitat del escenario 2021-2040

El modelo predictivo de idoneidad del hábitat bajo el escenario bioclimático 2021-2040 (Figura 7), muestra un gradiente con diferencias marcadas en torno a la aptitud de idoneidad, mostrando valores más altos para la zona central de la Península de Yucatán en una franja imaginaria que conecta de norte a sur y otra zona concentrada en la porción noreste; además, se observa un remanente con aptitud media y alta al suroeste de la Península.

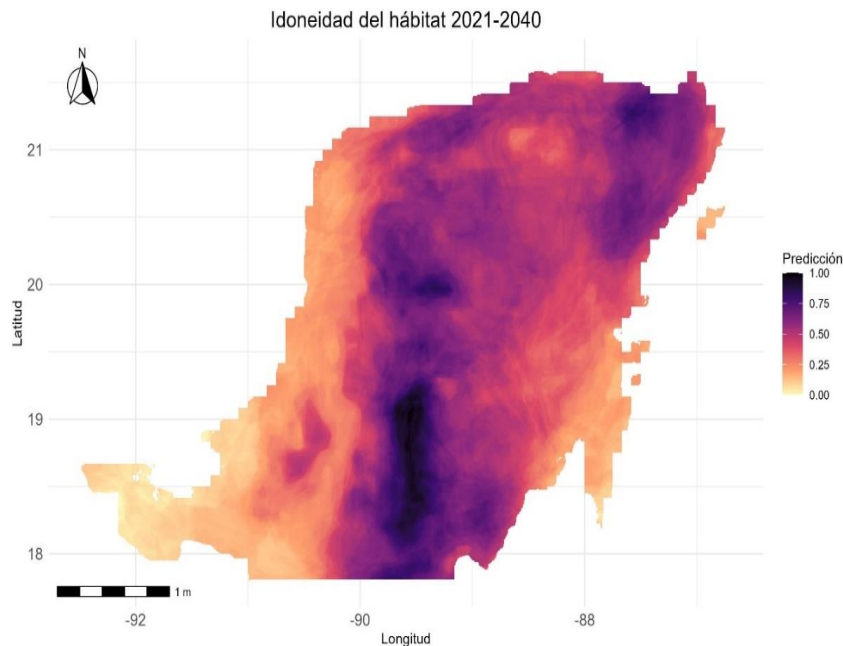


Figura 7. Predicción de la idoneidad del hábitat bajo un escenario de cambio climático

Cuantificación de pérdida entre el escenario presente y futuro.

De acuerdo con las estimaciones efectuadas en el software R, se contabilizó la superficie (Cuadro 5) de idoneidad que se perderá debido al factor del cambio climático. La predicción indica una pérdida del 40% del área de idoneidad (25 523,50 km<sup>2</sup>) bajo el escenario 2021-2040.

Cuadro 5. Pérdida de idoneidad del hábitat

Escenario	Idoneidad del hábitat (km <sup>2</sup> )	Pérdida proyectada (km <sup>2</sup> )	Porcentaje estimado de pérdida
Presente	64 004	-	-
2021-2040	38 500	25 523,50	40%

La proyección geográfica de este análisis se llevó a cabo mediante una representación binaria (Figura 8) en donde es observable las zonas de pérdida de idoneidad del hábitat para *Bolitoglossa yucatanana* en la Península de Yucatán.

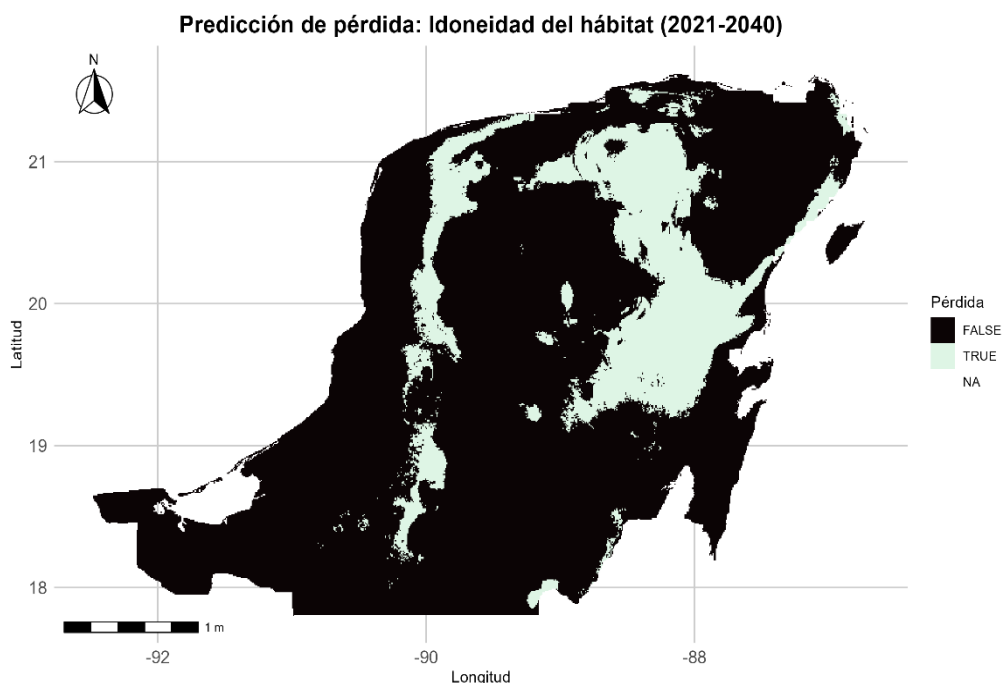


Figura 8. Pérdida de superficie de idoneidad para el escenario 2021-2040.

Los efectos del cambio climático reportados en esta investigación, son similares a los citados por García *et al.* (2013), ya que sugieren una reducción promedio del 64% en el rango geográfico de los anfibios endémicos de estudio en la región del occidente de

México, en donde se incluye a la especie de salamandra *Bolitoglossa macrinii*. Estos autores consideraron las variables climáticas del Modelo Global Acoplado CGCM2 y los escenarios climáticos 2020, 2050 y 2080.

La pérdida de superficie de idoneidad reportada en la presente, es equivalente para otras especies de salamandras mexicanas, por ejemplo; Vargas-Jaimes, *et al* (2021) estudiaron para las especies *Aquiloerycea cephalica*, *Isthmura bellii*, *Pseudoeurycea robertsi* y *Pseudoeurycea leprosa*, endémicas de la Faja Volcánica Transmexicana, la pérdida de su distribución bajo escenarios climáticos del Community Climate System Model (CCSM4) y con modelos de circulación RCP 4.5 y RCP 8.5, además de considerar los algoritmos de modelado MaxEnt y biomod2. Las predicciones efectuadas, indicaron que las cuatro especies de salamandras enfrentarían una reducción en su distribución potencial, y en la conectividad del paisaje, entre 4.93% y 73.92% en los escenarios de cambio climático. Se destacó a *Pseudoeurycea robertsi* como aquella especie que será sensible al mayor cambio debido a la mayor reducción estimada de conectividad del hábitat.

#### Mapas de idoneidad del habitat en áreas críticas

De acuerdo con el modelo de idoneidad del hábitat para el periodo 2021-2040, en la zona de estudio destacaron 5 Áreas Naturales Protegidas (Cuadro 6) las cuales se estima tendrán una superficie representativa en términos de refugios climáticos y de conservación de la especie *Bolitoglossa yucatanana*. Se destaca a Calakmul con la mayor superficie conservada de idoneidad (7303,9 km<sup>2</sup>).

Cuadro 6. Áreas Naturales Protegidas relevantes ante el escenario de cambio climático

<b>Áreas críticas 2021-2040 para la conservación de <i>Bolitoglossa yucatanana</i></b>				
<b>Nombre</b>	<b>Categoría de manejo</b>	<b>Estados</b>	<b>Superficie estimada (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Jerarquización (idoneidad del hábitat)</b>
Calakmul	Reserva de la Biósfera	Campeche	7303,9	1 (Muy alta)
Sian Ka'an	Reserva de la Biósfera	Quintana Roo	5298,3	0,50 (Media)
Balam Kú	Reserva de la Biósfera	Campeche	4664,1	0,50-0,75 (Media-Alta)
Bala'an K'aax	Área de Protección de Flora y Fauna	Quintana Roo, Yucatán y Campeche	1287,2	0,75 (Alta)
Balam Kin	Área de Protección de Flora y Fauna	Campeche	1158,5	0,75 (Alta)

De igual forma, el mapa de salida, indica la localización de estas áreas críticas y su orientación con respecto a la Península de Yucatán. Se observa que la mayor aptitud de idoneidad se centrará en la región conocida como Gran Calakmul, el cual engloba las ANP Calakmul, Balam Kú, Bala'an K'aax y Balam Kin del estado de Campeche. Por su parte, se destaca que el ANP de Sian Ka'an presentará una aptitud media a alta y aproximadamente 5298,3 km<sup>2</sup> de superficie de conservación para la especie bajo esas predicciones de hábitat.

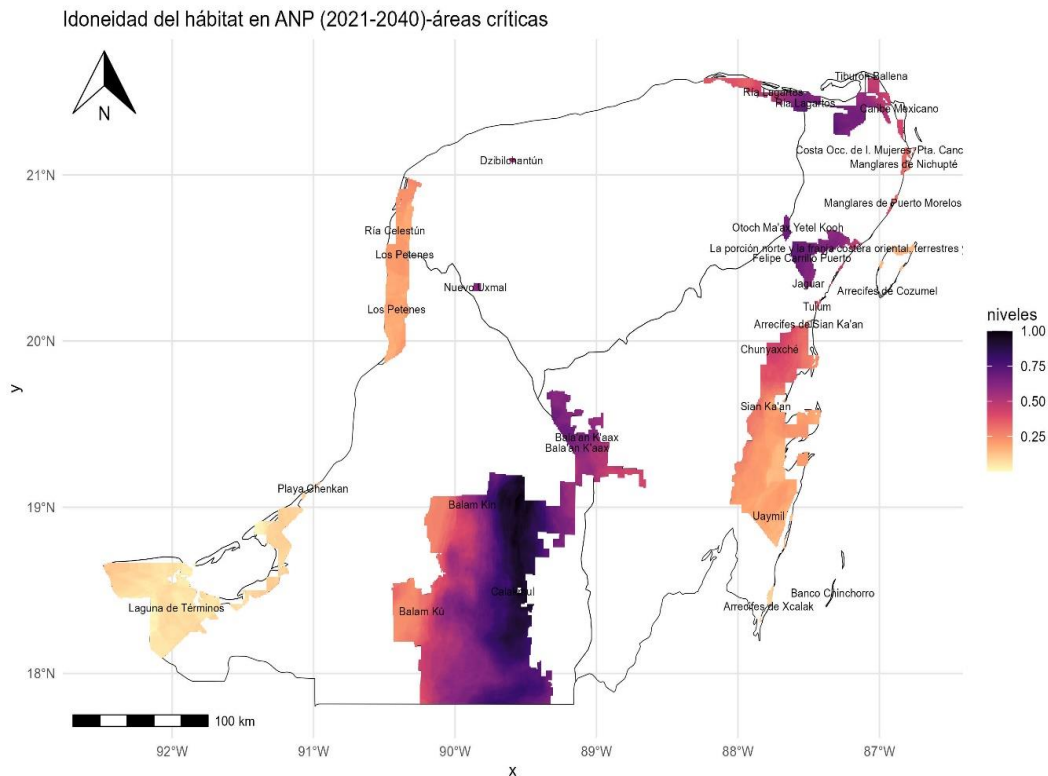


Figura 9. Idoneidad del hábitat en áreas críticas (ANP) bajo el escenario de cambio climático

En este rubro, las áreas críticas cobran relevancia como refugios climáticos a efecto de adoptar medidas efectivas y estrategias de conservación en estos sitios para la conservación de la salamandra lengua de hongo yucateca en las ANP donde se distribuye. El conocer la distribución de las especies en función de las ANP también fue reportado por Quintero-Vallejo y Ochoa-Ochoa (2022). Estos autores identificaron las ANP con mayor riqueza de especies de anfibios mexicanos, integrando a todas las especies del género *Bolitoglossa* con distribución en México; en específico, indicaron que *Bolitoglossa yucatanana* se encuentra distribuida en 24 ANP del país y 10 ANP privadas.

## Conclusiones

El modelo obtenido muestra métricas estadísticamente representativas en cuanto a la elaboración del mismo, destacando que las variables bioclimáticas bio 11 (Temperatura media del trimestre más frío), bio 9 (Temperatura media del trimestre más seco) y bio 13 (Precipitación del mes más húmedo) presentaron los mayores valores que explican mejor la idoneidad del hábitat para la especie *Bolitoglossa yucatanana* en el área de estudio.

La evaluación del modelo de idoneidad del hábitat indicó valores AUC (Area Under Curve): 0,872; TSS (True Skill Statistic): 0,630; Sensibilidad: 0,700; Especificidad 0,934; lo cual indica un buen desempeño del algoritmo, separación entre presencias y ausencias representativa, buena capacidad del modelo para detectar presencias y alta capacidad para identificar las ausencias. En lo que respecta a los valores del índice de Jaccard (0,653) y el índice de Sørensen (0,790), estos muestran una alta similitud y coincidencia entre las áreas predichas y las áreas observadas.

La predicción de pérdida de superficie de idoneidad del hábitat para el escenario 2021-2040 indica que se perderá el 40% del área original (25 523,50 km<sup>2</sup>).

Se identificaron áreas críticas con alta idoneidad de hábitat para la conservación de *Bolitoglossa yucatanana* en el escenario 2021-2040, destacando aquellas con mayor superficie estimada las Áreas Naturales Protegidas de Calakmul, Balam Kú, Sian Ka'an, Bala 'an K'aax y Balam Kin.

Se generó un flujo de trabajo con el código del modelo, ejecutable en R, con potencial aplicación a otras especies de anfibios de la Península de Yucatán, otras partes de México, e incluso servir de referencia para otras latitudes con condiciones ecológicas similares.

## Recomendaciones

Aumentar los registros de presencia para la salamandra lengua de hongo yucateca, consultando colecciones biológicas nacionales y del extranjero, a efecto de incorporar más datos para fortalecer o comparar el modelo de idoneidad del hábitat obtenido.

Evaluar a una escala geográfica más fina, sitios como cuevas, cavernas, cenotes y otras formaciones kársticas que puedan determinar las preferencias del hábitat o microhábitat de *Bolitoglossa yucatanana* en la Península de Yucatán.

Evaluar la idoneidad del hábitat con respecto a interacciones interespecíficas, por ejemplo, con la flora asociada en el uso de hábitat (Bromeliaceae).

Realizar un análisis de conectividad para evaluar la distancia entre parches de paisaje que representen zonas de conservación o corredores biológicos potenciales para la especie.

Realizar un análisis complementario y comparativo del rendimiento y nivel de predicción de otros modelos de distribución de especies para *Bolitoglossa yucatanana* dentro del área de estudio.

Se sugiere formar una sinergia con las autoridades de México en materia de medio ambiente (SEMARNAT, CONANP y PROFEPA) y ONG'S a efecto de elaborar un programa de protección y conservación de la especie o especies afines al género *Bolitoglossa*.

Se considera adecuado realizar un análisis de áreas críticas fuera de ANP y evaluar la creación de más áreas de conservación para la especie

### Referencias bibliográficas.

- Alfaro, M. C. (2009). Densidad y microhábitat de la rana arborícola *Ecnomiohyla miotypanum* (Cope, 1863) en la región centro de Veracruz. (Trabajo de grado). Facultad de Biología, Universidad Veracruzana, Veracruz, México. 40 pp.
- Appelhans T, Detsch F, Reudenbach C, Woellauer S. (2023). mapview: visualización interactiva de datos espaciales en R. Versión del paquete R 2.11.2, <https://github.com/r-spatial/mapview>.
- Araújo, M. B., R. G. Pearson., W. Thuiller., M. Erhard. (2005). “Validation of Species–Climate Impact Models under Climate Change”. *Global Change Biology* 11 (9): 1504–13.
- Begon, M., Townsend, C. R., Harper, J. L. (2006). Ecology: from individuals to ecosystems. United States of America: Blackwell Publishing Ltd.
- Bellard, C., Bertelsmeier, C., Leadley, P., Thuiller, W., Courchamp, F. (2012). Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology Letter*, 15(4), 365-377.
- Blaustein, A. R., B. A. Bancroft. (2007). Amphibian population declines: evolutionary considerations. *Bioscience* 57: 437-444.
- Boyd, R., Ibararán, M. A. (2008). Extreme events and adaptation: an exploratory analysis of drought in Mexico. *Environmental and Development Economics*, 14(3).
- Bolitoglossa yucatanana* (Peters, 1882) en la Secretaría de GBIF. (2024). Conjunto de datos de la lista de taxonomía de GBIF. <https://doi.org/10.15468/39omei>, consultado a través de GBIF.org el 20 de octubre de 2024.
- Calderón-Mandujano, R., Bahena-Basave, H., Calmé, S. (2008). Anfibios y reptiles de la Reserva de la Biósfera de Sian ka'an y zonas aledañas. El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR)-Comisión Nacional Para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Chetumal, Quintana Roo, México.
- Cervantes, S.J., R. Serna-Lagunes, J.S. Ortiz, A. Pérez-Sato. (2018). Nicho ecológico fundamental de *Ecnomiohyla miotypanum* (Cope, 1863) con DIVA-GIS y MaxEnt. *Rev. Biodivers. Neotrop.* ; 8 (2): 84-93.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. (2024). Áreas Naturales Protegidas Federales de México, octubre 2024. Ciudad de México. Disponible en: <https://sig.conanp.gob.mx/Shape>.
- Duno-de Stefano, R., Ramírez-Morillo, I., Tapia-Muñoz, J. L., Hernández-Aguilar, S., Can, L. L., Cetzal-Ix, W. (2018). Aspectos generales de la flora vascular de la Península de Yucatán mexicana. *Botanical Sciences*, 96, 515–532.
- Elith, J, C. H. Graham., R. P. Anderson., M. D. Simon., A. Guisan., R. J. Hijmans. (2006). “Novel Methods Improve Prediction of Species’ Distributions from Occurrence Data”. *Ecography* 29 (2): 129–51.

- Fellers, G. M., Green, D. E., Longcore, J. E. (2001). Oral chytridiomycosis in the mountain yellow-legged frog (*Rana muscosa*). *Copeia*, 2001(4), 945-953.
- Fick, S.E., y R. J. Hijmans. (2017). WorldClim 2: nuevas superficies climáticas con resolución espacial de 1 km para áreas terrestres globales. *Revista Internacional de Climatología*, 37 (12): 4302-4315.
- Flores, Andrade, B., Verdezoto Carvajal, M., Simbaña Punina, J., Domínguez Gaibor, I. (2022). Posibles efectos del Cambio Climático en los anfibios de la Amazonía Ecuatoriana. *Green World Journal*, 5(1), 006.
- Flores-Villela, O. y McCoy, C.J. (1993). Herpetofauna Mexicana: Lista anotada de las especies de anfibios y reptiles de México, cambios taxonómicos recientes, y nuevas especies. Museo Carnegie
- Frías-Álvarez P., Zúñiga-Vega J.J., Flores-Villela O. (2010). A general assessment of the conservation status and decline trends of Mexican amphibians. *Biodiversity and Conservation*, 19, 3699– 3742.
- Frost, D.R. (2024). Especies de anfibios del mundo: una referencia en línea. Versión 6.2 (10 de octubre de 2024). Base de datos electrónica accesible en <https://amphibiansoftheworld.amnh.org/index.php> . Museo Americano de Historia Natural, Nueva York, EE. UU.
- García, A., M. A. Ortega-Huerta., E. Martínez-Meyer. (2013). Potential distributional changes and conservation priorities of endemic amphibians in western Mexico as a result of climate change. *Environmental Conservation*, 40(1), 1-12.
- García-Padilla, E., D.L. De Santis., A. Rocha., V. Mata-Silva., J.D. Johnson., L. Fucsko., D. Lazcano., L. D. Wilson. (2021). Salamandras mesoamericanas (Amphibia: Caudata) como grupo focal de conservación.
- Guisan, A., N. E. Zimmermann. (2000). Predictive habitat distribution model in ecology. *Ecological Modelling*, 147-186.
- Guisan, A., N. E. Zimmermann, J. Elith., C. H. Graham., S. Phillips., A. T. Peterson. (2007). What the matter for predicting the occurrences of trees: techniques, data or species characteristics? *Ecological Monographs*, 77(4), 615-630.
- Guisan, A. N., E. Zimmermann., W. Thuiller. (2017). “Modeling Approaches and Model Calibration”. En *Habitat Suitability and Distribution Models: With Applications in R*, 151–236. Ecology, Biodiversity and Conservation. Cambridge: Cambridge University Press.
- Hanley, J. A., B. J McNeil. (1982). “The Meaning and Use of the Area under a Receiver Operating Characteristic (ROC) Curve.” *Radiology* 143 (1): 29–36.
- Hernández-Guzmán, R., L. H. Escalera-Vázquez., I. Suazo-Ortuno. (2019). Predicting *Ambystoma ordinarius* distribution under different climate scenarios in central Mexico. *Herpetological Journal*, 29(2), 71-81
- Hijmans, R. (2021). Geodata: Descargar datos geográficos. Versión del paquete R 0.6-2, <https://cran.r-project.org/web/packages/geodata>
- Hijmans R. (2024). Terra: Spatial Data Analysis. R package version 1.7-81, <https://github.com/rspatial/terra>.

Hof, C. (2010). Species distributions and climate change: current patterns and future scenarios for biodiversity. Dinamarca: Science University of Copenhagen, Department of Biology Faculty.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) e INAFED. (2018). Fauna de Yucatán: biodiversidad de fauna silvestre. Para todo México.

Iloldi-Rangel, E. T. Escalante. (2008). De los modelos de nicho ecológico a las áreas de distribución geográfica. *Biogeografía*, 3, 7-12.

Lenth, R., H. Singmann., P. L. Buerkner., M. Herve (2018). Paquete “Emmeans”. Versión del paquete R 4.0-3. <http://cran.r-project.org/package=emmeans>

Liria, J., J.C Navarro. (2010). Modelo de nicho ecológico en *Haemagogus williston* (Diptera: Culicidae), vectores del virus de la fiebre amarilla. *Rev Biomed.* 21 (3): 149-161.

Liu, F. T., K. M. Ting., Z.H. Zhou. Isolation forest. (2008). Eighth IEEE International Conference on Data Mining. IEEE.

Lobo, J. M., A. Jiménez-Valverde., R. Real. (2008). “AUC: A Misleading Measure of the Performance of Predictive Distribution Models”. *Global Ecology and Biogeography*, 17 (2): 145–51.

Magaña, V., C. Conde., O. Sánchez., C. Gay. (2003). Evaluación de escenarios regionales de clima actual y de cambio climático futuro para México. En C. Gay (Ed.). México: Una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México (pp. 1-18). México: Instituto Nacional de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México.

Martínez-Meyer, E., A. P. Cuervo-Robayo., G. A. Ortiz-Haro. (2016). Modelación de la distribución potencial actual y futura de las especies invasoras de mayor riesgo para México. México: CONABIO-GEF-PNUD.

Massicotte, P., A. Sur (2023). rnaturalearth: datos de mapas mundiales de Natural Earth. <https://docs.ropensci.org/rnaturalearth/>, <https://github.com/ropensci/rnaturalearth>

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

Mendoza-Almeralla, C., P. Burrowes., G. Parra-Olea. (2015). La quitridiomycosis en los anfibios de México: una revisión. *Revista mexicana de biodiversidad*, 86(1), 238-248.

Mendelson III, J. R., K. R. Lips., R. W Gagliardo., G. B. Rabb., J. P. Collins., J. E. Diffendorfer., E. D. Brodie Jr. (2006). Confronting amphibian declines and extinctions. *Science*, 313(5783), 48-48.

Merow, C. M. J., Smith, J. A., Silander, J. R. (2013). A practical guide to MaxEnt for modeling species ‘distribution: what it does, and why inputs and settings matter. *Ecography*, 36, 1058-1069.

Navarro-Martínez, A., Ellis, E. A., Hernández-Gómez, I., Romero-Montero, J. A., Sánchez-Sánchez, O. (2018). Distribution and abundance of big-leaf mahogany (*Swietenia macrophylla*) on the Yucatan Peninsula, Mexico. *Tropical Conservation Science*, 11, 1-17.

Ochoa-Ochoa, L.M. y O. A. Flores-Villela. (2016). Anfibiofauna endémica frente al cambio climático: Análisis de sensibilidad e incertidumbre. Universidad Nacional

Autónoma de México. Facultad de Ciencias. Informe final SNIB-CONABIO, proyecto No. JM022. Ciudad de México

Osorio-Olvera, L., V. Barve., N. Soberón., J. Falconi. (2018). Ntbox: From getting biodiversity data to evaluating species distribution models in a friendly GUI environment. R package version 0.2.5.4.

Owens, H., V. Barve, S. Chamberlain. (2024). spocc: Interfaz para fuentes de datos de ocurrencia de especies. Versión del paquete R 1.2.3, <https://docs.ropensci.org/spocc/> (manual del usuario), <https://github.com/ropensci/spocc> (desarrollo).

Paladino, M. (2017). Mapas con ggplot. Retrieved November 1, 2020, from [https://www.institutomora.edu.mx/testU/SitePages/martinpaladino/Mapas\\_con\\_R.html](https://www.institutomora.edu.mx/testU/SitePages/martinpaladino/Mapas_con_R.html)

Parmesan, C. (2006). Ecological and Evolutionary Responses to Recent Climate Change. *Annual Review Ecological Evolution Systems*, 37, 637- 669.

Parra-Olea, G., Martínez-Meyer, E., De León, G. P. P. (2005). Forecasting climate change effects on salamander distribution in the highlands of central Mexico. *Biotropica: The Journal of Biology and Conservation*, 37(2), 202-208.

Pebesma, E. (2018). Características simples para R: soporte estandarizado para datos vectoriales espaciales. *The R Journal*, 10(1).

Pebesma, E., R. Bivand. (2023). *Spatial Data Science: With applications in R\_ Chapman and Hall/CRC, London. Doi: 10.1201/9780429459016*  
<https://doi.org/10.1201/9780429459016>, <https://r-spatial.org/book/>

Picco, A. M. y J. P. Collins. (2008). Amphibian commerce as a likely source of pathogen pollution. *Conservation Biology*, 22: 1582-1589.

Plataforma Intergubernamental Científico-Normativa sobre Diversidad Biológica y Servicios de los Ecosistemas (IPBES). (2019). Resumen para los responsables de las políticas del informe de evaluación mundial sobre la diversidad biológica y los servicios de los ecosistemas (<https://archivos.ip.neto/ipbes-web-prod-publico-archivos/ipbes.1.pdf>)

Pounds, J. A., M. P. Fogden, J. M. Savage., G. C. Gorman. (1997). Tests of null models for amphibian declines on a tropical mountain. *Conservation biology*, 11(6), 1307-1322.

Pounds, J. A., Carnaval, A. C., Puschendorf, R., Haddad, C. F., Masters, K. L. (2006). Responding to amphibian loss. *Science*, 314(5805), 1541-1542.

Pounds, A., J. Savage y F. Bolaños. *Incilius periglenes*. In: IUCN. The IUCN Red List of Threatened Species. IUCN Species Survival Commission. (2008). Disponible en: [www.iucnredlist.org/details/3172](http://www.iucnredlist.org/details/3172)

Quintero-Vallejo, D. E., L. M. Ochoa-Ochoa. (2022). Priorización y distribución de los anfibios en las áreas naturales protegidas de México. *Rev. Mex. Biodiv.* vol.93

Ramírez-Bautista, A., A. Sánchez-González., G. Sánchez-Rojas., C. Cuevas-Cardona. (2017). Principales amenazas para la biodiversidad y perspectivas para su manejo y conservación en el estado de Hidalgo: El caso de los anfibios y reptiles. Universidad Autónoma del estado de Hidalgo, 578 pp.

Ramírez-Bautista, A. (2019). Distribución potencial de las especies de anfibios y reptiles en categoría de riesgo de México. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Informe final SNIB-CONABIO, Proyecto No. JM001. Ciudad de México

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2010). Norma Oficial Mexicana NOM-059- SEMARNAT-2010. Publicada el 30 de diciembre de 2010 en el Diario Oficial de la Federación. Última reforma publicada el 14 de noviembre de 2019.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2017). Actualización de la evaluación de impactos del cambio climático sobre la distribución potencial de especies de mamíferos, aves, reptiles, anfibios y plantas que habitan las islas de México, Informe final. México. 31 P.

Schupfner, Martín; Salchichas, Karl-Hermann; Wachsmann, Fabián; Steger, cristiano; Bittner, Matías; Jungclaus, Johann; Temprano, Bárbara; Pankatz, Klaus; Giorgetta, Marco; Reick, cristiano; Legutke, Stephanie; Esch, Mónica; Gayler, Verónica; Haak, Helmuth; de Vrese, Felipe; Raddatz, Thomas; Mauritsen, Thorsten; por Cigüeña, Jin Song; Behrens, Jörg; Brovkin, Víctor; Claussen, Martín; Crueger, Traute; Casi, Irina; Fiedler, Stephanie; Hagemann, Stefan; Hohenegger, Cathy; Jahns, Thomas; Monasterio, Silvia; Kinne, Stefan; Lasslop, Gitta; Kornblueh, Luis; Marotzke, Jochem; Matei, Daniela; Merano, Katharina; Mikolajewicz, Uwe; Modali, Kameswarrao; Müller, Wolfgang; Ombligo, Julia; Notz, Dirk; Peters-von Gehlen, Karsten; Pincus, Robert; Pohlmann, Holger; Pongratz, Julia; Descansa, Sebastián; Schmidt, Hauke; Cordón, Reiner; Schulzweida, Uwe; Seis, Catalina; Stevens, Björn; Voigt, Aiko; Roeckner, Erich ( 2019 ). Salida del modelo DKRZ MPI-ESM1.2-HR preparada para CMIP6 ScenariomIP ssp370. Versión AAAAMMDD [1]. Federación de la Red del Sistema Terrestre. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.4399>

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

Song, L., L. Estes. (2023). "itsdm: modelado y explicación de la distribución de especies en bosques de aislamiento basados en la presencia exclusiva en r". *Geografía*. 563.

Stuart, S. N., J. S Chanson., N. A. Cox., B. E. Young., A. S. Rodríguez., D. L. Fischman., R. W. Waller. (2004). Status and trends of amphibian declines and extinctions worldwide. *Science*, 306(5702), 1783-1786.

Thuiller W., B. Lafourcade., R. Engler., M.B. Araújo. (2009). BIOMOD - a platform for ensemble forecasting of species distributions. *Ecography*, 32, 369–373.

Thuiller A.W., D. Georges., R. Engler. (2013). Package “biomod2”: *Ensemble platform for species distribution modeling*. 89.

Toranza, C., A. Brazeiro., R. Maneyro. (2012). Efectos del Cambio Climático sobre la Biodiversidad: El caso de los anfibios de Uruguay. En Espacio Interdisciplinario, Uruguay.

Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (2020). Lista Roja de Especies Amenazadas, *Bolitoglossa yucatanana*. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2020-3.RLTS.T59218A53977565.en> . Consultado el 10 de noviembre de 2024.

Urbina-Cardona, J. N., O. Flores-Villela (2010). Ecological-niche modeling and prioritization of conservation-area networks for Mexican herpetofauna. *Conserv Biol*. 24 (4): 1031- 41.

Useros-Fernández, J. L. (2013). El cambio climático: sus causas y efectos medioambientales. *Anales de la Real Academia de Medicina y Cirugía de Valladolid*, 50, 71-98.

Vargas-Jaimes, J., González-Fernández, A., Torres-Romero, J. E., Bolom-Hue, R., Manjarez, J., Gopar-Merino, F., Pacheco, P. X., Garrido-Garduño, T., Chávez, C., Sunny, A. (2021). Impact of climate and land cover changes on the potential distribution of four endemic salamanders in Mexico. *Journal for Nature Conservation*, 64, 1-13

Velazco, S.J.E., M. B Rose., A. F. Andrade., I. Minoli., J. Franklin. (2022). flexsdm: Un paquete R para respaldar un flujo de trabajo de modelado de distribución de especies integral y flexible. *Métodos en ecología y evolución*, 13(8) 1661–1669.

Vredenburg, V. T. (2004). Reversing introduced species effects: experimental removal of introduced fish leads to rapid recovery of a declining frog. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(20), 7646-7650.

Wake, D.B., V. T. Vredenburg. (2008). Are we in the midst of the sixth mass extinction? A view from the world of amphibians. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105: 11466-11473.

Wickham, H., W. Chang., L. Henry., T. L Pedersen., K. Takahashi., C. Wilke., D. Dunnington. (2023). ggplot2: Cree visualizaciones de datos elegantes utilizando la gramática de gráficos (versión 3.4.0) <https://ggplot.tidyverse.org>

Zozaya, M. (2023). Observación en iNaturalistMX: <https://mexico.inaturalist.org/photos/300500704>. 10 de octubre de 2024.

## **Agradecimientos**

Agradezco al Instituto Internacional de Conservación y Manejo de Vida Silvestre (ICOMVIS) de la Universidad Nacional de Costa Rica, por la oportunidad de realizar este posgrado.

Al Dr. Víctor H. Montalvo Guadamuz, tutor del presente trabajo y a los revisores del escrito. Gracias por su atención, sus conocimientos y profesionalismo.

A los profesores de Módulo, por todo el conocimiento que me aportaron.

A mi asesora del trabajo final de graduación, por darme una oportunidad de crecer profesional y laboralmente.

A Stephanie y Diego.

A mi madre y hermana.

Agradezco a mi familia por ser el principal soporte para lograr esta meta.

A mis amigos y colegas, que siempre me alentaron para llegar a esta meta.

A Costa Rica, me abriste las puertas con gente linda y amable. ¡Pura vida!