



# Revista MINERVA

Plataforma digital de la revista: <https://minerva.sic.ues.edu.sv>



## Guía para el modelo de distribución de especies por Máxima Entropía, estudio de caso de la “lora nuca amarilla” *Amazona auropalliata* en El Salvador

### Guide for the species distribution model by Maximum Entropy, case study of the “yellow-naped amazon” *Amazona auropalliata* from El Salvador

Carlos Giovanni Rivera<sup>1</sup>, Katherine Tatiana Funes-Hernández<sup>2</sup>, José Fernando Merino-Villalta<sup>2</sup>, Alicia Verónica Beltrán-Sánchez<sup>3</sup>

Correspondencia:  
[carlos.riverag@gmail.com](mailto:carlos.riverag@gmail.com)

Presentado: 23 de marzo de 2021  
Aceptado: 23 de mayo de 2021

- 1 Dirección General de Ecosistemas y Biodiversidad, Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales; Escuela de Posgrado y Educación Continua, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de El Salvador.
- 2 Escuela de Biología, Facultad de Ciencias Naturales y Matemática, Universidad de El Salvador.
- 3 Escuela de Matemática, Facultad de Ciencias Naturales y Matemática, Universidad de El Salvador.

#### RESUMEN

Esta contribución pretende facilitar una guía para el análisis e interpretación de información modelada con MaxEnt, incluyendo los elementos centrales de calidad para generar resultados robustos de gran utilidad para la conservación y gestión de la diversidad biológica de El Salvador. Para facilitar el proceso de entrenamiento, se efectuó un modelo distribucional de *Amazona auropalliata*, especie catalogada en peligro de extinción en el país. El modelo obtenido presentó un valor AUC de 0.856 por lo que puede considerarse confiable, con las variables temperatura media del mes más húmedo, la precipitación del cuatrimestre más cálido y la precipitación en el período más seco, aportando en mayor medida al modelo. La distribución potencial de la especie según el modelo, ocurre principalmente en los departamentos de San Salvador, Santa Ana, Ahuachapán, Sonsonate, Usulután y La Libertad. Finalmente, con base en análisis estadísticos, se construyó un perfil bioclimático de la especie determinado por esta contribución, que facilitará el desarrollo de estudios futuros, incluyendo los efectos del Cambio Climático.

**Palabras clave:** Ecosistemas, nicho ecológico, distribución, especies, *Amazona auropalliata*, MaxEnt

## ABSTRACT

The aim of this work was to offer a guide for the analysis and interpretation of the model MaxEnt, including the quality requirements to generate solid results and provide researchers the key elements of this powerful ecological tool, in order to improve the conservation and management of the biological diversity of El Salvador. Hence, a potential distributional model of *Amazona auropalliata*, a species cataloged in danger of extinction in the country, was conducted. The model had an AUC (Area under the Curve) value of 0.856 considered reliable. The variables mean temperature of the wettest month, precipitation of the warmest four-month period and precipitation in the driest period, were mainly contributing to the model. The potential distribution of the species according to the model occurs mainly in the departments of San Salvador, Santa Ana, Ahuachapán, Sonsonate, Usulután and La Libertad. As a result, based on statistical analysis, a bioclimatic profile of the species determined by this contribution will facilitate the development of future studies, including the effects of Climate Change.

**Key words:** Ecosystems, ecological niche, distribution, species, *Amazona auropalliata*, MaxEnt

## INTRODUCCIÓN

El Salvador cuenta con una extraordinaria diversidad biológica, representatividad de ecosistemas, especies y recursos genéticos de gran valor regional y mundial (MARN 2018a). Este país centroamericano se localiza en Mesoamérica, considerada una de las regiones con mayor biodiversidad del planeta (Mittermeier et al. 2011; Myers 2003; Myers et al. 2000).

Los avances en el conocimiento de la diversidad biológica del país, especialmente de las especies que le conforman, ha estado orientada principalmente al levantamiento de inventarios (Gallo 2005), permitiendo ampliar el conocimiento taxonómico de diversos grupos, entre ellos, se puede mencionar anélidos (Rivera and Romero 2008), anfibios y reptiles (Gunter 2005), árboles y otros taxones botánicos (Berendsohn et al. 2009, 2012, 2016; Búcaro et al. 2012; Búcaro et al. 2016; Búcaro, Sollman, and Stech 2019; Linares 2003; Maekawa et al. 2013; MARN 2018b), aves (Dickey and Van Rossem 1938; Herrera and Komar 2006), crustáceos (Bott 1967; Holthuis 1954), mamíferos (Burt and Stirton 1961; Owen and Girón 2012; Owen et al. 1991), moluscos (Keen 1971) y peces (McMahan et al. 2013; Phillips and Cole 1978).

Además, se han descrito nuevas especies para la ciencia (García-Ríos 2006; Hartmann-Schröder 1956, 1959; Kilian and Smalla 2015; De León-González et al. 2004; Ratcliffe and Cave 2002; Van Tassel and Baldwin 2004) y se han identificado áreas importantes para la conservación de algunos grupos (Komar 2002; MARN 2018a).

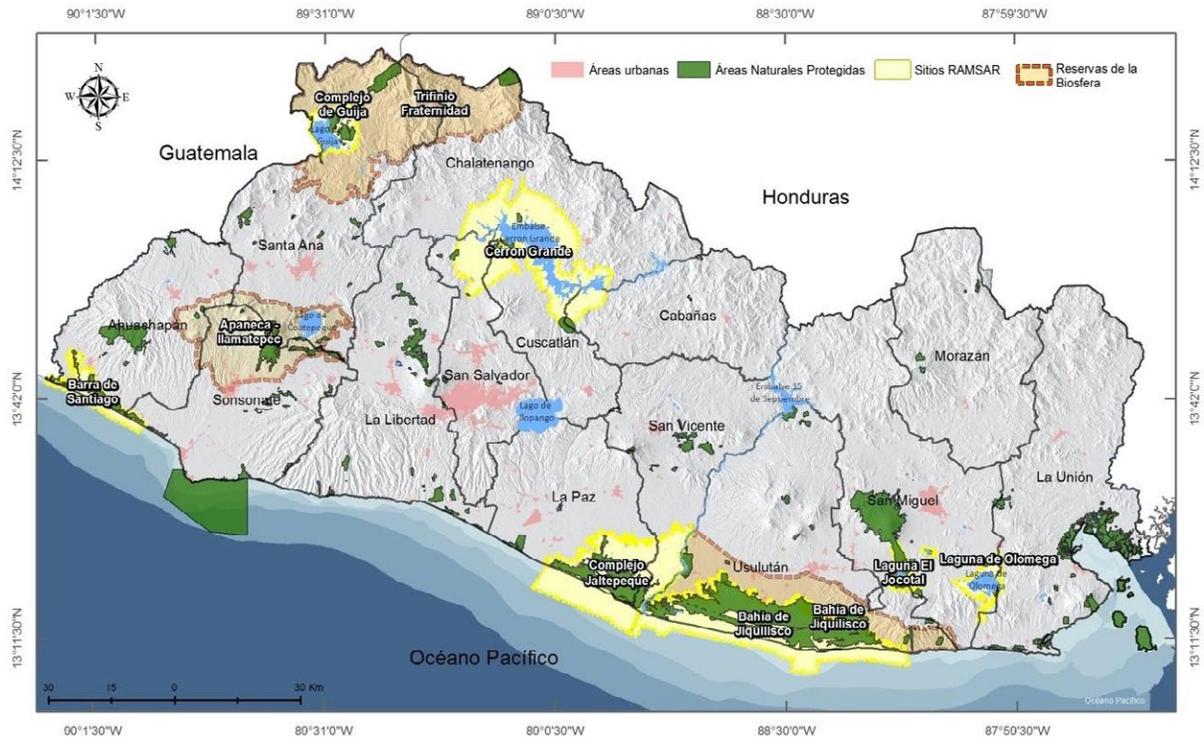
El Salvador registra 8,756 especies, la mitad de ellas pertenecientes al reino Plantae y un 49% al Reino Animalia (Gallo 2005; MARN and PNUMA 2007). Esto a pesar de las transformaciones al paisaje salvadoreño a lo largo de su historia, que han afectado de forma directa a los ecosistemas (Browning 1975; Lötschert 1952), especialmente a los territorios rurales.

Actualmente, el 38% (817,000 ha) del territorio nacional está cubierta de bosques (MARN 2018b) inmersos en diferentes usos de la tierra, incluyendo aquellos comprendidos en Áreas Naturales Protegidas, sitios Ramsar y Reservas de la Biosfera (MARN 2013) (Figura 1).

Los ecosistemas que contiene El Salvador proporcionan diferentes servicios ecosistémicos para la sociedad, entre los que se pueden mencionar: mantenimiento de la biodiversidad, conectividad biológica, moderar la pérdida de suelo y microclimas, control de torrentes y proporcionan sustento a los medios

## Figura 1

Reservas de la Biosfera, Sitios Ramsar y Áreas Naturales Protegidas de El Salvador



Fuente: Ministerio del Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador (MARN, 2013)

de vida locales (WB 2020).

No obstante, su evidente importancia, la diversidad biológica del país se ha visto sometida a fuertes presiones y los ecosistemas se han degradado, debido principalmente a la pérdida de hábitats, prácticas agropecuarias inadecuadas, sobreexplotación, contaminación, especies invasoras y el cambio climático (MARN 2013, 2018a).

### Distribución de especies

La presencia o ausencia de las especies en la distribución geográfica depende de múltiples factores tanto ecológicos, fisiológicos, geológicos y ambientales. De ellos, el clima resulta ser uno de los más importantes debido a que condiciona de forma importante

la ausencia o presencia de los seres vivos, especialmente en el contexto de Cambio Climático (Heikkinen et al. 2006)

La distribución real de las especies es aquella donde se tiene certeza de su ocurrencia por medio de verificaciones en campo, mientras que la distribución potencial se refiere a zonas geográficas que presentan condiciones ambientales de gran similitud con los sitios en los que se ha constatado su presencia y, por tanto, tienen mucha probabilidad que su distribución efectivamente ocurra (Gámez 2011).

El modelado de distribución de especies (SMD por sus siglas en inglés) ha tenido mucho auge en las últimas décadas, en contraste con el poco uso que se le ha dado en el país. Quizá se deba a su complejidad (Anderson 2015), por lo que

el entrenamiento es un elemento fundamental para abordar el tema, especialmente para investigadores en la región hispanoamericana (Peterson et al. 2019).

Entre los pocos esfuerzos por modelar la distribución de las especies en el país se pueden mencionar el análisis de 20 especies catalogadas en peligro extinción mediante DIVA GIS (MARN 2018a), y la creación de mapas de distribución potencial para *Pecari tajacu* (cucho de monte) y *Triatoma dimidiata*, ambos a través del programa MaxEnt (MARN 2019, Paredes et al. 2020).

### MaxEnt

MaxEnt es un software para modelar la distribución de especies y nicho ecológico (Phillips, et al., 2006). Forma parte de los modelos de ecología distribucional utilizados en gran medida por el uso de información geográfica en las últimas décadas (Elith and Leathwick 2009; Peterson et al. 1999; Soberón and Nakamura 2009; Soberón and Peterson 2005). Es el más popular de todos los modelos, porque supera en precisión predictiva a sus análogos y porque es un software relativamente fácil de usar (Merow et al. 2013), al requerir únicamente datos de presencia de las especies y de variables ambientales para generar los análisis (Phillips et al. 2006).

Ha sido utilizado para diversos propósitos, incluyendo el modelaje de distribución de especies en escalas temporales y espaciales, el modelado del nicho ecológico con datos escasos, filogeografía, análisis de especies endémicas, amenazadas, efectos de cambio climático, entre otros (Abdelaal et al. 2019; Baldwin 2009; Çoban et al. 2020; Galante et al. 2018; Guevara et al. 2018; Gutiérrez et al. 2014; Zhang et al. 2019).

El análisis de la base matemática de MaxEnt va más allá del alcance de esta contribución, por

lo que se recomienda revisar las consistentes reseñas disponibles en la literatura científica (Elith et al. 2011; Merow et al. 2013; Phillips et al. 2017, 2006). Incluso, se han desarrollado publicaciones de gran utilidad para mejorar la comprensión de sus alcances (Elith et al. 2011; Eysenbach and Levine 2019; Merow et al. 2013).

### Datos climáticos

Para correr MaxEnt se requieren dos tipos de datos: puntos de presencia de la especie de interés y datos ambientales del área de estudio. El primero se refiere a sitios georreferenciados en los que se ha observado la especie de interés. Los segundos son variables abióticas como temperatura y humedad. Estas se prefieren sobre el uso de suelo o la composición del mismo, debido a que los primeros son dinámicos (es decir que varían en escalas de tiempo pequeñas) y predecibles (Austin & Van Niel 2010).

La fuente más importante de variables bioclimáticas para detección remota es WorldClim (Waltari et al. 2014). WorldClim es un sitio que reúne conjuntos de datos climáticos a nivel mundial (Fick & Hijmans 2017). Los datos futuros se fundamentan en los resultados generados mediante el Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados Fase 6 (CMIP6) para la versión vigente de WorldClim y los resultados del CMIP5 para la versión 1.4 de la plataforma.

En su versión más reciente (2.5), consta de un conjunto de 19 variables basadas en datos climáticos mensuales (Tabla 1) interpolados espacialmente con una resolución espacial de 2.5 arc-segundos. Las variables incluyen temperatura (mínima, máxima y media), precipitación, radiación solar, presión de vapor y velocidad del viento, en el período 1970–2000 (Fick and Hijmans 2017).

**Tabla 1**

*Variables Bioclimáticas disponibles en WorldClim*

<b>Variable</b>	<b>Descripción</b>
Bio1	Temperatura promedio anual (°C)
Bio2	Oscilación diurna de la temperatura (°C)
Bio3	Isotermalidad (°C) = $BIO2/BIO7*100$
Bio4	Estacionalidad de la temperatura (desviación estándar *100) (°C)
Bio5	Temperatura máxima promedio del periodo más cálido (°C)
Bio6	Temperatura mínima del mes más frío (°C)
Bio7	Oscilación anual de la temperatura (°C) (BIO5-BIO6)
Bio8	Temperatura media del mes más húmedo (°C)
Bio9	Temperatura media del mes más seco (°C)
Bio10	Temperatura media del cuatrimestre más cálido (°C)
Bio11	Temperatura media del cuatrimestre más frío (°C)
Bio12	Precipitación anual (mm)
Bio13	Precipitación del periodo más húmedo (mm)
Bio14	Precipitación del periodo más seco (mm)
Bio15	Estacionalidad de la precipitación (Coeficiente de variación, CV)
Bio16	Precipitación del trimestre más húmedo (mm)
Bio17	Precipitación del trimestre más seco (mm)
Bio18	Precipitación del cuatrimestre más cálido (mm)
Bio19	Precipitación del cuatrimestre más frío (mm)

*Fuente:* 2000 (Fick and Hijmans 2017).

Las 19 variables bioclimáticas pueden ser descargadas sin costo de WorldClim. Una de las ventajas de este repositorio, es la posibilidad de disponer de información bioclimática del pasado, presente y futuro. La versión 1.4 de WorldClim incluye datos de los períodos medio Holoceno y de la última glaciación (Otto-Bliesner et al. 2006) y de proyecciones climáticas a 2050 y a 2070.

Se recomienda enfáticamente que las descargas de las variables de WorldClim se realicen a una escala más precisa, es decir 30 arc-segundos (disponible actualmente solo en la versión 1.4 de WorldClim), que es la escala de datos que podría ofrecer mejores resultados,

dado el tamaño de El Salvador.

Además de WorldClim, se pueden utilizar datos de sensores remotos con más precisión (Waltari et al. 2014) y datos interpolados de estaciones meteorológicas locales, ofrecidas por las agencias responsables de generar esta información en cada país. Puede valorarse incluir en el análisis otras variables ambientales de tipo topográfico o de uso de suelo, según su disponibilidad.

#### *Datos de presencia de especies*

Los datos de presencia de las especies se pueden obtener de bases de datos mundiales o regionales, según corresponda (Tabla 2).

Por razones obvias, es necesario contar con información de tipo local que se haya producido

por esfuerzos científicos sobre el grupo de interés.

**Tabla 2**

Bases de datos que registran ocurrencias geográficas de especies que pueden utilizarse para modelar su distribución en MaxEnt.

Fuente	Disponible en	Descripción
Global Biodiversity Information Facility (GBIF)	<a href="https://www.gbif.org">https://www.gbif.org</a>	Es una base de datos internacional que dispone datos de especies, incluyendo información geográfica, de manera gratuita para cualquier persona interesada. Contiene más de 1,601 millones de ocurrencias y miles de contribuciones científicas han utilizado sus datos.
Tropicos	<a href="https://www.tropicos.org/home">https://www.tropicos.org/home</a>	Es mantenida por el Jardín Botánico de Missouri. La versión vigente es 3.1.2. Contiene información de 1.33 millones de especies de plantas. Incluye imágenes y miles de referencias científicas.
OBIS-SEAMAP	<a href="https://obis.org">https://obis.org</a>	Es una plataforma que contiene datos georreferenciados de aves, mamíferos y tortugas marinas. Contiene más de 62 millones de registros de presencias de 135,178 especies. Los datos se pueden descargar de manera gratuita.
Paleobiology Database	<a href="https://paleobiodb.org/#/">https://paleobiodb.org/#/</a>	Es una base de datos paleontológica pública. Contiene cerca de 1.5 millones de ocurrencias y más de 425,000 taxones registrados.

Fuente: Información disponible en las descripciones en los sitios web

**METODOLOGÍA**

**Descarga e instalación de software**

MaxEnt requiere la instalación previa del lenguaje de programación Java 1.4 o superior, que puede ser descargado gratuitamente de <https://www.java.com/es/>. Es necesario verificar que la versión de Java sea compatible con el sistema operativo de la computadora en que

se realizarán los análisis.

MaxEnt puede descargarse gratuitamente en el sitio web [https://biodiversityinformatics.amnh.org/open\\_source/maxent/](https://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/). La carpeta en formato .zip debe descomprimirse. En su interior contiene archivos con extensiones .jar, .bat, .sh y .txt, que deben ser ubicadas en una única carpeta en la computadora de trabajo. El archivo .txt contiene las instrucciones para efectuar la instalación.

## Preparación de datos

Para ejecutar MaxEnt, se requiere que los datos bioclimáticos estén en formato ASCII (.asc) y posean encabezados coincidentes, además, deben contener los mismos tamaños de celda y límites geográficos para evitar fallos en la ejecución del programa. Se debe indicar si se trata de variables continuas o categóricas, según la naturaleza de los datos disponibles.

Por defecto, las variables de WorldClim se descargan en formato ráster GeoTiff con información a escala global, que debe ser consistentemente recortada a los límites del área de estudio, en este caso El Salvador. Para ello, se sugiere el uso de ArcGis, Qgis o algún otro software de análisis geográfico disponible, a efecto de iterar las operaciones de recorte de las capas utilizando una máscara vectorial, en un mismo proceso, que debería incluir su transformación del formato ráster tiff a Ascii .asc para evitar interrupciones en el software (Scheldeman and Van Zonneveld 2011).

Las variables de presencia de las especies seleccionadas para el estudio deben estar contenidas en un archivo de valores separados por coma ("comma separated values", extensión .csv) y deben contener los campos en el estricto orden de especie, longitud y latitud. Si bien el programa podría permitir columnas adicionales, serán ignoradas para el análisis.

## Ejecutar MaxEnt

Al ejecutar el archivo maxent.jar, se deberá indicar los directorios de las muestras (Samples), el directorio de las variables ambientales (Environmental Layers) y activar la casilla correspondiente. También debe seleccionarse "crear curvas de respuesta" y "jackknife". Por último, se debe indicar el directorio de salida (Output directory).

El formato de salida (output format) debe ser

logístico y el tipo de archivo de salida (output file), ASCII. Además, en la ventana principal debe seleccionarse la opción configuraciones (settings). Aparecerá una nueva ventana con tres pestañas. En la primera pestaña, llamada Basic, se debe seleccionar la opción "remove duplicados" (remove duplicate presence records), colocar 25 en la prueba de porcentaje aleatoria (random test percentage) y 5 réplicas (replicates). En la segunda pestaña, "advanced": desactivar la casilla resultados de casillas en blanco (write output grids).

La salida logística mejora la idoneidad del modelo (Phillips and Dudík 2008) debido a que estima la probabilidad de presencia, asumiendo que el diseño del muestreo es tal que las típicas localizaciones de presencias tienen una probabilidad de presencia de alrededor 0.5 (Phillips 2020).

Si bien los investigadores deberán sentirse en la libertad de modificar las especificaciones antes descritas, a efecto de ajustar mejor sus modelos y sacarles el máximo provecho a los resultados, se sugiere que se tome en cuenta los aportes de diversas contribuciones científicas y se fundamente muy bien los cambios.

Para efectos ilustrativos, se exponen algunos resultados de datos reales de *Amazona auropalliata*, especie en peligro según el listado Oficial de Especies Amenazadas y en Peligro de Extinción vigente (MARN 2015). Los datos de presencia fueron obtenidos el 16 de julio de 2020, mediante la extensión de QGis *Load GBIF occurrences*. También, se utilizaron las 19 variables bioclimáticas de WorldClim versión 1.3. En la configuración de MaxEnt se utilizaron 500 iteraciones, cinco réplicas, salida logística y el 25% del total de los registros se utilizó para entrenamiento.

Cabe destacar que los modelos fueron evaluados por medio de las pruebas curva de respuesta (análisis de omisión/comisión)

y sensibilidad Curva Operada por el Receptor (ROC) - Área bajo la curva (AUC) (Elith et al. 2006), así como la prueba de Jackknife para medir los efectos de cada variable en el modelo (Shcheglovitova and Anderson 2013).

Se realizó un análisis de componentes principales (APC) utilizando la matriz estandarizada de contribución de cada variable bioclimática para conocer su comportamiento en función del modelo. Para estimar la correlación de las variables, se realizó un dendrograma jerárquico con distancia de Mahalanobis y se estimó el valor de agrupamiento de la varianza en el modelo de APC. Todos los análisis fueron

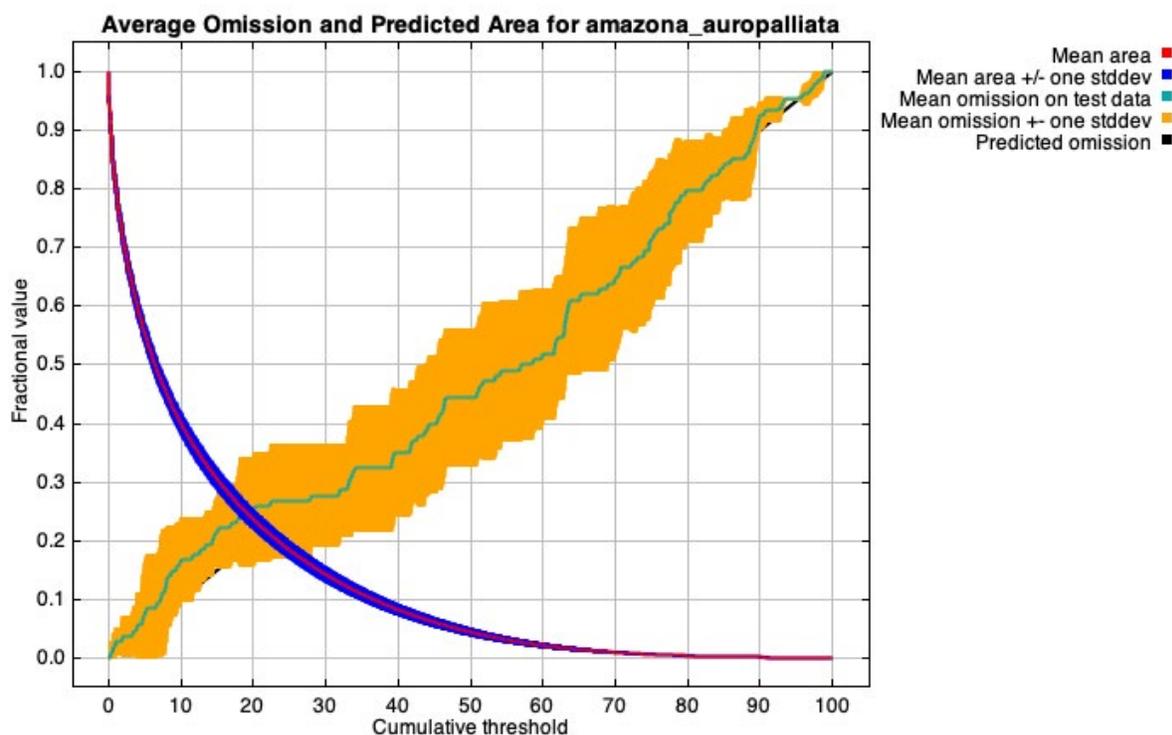
realizados con el Software estadístico PAST (Paleontological statistics software package for education and data analysis) (Hammer, Harper, and Ryan 2001)

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La prueba del Área bajo la Curva ROC muestra un ajuste de modelo bueno, dado que la tasa de omisión de los datos es cercana a la omisión esperada, tanto en la muestra de entrenamiento como en la prueba (Figura 2). Esta prueba es una medida simple, pero a la vez estandarizada de los resultados (Phillips 2020).

### Figura 2

Análisis del ajuste del modelo de distribución potencial de *Amazona auropalliata* en El Salvador, utilizando la técnica ROC.

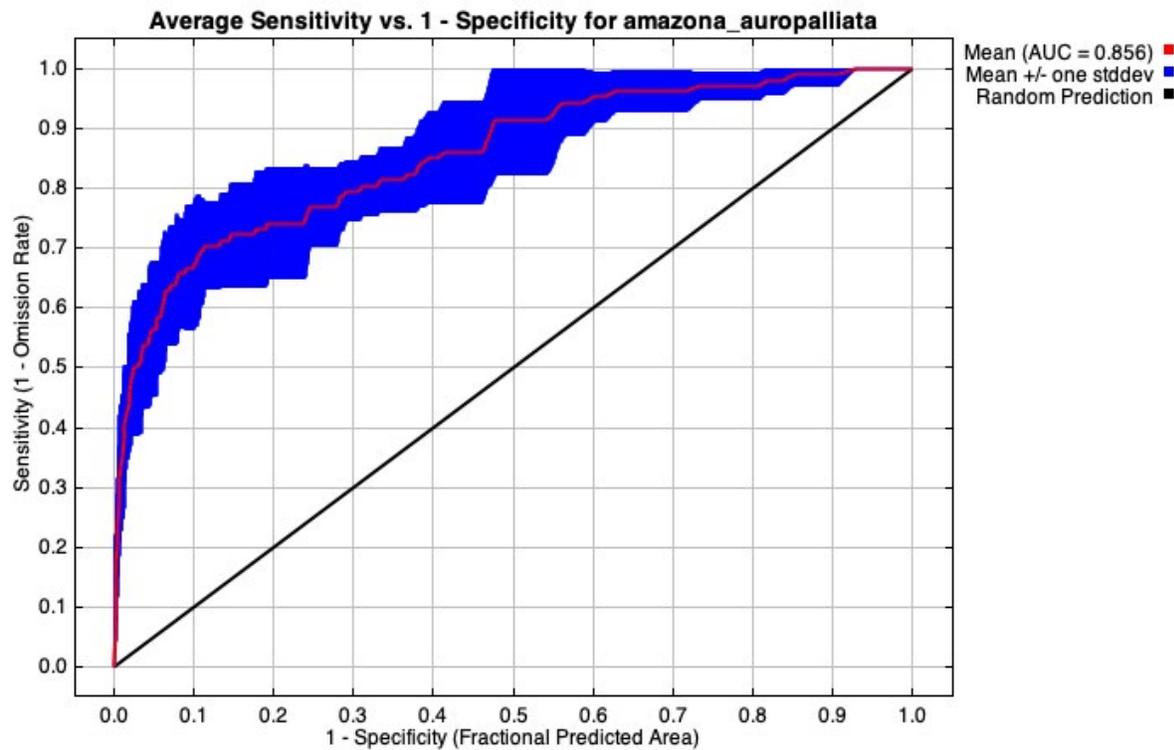


El valor obtenido por el modelo para AUC fue de 0.856 en promedio (Figura 3), correspondiente a un modelo bueno, que supera el umbral de 0.75 sugerido por la literatura científica (Elith et al. 2006). Cabe destacar que la máxima

capacidad de predicción es 1 (Phillips and Dudík 2008), mientras que 0.5, equivale a tener un resultado similar al que ocurriría al azar, por lo que abajo de este punto, el modelo no es válido.

### Figura 3

Tendencia de valores del Área bajo La Curva AUC de *Amazona auropalliata* en El Salvador.



Las variables bioclimáticas que más contribuyen al modelo de distribución de *Amazona auropalliata* son la temperatura media del mes más húmedo (21.7%) y la precipitación del cuatrimestre más cálido (21%), mientras que el resto de variables presentaron valores menores al 7.7%. En el caso de la importancia, las variables con valores mayores a 10, fueron la temperatura media del mes más húmedo (17.6), la precipitación en el período más seco (14) y la precipitación del cuatrimestre más cálido (12.6) (Tabla 3).

La prueba de Jackknife aplicado a AUC, se mostró de manera consistente con los resultados de la Tabla 3, resaltando el valor de las variables media del mes más húmedo y precipitación del cuatrimestre más cálido con el mayor aporte para el ajuste del modelo (Figura 4).

Al analizar los resultados del dendrograma

jerárquico del aporte de las variables climáticas sobre la distribución de *Amazona auropalliata*, se observó la conformación de tres grupos de variables, que a su vez se diferenciaron en subgrupos más pequeños (Figura 5). El primer grupo estuvo compuesto de las variables Bio03, Bio08, Bio10, Bio04 y Bio05, las primeras tres variables y las dos últimas, conformaron dos subgrupos respectivamente. El segundo grupo fue el más extenso, con cuatro subgrupos, el de mayor tamaño se conformó con Bio09, Bio11, Bio12 y Bio13, seguido del subgrupo Bio15, Bio18 y Bio19, el compuesto de Bio06 y Bio07 y finalmente, Bio14 aislada del resto. El tercer y último grupo, se conformó por las variables Bio01 y Bio02. El valor obtenido en la prueba fue de 0.856, lo que permite detectar las variables ambientales que están correlacionadas y que afectan la distribución de la especie.

El análisis de los principales componentes (Figura 6) permitió identificar cuatro grupos de

**Tabla 3**

Contribución de las variables ambientales al modelo MaxEnt de distribución de *Amazona auropalliata* en El Salvador.

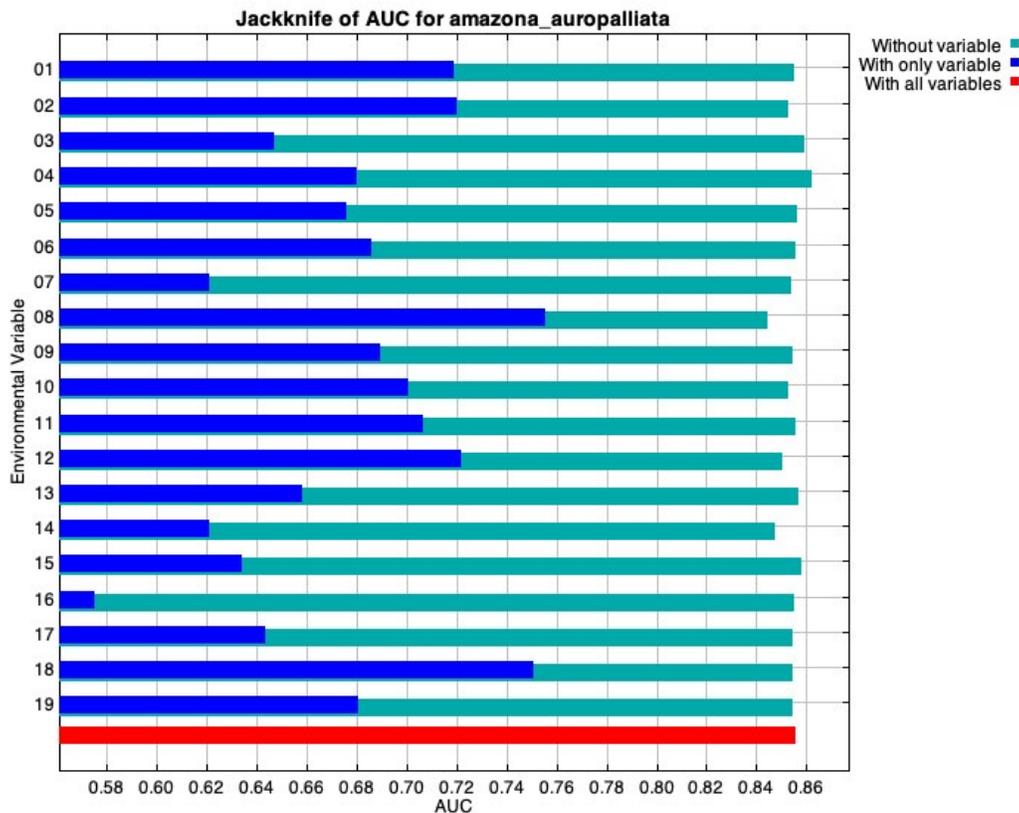
Variable bioclimática	Contribución (%)	Importancia por permutaciones
Temperatura media del mes más húmedo (°C)	21.7	17.6
Precipitación del cuatrimestre más cálido (mm)	21	12.6
Precipitación del periodo más seco (mm)	7.7	14
Precipitación del cuatrimestre más frío (mm)	7.7	8.8
Precipitación anual (mm)	7.3	9.2
Oscilación diurna de la temperatura (°C)	6.5	3.3
Estacionalidad de la temperatura (desviación estándar *100) (°C)	6.4	3.8
Estacionalidad de la precipitación (Coeficiente de variación, CV)	4.1	11.3
Temperatura media del cuatrimestre más frío (°C)	3.9	0.8
Precipitación del trimestre más seco (mm)	3.8	9.4
Precipitación del periodo más húmedo (mm)	2.7	0.9
Isotermalidad (°C) = BIO2/BIO7*100	2.4	1.1
Temperatura promedio anual (°C)	1.7	0.6
Temperatura media del mes más seco (°C)	1.5	3.4
Temperatura media del cuatrimestre más cálido (°C)	0.8	0.4
Oscilación anual de la temperatura (°C) (BIO5-BIO6)	0.3	1.2
Precipitación del trimestre más húmedo (mm)	0.2	1.3
Temperatura mínima del mes más frío (°C)	0.2	0.1
Temperatura máxima promedio del periodo más cálido (°C)	0.2	0.3

variables que aportan al modelo distribucional. Por una parte, el grupo de variables compuesto de Bio08, Bio10 y Bio03 y el grupo Bio04 y Bio05, estuvieron más relacionados con la importancia en la distribución de la especie. El tercer grupo,

se compuso de la mayoría de variables que se agruparon, pero con aportes escasos, tanto para la importancia como para la contribución. El cuarto grupo estuvo conformado por Bio07 y Bio08, con algunos aportes modestos en la

**Figura 4**

Prueba de Jackknife al AUC según las variables climáticas al modelo de distribución de *Amazona auropalliata* en El Salvador.



contribución. Finalmente, tal como lo había expresado el dendrograma jerárquico, las variables Bio01 y Bio02, relacionadas con la temperatura, se encontraron dispersas, pero contribuyendo fuertemente en la distribución de la lora nuca amarilla. El resultado mostró que el eje uno contiene el 90.38% de la varianza.

Al analizar los resultados de la distribución de la especie con MaxEnt, se observó que *Amazona auropalliata*, utilizando un umbral de 0.4, su distribución potencial se reduce principalmente a los departamentos de San Salvador, Santa Ana, Ahuachapán, Sonsonate y Usulután, con el departamento de La Libertad como especie de corredor y algunos puntos escasos en otros departamentos (Figura 7).

Tal como ha sido ampliamente documentado, la distribución de la especie está fuertemente asociada al servicio ecosistémico de provisión

de hábitat de Áreas Naturales Protegidas y Manglares del país (MARN 2013, 2018). Dado que la conexión entre su hábitat está condicionada por mosaicos de agroecosistemas y zonas urbanas, por lo que será necesario considerar estos aspectos en los programas de recuperación de la especie.

Utilizando 0.9 como umbral de presencia de la especie, se observaron núcleos concentrados de distribución, básicamente en San Salvador, seguido de algunos puntos dispersos en Santa Ana y algunos de los principales manglares del país (Figura 7).

## CONCLUSIONES

Las variables bioclimáticas predicen adecuadamente la potencial de distribución de *Amazona auropalliata* en El Salvador, con

**Figura 5**

Dendrograma jerárquico de aportes de las variables climáticas al modelo de distribución de *Amazona auropalliata* en El Salvador.



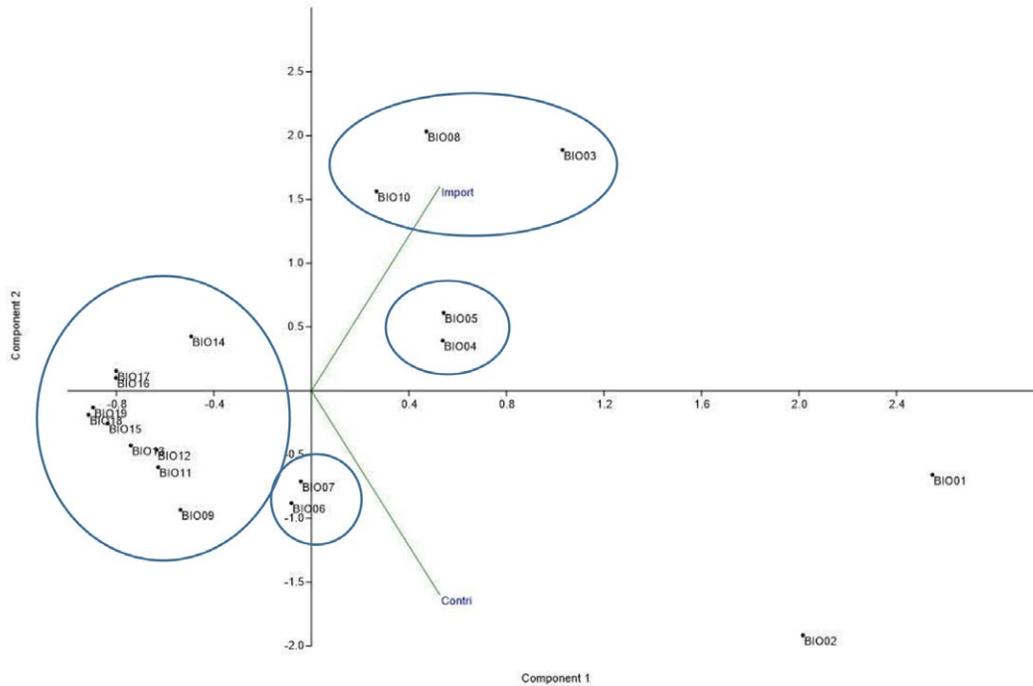
modelos que pueden considerarse confiables, dado que los valores de AUC fueron de 0.856.

Las variables que definieron los modelos fueron principalmente la temperatura media del mes más húmedo, la precipitación del cuatrimestre más cálido y la precipitación en el período más seco.

El modelaje distribucional potencial de la especie, expresado principalmente en los departamentos de San Salvador, Santa Ana, Ahuachapán, Sonsonate y Usulután. La Libertad servirá de base para el establecimiento de programas de recuperación de hábitat, incluyendo la protección de las Áreas Naturales Protegidas, bosques salados, así como en la

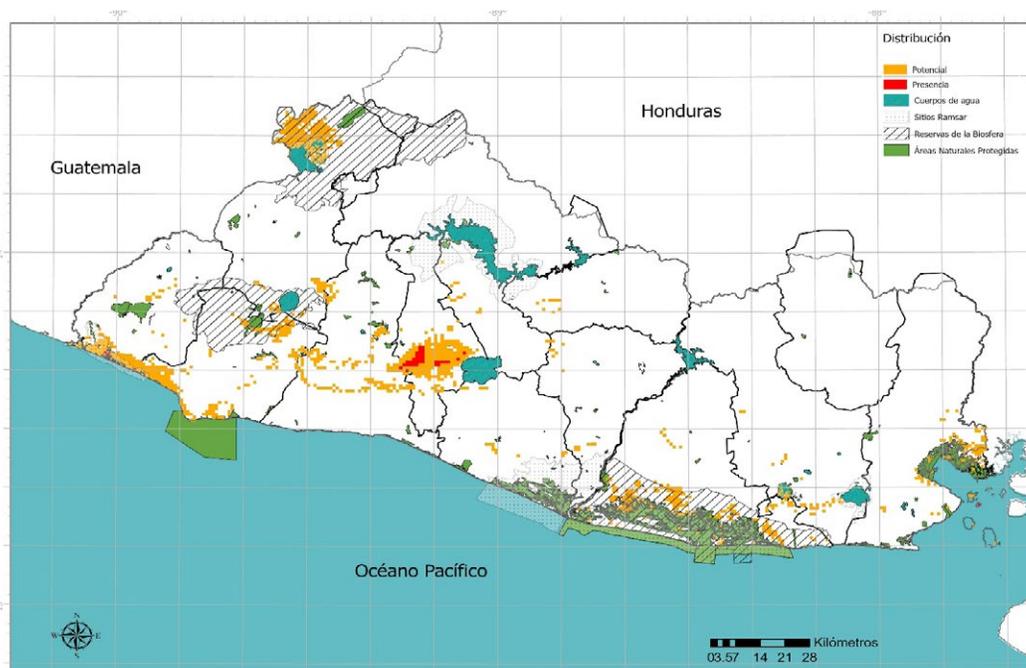
**Figura 6**

Análisis de los Componentes Principales de las variables climáticas al modelo de distribución de *Amazona auropalliata* en El Salvador.



**Figura 7**

Modelo de distribución potencial de *Amazona auropalliata* en El Salvador



Nota: Estimado en MaxEnt

búsqueda de territorios adecuados para la especie en otros usos de la tierra.

El perfil bioclimático determinado para la especie, permitirá modelar su distribución futura, incluyendo las variaciones ocasionadas del Cambio Climático.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece el aporte de Arturo Escalante, Yesenia Peñate y Carolina Canales en cuanto a sus orientaciones para el análisis geográfico de las variables. Dos evaluadores anónimos contribuyeron a mejorar la calidad del manuscrito.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdelaal, Mohamed, Mauro Fois, Giuseppe Fenu, and Gianluigi Bacchetta. 2019. "Using MaxEnt Modeling to Predict the Potential Distribution of the Endemic Plant *Rosa Arabica* Crép. in Egypt." *Ecological Informatics* 50(January):68–75.
- Anderson, R. P. 2015. "El Modelado de Nichos y Distribuciones: No Es Simplemente Clic, Clic, Clic." *Biogeografía* 8:4–27.
- Anderson, Robert P., and Israel Gonzalez. 2011. "Species-Specific Tuning Increases Robustness to Sampling Bias in Models of Species Distributions: An Implementation with Maxent." *Ecological Modelling* 222 (15): 2796–2811.
- Austin, M. and Van Niel, K.P. 2011, Improving species distribution models for climate change studies: variable selection and scale. *Journal of Biogeography*, 38: 1-8. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2010.02416.x>
- Baldwin, Roger A. 2009. "Use of Maximum Entropy Modeling in Wildlife Research." *Entropy* 11(4):854–66.
- Berendsohn, Walter G., Anne Kathrina Gruber, Dagoberto Rodríguez Delcid, and Pablo Olmedo Galán. 2009. "Nova Silva Cuscatlanica: Árboles Nativos e Introducidos de El Salvador. Parte 1: Angiospermae – Familias A a L." *Englera* (29):17–225.
- Berendsohn, Walter G., Anne Kathrina Gruber, Dagoberto Rodríguez Delcid, and Pablo Olmedo Galán. 2016. "Nova Silva Cuscatlanica: Árboles Nativos e Introducidos de El Salvador: Parte 3: Angiospermae – Familias R a Z y Gymnospermae." *Englera* (29):1–356.
- Berendsohn, Walter G., Anne Kathrina Gruber, Jorge Monterrosa Salomón, and José Gerver Molina. 2012. "Nova Silva Cuscatlanica: Árboles Nativos e Introducidos de El Salvador: Parte 2: Angiospermae – Familias M a P y Pteridophyta." *Englera* (29):1–300.
- Bott, R. 1967. "Fluß-Krabben Aus Dem Westlichen Mittelamerika (Crust., Decap.)." *Senckenbergiana Biologica* 48(5/6):373–380.
- Browning, D. 1975. *El Salvador, La Tierra y El Hombre*. Colección. San Salvador, El Salvador: Dirección de Publicaciones e Impresos.
- Búcaro, Rosa Delia, Andries Touw, and Michael Stech. 2012. "Bryoflora Salvadorensis. I. Introduction and Contributions to the Moss Flora of El Salvador." *Bryophyte Diversity and Evolution*.
- Búcaro, R., P. Sollman, and M. Stech. 2019. "Bryoflora Salvadorensis 3. An Updated Checklist and New Records of Pottiaceae for El Salvador." *Phytotaxa*.
- Búcaro, Rosa Delia, Maria Alida Bruggeman-Nannenga, and Michael Stech. 2016. "Bryoflora Salvadorensis. 2. Fissidens (Fissidentaceae, Bryophyta), New Additions." *Lindbergia*.

- Burt, WH, and RA Stirton. 1961. "The Mammals of El Salvador." *Miscellaneous Publications* 117:78.
- Çoban, H. Oğuz, Ömer K. Örucü, and E. Seda Arslan. 2020. "Maxent Modeling for Predicting the Current and Future Potential Geographical Distribution of *Quercus Libani* Olivier." *Sustainability (Switzerland)* 12(7):1-17.
- De León-González, Jesús Angel, Carlos Giovanni Rivera, and Mayra Yaneth Romero. 2004. "Sublittoral Eunicidae and Onuphidae (Polychaeta) from Soft Bottom off El Salvador, Eastern Pacific." *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 84(1):93-101.
- Dickey, DR, and AJ Van Rossem. 1938. "Birds of El Salvador." *Field Museum of Natural History: Zoological Series* 23:1-658.
- Elith, Jane, Catherine H. Graham, Robert P. Anderson, Miroslav Dudík, Simon Ferrier, Antoine Guisan, Robert J. Hijmans, Falk Huettmann, John R. Leathwick, Anthony Lehmann, Jin Li, Lucia G. Lohmann, Bette A. Loiselle, Glenn Manion, Craig Moritz, Miguel Nakamura, Yoshinori Nakazawa, Jacob McC. M. Overton, A. Townsend Peterson, Steven J. Phillips, Karen Richardson, Ricardo Scachetti-Pereira, Robert E. Schapire, Jorge Soberón, Stephen Williams, Mary S. Wisz, and Niklaus E. Zimmermann. 2006. "Novel Methods Improve Prediction of Species' Distributions from Occurrence Data." *Ecography*.
- Elith, Jane, and John R. Leathwick. 2009. "Species Distribution Models: Ecological Explanation and Prediction across Space and Time." *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 40:677-97.
- Elith, Jane, Steven J. Phillips, Trevor Hastie, Miroslav Dudík, Yung En Chee, and Colin J. Yates. 2011. "A Statistical Explanation of MaxEnt for Ecologists." *Diversity and Distributions* 17(1):43-57.
- Eysenbach, Benjamin, and Sergey Levine. 2019. "If MaxEnt RL Is the Answer, What Is the Question?"
- Fick, Stephen E., and Robert J. Hijmans. 2017. "WorldClim 2: New 1-Km Spatial Resolution Climate Surfaces for Global Land Areas." *International Journal of Climatology*.
- Galante, Peter J., Babatunde Alade, Robert Muscarella, Sharon A. Jansa, Steven M. Goodman, and Robert P. Anderson. 2018. "The Challenge of Modeling Niches and Distributions for Data-Poor Species: A Comprehensive Approach to Model Complexity." *Ecography* 41(5):726-36.
- Gallo, Melibea. 2005. "Estado Del Conocimiento de la Biodiversidad En El Salvador." *Documento Final. Ministerio de Medios Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador. San Salvador, El Salvador.* 154 pp..
- Gámez, R. (2011). Guía para la elaboración de mapas de distribución potencial. Retrieved from Universidad Veracruzana website: <https://www.uv.mx/personal/mgamez/files/2010/07/guia-version-germoplasma.pdf>.
- García-Ríos, Cedar I. 2006. "A New Species of *Lepidochitona* (Mollusca: Polyplacophora) from El Salvador." *Veliger*.
- Guevara, Lázaro, Beth E. Gerstner, Jamie M. Kass, and Robert P. Anderson. 2018. "Toward Ecologically Realistic Predictions of Species Distributions: A Cross-Time Example from Tropical Montane Cloud Forests." *Global Change Biology* 24(4):1511-22.
- Gunter, K. 2005. *The Amphibians and Reptiles of El Salvador*. Krieger Publishing Company.
- Gutiérrez, Eliécer E., Robert P. Anderson, Robert S. Voss, José Ochoa-G., Marisol Aguilera, and Sharon A. Jansa. 2014. "Phylogeography

- of Marmosa Robinsoni: Insights into the Biogeography of Dry Forests in Northern South America." *Journal of Mammalogy* 95(6):1175–88.
- Hammer, Øyvind, David A. T. Harper, and Paul D. Ryan. 2001. "Past: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis." *Palaeontologia Electronica*.
- Hartmann-Schröder, Gesa. 1956. "Neue Armandia-arten (Opheliidae, Zpolychaeta) Aus Brasilien Und El Salvador." *Beitrage Zur Neotropischen Fauna*.
- Hartmann-Schröder, Gesa. 1959. "Zur Ökologie Der Polychaeten Des Mangrove-esteregebietes von El Salvador." *Beitrage Zur Neotropischen Fauna*.
- Heikkinen, R. K., Luoto, M., Araújo, M. B., Virkkala, R., Thuiller, W., & Sykes, M. T. (2006). Methods and uncertainties in bioclimatic envelope modelling under climate change. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 30(6), 751-777. <https://doi.org/10.1177/0309133306071957>
- Herrera, Nestor, and Oliver Komar. 2006. "Aves Acuáticas En El Salvador." *Wetlands* 57.
- Holthuis, L. B. 1954. "On a Collection of Decapod Crustacea from the Republic of El Salvador (Central America)." *Zoologische Verhandelingen*.
- Jaynes, E. T. 1957. "Information Theory and Statistical Mechanics." *Physical Review*.
- Keen, M. 1971. *Sea Shells of Tropical West America; Marine Mollusks from Baja California to Peru*. 2nd ed. California: Stanford University Press.
- Kilian, Norbert, and Boris Smalla. 2015. "Ageratum Salvanaturae (Eupatorieae, Compositae), a New Species from the National Park El Imposible, Ahuachapán, El Salvador." *Willdenowia*.
- Komar, Oliver. 2002. "Priority Conservation Areas for Birds in El Salvador." *Animal Conservation*.
- Kramer-Schadt, Stephanie, Jürgen Niedballa, John D. Pilgrim, Boris Schröder, Jana Lindenborn, Vanessa Reinfelder, Milena Stillfried, Ilja Heckmann, Anne K. Scharf, Dave M. Augeri, Susan M. Cheyne, Andrew J. Hearn, Joanna Ross, David W. Macdonald, John Mathai, James Eaton, Andrew J. Marshall, Gono Semiadi, Rustam Rustam, Henry Bernard, Raymond Alfred, Hiromitsu Samejima, J. W. Duckworth, Christine Breitenmoser-Wuersten, Jerrold L. Belant, Heribert Hofer, and Andreas Wilting. 2013. "The Importance of Correcting for Sampling Bias in MaxEnt Species Distribution Models." *Diversity and Distributions* 19(11):1366–79.
- Linares, José. 2003. "Listado Comentado de Los Árboles Nativos y Cultivados En La República de El Salvador." *Ceiba*.
- Lötschert, Wilhelm. 1952. "La Vegetación De El Salvador." *Comunicaciones* 9.
- Maekawa, N., Y. Shirouzu, R. Parada, B. Castillo, and A. Nakagiri. 2013. *Mushrooms of El Salvador*. CENTA and University of Tatory.
- MARN. 2013. *Estrategia Nacional de Biodiversidad*. San Salvador.
- MARN. 2015. *Listado Oficial de Especies de Vida Silvestre Amenazadas o En Peligro de Extinción*. El Salvador: Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- MARN. 2018a. *Informe Nacional Del Estado Del Medio Ambiente INEMA 2017*. San Salvador, El Salvador.
- MARN. 2018b. *Inventario Nacional de Bosques de El Salvador (INB) 2018*. San Salvador.
- MARN. 2019. *Sexto Informe Nacional Para El Convenio Sobre La Diversidad Biológica El Salvador*. San Salvador, El Salvador.
- MARN, and PNUMA. 2007. *GEO El Salvador 2003-2006 Informe Del Estado Del Medio*

- Ambiente de El Salvador*. San Salvador, El Salvador.
- McMahan, Caleb D., Wilfredo A. Matamoros, Francisco S. Álvarez Calderón, Wendy Yamileth Henríquez, H. Michelle Recinos, Prosanta Chakrabarty, Enrique Barraza, and Néstor Herrera. 2013. "Checklist of the Inland Fishes of El Salvador." *Zootaxa*.
- Merow, Cory, Matthew J. Smith, and John A. Silander. 2013. "A Practical Guide to MaxEnt for Modeling Species' Distributions: What It Does, and Why Inputs and Settings Matter." *Ecography* 36(10):1058–69.
- Mittermeier, Russell A., Will R. Turner, Frank W. Larsen, Thomas M. Brooks, and Claude Gascon. 2011. "Global Biodiversity Conservation: The Critical Role of Hotspots." in *Biodiversity Hotspots*.
- Moreno, Roberto, Ricardo Zamora, Juan Ramón Molina, Angélica Vasquez, and Miguel Ángel Herrera. 2011. "Predictive Modeling of Microhabitats for Endemic Birds in South Chilean Temperate Forests Using Maximum Entropy (Maxent)." *Ecological Informatics*.
- Myers, Norman. 2003. "Biodiversity Hotspots Revisited." *BioScience* 53(10):916–17.
- Myers, Norman, Russell A. Mittermeyer, Cristina G. Mittermeyer, Gustavo A. B. Da Fonseca, and Jennifer Kent. 2000. "Biodiversity Hotspots for Conservation Priorities." *Nature*.
- Ortega-Pacheco, Daniel, Maria J. Mendoza-Jimenez, and Paul Herrera. 2019. "Mangrove Conservation Policies in the Gulf of Guayaquil." in *Climate Change Management*.
- Otto-Bliesner, Bette L., Shawn J. Marshall, Jonathan T. Overpeck, Gifford H. Miller, and Aixue Hu. 2006. "Simulating Arctic Climate Warmth and Icefield Retreat in the Last Interglaciation." *Science*.
- Owen, J. G., J. K. Jones, and R. J. Baker. 1991. "Annotated Checklist of Land Mammals of El Salvador." *Occasional Papers the Museum Texas Tech University* 139:1–20.
- Owen, James, and Luis Girón. 2012. "Revised Checklist and Distributions of Land Mammals of El Salvador." *Museum of Texas Tech University*.
- Paredes, G. V. R., Gonzalez, M. A., Gonzalez, A. M., Amaya-Díaz, J., Saravia, F., Tesonero, C., Marín, M. F., & Carmona-Galindo, V. D. (2020). Aplicación de máxima entropía para el modelaje del nicho fundamental de la interacción *Triatoma dimidiata*—*Trypanosoma cruzi* (Tc 1) en El Salvador. *Revista Fesahancocal*, 6(2), 36–37.
- Peterson, A. T., J. Soberón, and V. Sánchez-Cordero. 1999. "Conservatism of Ecological Niches in Evolutionary Time." *Science*.
- Peterson, A. Townsend, Robert P. Anderson, Marlon E. Cobos, Martín Cuahutle, Angela P. Cuervo-robayo, Luis E. Escobar, Marc Fernandez, Daniel Jiménez-garcía, Andrés Lira-noriega, Jorge M. Lobo, Fernando Machado-stredel, Enrique Martínez-, Claudia Nuñez-penichet, Javier Nori, Luis Osorio-olvera, and María Teresa. 2019. "Curso Modelado de Nicho Ecológico, Versión 1.0." *Biodiversity Informatics* 14:1–7.
- Phillips, P., and C. Cole. 1978. "Fisheries Resources of Jiquilisco Bay, El Salvador." Pp. 81–94 in *Proceedings of the 30th Annual Session, Gulf and Caribbean Fisheries Institute*. Gulf and Caribbean Fisheries Institute.
- Phillips, S. J. 2020. "A Brief Tutorial on Maxent." Phillips, S. J. 2020. A Brief Tutorial on Maxent. Available from Url: [Http:// Biodiversityinformatics.Amnh.Org/Open\\_source/Maxent/](http://Biodiversityinformatics.Amnh.Org/Open_source/Maxent/)." *AT&T Research*.
- Phillips, Steven J., Robert P. Anderson, Miroslav Dudík, Robert E. Schapire, and Mary E. Blair. 2017. "Opening the Black Box: An Open-

- Source Release of Maxent." *Ecography* 40(7):887–93.
- Phillips, Steven J., Robert P. Anderson, and Robert E. Schapire. 2006. "Maximum Entropy Modeling of Species Geographic Distributions." *Ecological Modelling* 190:231–59.
- Phillips, Steven J., and Miroslav Dudík. 2008. "Modeling of Species Distributions with Maxent: New Extensions and a Comprehensive Evaluation." *Ecography*.
- Radosavljevic, Aleksandar, and Robert P. Anderson. 2014. "Making Better Maxent Models of Species Distributions: Complexity, Overfitting and Evaluation." *Journal of Biogeography* 41(4):629–43.
- Ratcliffe, Brett C., and Ronald D. Cave. 2002. "New Species of Cyclocephala from Honduras and El Salvador (Coleoptera: Scarabaeidae: Dynastinae: Cyclocephalini)." *Coleopterists Bulletin*.
- Rivera, C., and M. Romero. 2008. "Checklist of Polychaetes (Annelida: Polychaeta) from El Salvador, Eastern Pacific." *Check List*.
- Scheldeman, X., and M. Van Zonneveld. 2011. *Manual de Capacitación En Análisis Espacial de Diversidad y Distribución de Plantas*. Rome: Biodiversity International.
- Shcheglovitova, Mariya, and Robert P. Anderson. 2013. "Estimating Optimal Complexity for Ecological Niche Models: A Jackknife Approach for Species with Small Sample Sizes." *Ecological Modelling* 269:9–17.
- Soberón, Jorge, and Miguel Nakamura. 2009. "Niches and Distributional Areas: Concepts, Methods, and Assumptions." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*.
- Soberón, Jorge, and A. Townsend Peterson. 2005. "Interpretation of Models of Fundamental Ecological Niches and Species' Distributional Areas." *Biodiversity Informatics*.
- Van Tassell, J., and C. Baldwin. 2004. "A Review of the Gobiid Genus Akko (Teleostei: Gobiidae) with Description of a New Species." *Zootaxa*.
- Waltari, Eric, Ronny Schroeder, Kyle McDonald, Robert P. Anderson, and Ana Carnaval. 2014. "Bioclimatic Variables Derived from Remote Sensing: Assessment and Application for Species Distribution Modelling." *Methods in Ecology and Evolution* 5(10):1033–42.
- Warren, Dan L., and Stephanie N. Seifert. 2011. "Ecological Niche Modeling in Maxent: The Importance of Model Complexity and the Performance of Model Selection Criteria." *Ecological Applications* 21(2):335–42.
- WB. 2020. *World Bank Country Forest Note. A Green Deal for El Salvador: Green Infrastructure for Nature-Based Income and Services*. Washington.
- Zhang, Jingjie, Feng Jiang, Guangying Li, Wen Qin, Shengqing Li, Hongmei Gao, Zhenyuan Cai, Gonghua Lin, and Tongzuo Zhang. 2019. "Maxent Modeling for Predicting the Spatial Distribution of Three Raptors in the Sanjiangyuan National Park, China." *Ecology and Evolution* 9(11):6643–54.