

Efectos del cambio climático en la distribución potencial del Quetzal (*Pharomachrus mocinno*) en Guatemala a partir de modelamientos de nicho ecológico

Belém González, gon18560@uvg.edu.gt / María José Ortíz, ort18741@uvg.edu.gt / Zabdi López, zabdi@alumni.uvg.edu.gt
Departamento de Biología, Facultad de Ciencias y Humanidades, Universidad del Valle de Guatemala.

RESUMEN: *Pharomachrus mocinno* es un migrante latitudinal, distribuyéndose desde el sur de México hasta Panamá. Esta especie endémica de la región mesoamericana habita principalmente en bosques nubosos bien conservados. Se encuentra clasificado cerca de estar amenazado de extinción a nivel regional según la UICN, Apéndice I de CITES y en el Índice 3 del LEA. Se conoce poco sobre su distribución potencial por lo que es importante la generación de modelos de distribución de especies. Esta metodología establece posibles rangos de distribución en tiempo pasado, actual y futuro; relacionando amenazas como el cambio climático que permitan generar planes de conservación y manejo efectivos. El objetivo de este estudio era evaluar si existía un efecto directo de las condiciones climáticas futuras relacionadas a las trayectorias socioeconómicas compartidas (escenarios SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5) sobre la distribución de *P. mocinno*. El escenario SSP5-8.5 mostró el mayor impacto sobre la potencial distribución de la especie con un total de 1,140,264.00 ha perdidas. Esto evidencia la vulnerabilidad del Quetzal ante el aumento de temperatura, uno de los efectos principales del cambio climático.

PALABRAS CLAVE: Distribución potencial, cambio climático, temperatura, quetzal.

Effects of climate change on the potential distribution of the resplendent quetzal (*Pharomachrus mocinno*) in Guatemala based on ecological niche modeling

ABSTRACT: (*Pharomachrus mocinno* is an altitudinal migrant, distributed from southern Mexico to Panama. This species, endemic to the Mesoamerican region, mainly inhabits well-preserved cloud forests. It is classified close to being threatened with extinction at the regional level according to the IUCN, CITES Appendix I, and LEA Index 3. Little is known about its potential distribution; therefore, it is important to generate distribution models. This methodology establishes possible ranges of distribution in the past, present, and future; relating threats such as climate change to generate effective conservation and management plans. The objective of this study was to evaluate if there is a direct effect of future climatic conditions related to shared socioeconomic pathways (scenarios SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, and SSP5-8.5) on the distribution of the resplendent quetzal. From this, it was observed that there is a decrease of the potential area for the presence of the species concerning the increased number of degrees Celsius. The SSP5-8.5 scenario has the largest loss in the potential distribution for this species, with a loss of 1,140,264.00 hectares. This shows the vulnerability of the resplendent quetzal to temperature increase, the main effect of climate change.

KEY WORDS: Potential distribution, climate change, temperature, resplendent quetzal.

Introducción

El cambio climático es una importante presión para la biodiversidad del mundo, la cual está afectada también por la contaminación, sobreexplotación y fragmentación de hábitat. Para algunos grupos taxonómicos aún son desconocidos los impactos del calentamiento global, específicamente se ignora la repercusión en la distribución de estos organismos. A grandes rasgos se sabe que numerosas especies van a modificar su rango de distribución, ya sea aumentando o disminuyéndolo; esto implica cambios conductuales, micro-evolutivos y adaptativos que deberán ser desarrollados (Lorente et al., 2004; Morrone, 2009). Los bosques nubosos presentan características ecológicas y fisiológicas únicas, haciéndolos susceptibles ante la amenaza del calentamiento global (Agudelo et al. 2012; Cascante y Trejos, 2019). Estos bosques albergan una alta proporción de biodiversidad y especies endémicas (Bubb et al., 2004). El cambio climático amenaza a estos ecosistemas nubosos con un reemplazo de bosques de rango altitudinal estrecho, orillándolos a una posible extinción. La alteración del equilibrio dinámico de este tipo particular de ecosistemas tendrá como resultado la pérdida de biodiversidad, cambios de altitud en rangos de especie y una posterior reorganización de la comunidad.

Pharomachrus mocinno es un ave endémica regional que se encuentra clasificado cerca de estar amenazado de extinción a nivel región según la UICN, Apéndice I de CITES y en el Índice 3 del Listado de Especies Amenazadas de Guatemala -LEA- (Renner, 2005; CUNZAP-USAC y CONAP, 2020). Las poblaciones de Quetzal han declinado en toda su área de distribución, debido principalmente a la pérdida acelerada y a la perturbación de los bosques nubosos. Siendo sus principales zonas de distribución los bosques nubosos desde el sur de México hasta Panamá (BirdLife International, 2012). Dentro de esta zona se distinguen dos subespecies: *P. m. costaricensis* y *P. m. mocinno*, separadas por la depresión nicaragüense (Bolaños et al. 2020). Habita principalmente en ecosistemas bien conservados de la Sierra Madre de Chiapas, sur de México y Centroamérica (Ávila et al. 1996). Generalmente, usa todas las áreas de las regiones del bosque nuboso con árboles mayores a 5 m de altura y se reproduce exclusivamente en árboles muertos y en pie, principalmente en restos de *Brosimum costaricanum* (Renner, 2005). Por la mala calidad de los bosques debido a la destrucción el patrón de distribución geográfica de la especie es discontinuo con diferentes niveles de conectividad entre los remanentes generándose un pequeño tamaño poblacional (Solórzano et al. 2003).

En Guatemala, su período reproductivo ocurre de enero a junio, en el que permanece en el bosque nuboso de la Sierra de las Minas a elevaciones entre los 2,500 msnm. Se considera un migrante altitudinal, ya que se desplaza a áreas más bajas

en julio (1,200 a 2,000 msnm) y regresa al bosque nuboso a principios de diciembre. Se ha sugerido que dicho comportamiento está asociado a la abundancia de frutos de lauráceas, uno de sus principales alimentos (Paíz, 1996; Solórzano et al. 2000; 2004). Por esto, juega un papel ecológico significativo al dispersar semillas de al menos 32 especies de árboles; participando en la dinámica de resiliencia del bosque nuboso (Bolaños et al. 2020).

Estudios previos han evaluado los impactos de la cobertura de los bosques nubosos sobre la distribución del quetzal. Solórzano et al. (2003) sugirieron que dentro de 50 años solo una de las 21 regiones en donde hoy se puede encontrar a la especie se mantendrá. Además, existen diversos estudios que promueven la conservación del quetzal. Entre estos se encuentra el análisis realizado por Solórzano et al. (2008) sobre la variación genética del ave a lo largo de su distribución para determinar la cantidad de grupos genéticos que deben ser considerados prioridad para planes de conservación. En general, se conoce poco sobre la distribución de la mayoría de las especies de regiones tropicales. Esta falta de información es un reto para aquellos que toman decisiones sobre la conservación y manejo de vida silvestre. Los modelos de distribución de especies establecen una distribución potencial mediante el uso de datos primarios (sitios de colecta u observación de la especie) y secundarios (información de clima, topografía o medio ambiente del área) (Naoki et al. 2006). Estos modelos permiten realizar predicciones sobre la distribución de especies en tiempo pasado, presente y futuro, relacionando amenazas como el cambio climático para generar planes de conservación y manejo efectivos.

Bajo las evidentes amenazas que el Quetzal presenta se han implementado estrategias de conservación en el país. Uno de los primeros esfuerzos fue la creación del Refugio del Quetzal que está localizado en las faldas del Volcán Atitlán, en Santa Bárbara Suchitepéquez. Aquí se donó un área complementaria que permitió que se ampliara la extensión del refugio de esta especie en la zona. También se ha realizado proyectos de nidos artificiales que han sido exitosos, ya que algunos fueron empleados para su reproducción (Burgos et al., 2008). Finalmente, uno de los esfuerzos más relevantes de conservación fue la declaratoria del Biotopo Universitario para la Conservación del Quetzal-BUCQ-, un área protegida del país establecida con el objetivo principal de conservar un remanente importante de su hábitat, así como mantener la conectividad biológica entre dicha zona y la Sierra de las Minas por medio de un corredor biológico (Solórzano et al. 2003).

El objetivo del estudio fue evaluar si existía un efecto de las condiciones climáticas predichas por el calentamiento climático sobre la modelación de la distribución potencial del Quetzal (*P. mocinno*). Siendo *P. mocinno* una especie en peligro de extinción, el modelaje de nicho ecológico es esencial para

determinar mejores medidas de manejo y conservación de la especie y su hábitat, permitiendo disminuir el grado de amenaza de la especie.

Materiales y métodos

Área de estudio

Los bosques nublados montanos se encuentran por encima de los 1,000 msnm. Por otro lado, los bosques nubosos premontanos son aquellos que se localizan a altitudes entre los 1,000 y 500 msnm. El piso montano se caracteriza por temperaturas que no superan a los 18 °C, a nivel mundial representan unos 48 millones de hectáreas de los cuales el 50 % se encuentran en América Latina. El piso premontano o subtropical cubre la tercera parte del istmo, con temperatura anuales de 12 a 24 °C. Estos tipos de bosque existen en un patrón de lluvias anuales entre los 500-6,000 mm por año (Hall, 1985; Bubb et al. 2004). Los bosques montanos y premontanos de Guatemala se encuentran en las tierras volcánicas, tierras calizas altas y bajas del norte, tierras metamórficas y tierras volcánicas de la boca costa. Se caracterizan por ser bosques de latifoliadas o coníferas, húmedos, tropicales y subtropicales. Abarcan un 5.49 % de la extensión del país. Los escenarios de zonas de vida muestran que estos tipos de bosque podrían ser fuertemente impactados por el cambio climático en las próximas décadas, pudiendo llegar a desaparecer en los próximos 100 años (Carrera et al. 2019).

Variables climatológicas

- **Distribución actual.** Para el modelo de distribución de la especie, se utilizó una base de colectas/observaciones obtenidas de GBIF.org (2021). Dichos datos fueron filtrados, seleccionando únicamente aquellas ocurrencias dentro del país que tenían coordenadas geográficas y pertenecían al período 2000-2021. Se obtuvo un total de 1,756 registros, con los que se realizó un mapa de calor utilizando Qgis versión 3.12.0.

- **Variables climáticas.** Se utilizó el sitio WorldClim para descargar mapas históricos del clima (1970-2000) que contienen la información para 19 variables climáticas desde la era industrial (Fick y Hijmans, 2017). Estas variables climáticas son: temperatura media anual, intervalo medio diurno, isothermidad, estacionalidad de la temperatura, temperatura máxima del mes más cálido, temperatura mínima del mes más frío, rango anual de temperatura, temperatura media del trimestre más húmedo, temperatura media del cuarto trimestre más seco, temperatura media del trimestre más cálido, temperatura media del trimestre más frío, precipitación anual, precipitación del mes más lluvioso, precipitación del mes más seco, estacionalidad de la

precipitación, precipitación del trimestre más húmedo, precipitación del trimestre más seco, precipitación del trimestre más cálido y precipitación del trimestre más frío.

Para las condiciones futuras (2080-2100), también se utilizó el sitio WorldClim y se descargaron los mapas con las 19 variables climáticas mencionadas anteriormente de cuatro escenarios de las trayectorias socioeconómicas compartidas (SSP) de los Proyectos de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP por sus siglas en inglés).

- **Modelo de distribución pasada y futura bajo cuatro escenarios de cambio climático.** El modelo fue realizado en Maxent versión 3.4.4 utilizando los puntos de colecta y la información de los datos de WorldClim se procedió a realizar el modelo de la actual distribución potencial de *P. moccino*. El cuadro 1 muestra el porcentaje de contribución y la importancia de permutación de cada variable incluida en el análisis de distribución potencial.

Se realizó también un análisis mediante el método de Jackknife para ver la importancia de cada variable climática utilizada en el análisis. Mediante este análisis se pudo determinar que las variables de temperatura media del trimestre más frío, precipitación anual, estacionalidad de la temperatura, temperatura máxima del mes más cálido, temperatura mínima del mes más frío, rango anual de temperatura, temperatura media del trimestre más húmedo y temperatura media del cuarto más seco no representaban una menor importancia en el análisis de la potencial distribución de *P. moccino* y pueden ser descartadas del análisis. Por otro lado, la estacionalidad de la precipitación presenta mayor aumento en la ganancia en el análisis cuando es utilizada de manera individual por lo que se infiere que posee información con mayor utilidad para el análisis. En el caso de precipitación del mes más seco, presenta la mayor pérdida en la ganancia cuando es omitida del análisis por lo que se infiere que tiene la mayor cantidad de información que no está presente en el resto de las variables. Se decidió utilizar las variables climáticas que representan un mínimo de 0.2 de ganancia de entrenamiento regularizado. El análisis de omisión muestra la tasa de omisión y el área predicha en función del umbral acumulativo. Calculada tanto en los registros de presencia de capacitación como en los registros de prueba. La tasa de omisión se encuentra cerca a la omisión prevista, esto indica que, según la definición del umbral acumulativo, este modelo no generó un sobreajuste.

Una vez definida las variables más importantes se procedió a desarrollar la modelación de la distribución potencial de *P. moccino* para el período 2080 - 2100 quitando las variables que no aportaban información relevante para este análisis. Para este se utilizaron los cuatro escenarios disponibles en WorldClim (Fick y Hijmans, 2017). Estos escenarios futuros están basados en las trayectorias socioeconómicas compartidas

Cuadro 1. Porcentaje de contribución e importancia de permutación de cada variable climática utilizada para el análisis de potencial distribución de *Pharomachus moccino*.

Variable	Porcentaje de contribución	Importancia de permutación
Temperatura media anual	1.2	0
Temperatura media del trimestre más cálido	5.7	1.9
Temperatura media del trimestre más frío	0.7	0.2
Precipitación Anual	0.1	0
Precipitación del mes más lluvioso	0.1	0
Precipitación del mes más seco	19	46.8
Estacionalidad de la Precipitación	3.3	6
Precipitación del trimestre más húmedo	0.8	0
Precipitación del Trimestre más seco	6.3	0.9
Precipitación del trimestre más cálido	0.1	0.1
Precipitación del trimestre más frío	0	0
Intervalo medio diario	50.6	0
Isotermalidad	0.6	0
Estacionalidad de la temperatura	0.9	0.8
Temperatura máxima del mes más cálido	0	0
Temperatura mínima del mes más frío	0.3	8.7
Rango Anual de Temperatura	7.3	1.8
Temperatura media del trimestre más húmedo	0.2	0.3
Temperatura Media del Cuarto Más Seco	2.8	32.4

(SSP). Estos representan una serie de modelos de última generación que en el quinto informe de evaluación (AR5) del IPCC de 2013 se presentaron como modelos climáticos CMIP5 y en 2021 en el sexto informe de evaluación (AR6) se presentaron como los nuevos modelos CMIP6 de última generación. Específicamente, poseen un conjunto de escenarios para proporcionar una variedad de resultados distintos del cambio climático para el fin de siglo. El IPCC AR5 presentó cuatro rutas de concentración representativas (RCP) que examinaron diferentes posibles emisiones futuras de gases de efecto invernadero. Estos escenarios, RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5, tienen nuevas versiones en CMIP6. Estos escenarios actualizados se denominan SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP4-6.0 y SSP5-8.5 (estos indican un aumento de 2°C, 3°C, 4.1°C y 5°C respectivamente), cada uno presenta niveles de forzamiento radiativo de 2100 similares a los de su predecesor en AR5. (Hauspadre, 2019).

Para realizar los mapas de cambios en la futura potencial distribución de *P. moccino* se crearon los mapas utilizando la regla umbral de presencia de entrenamiento percentil 10. Esta configuración indica al programa que el umbral

identificará el 90 % de muestras de entrenamiento generando mapas binarios con valores de presencia (1) y ausencia (0). Estos mapas binarios se analizaron dentro del programa Qgis versión 3.12.0. Se recalcularon los valores de mapas de futura distribución potencial a valores de presencia (2) y ausencia (0) para poder realizar la resta con el mapa de actual distribución potencial. Esto genera mapas con cuatro distintas categorías, la primera son las *áreas de alto impacto* (-1) que hace referencia a las áreas donde actualmente se encuentran las condiciones adecuadas para la distribución potencial del quetzal, pero que en el futuro no presentan dichas características. Las *áreas de bajo impacto* (1) que son áreas que actualmente presentan características ideales para la distribución potencial del quetzal y que en el futuro no se verán afectadas. Las nuevas *áreas idóneas* (2), que son áreas que actualmente no presentan las condiciones ideales para la distribución del quetzal pero que en el futuro presentarían las condiciones ideales para la distribución potencial del quetzal. Por último, las *áreas fuera del nicho realizado* (0) que son áreas que actualmente no presentan condiciones climáticas adecuadas para la especie y que en el futuro tampoco lo tendrán.

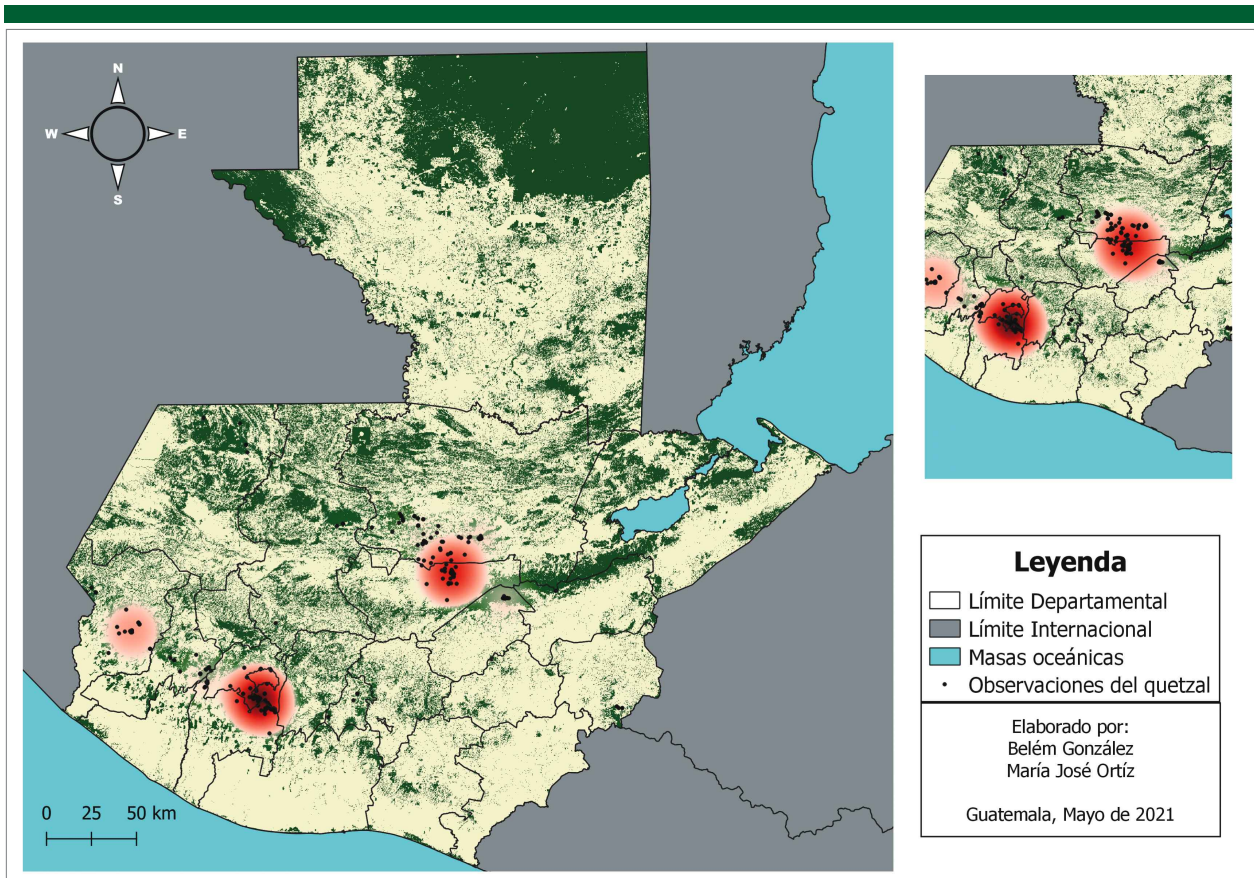


Figura 1. Mapa de color respecto a puntos de observación y colecta de *Pharomachus mocino* durante el periodo 2000-2021.

Resultados y Discusión

El objetivo del estudio consistía en evaluar si existía un efecto de las condiciones climáticas predichas en los distintos escenarios del calentamiento climático sobre la distribución del Quetzal (*P. mocinno*). En la figura 1 se muestran que las observaciones de *P. mocinno* son predominantes en el sur de Alta Verapaz y norte de Baja Verapaz, en Sololá, Suchitepéquez, Quetzaltenango y San Marcos. En dichas zonas del país es en donde se encuentran los bosques nubosos.

El mapa de la distribución de *P. mocinno* en 1970-2000 (figura 2), muestra la idoneidad del hábitat o probabilidad de la presencia de *P. mocinno*, desde un punto de vista climático (Graham et al., 2004) La mayor probabilidad de presencia está representada en las áreas con tonalidad azul más oscura (0.999) -zona predominante-, mientras que va disminuyendo en las áreas con variantes de la tonalidad

celeste (0.749-0.249). En total se estima un total de 1,146,482.64 ha de distribución potencial para *P. mocinno*.

En las figuras 3 a 6 se muestra la distribución potencial de *P. mocinno* para el período 2080-2100 bajo los escenarios SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5. En estos escenarios se tienen tres posibles áreas de distribución; las que tendrán alto impacto, (rojo), bajo impacto (verde claro) y las nuevas áreas idóneas (celeste). Las áreas de alto impacto son zonas en las que actualmente se distribuye la especie pero que en el futuro las condiciones climáticas desaparecerán por lo que no se podrá distribuir en dichas zonas. Las áreas de bajo impacto son las zonas en las que las condiciones climáticas no cambiarán con respecto al actual. Mientras que las nuevas áreas idóneas, son zonas que actualmente no presentan las condiciones ideales para la especie pero que en el futuro posiblemente lo harán.

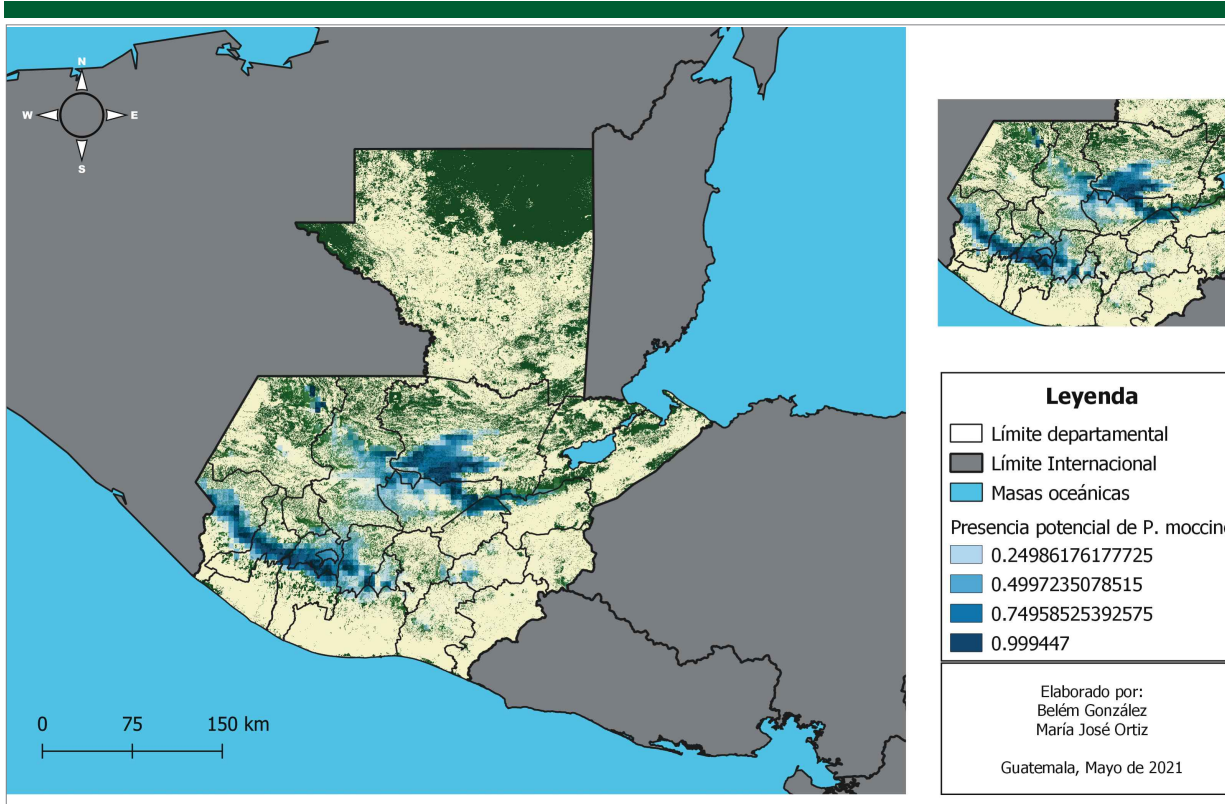


Figura 2. Distribución potencial actual de *Phoromachus moccino*.

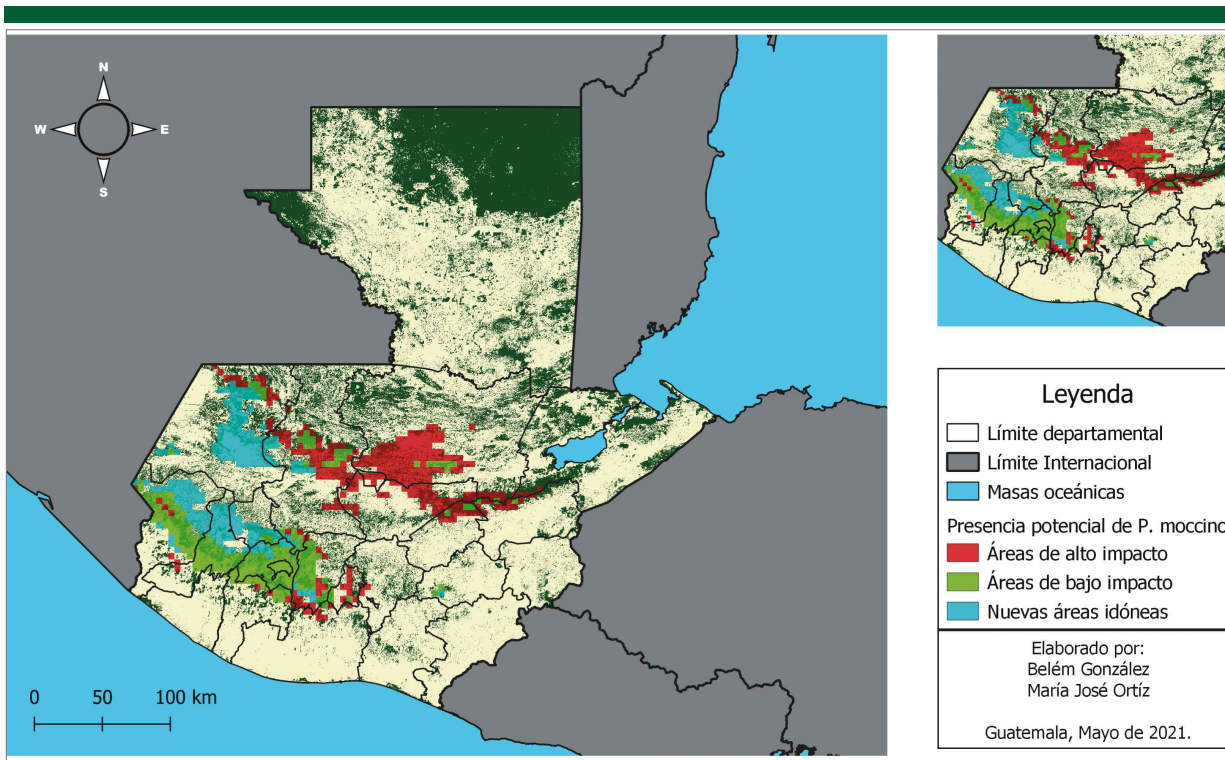


Figura 3. Distribución potencial futura de *Phoromachus moccino* durante el periodo 2080-2100 bajo el escenario SSP1-2.6.

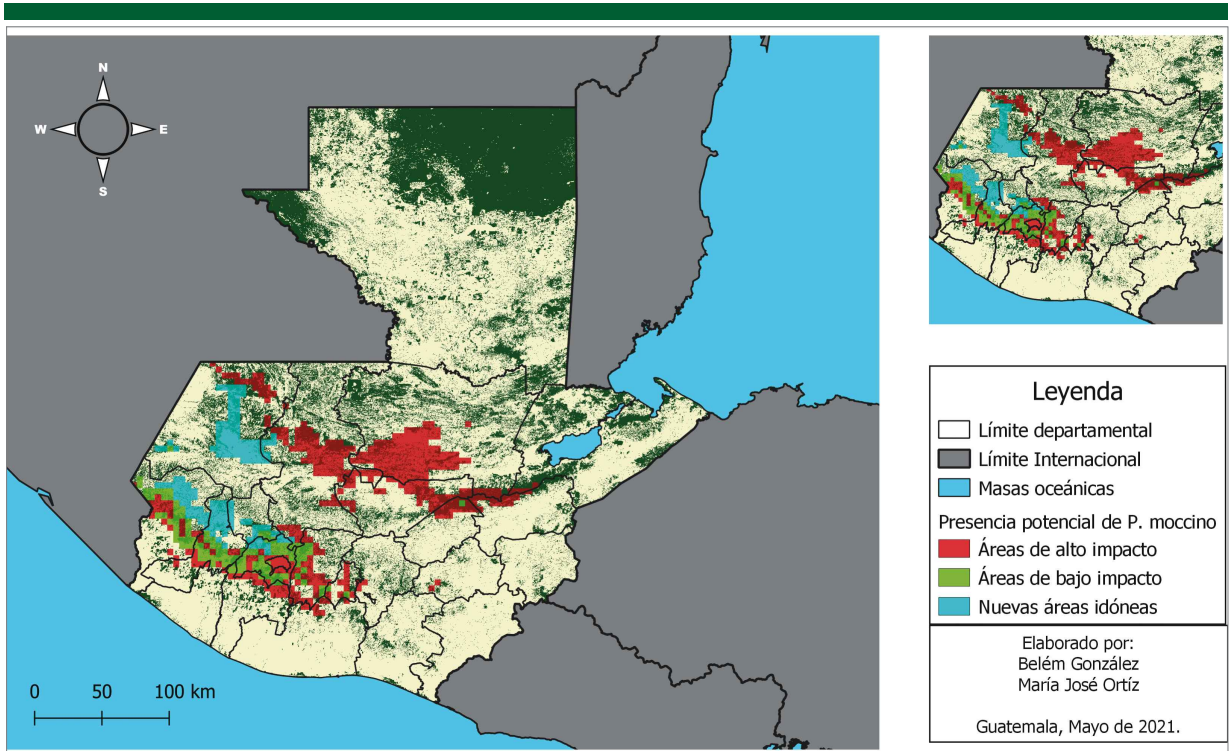


Figura 4. Distribución potencial futura de *Pharomachus moccino* durante el periodo 2080-2100 bajo el escenario SSP2-4.5.

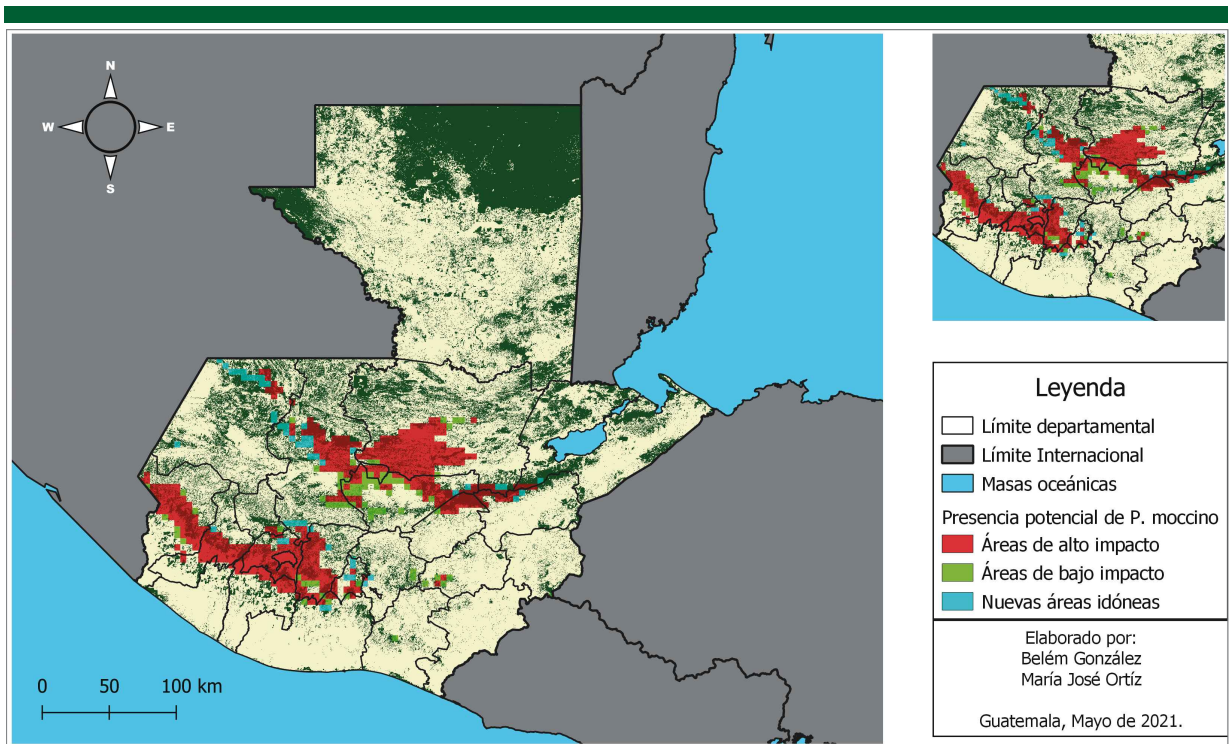


Figura 5. Distribución potencial futura de *Pharomachus moccino* durante el periodo 2080-2100 bajo el escenario SSP3-7.0.

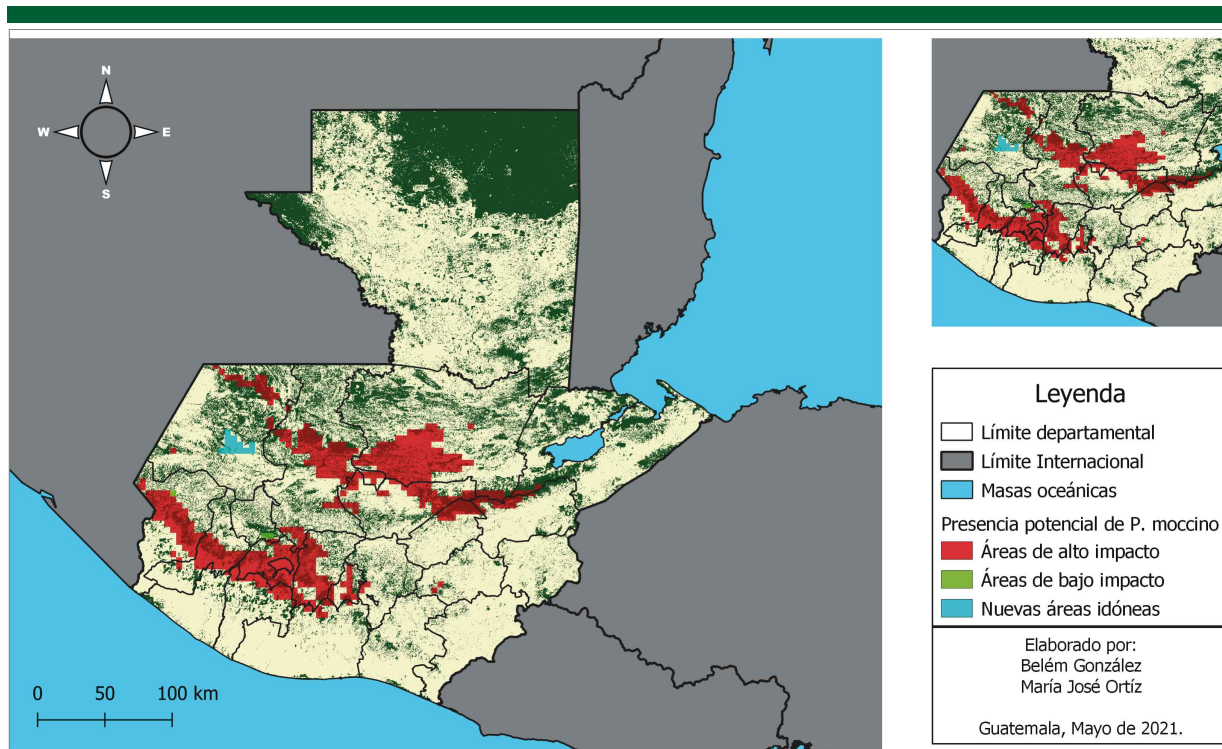


Figura 6. Distribución potencial futura de *Pharomachrus moccino* durante el periodo 2080-2100 bajo el escenario SSP4-8.5.

Cuadro 2. Cambio en la distribución potencial de *Pharomachrus moccino* dentro del territorio de Guatemala en hectáreas en función de los distintos escenarios de AR6.

Escenario	Áreas de bajo impacto (ha)	Áreas de alto impacto (ha)	Nuevas áreas idóneas (ha)
SSP1-2.6	521,772.33	442,984.00	424,564.66
SSP2-4.5	242,292.00	624,709.39	294,102.00
SSP3-7.0	130,792.11	833,288.42	138,961.05
SSP4-8.5	6,213.00	1,140,264.00	26,924.00

El cuadro 2 muestra los cambios en la distribución de *P. moccino* en hectáreas para cada escenario utilizado. El escenario SSP1-2.6 es el escenario más conveniente para la distribución de *P. moccino*, proyectando un total de un 442,984.00 ha de alto impacto y en este escenario existe la posibilidad de nuevas áreas idóneas con un total de 424,564.66 ha. El escenario con mayor impacto para la especie es el SSP4-8.5 en el cual se proyecta una pérdida de 1,140,264.00 ha y al mismo tiempo es el que menor cantidad de nuevas áreas idóneas presenta con un total de 26,924.00.

En la figura 7a se compara el cambio en los cuatro escenarios utilizados. El escenario SSP4-8.5 muestra la mayor fluctuación de los 4 escenarios y es el que tiene un mayor impacto para la especie. Los escenarios SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP4-8.5 muestran un comportamiento similar con una mayor cantidad de áreas de alto impacto comparado con las áreas de bajo impacto y las nuevas áreas idóneas. La figura 7b representa el impacto que generan los cuatro escenarios a la distribución potencial de la especie.

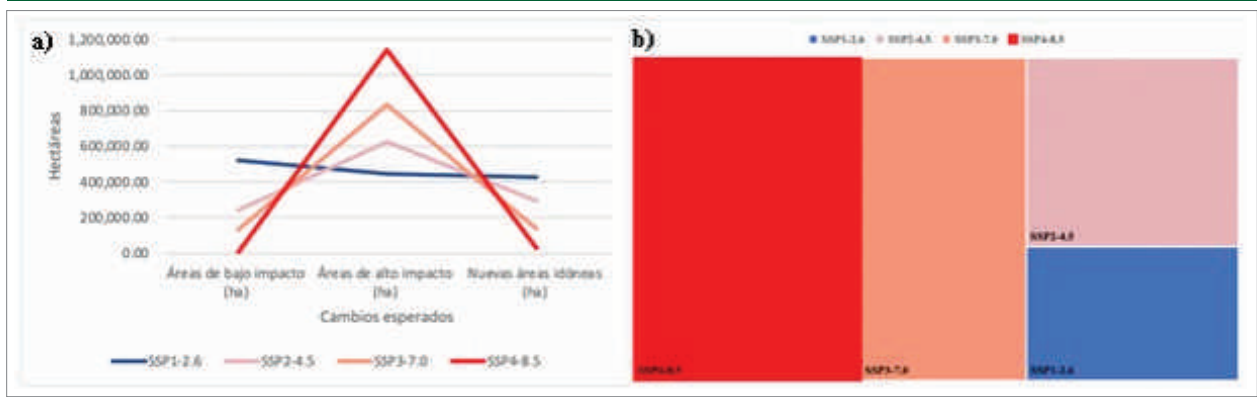


Figura 7. Cambios en las distintas áreas de impacto proyectados por los distintos modelos utilizados. a) comparación de los cambios entre los 4 modelos para cada área. b) Comparación de los cambios en las áreas de alto impacto para cada modelo utilizado.

Respecto a la distribución potencial actual y el mapa de calor de las observaciones de *P. moccino* en el país, se determinó que existen vacíos de información en los bosques de altura de los departamentos de Huehuetenango, Quiché, San Marcos, Quetzaltenango y Sacatepéquez. Dichas áreas son zonas potenciales para la distribución de la especie. La importancia de aumentar el esfuerzo de muestreo en estas zonas radica en el refuerzo de la comprensión de los requerimientos eco-sistémicos que determinan la riqueza y distribución del Trogonido (Quezada et al., 2017)

Los distintos escenarios del cambio climático muestran una alteración significativa respecto a la distribución potencial actual. Esto es sumamente preocupante, ya que las regiones en donde se puede encontrar actualmente a la especie son hábitats característicos del bosque nuboso. Aunado a esto, las zonas establecidas poseen las altitudes óptimas para la especie, las cuales oscilan entre los 1,200 a 2,500 msnm (Paíz, 1996; Solórzano et al., 2004). Particularmente para los escenarios SSP1-2.6 y SSP2-4.5 las nuevas áreas idóneas se encontrarán en el sureste de Huehuetenango, noreste de San Marcos, Quetzaltenango y Totonicapán. Las nuevas altitudes óptimas bajo estos escenarios varían entre los 1,902-2,495 msnm lo cual puede asociarse a la migración altitudinal que sufrirán los bosques nubosos ante dicha amenaza (Peralta et al., 2009). Con esto se infiere que en 2080-2100 el Quetzal podría distribuirse 700 msnm más arriba que en el límite mínimo en el cual actualmente se le observa migrar. En aquellas zonas de distribución ubicadas por debajo de los 1,800 será casi imposible de observar, viéndose potencialmente afectado su comportamiento migratorio. Por otro lado, para los escenarios SSP3-7.0 y SSP5-8.5 existen reducidas nuevas áreas idóneas, por lo que en estas áreas existe una alta probabilidad de extinción.

Los modelos de distribución potencial de *P. moccino* mostraron fragmentos en donde se encuentran las condiciones necesarias para la adaptación de la especie, sin embargo, estos tienen

la peculiaridad de estar seriamente separados entre sí. Aun siendo el quetzal una especie con capacidad de vuelo, la fragmentación en su hábitat potencial generará fuertes retos para la dispersión y hábitos migratorios. Por esto, puede suceder que muchas de las nuevas áreas potenciales no sean fácilmente ocupadas llevando a la especie a una disminución mayor en su hábitat. De igual manera, de llegar a existir una fragmentación del hábitat podría repercutir en un aislamiento entre poblaciones el cual tendría implicaciones en la diversidad genética. Aunado a esto, se debe de verificar que en las posibles nuevas zonas de distribución se encuentre alimento para la especie y zonas de anidamiento, factores claves para la presencia de *P. moccino* (Solórzano et al., 2000; Solórzano et al., 2004; Renner, 2005).

La fragmentación dificultará la migración no solamente del Quetzal, sino también de las especies de plantas de las cuales depende. Además, las poblaciones de quetzales han mermado a lo largo de su distribución producto de la deforestación (Renner, 2004). Las distintas amenazas y el panorama futuro son preocupantes por lo que es indispensable que se involucren a todos los actores necesarios en su conservación y la de su hábitat. Así mismo es importante que los esfuerzos de conservación del Quetzal también tomen en cuenta la ecología del paisaje, cuyos métodos permitan establecer corredores biológicos. Estos corredores deberían unir las áreas de distribución actuales con las potenciales nuevas áreas idóneas. Permitiendo así una migración asistida que posibilite el movimiento, no solo del Quetzal sino también de las especies de plantas de las cuales depende. Debido a esto se recomienda la identificación de sitios adecuados entre los bosques que han quedado aislados. Estos deben de tener la particularidad de ser variables respecto al tipo de hábitat conservado, manteniendo todos los tipos que el quetzal utilice durante su migración entre áreas. Se recomienda también que otra de las principales estrategias de acción para la conservación de la especie sea evitar el avance de la frontera agrícola, los incendios y la extracción de madera aumentando la regulación

de los recursos forestales de las zonas cercanas a los puntos de distribución de la especie. Como se menciona en el documento de Estrategias de Conservación del Quetzal se debe priorizar la conservación de las seis áreas más grandes en donde la especie habita, siendo estas: la cadena volcánica, el Biotopo del Quetzal - corredor biológico del bosque nuboso, sierra Yalijux, Cerro Amay - Aldea Santa Cruz Barrillas, Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas y área trinacional Trifinio. Además, es importante la incorporación de nuevas áreas de bosques nubosos al Sistema guatemalteco de Áreas Protegidas -SIGAP- con sus respectivos estudios técnicos y planes de manejo (CUNZAP-USAC y CONAP, 2020).

Conclusiones

Existe una posible reducción de la distribución potencial de *P. moccino* en Guatemala ligada al cambio climático. Las variables climáticas más determinantes en la distribución potencial de la especie son la estacionalidad de la precipitación y la precipitación del mes más seco. Esto posiblemente tenga relación con la fenología de las especies de plantas de las que es dependiente el ave, pero más estudios son necesarios para definir dicha relación. En cuanto a la reducción de distribución potencial de *P. moccino* el escenario SSP1-2.6 presenta una reducción de 442,984.00 ha; el escenario SSP2-4.5 una reducción de 624,709.39 ha; el escenario SSP3-7.0 833,288.42 ha y el escenario SSP4-8.5 una reducción de 1,140,264.00 ha, sido este el escenario que mayor impacto tendría en la especie. En el caso de las nuevas áreas idóneas SSP1-2.6 muestra un aumento de 424,564.66 ha; el escenario SSP2-4.5 un total de 294102.00 ha nuevas; el escenario SSP3-7.0 presenta un total de 168,961.05 ha nuevas y el escenario SSP4-8.5 un aumento de 26,924.00 ha donde la especie podría llegar a distribuirse. Los resultados evidencian las zonas principales de distribución actuales como futuras que son idóneas para la especie, esto permite implementar medidas de conservación que sean más eficaces y acertadas para evitar la pérdida de la especie y así mismo evitar que se pierda este eslabón que es esencial para la dinámica óptima del ecosistema de las zonas que habita.

Bibliografía

Agudelo, N., Mora, J., Pérard, S., Solórzano, J. (2012) *Extensión del Bosque Nublado y su Contribución de la Lluvia Horizontal a la Precipitación Total en la Reserva Biológica Uyuca, Honduras Ceiba*, 53 (2): 109-123.

Ávila, M., Hernandez, V., Verlarde, E. (1996) *The Diet of Resplendent Quetzal (Pharomachrus mocinno mocinno: Trogonidae) in a Mexican Cloud Forest* Biotropica 28 (4b): 720-727.

BirdLife International. (2015) *Pharomachrus mocinno* The IUCN Red List of Threatened Species.

Bolaños, P., Sueur, J., Fuchs, J., Aubin, T. (2020) *Vocalization of the rare and flagship species Pharomachrus mocinno (Aves: Trogonidae): implications for its taxonomy, evolution and conservation* Bioacoustics 29 (6): 654-669.

Bubb, P., May, I., Miles, L., Sayer, J. (2004) *Cloud forest agenda* United Nations Environment Program World Conservation Monitoring Centre, Cambridge

Burgos, C., Guzmán, F., Dollies, C., Mendizabal, G. (2008) *Observación del Quetzal en Guatemala* Instituto Guatemalteco de Turismo -INGUAT-. Organización de Estados Americanos -OEA-.

Cascante, A., Trejos, C. (2019) *Diversidad y vulnerabilidad de la flora orquídeológica de un bosque montano nuboso del Valle Central de Costa Rica* Lankesteriana 19 (1): 31-55.

Carrera, J., Mosquera, V., Gándara, A. (2019) *Diversidad biológica y ecosistemas terrestres* En: Castellanos, E., Paiz, A., Escribá, J., Rosales, M. Santizo, A. (Eds.) *Primer reporte de evaluación del conocimiento sobre cambio climático en Guatemala* (pp. 142-169) Guatemala: Editorial Universitaria UVG.

Centro Universitario de Zacapa de la Universidad de San Carlos de Guatemala (CUNZAP-USAC) y Consejo Nacional de Áreas Protegidas (CONAP). (2020). *Estrategia de Conservación del Quetzal (Pharomachrus mocinno mocinno) y su Hábitat en Guatemala*. Publicación técnica No. 9-2020. Guatemala.

Fick, S.E., Hijmans, R.J. (2017) *WorldClim 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas* International Journal of Climatology 37 (12): 4302-4315.

GBIF.org (2021). GBIF Occurrence. Download <https://doi.org/10.15468/dl.dbbifp>

Graham, C., Ferrier, S., Huetman, F., Moritz, C., & Peterson, A. T. (2004). *New developments in museum-based informatics and applications in biodiversity analysis*. *Trends in ecology & evolution*, 19(9), 497-503.

Graham, C., Ferrier, S., Huetman, F., Moritz, C., Peterson, A. T. (2004) *New developments in museum-based informatics and applications in biodiversity analysis* Trends in Ecology & Evolution 19 (9): 497-503.

Hall, C. (1985) *América Central como región geográfica* Anuario de Estudios Centroamericanos 5-24.

Hauspadre, Z. (02-de diciembre de 2019) *CMIP6: the next generation of climate models explained* CarbonBrief, Clear on Climate. <https://www.carbonbrief.org/cmip6-the-next-generation-of-climate-models-explained>

Lorente, I., Gamo, D., Gómez, J. L., Santos, R., Flores, L., Camacho, A. Navarro, J. (2004) *Los efectos biológicos del cambio climático* Ecosistemas 13 (1).

Morrone, J. (2009) *Evolutionary biogeography: an integrative approach with case studies* Nueva York: Columbia University Press.

Naoki, K., Gómez, M., López, R., Meneses, R., Vargas, J. (2006) *Comparación de modelos de distribución de especies para predecir la distribución potencial de vida silvestre en Bolivia* Ecología en Bolivia, 41 (1): 65-78.

Paiz, M. (1996) *Migraciones estacionales del quetzal (Pharomachrus mocinno mocinno de la Llave) en la región de la Sierra de las Minas, Guatemala y sus implicaciones en la conservación de la especie* (Tesis de Licenciatura). Universidad del Valle de Guatemala.

Peralta, P., Gustavo, M., Salazar, R. & Moguel, R. (2009). *Dos registros recientes del quetzal (Pharomachrus mocinno) en las Montañas del Este de Chiapas Huitzil*. *Revista Mexicana de Ornitología*, 10(2): 52-55

Quezada, M., Rodas, R., Chew, D. & Marroquín, A. (2017). *Riqueza, distribución y estado de conservación de las especies de encino en Guatemala*. *Ciencia, Tecnología y Salud*, 4(2), 141-158.

Quezada, M., Rodas, R., Chew, D. Marroquín, A. (2017) *Riqueza, distribución y estado de conservación de las especies de encino en Guatemala* *Ciencia, Tecnología y Salud* 4 (2): 141-158.

Renner, S. (2005) *The Resplendent Quetzal (Pharomachrus mocinno) in the Sierra Yalijux, Alta Verapaz, Guatemala* *Journal of Ornithology* 146 (1): 79-84.

Solórzano, S., Castillo, S., Valverde, T., Ávila, L. (2000) *Quetzal abundance in relation to fruit availability in a cloud forest in southeastern Mexico* Biotropica 32 (3): 523-532.

Solórzano, S., Castillo, M., Navarrete, D., Oyama, K. (2003) *Impacts of the loss of Neotropical highland forests on the species distribution: a case study using resplendent quetzal an endangered bird species* Biological Conservation 114 (3): 341-349.

Solórzano, S., Baker A., Oyama, K. (2004) *Conservation priorities for Resplendent Quetzals based on analysis of mitochondrial DNA control region sequences* The Condor 106 (3): 449-456.

Solórzano, S., García, M., Oyama, K. (2009) *Genetic diversity and conservation of the Resplendent Quetzal Pharomachrus mocinno in Mesoamerica* *Revista mexicana de biodiversidad* 80 (1): 241-248. Recuperado en 22 de septiembre de 2022, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-34532009000100026&lng=es&tlng=en.