

**UNIVERSIDAD NACIONAL
TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS**



**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**TESIS PARA OBTENER
EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL**

**Modelos Lineales Generalizados para estimar la presencia de
Cinchona officinalis L., *Cinchona pubescens* Vahl y
Cinchona calisaya Wedd en el Perú**

Autor: Bach. Elton Jhon Tafur Monteza

Asesor(a): Ph.D. Ligia Magali García Rosero

Co-asesor(a): Ph.D.. Jaris Emmanuel Veneros Guevara

Registro:

CHACHAPOYAS – PERÚ

2024

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN DE LA TESIS EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL DE LA UNTRM



ANEXO 3-H

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN DE LA TESIS EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL DE LA UNTRM

1. Datos de autor 1

Apellidos y nombres (tener en cuenta las tildes): Tafur Monteza, Elton Jhon
DNI N°: 72861560
Correo electrónico: 7286156062@untrm.edu.pe
Facultad: Ingeniería Civil y Ambiental
Escuela Profesional: Ingeniería Ambiental

Datos de autor 2

Apellidos y nombres (tener en cuenta las tildes): _____
DNI N°: _____
Correo electrónico: _____
Facultad: _____
Escuela Profesional: _____

2. Título de la tesis para obtener el Título Profesional

Modelos Lineales Generalizados para estimar la presencia de Cinchona officinalis L., Cinchona pubescens Vahl y Cinchona calisaya Wedd en el Perú.

3. Datos de asesor 1

Apellidos y nombres: García Rosero, Ligia Magali
DNI, Pasaporte, C.E N°: CE 001691738
Open Research and Contributor-ORCID (<https://orcid.org/0000-0002-9670-0970>) <https://orcid.org/0000-0001-7508-7516>

Datos de asesor 2

Apellidos y nombres: Venero Guevara, Jarvis Emmanuel
DNI, Pasaporte, C.E N°: 46145659
Open Research and Contributor-ORCID (<https://orcid.org/0000-0002-9670-0970>) <https://orcid.org/0000-0001-6781-4078>

4. Campo del conocimiento según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos- OCDE (ejemplo: Ciencias médicas, Ciencias de la Salud-Medicina básica- Inmunología)

<https://catalogos.concytec.gob.pe/vocabulario/ocde-ford.html>
2-07-04 -- Sensores remotos

5. Originalidad del Trabajo

Con la presentación de esta ficha, el(la) autor(a) o autores(as) señalan expresamente que la obra es original, ya que sus contenidos son producto de su directa contribución intelectual. Se reconoce también que todos los datos y las referencias a materiales ya publicados están debidamente identificados con su respectivo crédito e incluidos en las notas bibliográficas y en las citas que se destacan como tal.

6. Autorización de publicación

El(los) titular(es) de los derechos de autor otorga a la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas (UNTRM), la autorización para la publicación del documento indicado en el punto 2, bajo la *Licencia creative commons* de tipo BY-NC: Licencia que permite distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir de su obra de forma no comercial por lo que la Universidad deberá publicar la obra poniéndola en acceso libre en el repositorio institucional de la UNTRM y a su vez en el Registro Nacional de Trabajos de Investigación-RENATI, dejando constancia que el archivo digital que se está entregando, contiene la versión final del documento sustentado y aprobado por el Jurado Evaluador.

Chachapoyas, 08, febrero, 2021.


Firma del autor 1

Firma del autor 2


Firma del Asesor 1


Firma del Asesor 2

DEDICATORIA

A mis padres, por haberme formado con principios y valores que me ayudaron a superar cada uno de los obstáculos que se me presentaron, y por brindarme su apoyo incondicional a lo largo de mi desarrollo académico y profesional.

A mis hermanos, por la confianza y el aliento que me brindaron, para poder culminar la tesis con éxito.

A Karina Atoche, por ser mi compañera de vida, por su amor, sus palabras de aliento y su apoyo incondicional para la culminación de la tesis.

AGRADECIMIENTOS

A mis asesores **Ph.D. Ligia Magali García Rosero** y **Ph.D. Jaris Emmanuel Veneros Guevara**, por los consejos, las opiniones, los conocimientos y todas las sugerencias brindadas para la realización de la tesis.

Al subproyecto “**Reconstrucción de mapas históricos de la distribución observada del árbol de la quina (*Cinchona sp.*) y análisis de su distribución potencial bajo dos escenarios del cambio climático con fines de su conservación en la Región Amazonas, Perú**”, por la oportunidad y la confianza brindada, al aceptarme como parte de sus tesis.

Al **Instituto de Investigación para el Desarrollo Sustentable de Ceja de Selva (INDESCES)**, por brindarme la logística necesaria para la realización de la tesis.

**AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRÍGUEZ
DE MENDOZA DE AMAZONAS**

Ph.D. Jorge Luis Maicelo Quintana
RECTOR

Dr. Oscar Andrés Gamarra Torres
VICERRECTOR ACADÉMICO

Dra. María Nelly Luján Espinoza
VICERRECTORA DE INVESTIGACIÓN

Ph.D. Ricardo Edmundo Campos Ramos
DECANO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

VISTO BUENO DEL ASESOR DE TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL



UNTRM

REGLAMENTO GENERAL
PARA EL OTORGAMIENTO DEL GRADO ACADÉMICO DE
LICENCIADO, MAESTRO O DOCTOR Y DEL TÍTULO PROFESIONAL

ANEXO 3-L

VISTO BUENO DEL ASESOR DE TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL

El que suscribe el presente, docente de la UNTRM (x)/Profesional externo (), hace constar que ha asesorado la realización de la Tesis titulada Modelos Lineales Generalizados para estimar la presencia de Cinchona officinalis L., Cinchona pubescens Vahl y Cinchona calisaya Wedd en el Perú; del egresado Elton Jhon Tafur Montaña de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de esta Casa Superior de Estudios.



El suscrito da el Visto Bueno a la Tesis mencionada, dándole pase para que sea sometida a la revisión por el Jurado Evaluador, comprometiéndose a supervisar el levantamiento de observaciones que formulen en Acta en conjunto, y estar presente en la sustentación.

Chachapoyas, 30 de Octubre de 2023

Firma y nombre completo del Asesor
Ligia Nagaly García Rosero

VISTO BUENO DEL ASESOR DE TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL



UNTRM

REGLAMENTO GENERAL
PARA EL OTORGAMIENTO DEL GRADO ACADÉMICO DE
BACHILLER, MAESTRO O DOCTOR Y DEL TÍTULO PROFESIONAL

ANEXO 3-L

VISTO BUENO DEL ASESOR DE TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL

El que suscribe el presente, docente de la UNTRM ()/Profesional externo (x), hace constar que ha asesorado la realización de la Tesis titulada Modelos Lineales Generalizados para estimar la presencia de Cinchona officinalis L., Cinchona pubescens Vahl y Cinchona Calisaya Wedd en el Perú; del egresado Elton Jhon Tafur Nanteza de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de esta Casa Superior de Estudios.



El suscrito da el Visto Bueno a la Tesis mencionada, dándole pase para que sea sometida a la revisión por el Jurado Evaluador, comprometiéndose a supervisar el levantamiento de observaciones que formulen en Acta en conjunto, y estar presente en la sustentación.

Chachapoyas, 30 de octubre de 2023


Firma y nombre completo del Asesor
Jaris Emmanuel Veneros Guevara.

JURADO EVALUADOR DE LA TESIS



Ph.D. Danilo Edson Bustamante Mostajo
PRESIDENTE



M.Sc. Elí Pariente Mondragón
SECRETARIO



Mg. Jhonsy Omar Silva López
VOCAL

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE LA TESIS



ANEXO 3-Q

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE LA TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL

Los suscritos, miembros del Jurado Evaluador de la Tesis titulada:

Modelos lineales Generalizados para estimar la presencia de Cinchona -
officinalis. L., Cinchona pubescens Vahl y Cinchona calisaya Wedd en el Perú
presentada por el estudiante () /egresado (x) Elton Jhon Tafur Montezza.
de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental
con correo electrónico institucional 7286156062@untrm.edu.pe

después de revisar con el software Turnitin el contenido de la citada Tesis, acordamos:

- La citada Tesis tiene 20 % de similitud, según el reporte del software Turnitin que se adjunta a la presente, el que es menor (✓) / igual () al 25% de similitud que es el máximo permitido en la UNTRM.
- La citada Tesis tiene _____ % de similitud, según el reporte del software Turnitin que se adjunta a la presente, el que es mayor al 25% de similitud que es el máximo permitido en la UNTRM, por lo que el aspirante debe revisar su Tesis para corregir la redacción de acuerdo al Informe Turnitin que se adjunta a la presente. Debe presentar al Presidente del Jurado Evaluador su Tesis corregida para nueva revisión con el software Turnitin.



Chachapoyas, 11 de diciembre del 2023


SECRETARIO


PRESIDENTE


VOCAL

OBSERVACIONES:

.....
.....

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL



ANEXO 3-5

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL

En la ciudad de Chachapoyas, el día 20 de diciembre del año 2023, siendo las 4:30 horas, el aspirante: Eltan Jhon Tafur Montero, asesorado por Ph.D. Ligia Magali García Rosero defiende en sesión pública presencial () a distancia () la Tesis titulada: Modelos lineales generalizados para estimar la presencia de Cinchona officinalis L- Cinchona pubescens Vahl y Cinchona calisaya Wedd en Perú, para obtener el Título Profesional de Ingeniero Ambiental a ser otorgado por la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas; ante el Jurado Evaluador, constituido por:

Presidente: Dr. Danilo Edson Bustamante Martajo

Secretario: M.Sc. Eli Pariente Mondragón

Vocal: Ing. Jhony Omar Silva López

Procedió el aspirante a hacer la exposición de la Introducción, Material y métodos, Resultados, Discusión y Conclusiones, haciendo especial mención de sus aportaciones originales. Terminada la defensa de la Tesis presentada, los miembros del Jurado Evaluador pasaron a exponer su opinión sobre la misma, formulando cuantas cuestiones y objeciones consideraron oportunas, las cuales fueron contestadas por el aspirante.



Tras la intervención de los miembros del Jurado Evaluador y las oportunas respuestas del aspirante, el Presidente abre un turno de intervenciones para los presentes en el acto de sustentación, para que formulen las cuestiones u objeciones que consideren pertinentes.

Seguidamente, a puerta cerrada, el Jurado Evaluador determinó la calificación global concedida a la sustentación de la Tesis para obtener el Título Profesional, en términos de:

Aprobado () por Unanimidad () / Mayoría () Desaprobado ()

Otorgada la calificación, el Secretario del Jurado Evaluador lee la presente Acta en esta misma sesión pública. A continuación se levanta la sesión.

Siendo las 5:24 horas del mismo día y fecha, el Jurado Evaluador concluye el acto de sustentación de la Tesis para obtener el Título Profesional.

[Signature]
SECRETARIO

[Signature]
VOCAL

[Signature]
PRESIDENTE

OBSERVACIONES:
.....

ÍNDICE

| | |
|---|------------|
| RESUMEN | xv |
| ABSTRACT | xvi |
| I. INTRODUCCIÓN | 17 |
| II. MATERIALES Y MÉTODOS | 19 |
| 2.1. Área de estudio..... | 19 |
| 2.2. Características de las especies..... | 22 |
| 2.3. Datos de presencia y ausencia de las especies | 23 |
| 2.4. Datos climáticos | 23 |
| 2.5. Datos topográficos | 23 |
| 2.6. Datos edáficos | 24 |
| 2.7. Selección de variables | 25 |
| 2.8. Desarrollo de modelos lineales generalizados | 25 |
| 2.9. Validación y precisión de los modelos..... | 26 |
| 2.10. Patrones de localidad de presencia/ausencia de las tres especies de <i>Cinchona</i> en el Perú | 27 |
| III. RESULTADOS | 27 |
| 3.1. Selección de variables | 27 |
| 3.2. Modelado..... | 27 |
| 3.2.1. Modelos lineales generalizados para <i>C. pubescens</i> | 28 |
| 3.2.2. Modelos lineales generalizados para <i>C. officinalis</i> | 31 |
| 3.2.3. Modelos lineales generalizados para <i>C. calisaya</i> | 33 |

| | | |
|-------------|---|-----------|
| 3.3. | Validación y precisión de los modelos..... | 35 |
| 3.4. | Patrones de localidad de presencia de las tres especies de <i>Cinchona</i> en el Perú 41 | |
| IV. | DISCUSIONES | 48 |
| 4.1. | Selección de variables | 48 |
| 4.2. | Modelado..... | 48 |
| 4.3. | Validación y precisión de los modelos..... | 51 |
| 4.4. | Patrones de localidad de presencia de las tres especies de <i>Cinchona</i> en el Perú 52 | |
| V. | CONCLUSIONES | 53 |
| VI. | RECOMENDACIONES | 54 |
| VII. | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 55 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | | |
|------------------|---|-----------|
| Tabla 1: | <i>Variables Climáticas</i> | <i>24</i> |
| Tabla 2: | <i>Variables edáficas</i> | <i>25</i> |
| Tabla 3: | <i>Categorías de los criterios de evaluación del rendimiento del modelo</i> | <i>26</i> |
| Tabla 4: | <i>Variables seleccionadas para la construcción de los GLM para las tres especies de Cinchona</i> | <i>28</i> |
| Tabla 5 : | <i>Coeficientes de los GLM para C. pubescens.....</i> | <i>29</i> |
| Tabla 6: | <i>Coeficientes de los GLM para C. officinalis</i> | <i>31</i> |
| Tabla 7: | <i>Coeficientes de los GLM para C. calisaya</i> | <i>33</i> |
| Tabla 8: | <i>Métricas de precisión de los GLM en los datos de entrenamiento</i> | <i>37</i> |
| Tabla 9: | <i>Métricas de precisión de los GLM en los datos de validación.....</i> | <i>38</i> |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. <i>Diagrama de flujo de la metodología empleada en este estudio.</i> | 20 |
| Figura 2. <i>Mapa de presencia observada de C. pubescens, C. calisaya y C. officinalis en el Perú</i> | 21 |
| Figura 3. <i>Especies del género Cinchona</i> | 22 |
| Figura 4. <i>Curvas de respuesta de la probabilidad predicha vs las variables ambientales para C. pubescens</i> | 30 |
| Figura 5. <i>Curvas de respuesta de la probabilidad predicha vs las variables ambientales para C. officinalis</i> | 32 |
| Figura 6. <i>Curvas de respuesta de la probabilidad predicha vs las variables ambientales para C. calisaya</i> | 34 |
| Figura 7. <i>Gráfica del Modelo 1 (A) y el Modelo 2 (B), para C. pubescens</i> | 35 |
| Figura 8. <i>Gráfica del Modelo 1 (A) y el Modelo 2 (B), para C. officinalis</i> | 36 |
| Figura 9. <i>Gráfica del Modelo 1 (A) y el Modelo 2 (B), para C. calisaya</i> | 36 |
| Figura 10. <i>Gráfica de la curva ROC para el Modelo 1 (A) y el Modelo 2 (B), para C. pubescens</i> | 39 |
| Figura 11. <i>Gráfica de la curva ROC para el Modelo 1 (A) y el Modelo 2 (B), para C. officinalis</i> | 40 |
| Figura 12. <i>Gráfica de la curva ROC para el Modelo 1 (A) y el Modelo 2 (B), para C. calisaya.</i> | 40 |
| Figura 13. <i>Área con alta probabilidad para encontrar presencia de las tres especies Cinchona a nivel de Perú</i> | 41 |
| Figura 14. <i>Mapa de los patrones de localidad de presencia / ausencia de C. pubescens predichas por el Modelo 1 (A) y Modelo 2 (B) en el Perú</i> | 42 |

| | |
|--|----|
| Figura 15. <i>Mapa de los patrones de localidad de presencia / ausencia de C. officinalis predichas por el Modelo 1 (A) y Modelo 2 (B) en el Perú</i> | 43 |
| Figura 16. <i>Mapa de los patrones de localidad de presencia / ausencia de C. calisaya predichas por el Modelo 1 (A) y Modelo 2 (B) en el Perú</i> | 44 |
| Figura 17. <i>Área en km² con alta probabilidad para encontrar presencia de C. calisaya, C. pubescens y C. officinalis predichas por el Modelo 1 a nivel de Departamental.....</i> | 46 |
| Figura 18. <i>Área en km² con alta probabilidad para encontrar presencia de C. calisaya, C. pubescens y C. officinalis predichas por el Modelo 2 a nivel de Departamental.....</i> | 47 |

RESUMEN

Actualmente, las especies del género *Cinchona* se encuentran en ecosistemas perturbados y amenazados. Es por ello, que en el Perú se aprobó el Plan de Acción para el Repoblamiento Forestal del género *Cinchona*. Sin embargo, se sabe poco o nada sobre los patrones de distribución espacial de las especies de este género. Por este motivo, en esta investigación se desarrollaron Modelos Lineales Generalizados (GLM) para estimar la presencia de *C. officinalis*, *C. pubescens* y *C. calisaya* en el Perú. Para ello, se modeló la presencia-ausencia de estas tres especies con 26 predictores ambientales mediante la regresión forward para los GLM. La precisión de los modelos resultantes se midió mediante el Área Bajo la Curva (AUC), el Criterio de Habilidades Verdaderas (TSS) e índice de kappa. Los resultados obtenidos demuestran que el modelo seleccionado para predecir la presencia-ausencia para *C. pubescens*, obtuvo valores de AUC, TSS e índice kappa de 0.90, 0.72 y 0.71 respectivamente. Mientras que, para *C. officinalis*, el modelo seleccionado obtuvo valores de AUC, TSS e índice kappa de 0.93, 0.74 y 0.74 respectivamente. Y para *C. calisaya*, el modelo seleccionado obtuvo valores de AUC, TSS e índice kappa de 0.97, 0.92 y 0.91 respectivamente. Además, se encontró que el Departamento de San Martín presenta la más alta idoneidad de área para encontrar la presencia de estas tres especies. En conclusión, nuestros resultados brindan información detallada y precisa sobre la distribución de *C. pubescens*, *C. officinalis* y *C. calisaya* en el Perú, los cuáles pueden usarse para identificar las áreas de mayor aptitud para el repoblamiento o conservación de estas especies en el territorio peruano.

Palabras clave: *Cinchona*, *C. pubescens*, *C. officinalis*, *C. calisaya*, MDE, GLM, entrenamiento, validación, precisión.

ABSTRACT

Currently, species of the genus *Cinchona* are found in disturbed and threatened ecosystems. This is why the Action Plan for the Forest Repopulation of the *Cinchona* genus was approved in Peru. However, little or nothing is known about the spatial distribution patterns of species in this genus. For this reason, in this research, Generalized Linear Models (GLM) were developed to estimate the presence of *C. officinalis*, *C. pubescens* and *C. calisaya* in Peru. To do this, the presence-absence of these three species was modeled with 26 environmental predictors using forward regression for the GLMs. The accuracy of the resulting models was measured using the Area Under the Curve (AUC), the True Skills Criterion (TSS) and the kappa index. The results obtained demonstrate that the model selected to predict presence-absence for *C. pubescens* obtained AUC, TSS and kappa index values of 0.90, 0.72 and 0.71 respectively. While, for *C. officinalis*, the selected model obtained AUC, TSS and kappa index values of 0.93, 0.74 and 0.74 respectively. And for *C. calisaya*, the selected model obtained AUC, TSS and kappa index values of 0.97, 0.92 and 0.91 respectively. In addition, it was found that the Department of San Martín presents the highest area suitability to find the presence of these three species. In conclusion, our results provide detailed and precise information on the distribution of *C. pubescens*, *C. officinalis* and *C. calisaya* in Peru, which can be used to identify the areas of greatest suitability for the repopulation or conservation of these species in the Peruvian territory.

Keywords: *Cinchona*, *C. pubescens*, *C. officinalis*, *C. calisaya*, MDE, GLM, training, validation, precision

I. INTRODUCCIÓN

Los impactos inducidos por el hombre en los ecosistemas han producido una gran pérdida de la biodiversidad del planeta (Lopatin et al., 2016; Tafur et al., 2022), y han ocasionado la fragmentación de los ecosistemas, la cual representa una amenaza latente para los hábitats de las especies vegetales (Safaei et al., 2018). Sin embargo, ante esta problemática la modelación de la distribución de especies se ha convertido en una herramienta fundamental para implementar medidas de conservación (Ghareghan et al., 2020). Se ha modelado la distribución espacial de muchas especies, por ejemplo, *Scirpus tabernaemontani* C.C.Gmel, *Scirpus maritimus* L. y *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud (Heuner et al., 2016), *Morina persica* L. (Ghareghan et al., 2020), *Campanula pulla* L. y *Valeriana celtica* L. (Schwager & Berg, 2021), entre otras. Sin embargo, existen muy pocos estudios sobre la distribución espacial del género *Cinchona* en el Perú (García et al., 2022; Vergara et al., 2023)

Históricamente las especies del género *Cinchona* fueron la única medicina para el tratamiento de la malaria, debido a su alto contenido en alcaloides (Huamán et al., 2019 & Albán-Castillo et al., 2020). Por este motivo, el árbol de la quina o *Cinchona* es el género emblemático de los recursos naturales del Perú (Perez, 2021). El género *Cinchona* presenta alrededor de 25 tipos de alcaloides, siendo los más importantes la quinina y la quinidina (Remuzgo et al., 2020). Este género está distribuido desde Costa Rica hasta los andes bolivianos, con mayor distribución en el norte de Perú y el sur de Ecuador (Perez, 2021). Sin embargo, en la actualidad las especies del género *Cinchona* son altamente amenazadas por la agricultura, la ganadería, la quema, entre otros (Huamán et al., 2019). Por ello, estas especies han llegado a ser consideradas como especies en vías de extinción o estar presentes en las listas de especies amenazadas (Mesa-Vanegas et al., 2013). Por este motivo el gobierno peruano aprobó el plan de repoblamiento de *Cinchona* en el Perú (Albán-Castillo et al., 2020).

En este sentido, el uso de los Modelos de Distribución de Especies (MDE) en la gestión y planificación de la conservación de especies endémicas es de vital importancia (Alatawi et al., 2020; Nielsen et al., 2020; Rew et al., 2021). Ya que permiten inferir el nicho ecológico de la especie y estimar su presencia en otros lugares con condiciones ambientales similares, favoreciendo el repoblamiento de la especie (Bystrova et al., 2021).

Modelar la distribución de las especies en el espacio y el tiempo ha sido un gran desafío en la ecología (Bystrova et al., 2021; Chauvier et al., 2021), ya que la distribución de las especies está influenciada por muchos factores bióticos y abióticos (Alatawi et al., 2020; Carus et al., 2017). Actualmente los modelos de la distribución de especies se basan en la correlación de los datos observados de presencia geolocalizada de la especie y las variables ambientales (Ghareghan et al., 2020; Rew et al., 2021). En otras palabras, los MDE son herramientas esenciales que permiten investigar cómo responden las especies a las condiciones ambientales (Bystrova et al., 2021; Fournier et al., 2017). Cabe mencionar que las condiciones ambientales más utilizadas para el MDE son las variables climáticas, edáficas y topográficas (Ndlovu et al., 2018, Safaei et al., 2018).

Se han aplicado y estudiado distintos métodos estadísticos y matemáticos para estimar la distribución geográfica de las especies a diferentes escalas (Aghajanlou et al., 2021). Dentro de los métodos más utilizados se encuentran el método de Máxima Entropía (MaxEnt) (Alatawi et al., 2020), Redes Neuronales Artificiales (Aghajanlou et al., 2021), Random Forest (RF) (Rew et al., 2021), Modelos Lineales Generalizados (GLM) (Ghareghan et al., 2020), Modelos Aditivos Generalizados (Rew et al., 2021), entre otros.

En cuanto a los GLM, estos representan un caso especial de la regresión lineal múltiple que permite la obtención de respuestas no normales (Ghareghan et al., 2020). Los GLM para el caso de la distribución de especies, suelen utilizar una función de enlace logit y el término de error binomial (Lopatin et al., 2016). Puesto que mayormente se tiene una variable respuesta de tipo binaria es decir presencia y ausencia (Safaei et al., 2018, Rew et al., 2021). Este método ha sido ampliamente aplicado y aceptado en la literatura (Ghareghan et al., 2020).

A nivel del mundo, existen numerosas investigaciones que han hecho uso del GLM para modelar la distribución de especies, por ejemplo, en los Alpes europeos se aplicó en 2616 especies de plantas vasculares (Chauvier et al., 2021), en Alemania se aplicó para *Bolboschoenus maritimus* (L.) Palla y *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud (Carus et al., 2017), en Irán para *M. persica* (Ghareghan et al., 2020), en Etiopía para *Coffea arabica* L. (Hailu et al., 2017), en Canadá para *Vaccinium myrtilloides* Michx (Nielsen et al., 2020), en Uruguay para *Eucalyptus grandis* W.Hill y *Eucalyptus dunnii* Maiden (Resquin et al., 2020) y en Etiopía para *Prosopis juliflora* (Sw.) DC (Sintayehu et al., 2020). A nivel de Perú los estudios que utilizaron los GLM en la distribución de especies

de flora son muy escasos; sin embargo, se logró identificar el uso de los GLM para la distribución de la especie *Polylepis spp* (Sevillano-ríos & Morales, 2021) y la distribución de helechos de los bosques del Manú (Centeno, 2023). No obstante, hasta el momento no se ha modelado la distribución espacial de ninguna especie del género *Cinchona* mediante un GLM en Perú.

Teniendo en cuenta que en el Perú se aprobó el plan de repoblamiento del género *Cinchona*, priorizando a las especies *Cinchona officinalis*, *Cinchona pubescens* y *Cinchona calisaya* (Albán-Castillo et al., 2020). Este estudio tuvo por objetivo desarrollar GLM para estimar la presencia de *C. officinalis*, *C. pubescens* y *C. calisaya* en el Perú. Con la finalidad de contribuir como una herramienta a la toma de decisiones sobre las áreas con mayor idoneidad para el repoblamiento de estas tres especies en el Perú.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

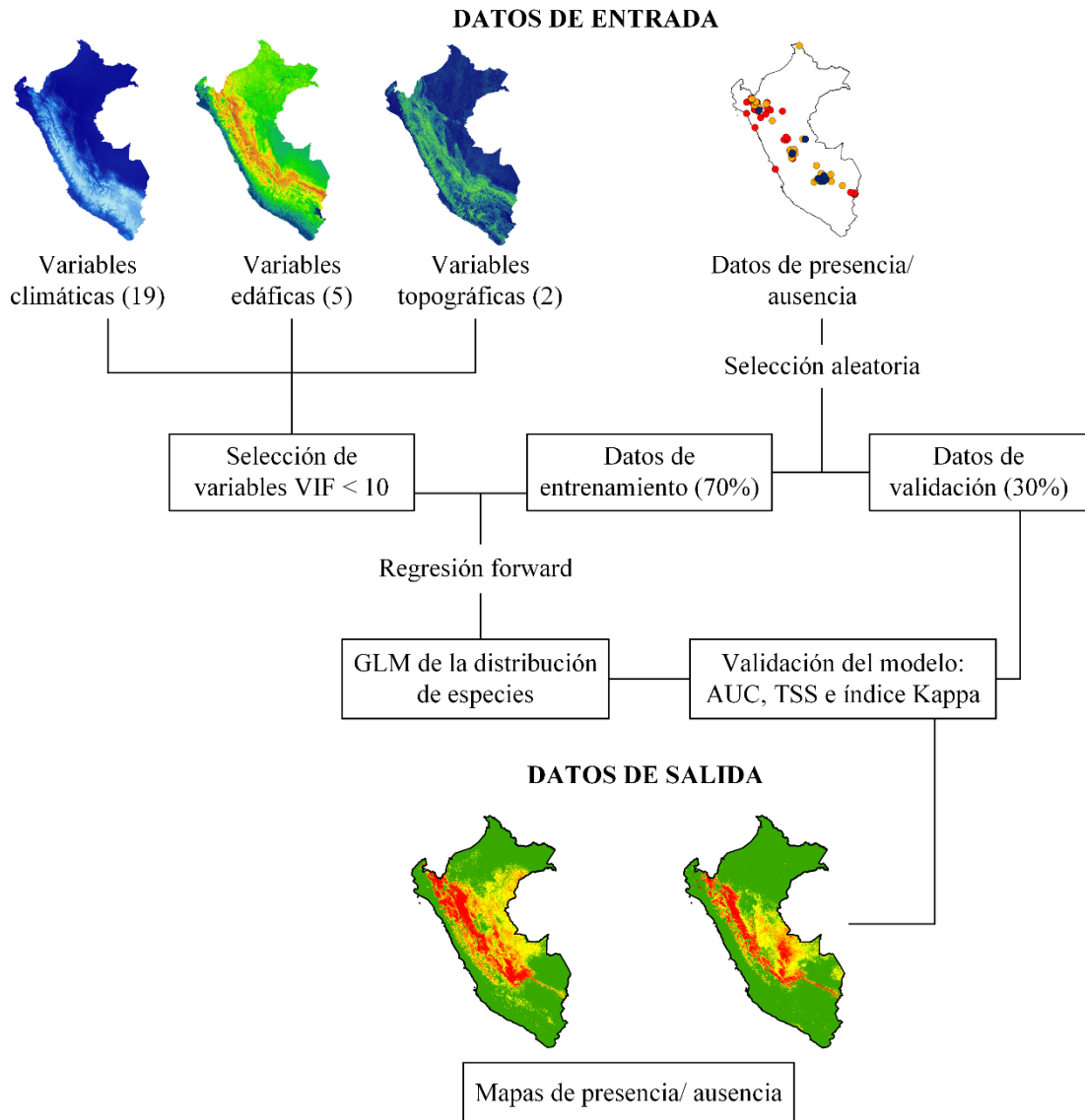
La **Figura 1** muestra el diagrama de flujo de la metodología empleada para este estudio. Este agrupa los procedimientos de preparación de datos, el proceso de modelado y la validación de los modelos.

2.1. Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en Perú, el cual abarca un área territorial de 1 285 215.60 km² (**Figura 2**). Perú presenta una de las mayores biodiversidades del planeta, ya que cuenta con ocho regiones naturales, las cuales fueron clasificadas según su piso altitudinal en Costa, Yunga, Quechua, Suni, Puna, Cordillera, Selva Alta y Selva Baja (Pulgar-Vidal, 2014). Asimismo, Perú es el país con mayor diversidad de *Cinchona* en el mundo, puesto que alberga 19 de las 25 especies del género *Cinchona* presentes en el planeta (Albán-Castillo et al., 2020; Perez, 2021). En Perú, la mayor cantidad de presencia observada de *Cinchona* se encuentra en la cordillera nor-andina (Huamán et al., 2019).

Figura 1.

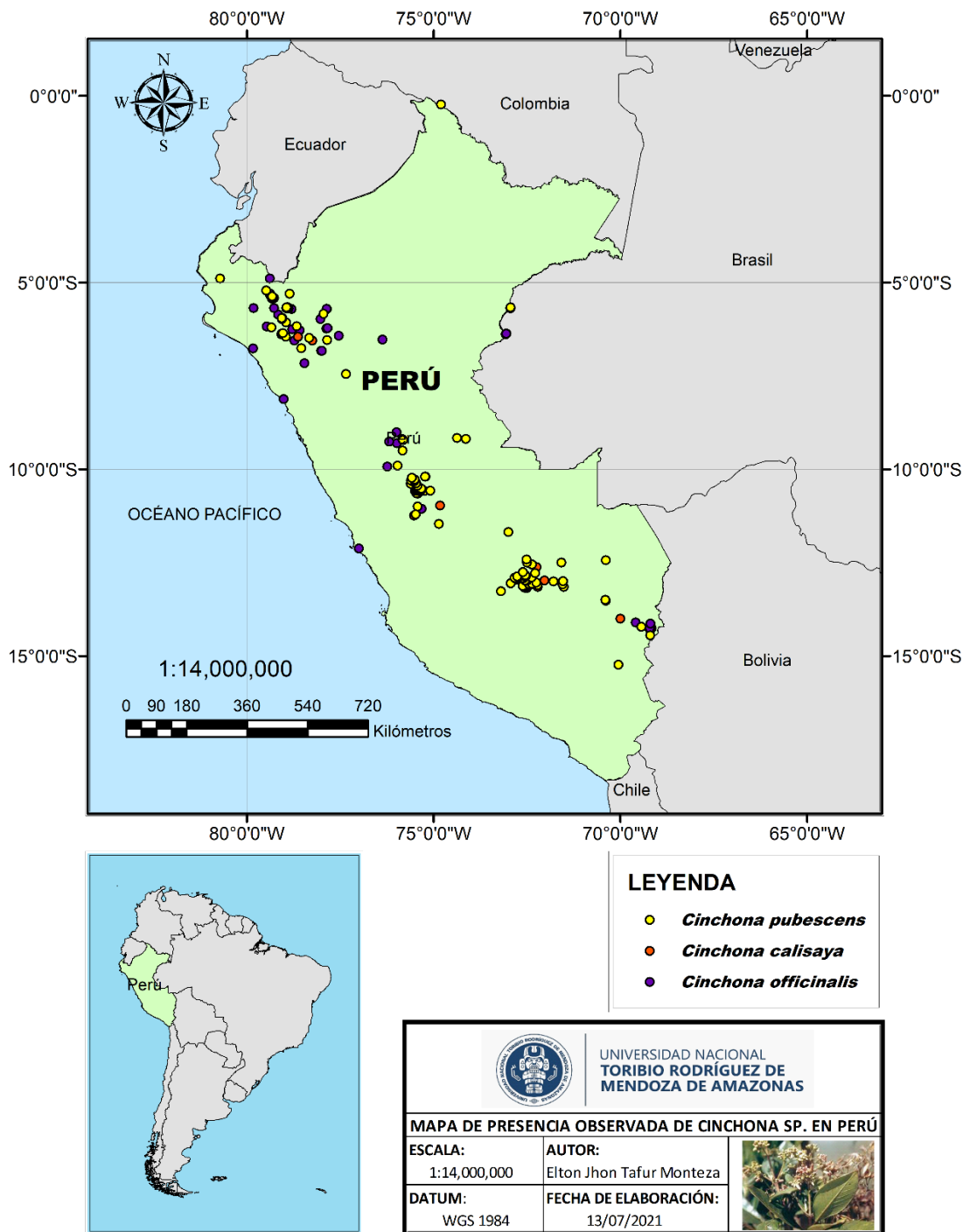
Diagrama de flujo de la metodología empleada en este estudio.



Nota. VIF = Factor de inflación de varianza. GLM = Modelo lineal generalizado. AUC = Área bajo la curva. TSS = True Skill Statistic.

Figura 2.

Mapa de presencia observada de C. pubescens, C. calisaya y C. officinalis en el Perú.



2.2. Características de las especies

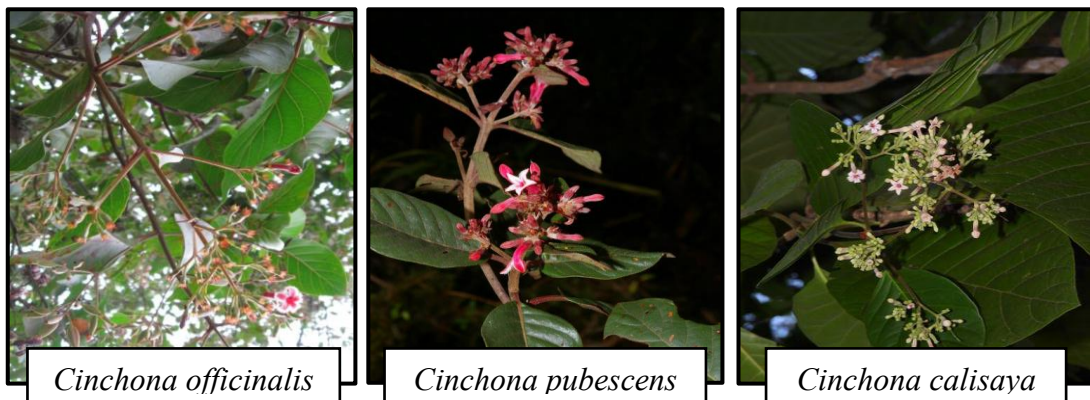
En cuanto a *C. officinalis*, esta se caracteriza por presentar una altura entre 11 a 15 m, un diámetro de fuste entre 30 a 40 cm, hojas simples, opuestas y decusadas, flores en forma de panícula entre 20 a 25 cm y frutos encapsulados con forma elipsoidal (**Figura 3**) (Nair, 2010; Zevallos, 1989). La corteza de esta especie presenta alrededor de 4 al 6 % de alcaloides totales, de los cuales el 50 % es quinina (Mesa-Vanegas et al., 2013).

Por otra parte, *C. pubescens* se caracteriza por presentar una altura entre 8 a 12 m, un diámetro de fuste entre 18 a 28 cm, hojas simples, opuestas y decusadas, flores en forma de panícula con 15 cm de longitud y frutos encapsulados con forma oblongo-lanceolada (**Figura 3**) (Nair, 2010; Zevallos, 1989). La corteza de esta especie contiene alrededor de $21,3 \pm 0,0247$ ppm de quinina (Mesa-Vanegas et al., 2013).

Finalmente, *C. calisaya* es caracterizada por ser un árbol de porte grande (Nair, 2010). Una altura aproxima de esta especie se obtuvo en un muestreo realizado en Bolivia, donde presentó una altura entre 7 a 8 m y un diámetro de fuste entre 7 a 15 cm (Maldonado et al., 2017). Asimismo, presenta hojas gruesas, oblongas a lanceoladas, con superficies lisas, flores en forma de panícula de color rosa pálido y frutos encapsulados de forma oblonga (**Figura 3**) (Nair, 2010). La corteza de esta especie presenta alrededor de 3.89 a 7.24 % de alcaloides, de los cuales el contenido de quinina se encuentra en un rango de 0.78 a 5.57 % (Mesa-Vanegas et al., 2013; Nair, 2010).

Figura 3.

Especies del género Cinchona.



Nota. Imagen adaptada de Karthick (2013), Shu (2023) & Vásquez-Martínez (2011).

2.3. Datos de presencia y ausencia de las especies

Los datos de presencia de *C. officinalis*, *C. pubescens* y *C. calisaya* fueron descargados del repositorio de Figshare del Proyecto Quina.pe de la UNTRM: “Historical world mapping and current distribution in Peru of *Cinchona* sp.: Contribution to restoration and conservation strategies” (<https://bit.ly/2UKobj8>). Esta base de datos contiene 10 860 referencias de presencia observada del género *Cinchona* en el mundo; sin embargo, para fines de esta investigación sólo se utilizó los datos de latitud y longitud de tres especies de *Cinchona* para Perú. Estos datos fueron filtrados, limpiados, georreferenciados y corregidos utilizando Excel ver. 2019 y ArcGIS ver. 10.8. Finalmente se obtuvo 281 registros para *C. pubescens*, 116 registros para *C. officinalis* y 39 registros para *C. calisaya* (García et al., 2021).

Los datos de ausencia o también llamada pseudoausencias para las tres especies de *Cinchona* fueron generados aleatoriamente en el programa RStudio (Naimi & Araújo, 2016). La cantidad de pseudoausencias generadas para cada una de las tres especies fue 1000 registros, de los cuales se tomó aleatoriamente la misma cantidad de registros de presencia para cada una de las tres especies, es decir, se tomó 281 pseudoausencias para *C. pubescens*, 116 pseudoausencias para *C. officinalis* y 39 pseudoausencias para *C. calisaya* (Barbet-Massin et al., 2012; Rew et al., 2021).

2.4. Datos climáticos

Para esta investigación se descargaron de la base de datos WorldClim versión 2 (<http://worldclim.org/version2>), un conjunto de 19 variables bioclimáticas a una resolución de 1 km² [Tabla 1] (Alatawi et al., 2020; Hailu et al., 2017). Estas variables bioclimáticas representan promedios anuales, estacionales, extremos o limitantes de las variables de precipitación y temperatura, entre los años 1970 y 2000 (Alatawi et al., 2020).

2.5. Datos topográficos

Los datos de las variables topográficas (altitud y pendiente) se obtuvieron de un mosaico de 44 modelos digitales de elevación (DEM), obtenidos del geo servidor del Ministerio del Ambiente. Este DEM presenta una resolución espacial de 30 m, con un sistema de

coordenadas: horizontal (WGS 1984) y vertical (EGM96). El DEM se utilizó para generar un mapa de pendientes en grados sexagesimales para todo Perú utilizando ArcGis 10.8.

Tabla 1.

Variables climáticas según Worldclim.org (2020).

| Abreviatura | Variable | Unidad |
|--------------------|--|---------------|
| BIO1 | Temperatura media anual | °C |
| BIO2 | Rango diurno medio | °C |
| BIO3 | Isotermalidad | Adimensional |
| BIO4 | Estacionalidad de la temperatura | °C |
| BIO5 | Temperatura máxima del mes más cálido | °C |
| BIO6 | Temperatura mínima del mes más frío | °C |
| BIO7 | Rango anual de temperatura | °C |
| BIO8 | Temperatura media del trimestre más húmedo | °C |
| BIO9 | Temperatura media del trimestre más seco | °C |
| BIO10 | Temperatura media del trimestre más cálido | °C |
| BIO11 | Temperatura media del trimestre mes más frío | °C |
| BIO12 | Precipitación anual | mm |
| BIO13 | Precipitación del mes más húmedo | mm |
| BIO14 | Precipitación del mes más seco | mm |
| BIO15 | Estacionalidad de la precipitación | Adimensional |
| BIO16 | Precipitación del trimestre más húmedo | mm |
| BIO17 | Precipitación del trimestre más seco | mm |
| BIO18 | Precipitación del trimestre más cálido | mm |
| BIO19 | Precipitación del trimestre más frío | mm |

2.6. Datos edáficos

En este estudio se utilizó cinco variables continuas del suelo, las cuales fueron descargadas de la Base de Datos de SoilGrids Versión 2.0 perteneciente al Centro Internacional de Información y Referencia de Suelos (ISRIC) (<https://soilgrids.org/>) [Tabla 2]. Esta base de datos se encuentra en formato ráster con una resolución de 250 m, conteniendo las propiedades fisicoquímicas del suelo (Hengl et al., 2017).

Tabla 2.

Variables edáficas según Batjes et al. (2020).

| Código | Variable | Unidad |
|---------------|--|---------------|
| CO | Carbono orgánico del suelo | g / kg |
| pH | Potencial de hidrógeno | Escala: 0-14 |
| N | Nitrógeno | g / kg |
| CIC | Capacidad de intercambio catiónico del suelo | mmol / kg |
| CA | Contenido de arcilla | g / kg |

2.7. Selección de variables

En primer lugar, se extrajo los datos de las variables climáticas, topográficas y del suelo para cada uno de los puntos de presencia y ausencia de las tres especies de *Cinchona*, utilizando el paquete RASTER de RStudio. En segundo lugar, se seleccionó las variables que no estén correlacionadas para evitar problemas de colinealidad y sobreajuste de los modelos (Fournier et al., 2017). Para ello se utilizó el factor de inflación de varianza (VIF) del paquete MDE en R Studio (Naimi et al., 2014; Alatawi et al., 2020). Por último, se seleccionó las variables que presenten un $VIF < 10$ para la construcción de los modelos (Alatawi et al., 2020; Resquin et al., 2020; Rew et al., 2021).

2.8. Desarrollo de modelos lineales generalizados

Los GLM se utilizan para modelar variables dependientes discretas, que presenten una relación no lineal con las variables independientes (Hailu et al., 2017). Por esta razón, es ampliamente utilizado para modelar la distribución de especies (Ghareghan et al., 2020; Meynard et al., 2019). El GLM modela la presencia y ausencia de las especies en función de predictores ambientales mediante la función logit y el termino de error binomial (Ghareghan et al., 2020; Lopatin et al., 2016; Sousa-Guedes et al., 2021).

En este estudio los datos de presencia y pseudoausencias fueron catalogados con un valor de 0 y 1, donde 0 representa la pseudoausencias de la especie y 1 representa la presencia de la especie (Ghareghan et al., 2020). Luego fueron divididos aleatoriamente en datos de entrenamiento del modelo (70 %) y datos de validación del modelo (30 %) en RStudio (Alatawi et al., 2020; Sintayehu et al., 2020).

Posteriormente, con los datos de entrenamiento se generó un GLM para cada una de las tres especies de *Cinchona*, utilizando la selección automática de variables con el método forward o selección hacia delante (Lopatin et al., 2016). Este tipo de regresión utiliza el criterio de información de Akaike (AIC) para evaluar la inclusión o exclusión de la variable al modelo (Resquin et al., 2020; Schwager & Berg, 2021). Para esto se utilizó el comando GLM indicando la familia de distribución binomial en RStudio (Naimi & Araújo, 2016). Asimismo, a este modelo se le agregó interacciones entre variables, es decir la multiplicación entre dos variables con todas las combinaciones posibles, estas interacciones fueron incluidas al modelo ya generado utilizando el procedimiento descrito anteriormente, con la finalidad de mejorar la precisión predictiva del modelo. Los modelos resultantes se seleccionarán según el principio de parsimonia, es decir, el modelo debe tener el menor número de variables posibles y alta significancia, pero él que más explique a la variable dependiente (Heuner et al., 2016; López-González & Ruiz-Soler, 2011).

2.9. Validación y precisión de los modelos

La validación de los modelos consistió en medir la capacidad predictiva de los modelos con los datos de validación o test. La capacidad predictiva se determinó mediante las medidas de precisión independientes de umbral (AUC) y dependientes del umbral (índice kappa y TSS) (Ndlovu et al., 2018). Estos criterios miden la discriminación entre la predicción correcta y la incorrecta (Resquin et al., 2020). Por ende, han sido ampliamente utilizados en el modelado de la distribución de especies (Rew et al., 2021; Schwager & Berg, 2021). La **Tabla 3** muestra las categorías de los criterios de evaluación del rendimiento del modelo.

Tabla 3.

Criterios de evaluación del rendimiento del modelo según Rew et al. (2021).

| Clasificación | AUC | TSS | Índice kappa |
|----------------------|------------|------------|---------------------|
| Excelente | $\geq 0,9$ | $\geq 0,8$ | $\geq 0,9$ |
| Bueno | 0.8 – 0.9 | 0.6 – 0.8 | 0.8 – 0.9 |
| Justa | 0.7 – 0.8 | 0.4 – 0.6 | 0.7 – 0.8 |
| Deficiente o nula | $\leq 0,7$ | $\leq 0,4$ | $\leq 0,6$ |

2.10. Patrones de localidad de presencia/ausencia de las tres especies de *Cinchona* en el Perú

Una vez obtenido los GLM para las tres especies de *Cinchona*, estos fueron aplicados en todo el territorio peruano, con la finalidad de discriminar las áreas aptas para el repoblamiento de las tres especies de *Cinchona* en el Perú. Asimismo, para una mejor visualización de la probabilidad ocurrencia (presencia/ausencia) de las especies para todo Perú, los datos de probabilidad se categorizaron en ausencia (alta y baja) y en presencia (alta y baja) en función al umbral de clasificación para cada especie. (Resquin et al., 2020).

III.RESULTADOS

3.1. Selección de variables

Los resultados de la selección de variables muestran que 12 de las 26 variables iniciales no presentan problemas de colinealidad ($VIF < 10$) para *C. pubescens* y *C. officinalis*, de las cuales seis fueron variables bioclimáticas, cinco fueron variables edáficas y solo una fue variable topográfica. Mientras que para *C. calisaya* solo 10 de las 26 variables iniciales no son colineales, de las cuales cinco fueron variables bioclimáticas, cuatro fueron variables edáficas y solo una fue variable topográfica. Todas las variables seleccionadas para la construcción de los modelos para las tres especies de *Cinchona* se muestran en la **Tabla 4.**

3.2. Modelado

Con los datos de entrenamiento se obtuvieron dos modelos lineales generalizados (Modelo 1 y Modelo 2), para cada una de las tres especies de *Cinchona* mediante la regresión escalonada hacia delante o regresión Forward. El Modelo 1 estuvo conformado únicamente por variables ambientales sin ningún tipo de interacción entre estas. Mientras que el Modelo 2, estuvo conformado por las variables del Modelo 1 más las interacciones entre estas variables, las cuales contribuyen significativamente al modelo.

Tabla 4.

Variables seleccionadas para la construcción de los GLM para las tres especies de Cinchona.

| Variables ambientales | Factor de inflación de varianza (VIF) | | |
|-----------------------|---------------------------------------|-----------------------|--------------------|
| | <i>C. pubescens</i> | <i>C. officinalis</i> | <i>C. calisaya</i> |
| Bio 2 | 3.78 | 4.23 | ----- |
| Bio 3 | 2.62 | 2.87 | 2.60 |
| Bio 8 | 5.58 | 5.73 | 3.80 |
| Bio 13 | 2.98 | 2.97 | 3.51 |
| Bio 15 | 3.83 | 3.27 | 2.96 |
| Bio 19 | 3.60 | 3.44 | 2.92 |
| Carbono orgánico | 6.24 | 5.77 | 5.33 |
| Nitrógeno | 3.25 | 2.45 | 3.44 |
| Arcilla | 2.17 | 2.57 | 3.59 |
| PH | 2.53 | 2.45 | 3.05 |
| CIC | 6.07 | 5.99 | ----- |
| Pendiente | 1.93 | 1.47 | 1.62 |

3.2.1. Modelos lineales generalizados para *C. pubescens*

Para *C. pubescens*, el Modelo 1 estuvo conformado por tres variables edáficas y tres variables bioclimáticas, las cuales fueron altamente significativas al 95 % con un *p* valor < 0.03 y un AIC = 310.57 (**Tabla 5.**). Por otra parte, en el Modelo 2, la inclusión de las interacciones Carbono*CIC y PH*Bio15 contribuyeron significativamente al modelo al 95 % con un *p* valor < 0.001, un AIC = 264.36 y un delta de AIC = 64.21 con respecto al Modelo 1. Esto indica que el Modelo 2, es el mejor modelo para *C. pubescens* en términos de AIC. La adición de estas interacciones provocó que la variable Bio 19 sea no significativa al 95 % con un *p* valor = 0.314 para el Modelo 2 (**Tabla 5.**). Sin embargo, la variable Bio 19 se conservó como parte del Modelo 2, ya que al considerar eliminar esta variable ocasionaría un alto incremento en la devianza del modelo.

Tabla 5.*Coefficientes de los GLM para C. pubescens.*

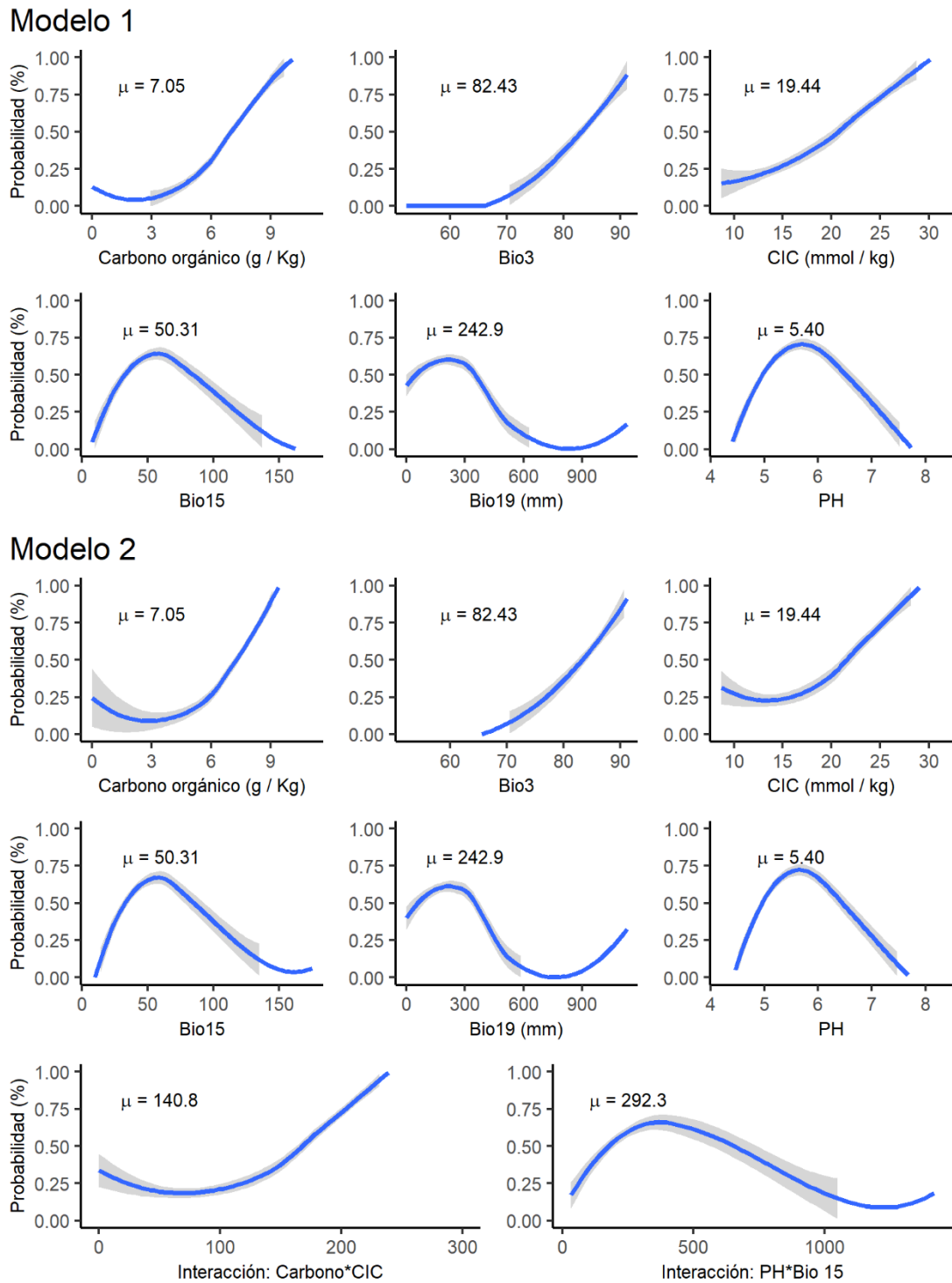
| Variables del modelo | Modelo 1 | | | Modelo 2 | | |
|----------------------|--------------|------------|---------|--------------|------------|---------|
| | Coefficiente | Odds ratio | p value | Coefficiente | Odds ratio | p value |
| Intercepto | -10.752075 | 0.00 | 0.01 | -20.956874 | 0.00 | 0.009 |
| Carbono orgánico | 0.339674 | 1.40 | 0.006 | -2.503554 | 0.08 | < 001 |
| Bio 3 | 0.23968 | 1.27 | < 001 | 0.218449 | 1.24 | < 001 |
| Bio 19 | -0.007889 | 0.99 | < 001 | -0.001535 | 1.00 | 0.314 |
| PH | -2.718453 | 0.07 | < 001 | 2.698564 | 14.86 | 0.035 |
| CIC | 0.174816 | 1.19 | < 001 | -1.011456 | 0.36 | < 001 |
| Bio 15 | 0.029053 | 1.03 | 0.029 | 0.494509 | 1.64 | < 001 |
| Carbono*CIC | | | | 0.160956 | 1.17 | < 001 |
| PH*Bio15 | | | | -0.079052 | 0.92 | < 001 |

Nota. Modelo 1 = Modelo sin interacción entre variables, Modelo 2 = Modelo con interacción entre variables.

Las curvas de respuesta del Modelo 1 y Modelo 2 para *C. pubescens*, nos muestra de manera visual el comportamiento que siguen las variables del modelo, en función a la probabilidad predicha por este (**Figura 4.**). El análisis de las curvas de respuesta muestra que el aumento por encima de la media (μ) de las variables Carbono orgánico, Bio 3 y CIC, aumentan la probabilidad predicha para *C. pubescens*, para ambos modelos. Por otra parte, el aumento o la disminución con respecto a la media (μ) de las variables Bio 15, Bio 19 y PH, disminuyen la probabilidad predicha para *C. pubescens*, para ambos modelos (**Figura 4.**). En cuanto a las interacciones que incluye el Modelo 2, el aumento por encima de la media (μ) de la interacción Carbono*CIC, aumenta la probabilidad predicha para *C. pubescens*, mientras que, el aumento o la disminución con respecto a la media de la interacción PH*Bio15, disminuye la probabilidad predicha para *C. pubescens* (**Figura 4.**).

Figura 4.

Curvas de respuesta de la probabilidad predicha vs las variables ambientales para C. pubescens.



Nota. μ = Media. CIC= Capacidad de intercambio catiónico.

3.2.2. Modelos lineales generalizados para *C. officinalis*

Para *C. officinalis* el Modelo 1 estuvo conformado por tres variables edáficas y dos variables bioclimáticas, las cuales fueron altamente significativas al 95 % con un *p* valor < 0.01 y un AIC = 91.13 (**Tabla 6**). Por otra parte, en el Modelo 2, la inclusión de la interacción Carbono*Bio8 contribuyó significativamente al modelo al 95 % con un *p* valor = 0.018, un AIC = 86.13 y un delta de AIC = 5 con respecto al Modelo 1, lo cual indica que el Modelo 2, es ligeramente el mejor modelo para *C. officinalis* en términos de AIC. Por otro lado, la adición de esta interacción no generó la pérdida de significancia al 95 % de ninguna de las demás variables del Modelo 2, ya que estas presentaron un *p* valor < 0.02 (**Tabla 6**).

Tabla 6.

Coefficientes de los GLM para C. officinalis.

| Variables del modelo | Modelo 1 | | | Modelo 2 | | |
|----------------------|--------------|------------|----------------|--------------|------------|----------------|
| | Coefficiente | Odds ratio | <i>P</i> value | Coefficiente | Odds ratio | <i>p</i> value |
| Intercepto | -14.797105 | 0.00 | < 001 | -32.222568 | 0.00 | 0.001 |
| Carbono orgánico | 1.941587 | 6.97 | < 001 | 5.134795 | 169.83 | 0.001 |
| Nitrógeno | -3.372963 | 0.03 | < 001 | -4.424623 | 0.01 | < 001 |
| Bio 13 | -0.012362 | 0.99 | 0.009 | -0.015555 | 0.98 | 0.004 |
| CIC | 0.331887 | 1.39 | 0.004 | 0.288916 | 1.33 | 0.017 |
| Bio 8 | 0.203275 | 1.23 | 0.01 | 1.06596 | 2.90 | 0.007 |
| Carbono*Bio8 | | | | -0.13742 | 0.87 | 0.018 |

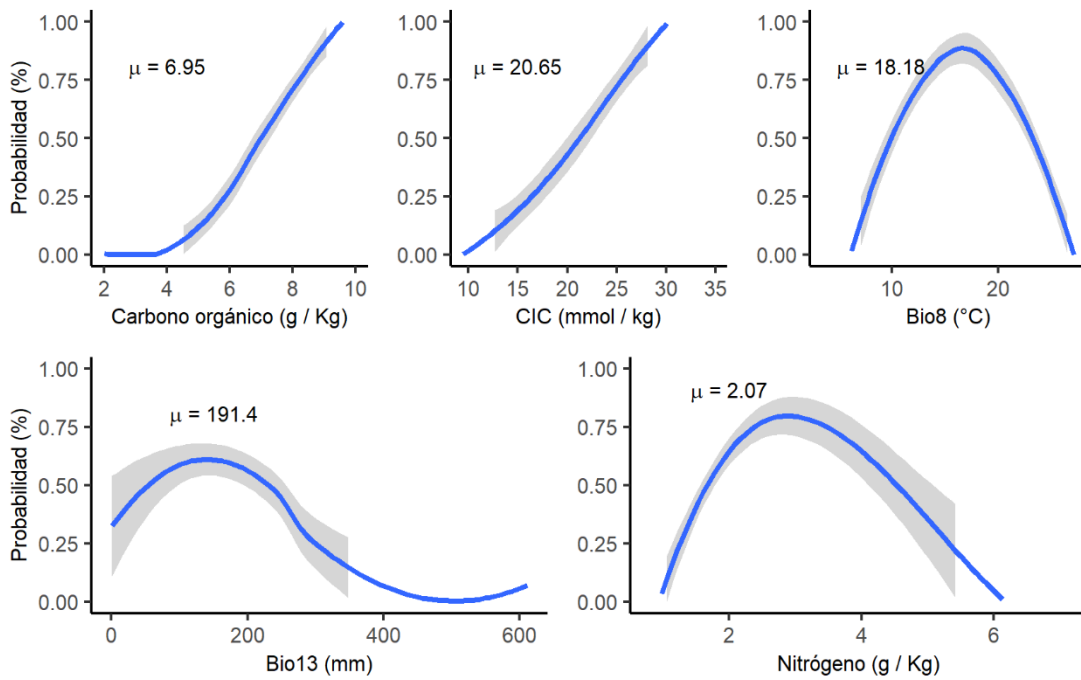
Nota. Modelo 1 = Modelo sin interacción entre variables, Modelo 2 = Modelo con interacción entre variables.

El análisis de las curvas de respuesta muestra que, el aumento por encima de la media de las variables Carbono orgánico y CIC, aumentan la probabilidad predicha para *C. officinalis*, para ambos modelos. Por otra parte, el aumento o la disminución con respecto a la media (μ) de las variables Bio 8, Bio 13 y Nitrógeno, disminuyen la probabilidad predicha para *C. officinalis*, para ambos modelos (**Figura 5**). En cuanto a la interacción Carbono*Bio 8 que incluye el Modelo 2, los valores por encima de la media (μ) de esta interacción, aumentan la probabilidad predicha para *C. officinalis* (**Figura 5**).

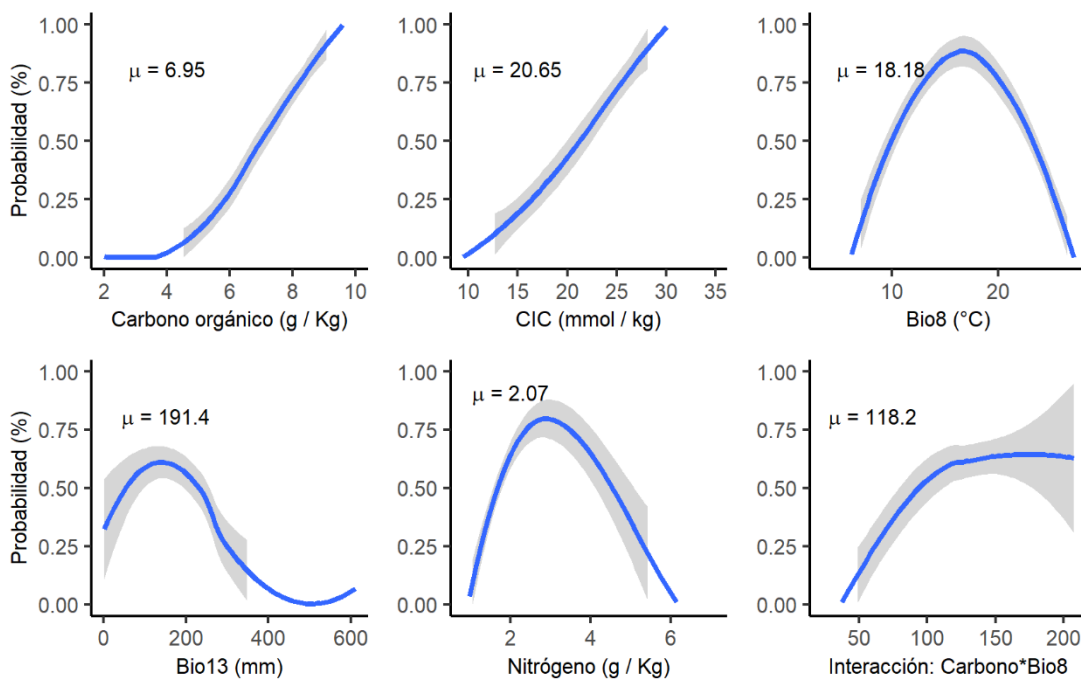
Figura 5.

Curvas de respuesta de la probabilidad predicha vs las variables ambientales para C. officinalis.

Modelo 1



Modelo 2



Nota. μ = Media. CIC= Capacidad de intercambio catiónico.

3.2.3. Modelos lineales generalizados para *C. calisaya*

Para *C. calisaya* el Modelo 1 estuvo conformado por dos variables edáficas y dos variables bioclimáticas, las cuales fueron altamente significativas al 95 % con un *p* valor < 0.05 a excepción de la variable Bio 15 y un AIC del modelo igual a 36.18 (**Tabla 7**). Por otra parte, en el Modelo 2, la inclusión de la interacción Nitrógeno*Bio15 contribuyó significativamente al modelo al 95 % con un *p* valor = 0.03, un AIC = 31.84 y un delta de AIC = 4.34 con respecto al Modelo 1, lo cual indica que el Modelo 2, es ligeramente el mejor modelo para *C. calisaya* en términos de AIC. Por otro lado, la adición de esta interacción generó que todas las variables del Modelo 2 sean significativas al 95 %, ya que estas presentaron un *p* valor < 0.05 (**Tabla 7**).

Tabla 7.

Coefficientes de los GLM para C. calisaya.

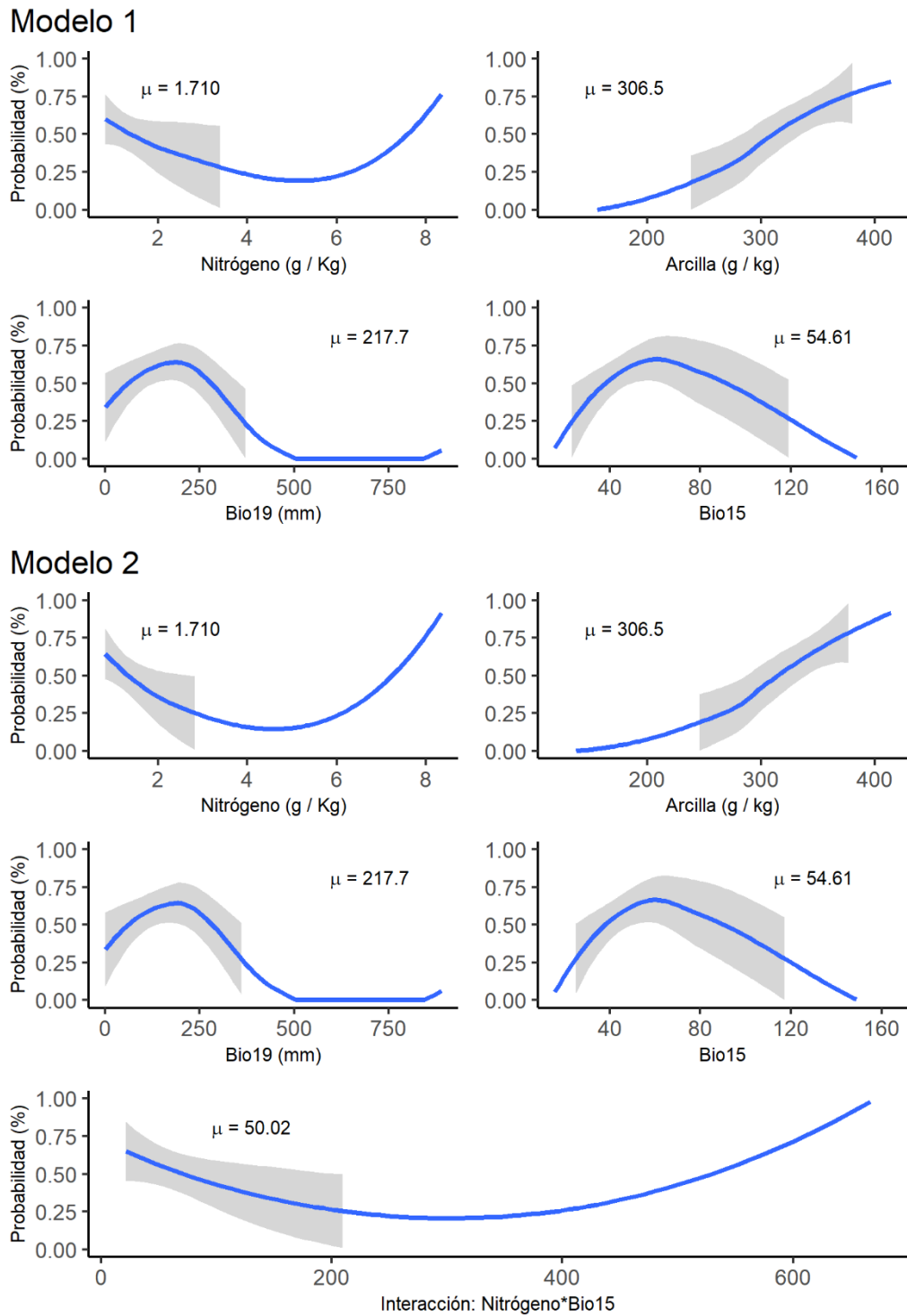
| Variables del modelo | Modelo 1 | | | Modelo 2 | | |
|----------------------|--------------|------------|---------|--------------|------------|---------|
| | Coefficiente | Odds ratio | p value | Coefficiente | Odds ratio | p value |
| Intercepto | -21.4605 | 0.00 | 0.03 | 8.22874 | 3747.11 | 0.63 |
| Arcilla | 0.10374 | 1.11 | 0.00 | 0.0953 | 1.10 | 0.02 |
| Bio 19 | -0.05002 | 0.95 | 0.00 | -0.05853 | 0.94 | 0.01 |
| Nitrógeno | 1.18794 | 3.28 | 0.04 | -10.59743 | 0.00 | 0.04 |
| Bio 15 | -0.11601 | 0.89 | 0.07 | -0.61356 | 0.54 | 0.02 |
| Nitrógeno*Bio15 | | | | 0.21275 | 1.24 | 0.03 |

Nota. Modelo 1 = Modelo sin interacción entre variables, Modelo 2 = Modelo con interacción entre variables.

El análisis de las curvas de respuesta muestra que, el aumento por encima de la media de la variable Nitrógeno, disminuye la probabilidad predicha para *C. calisaya*, para ambos modelos. Por otra parte, el aumento por encima de la media (μ) de la variable Arcilla, aumenta la probabilidad predicha para *C. calisaya*, para ambos modelos. Por otro lado, el aumento o la disminución con respecto a la media (μ) de las variables Bio 19 y Bio 15, disminuyen la probabilidad predicha para *C. calisaya*, para ambos modelos (**Figura 6**). En cuanto a la interacción Nitrógeno*Bio 15 que incluye el Modelo 2, el aumento por encima de la media (μ) de esta interacción, disminuye la probabilidad predicha para *C. calisaya*.

Figura 6.

Curvas de respuesta de la probabilidad predicha vs las variables ambientales para C. calisaya.



Nota. μ = Media. CIC= Capacidad de intercambio catiónico.

3.3. Validación y precisión de los modelos

La primera evaluación de la precisión del Modelo 1 y Modelo 2 para las tres especies de *Cinchona* se realizó con los datos de entrenamiento del modelo (70 % de los datos). Esta evaluación nos permitió comparar de manera visual y estadísticamente los datos de presencia / ausencia predichos por el modelo con los datos reales de presencia / ausencia, con los cuales se construyó el modelo.

Las gráficas del Modelo 1 y Modelo 2 para *C. pubescens* (**Figura 7**), *C. officinalis* (**Figura 8**) y *C. calisaya* (**Figura 9**), muestran de manera visual el resultado de la clasificación de los modelos, donde los datos correctamente clasificados fueron llamados verdaderos positivos (VP) o verdaderas presencias y verdaderos negativos (VN) o verdaderas ausencias, mientras que los datos mal clasificados fueron llamados falsos positivos (FP) o falsas presencias y falsos negativos (FN) o falsas ausencias. Estas clasificaciones se obtuvieron a partir del punto de corte para cada uno de los modelos, los cuales fueron seleccionados por mostrar los mejores resultados en los criterios TSS e índice kappa (**Tabla 8**).

Figura 7.

Gráfica del Modelo 1 (A) y el Modelo 2 (B), para *C. pubescens*.

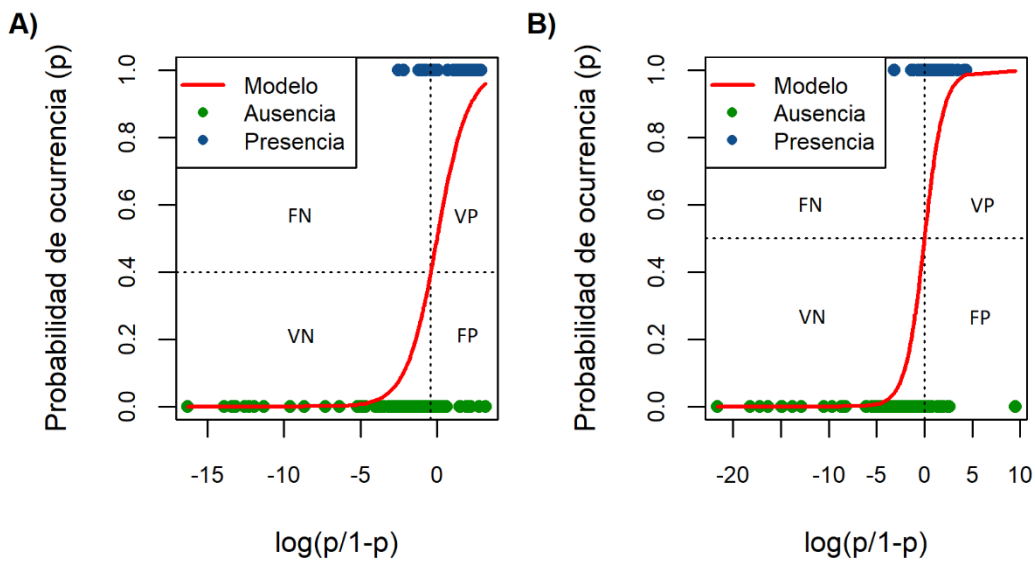


Figura 8.

Gráfica del Modelo 1 (A) y el Modelo 2 (B), para *C. officinalis*.

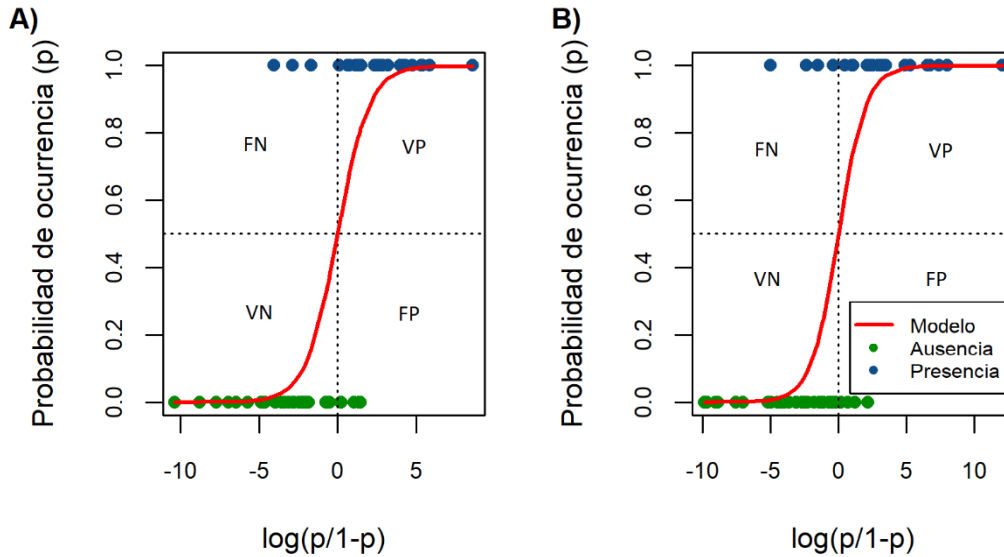
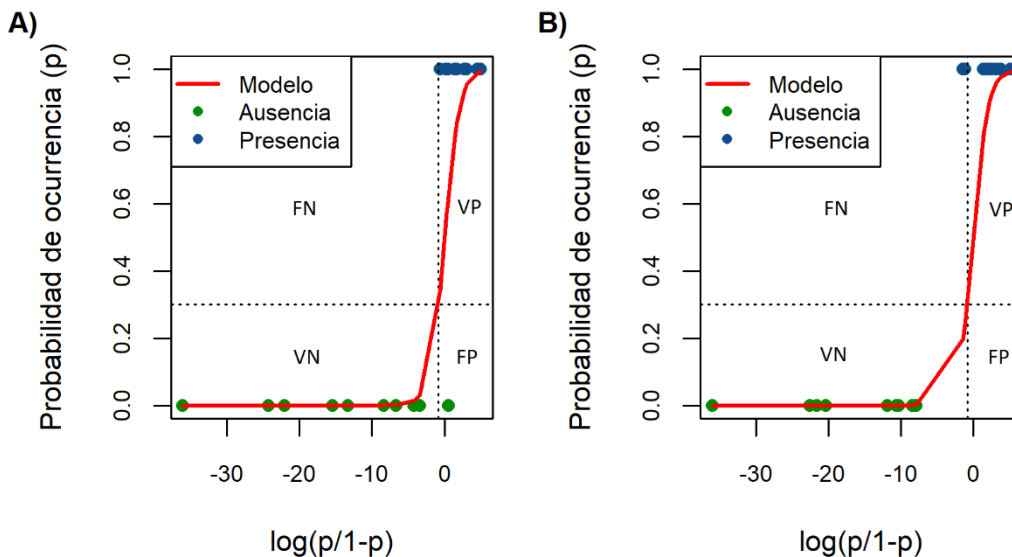


Figura 9.

Gráfica del Modelo 1 (A) y el Modelo 2 (B), para *C. calisaya*.



La evaluación de la precisión de los modelos para los datos de entrenamiento muestra que, para *C. pubescens* el Modelo 2 mostro mejores resultados en los criterios AUC, TSS e índice kappa con valores de 0.94, 0.80 y 0.79 respectivamente. En comparación al Modelo 1, cuyos valores de los criterios AUC, TSS e índice kappa fueron de 0.91, 0.74 y

0.73 respectivamente. Mientras que, para *C. officinalis* el Modelo 1 y el Modelo 2 mostraron resultados similares en los criterios AUC, TSS e índice kappa con valores promedio de 0.96, 0.84 y 0.84 respectivamente. Asimismo, para *C. calisaya* el Modelo 1 y el Modelo 2 mostraron resultados similares en los criterios AUC, TSS e índice kappa con valores promedio de 0.97, 0.87 y 0.86 respectivamente (**Tabla 8**).

Para este estudio se prevaleció la sensibilidad frente a la especificidad ya que, para los objetivos de la investigación se necesita conocer con mayor precisión las áreas de presencia de la especie frente a la ausencia de la misma. Sin embargo, los criterios TSS e índice kappa fueron los más determinante para establecer los puntos de corte para cada modelo. Para *C. pubescens* y *C. calisaya* se logró tener modelos con mayor sensibilidad que especificidad, con el mejor rendimiento en los criterios TSS e índice kappa, tanto para el Modelo 1 como para el Modelo 2. Sin embargo, para *C. officinalis* la especificidad fue mayor que la sensibilidad para ambos modelos, ya que de elegir un modelo con mayor sensibilidad que especificidad los criterios TSS e índice kappa hubieran disminuido (**Tabla 8**).

Tabla 8.

Métricas de precisión de los GLM en los datos de entrenamiento.

| Especie | Modelo | Corte | Sensibilidad | Especificidad | TSS | AUC | Índice kappa | AIC |
|-----------------------|--------|-------|--------------|---------------|------|------|--------------|--------|
| <i>C. pubescens</i> | M1 | 0.4 | 0.91 | 0.82 | 0.74 | 0.91 | 0.73 | 310.57 |
| | M2 | 0.5 | 0.93 | 0.87 | 0.80 | 0.94 | 0.79 | 264.36 |
| <i>C. officinalis</i> | M1 | 0.5 | 0.92 | 0.93 | 0.84 | 0.96 | 0.84 | 91.13 |
| | M2 | 0.5 | 0.91 | 0.94 | 0.84 | 0.97 | 0.84 | 86.13 |
| <i>C. Calisaya</i> | M1 | 0.3 | 1.00 | 0.88 | 0.88 | 0.96 | 0.86 | 36.18 |
| | M2 | 0.3 | 0.96 | 0.90 | 0.86 | 0.98 | 0.86 | 31.84 |

Nota. M1 = Modelo sin interacción entre variables, M2 = Modelo con interacción entre variables. AUC = Área bajo la curva, AIC = Criterio de información de Akaike.

La segunda evaluación de la precisión del Modelo 1 y Modelo 2 para las tres especies de *Cinchona* se realizó con los datos de validación del modelo (30 % datos). Esta evaluación nos permitió medir la precisión de los modelos a nuevos datos (datos de validación).

La evaluación de la precisión de los modelos para los datos de validación demuestra que, para *C. pubescens* el Modelo 2 mostró mejores resultados en los criterios AUC, TSS e

índice kappa con valores de 0.92, 0.76 y 0.76 respectivamente. En comparación al Modelo 1, cuyos valores de los criterios AUC, TSS e índice kappa fueron de 0.90, 0.72 y 0.71 respectivamente (**Tabla 9**). Asimismo, para *C. officinalis* el Modelo 2 mostró mejores resultados en los criterios AUC, TSS e índice kappa con valores de 0.94, 0.76 y 0.76 respectivamente. En comparación a el Modelo 1, cuyos valores de los criterios AUC, TSS e índice kappa fueron de 0.93, 0.74 y 0.74 respectivamente. Para *C. calisaya*, el Modelo 1 mostró los mejores resultados en los criterios TSS e índice kappa con valores de 0.92 y 0.91 respectivamente. En comparación al Modelo 2, cuyos valores de los criterios TSS e índice kappa fueron 0.86 y 0.86 respectivamente. Sin embargo, el criterio AUC fue levemente superior en el Modelo 2 (**Tabla 9**).

Para los datos de validación se logró tener modelos con mayor sensibilidad que especificidad, con el mejor rendimiento en los criterios TSS e índice kappa para las tres especies de *Cinchona*, tanto para el Modelo 1 como para el Modelo 2 (**Tabla 9**).

Tabla 9.

Métricas de precisión de los GLM en los datos de validación.

| Especie | Modelo | Corte | Sensibilidad | Especificidad | TSS | AUC | Índice kappa | AIC |
|-----------------------|--------|-------|--------------|---------------|------|------|--------------|--------|
| <i>C. pubescens</i> | M1 | 0.4 | 0.91 | 0.82 | 0.72 | 0.90 | 0.71 | 310.57 |
| | M2 | 0.5 | 0.89 | 0.87 | 0.76 | 0.92 | 0.76 | 264.36 |
| <i>C. officinalis</i> | M1 | 0.5 | 0.90 | 0.84 | 0.74 | 0.93 | 0.74 | 91.13 |
| | M2 | 0.5 | 0.88 | 0.88 | 0.76 | 0.94 | 0.76 | 86.13 |
| <i>C. Calisaya</i> | M1 | 0.3 | 0.92 | 0.91 | 0.92 | 0.97 | 0.91 | 36.18 |
| | M2 | 0.3 | 0.96 | 0.90 | 0.86 | 0.98 | 0.86 | 31.84 |

Nota. M1 = Modelo sin interacción entre variables, M2 = Modelo con interacción entre variables. AUC = Área bajo la curva, AIC = Criterio de información de akaike.

La precisión más elevada en los criterios AUC, TSS e índice kappa de los Modelos 1 y 2 se logró con *C. calisaya*, tanto en los datos de entrenamiento como en los datos de validación. Sin embargo, se podría considerar que la elevada precisión de estos criterios para *C. calisaya* se debe a un problema de sobreajuste de los datos, ya que solo se contó con 56 observaciones de presencia/ausencia (70 % datos) para la construcción de los modelos, y 22 observaciones para la validación de los mismos (30 % datos).

Por otra parte, no se encontró diferencias significativas en lo criterios TSS, índice kappa y AUC en los datos de entrenamiento y validación para los Modelos 1 y 2 (**Tabla 8** y

Tabla 9). Lo cual demuestra que los Modelos 1 y 2 son adecuados para predecir la presencia/ausencia de *C. pubescens*, *C. officinalis* y *C. calisaya*, ya que presentan buen ajuste en datos conocidos (entrenamiento) como en datos desconocidos (validación).

Asimismo, el análisis de las curvas ROC para *C. pubescens* (**Figura 10**), *C. officinalis* (**Figura 11**), y *C. calisaya* (**Figura 12**), muestran que no existe diferencias significativas en las curvas ROC de los datos de entrenamiento y de los datos de validación, lo cual se evidencia con el criterio AUC en los Modelos 1 y 2 para las tres especies de *Cinchona* (**Tabla 8** y **Tabla 9**).

Figura 10.

Gráfica de la curva ROC para el Modelo 1 (A) y el Modelo 2 (B), para *C. pubescens*.

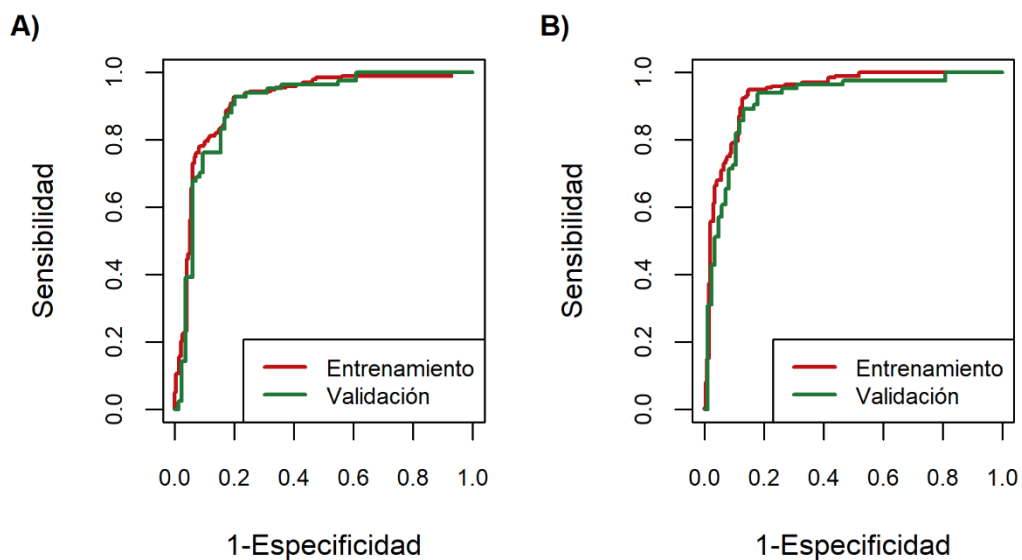


Figura 11.

Gráfica de la curva ROC para el Modelo 1 (A) y el Modelo 2 (B), para C. officinalis.

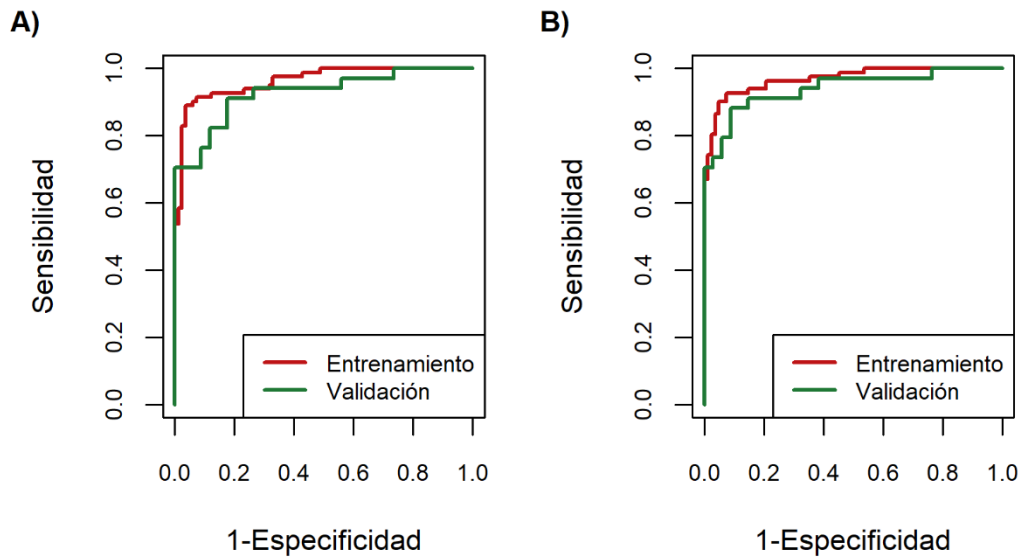
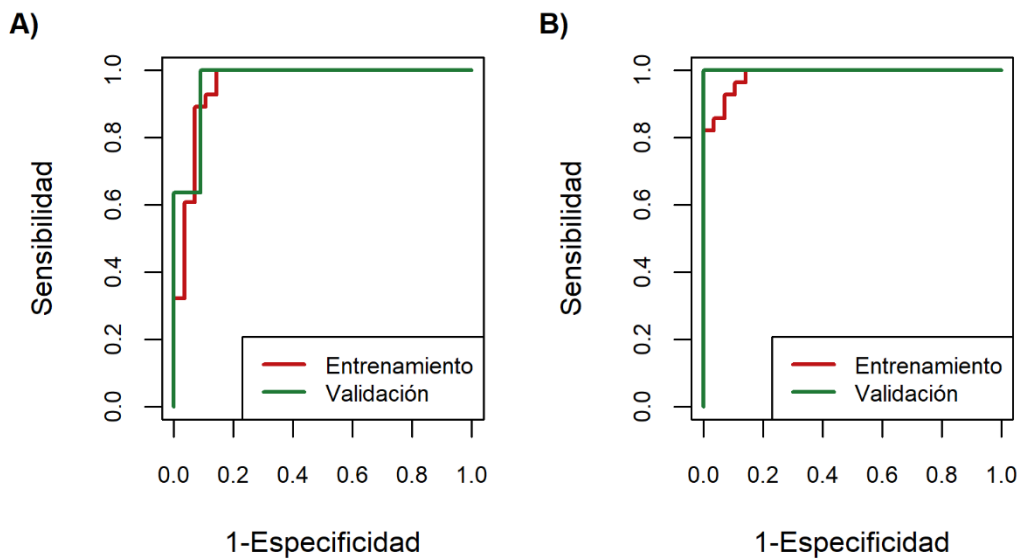


Figura 12.

Gráfica de la curva ROC para el Modelo 1 (A) y el Modelo 2 (B), para C. calisaya.

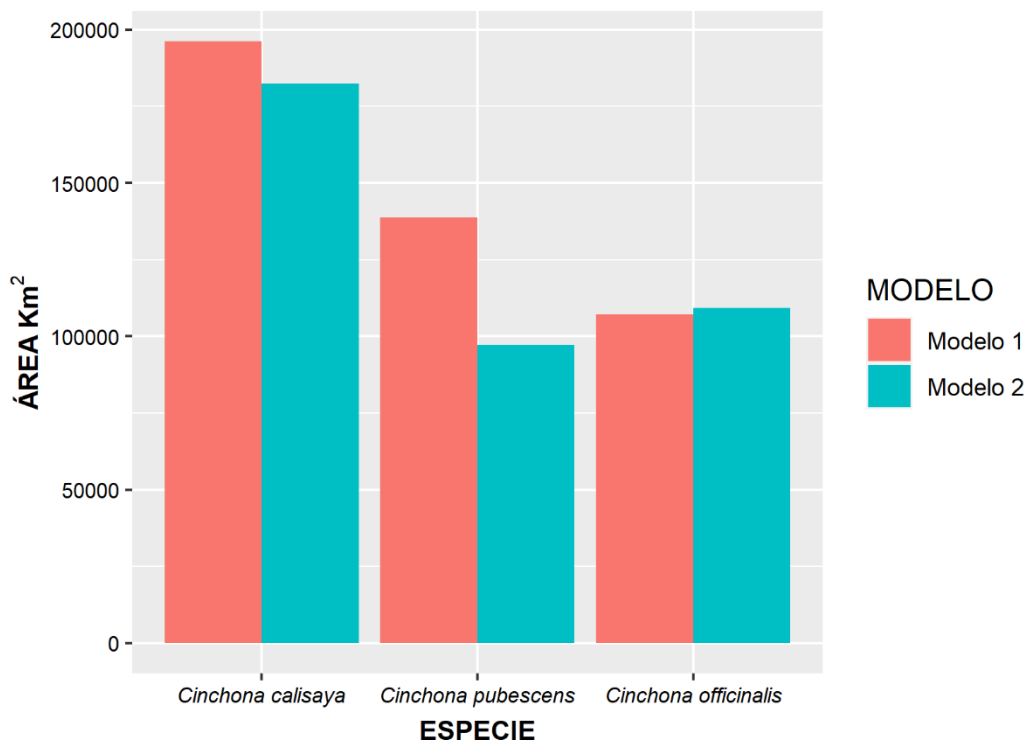


3.4. Patrones de localidad de presencia de las tres especies de *Cinchona* en el Perú

Se determinó que los patrones de localidad con alta probabilidad para encontrar presencia de *C. pubescens* en el Perú, abarcan un área territorial de 138819.62 km² y 97195.04 km² para el Modelo 1 y Modelo 2 respectivamente (**Figura 13**). El Modelo 1 abarcó una mayor área territorial con respecto al Modelo 2, con una diferencia considerable de 41624.57 km². Esta diferencia observada se puede atribuir principalmente a la diferencia significativa en la precisión de los Modelos 1 y 2, así como a la diferencia entre los puntos de corte de los mismos, los cuales provocan distinción en la clasificación de presencia/ausencia de *C. pubescens* (**Tabla 8** y **Tabla 9**). Además, esta diferencia se logró observar visualmente en los mapas de los patrones de localidad de presencia/ ausencia predicha por el Modelo 1 y 2 para *C. pubescens* (**Figura 14**).

Figura 13.

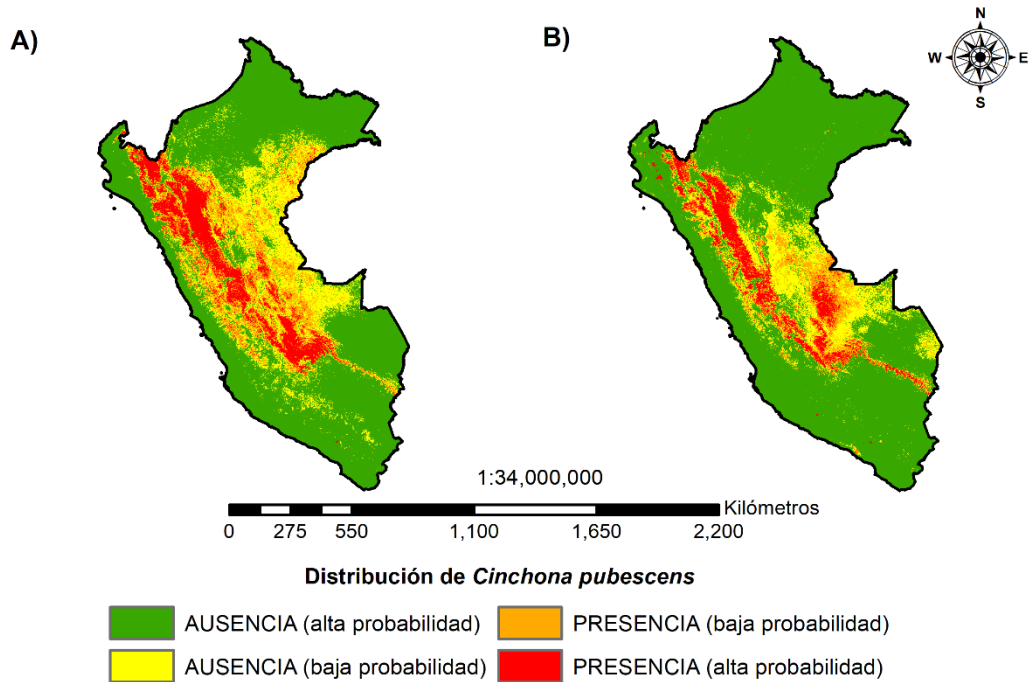
Área con alta probabilidad para encontrar presencia de las tres especies Cinchona a nivel de Perú.



Nota. Alta probabilidad (probabilidad >0.75).

Figura 14.

Mapa de los patrones de localidad de presencia / ausencia de C. pubescens predichas por el Modelo 1 (A) y Modelo 2 (B) en el Perú.



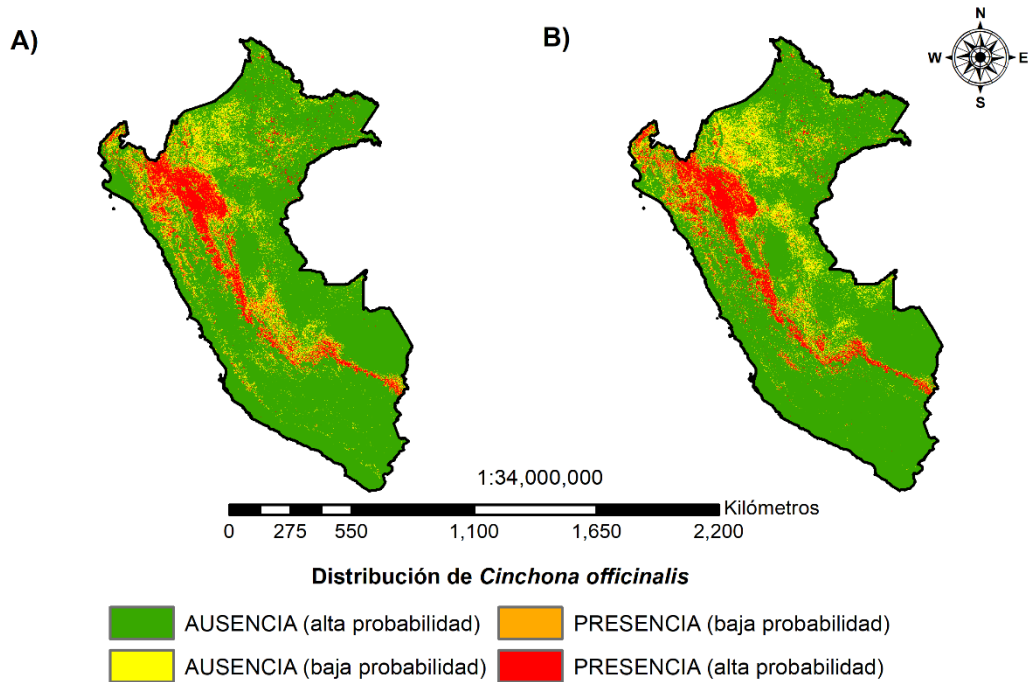
Nota. El mapa de probabilidad para el modelo 1 fue clasificado como: ausencia con alta probabilidad (desde 0 a 0.20), ausencia con baja probabilidad (desde 0.20 a 0.40), presencia con baja probabilidad (desde 0.40 a 0.70) y presencia con alta probabilidad (mayor a 0.70). Mientras que, el mapa de probabilidad para el modelo 2 fue clasificado como: ausencia con alta probabilidad (desde 0 a 0.25), ausencia con baja probabilidad (desde 0.25 a 0.50), presencia con baja probabilidad (desde 0.50 a 0.75) y presencia con alta probabilidad (mayor a 0.75).

También, se determinó que los patrones de localidad con alta probabilidad para encontrar presencia de *C. officinalis* en el Perú, abarcan un área territorial de 107229.01 km² y 109211.8667 km² para el Modelo 1 y Modelo 2 respectivamente (**Figura 13**). El Modelo 2 abarcó una mayor área territorial con respecto al Modelo 1, con una diferencia relativamente baja de 1982.85 km², lo cual concuerda con las métricas de precisión similares para el Modelo 1 y 2, con el mismo punto de corte para cada una de estas especies (**Tabla 8** y **Tabla 9**). Además, esta diferencia no se logró observar visualmente

en los mapas de los patrones de localidad de presencia/ ausencia predicha por el Modelo 1 y 2 para *C. officinalis* (Figura 15).

Figura 15.

Mapa de los patrones de localidad de presencia / ausencia de C. officinalis predichas por el Modelo 1 (A) y Modelo 2 (B) en el Perú.



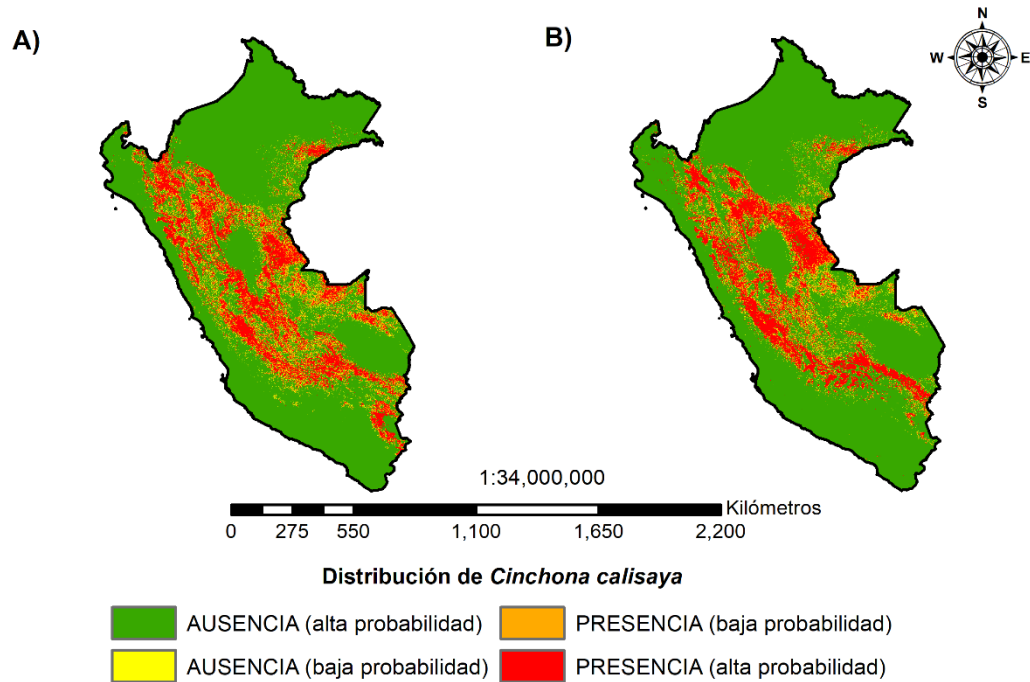
Nota. Los mapas de probabilidad para el modelo 1 y 2 fueron clasificados como: ausencia con alta probabilidad (desde 0 a 0.25), ausencia con baja probabilidad (desde 0.25 a 0.50), presencia con baja probabilidad (desde 0.50 a 0.75) y presencia con alta probabilidad (mayor a 0.75).

Asimismo, se determinó que los patrones de localidad con alta probabilidad para encontrar presencia de *C. calisaya* en el Perú, abarcan un área territorial de 196149.87 km² y 182455.6195 km² para el Modelo 1 y Modelo 2 respectivamente (Figura 13). El Modelo 1 abarcó una mayor área territorial con respecto al Modelo 2, con una diferencia moderadamente baja de 13694.25 km², lo cual concuerda con las métricas de precisión similares y con el mismo punto de corte para el Modelo 1 y 2, (Tabla 8 y Tabla 9). Además, esta diferencia no se logró observar visualmente en los mapas de los patrones

de localidad de presencia/ ausencia predicha por el Modelo 1 y 2 para *C. calisaya* (**Figura 16**).

Figura 16.

Mapa de los patrones de localidad de presencia / ausencia de C. calisaya predichas por el Modelo 1 (A) y Modelo 2 (B) en el Perú.



Nota. Los mapas de probabilidad para el modelo 1 y 2 fueron clasificados como: ausencia con alta probabilidad (desde 0 a 0.15), ausencia con baja probabilidad (desde 0.15 a 0.30), presencia con baja probabilidad (desde 0.30 a 0.65) y presencia con alta probabilidad (mayor a 0.65).

La distribución de presencia con alta probabilidad también se realizó a nivel departamental, donde se identificó que los departamentos de San Martín, Cuzco, Cajamarca, Junín, Ucayali, Amazonas, Huánuco y Loreto albergan la mayor distribución con alta probabilidad para encontrar la presencia de *C. calisaya*, *C. pubescens* y *C. officinalis* predichas por el Modelo 1 y 2. Asimismo, para *C. calisaya* la mayor distribución de presencia con alta probabilidad se encontró en el departamento de Ucayali, con un área total de 30818.98 km² para el Modelo 1 (**Figura 17**) y 29714.74 km² para el Modelo 2 (**Figura 18**). Mientras que, para *C. officinalis* la mayor distribución de presencia con alta probabilidad se encontró en el departamento de San Martín, con un área total de 26200.76 km² para el Modelo 1 (**Figura 17**) y 24868.20 km² para el Modelo 2 (**Figura 18**). Por otra parte, para *C. pubescens* la mayor distribución de presencia con alta probabilidad se encontró en el departamento de San Martín, con un área total de 19836.31 km² para el Modelo 1 (**Figura 17**), mientras que para el Modelo 2 el departamento de Huánuco presentó la mayor distribución de presencia con alta probabilidad, con un área total de 13076.07 km², seguidamente del departamento de San Martín, con un área total de 11363.83 km² (**Figura 18**).

Figura 17.

Área en km² con alta probabilidad para encontrar presencia de *C. calisaya*,
C. pubescens y *C. officinalis* predichas por el Modelo 1 a nivel de Departamental.

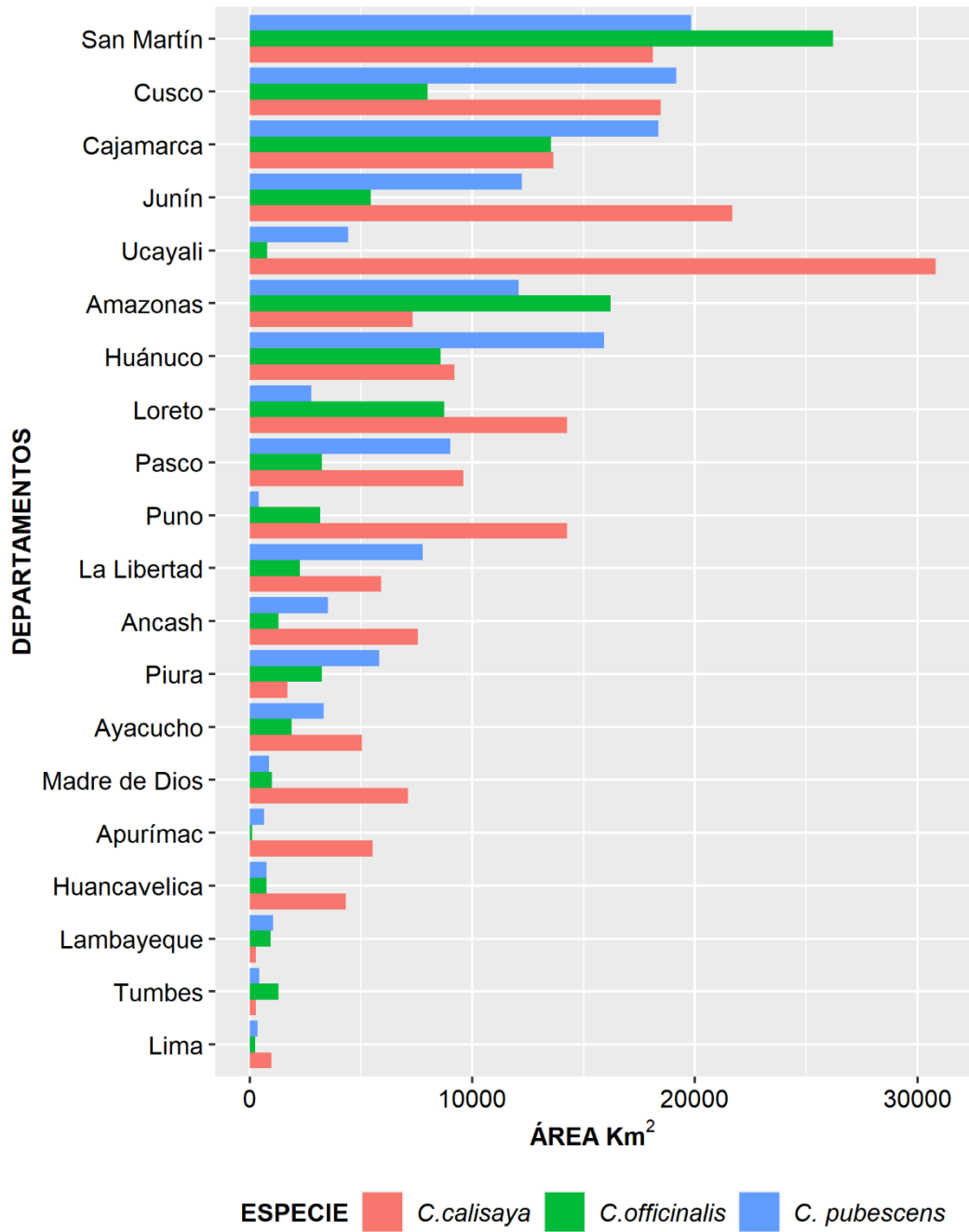
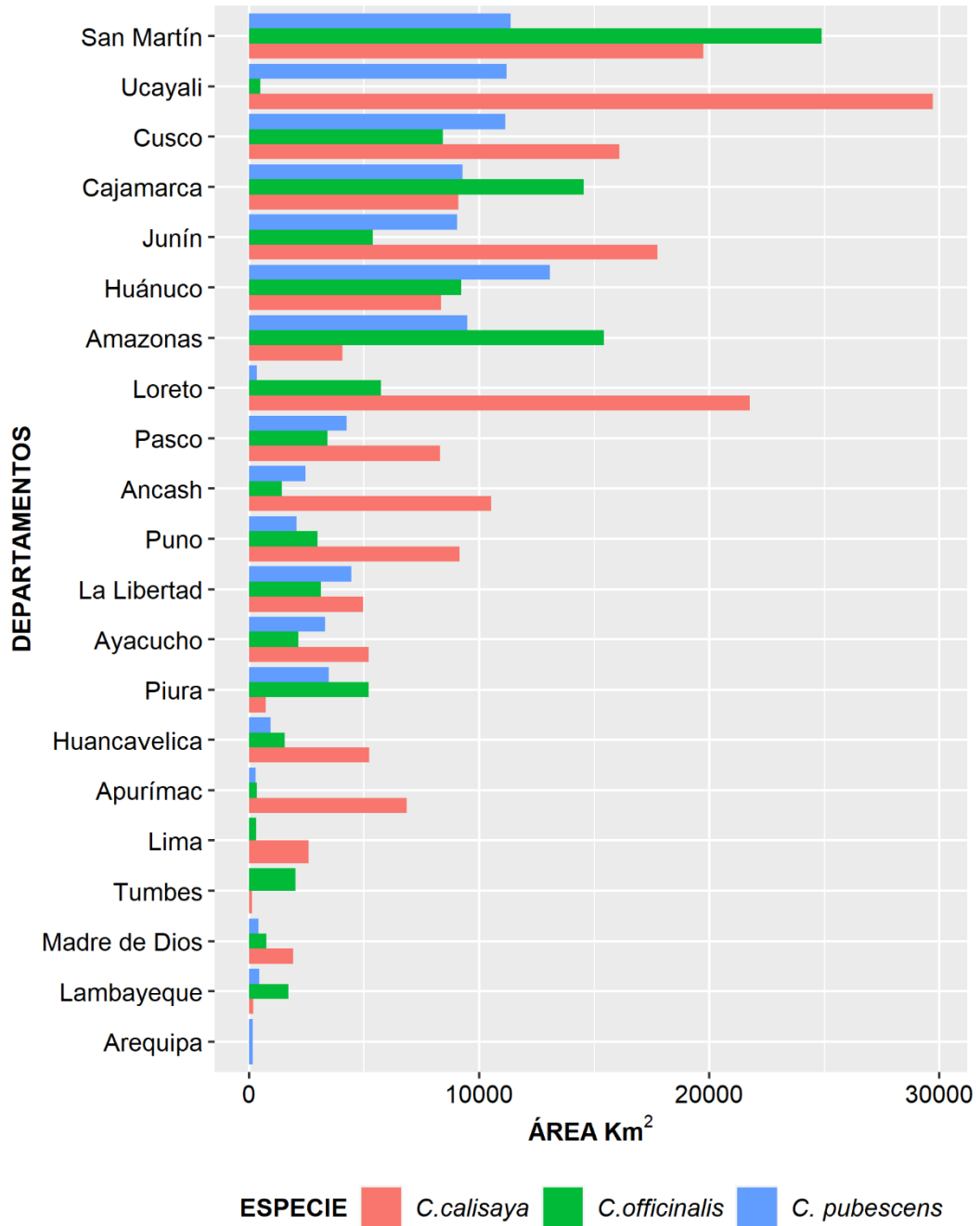


Figura 18.

Área en km² con alta probabilidad para encontrar presencia de *C. calisaya*, *C. pubescens* y *C. officinalis* predichas por el Modelo 2 a nivel de Departamental.



IV. DISCUSIONES

4.1. Selección de variables

La selección de variables debe considerar la importancia biológica de la variable para la especie a modelar (Velazco et al., 2017). En este estudio seleccionamos un total de 26 variables iniciales conformadas por variables bioclimáticas (19), edáficas (5) y topográficas (2), las cuales están estrechamente relacionadas con la distribución de especies vegetales (Resquin et al., 2020; Sintayehu et al., 2020). La cantidad de predictores en la MDE tiene gran relevancia desde el punto de vista ecológico (Fournier et al., 2017). Sin embargo, una elevada cantidad de variables predictoras conlleva a problemas de sobreajuste del modelo y multicolinealidad entre las variables (Brun et al., 2020; Pant et al., 2021). Por lo tanto, la selección de las variables predictoras es un paso clave en MDE (De Marco & Nóbrega, 2018).

Nuestros resultados muestran que, más de la mitad de las variables iniciales presentaron problemas de multicolinealidad ($VIF > 10$) (Kaky et al., 2020). La multicolinealidad incrementa la varianza de los predictores del modelo, provocando una selección errónea de predictores significativos (Brun et al., 2020). Asimismo, aumenta la incertidumbre del modelo disminuyendo su eficiencia (De Marco & Nóbrega, 2018). Por lo cual, en este estudio se excluyó variables colineales para la construcción del modelo, independientemente del efecto ecológico de las variables en las especies (Chen et al., 2020; Kaky et al., 2020; Santini et al., 2021). Lo cual es respaldado por una gran cantidad de estudios previos (Alatawi et al., 2020; Carus et al., 2017; Ghareghan et al., 2020; Rew et al., 2021; Velazco et al., 2017).

4.2. Modelado

La selección de las variables predictoras no colineales que conformen el GLM deberá estar correlacionadas con la presencia o ausencia de la especie con un p valor < 0.05 (Sungirai et al., 2018). Asimismo, deberán minimizar el AIC de los modelos resultantes para un buen ajuste del modelo en los datos de entrenamiento (Santini et al., 2021; Valavi et al., 2022). Nuestros resultados de la selección automática de las variables mediante el método forward basado en el AIC y p valor, mostraron buen ajuste para creación de los modelos para cada una de las tres especies de *Cinchona*.

Frecuentemente, los estudios de MDE han utilizado únicamente variables bioclimáticas para predecir la distribución de las especies (Hailu et al., 2017). Sin embargo, algunas investigaciones han demostrado que las variables edáficas y topográficas son impulsores importantes en MDE (Chauvier et al., 2021; Kaky et al., 2020). Nuestros resultados muestran que la mitad de las variables predictoras para cada GLM de las tres especies fueron variables edáficas. Lo cual demuestra la importancia de incorporar variables edáficas en la MDE (Kargar et al., 2019; Wan et al., 2019).

Las variables edáficas más importantes (variables con reincidencia en dos o más modelos), encontradas para las tres especies de *Cinchona* en nuestro estudio fueron el contenido de carbono orgánico, la CIC y la cantidad de nitrógeno. Un alto contenido de carbono orgánico en el suelo aumenta la supervivencia de las especies vegetales debido al mejoramiento de las propiedades físicas y biológicas del suelo (Kargar et al., 2019). Además, el alto contenido en carbono orgánico en los suelos incrementan la CIC (Lebrun et al., 2022). Los árboles del género *Cinchona* crecen en suelos volcánicos ricos en carbono orgánico (Jäger et al., 2013; Zevallos, 1989). En nuestro estudio las variables carbono orgánico y CIC presentaron una correlación directa con la presencia de las especies *C. pubescens* y *C. officinalis*. Estudios similares respaldan el uso de carbono orgánico como predictor importante en la distribución de especies vegetales (Chauvier et al., 2021; Kargar et al., 2019).

El contenido de nitrógeno en el suelo es un componente importante en la distribución de las especies vegetales (Wherry, 1926). Estudios previos han demostrado que la adición de cepas de *Pseudomonas sp* al sistema radicular de plántulas de *C. officinalis* incrementan la fijación de nitrógeno atmosférico, lo que permite un mayor crecimiento vegetativo (Quesquén-Esquen, 2020). El aumento de nitrógeno en el suelo también incrementa el contenido de alcaloides presentes en la cortezas de *Cinchona* (Maldonado et al., 2017). En nuestro estudio la variable nitrógeno presentó rangos específicos alrededor de la media (1.7-2.7 g/kg) para obtener alta probabilidad de presencia de las especies *C. officinalis* y *C. calisaya*.

Las variables edáficas PH y contenido de arcilla no tuvieron reincidencia en los modelos, pero formaron parte de los modelos de *C. pubescens* y *C. calisaya* respectivamente. Desde el punto de vista ecológico es de esperarse que los árboles de *C. pubescens* estén correlacionados con el PH, ya que la presencia de esta especie requiere de suelos con un

PH ácido entre 5 a 6.5 para su desarrollo (Nair, 2010), lo cual concuerda con nuestros resultados de alta probabilidad de presencia de esta especie en este rango. También encontramos la existencia de correlación directa entre el contenido de arcilla y la presencia de *C. pubescens*. El género *Cinchona* comúnmente se distribuyen en suelos arcillosos de textura media a pesada (Zevallos, 1989). Los suelos con alto contenido en arcilla presentan alta humedad, por ende, proporcionan mayor disponibilidad de nutrientes (Kargar et al., 2019).

Encontramos que para Perú *C. pubescens* se distribuye en áreas con una temperatura media anual entre 14.2°C a 17.9 °C y una precipitación media anual entre 1041 a 1150. También se obtuvo resultados semejantes para *C. officinalis*, la cual se distribuye en áreas con una temperatura media anual entre 13.73 °C a 16. 56 °C y una precipitación media anual entre 1151 a 1444 mm. Estas características clasifican a la distribución de estas dos especies en climas templados húmedos y de montaña según la clasificación climática de Köppen-Geiger (Beck et al., 2018). En cuanto a *C. calisaya*, nuestros resultados de precipitación y temperatura media anual, estuvieron sesgados espacialmente, ya que más del 50 % de nuestros datos (25 datos) estuvieron distribuidos en la Región Ucayali. Esta Región no se encuentra en el rango de distribución documentada para ninguna especie del género *Cinchona* en el Perú (Zevallos, 1989). Por lo que se considera que hubo problemas de georreferenciación o alguna confusión taxonómica (Perez, 2021).

Las variables bioclimáticas delimitan condiciones climáticas a escalas muy grandes, por lo que se espera que presenten influencia similar en la presencia de especies con hábitat semejantes (Schwager & Berg, 2021). Nuestros resultados indican que la más alta probabilidad de presencia para *C. pubescens*, *C. officinalis* y *C. calisaya* ocurre en la media (μ) de cada una de las variables bioclimáticas de temperatura y precipitación seleccionadas para cada especie, a excepción de la variable Isotermalidad que mostró una relación directa con la probabilidad de presencia. Asimismo, nuestros resultados muestran solamente la reincidencia de las variables Bio 15 y Bio 19 en los modelos de *C. pubescens* y *C. calisaya*. Debido a la distribución de las especies del género *Cinchona* en los climas templados húmedos y de montaña, se espera que las áreas de distribución presenten una baja estacionalidad de la precipitación y alta Isotermalidad (Beck et al., 2018). Nuestros resultados muestran concordancia, ya que se encontró alta probabilidad de presencia de *C. pubescens* y *C. calisaya*, en zonas con baja estacionalidad de la precipitación, alrededor

de 50mm. Asimismo, para *C. pubescens* se encontró resultados de alta probabilidad de presencia en zonas con alta Isotermalidad, lo cual sugiere bajas variaciones de temperatura entre cada mes. Nuestros resultados muestran similitud con los obtenidos por Vargas Aguilar (2021), donde encontró que la Isotermalidad o Bio3 fue la variable más importante para predecir la distribución del género *Cinchona*.

4.3. Validación y precisión de los modelos

Según la clasificación de Rew et al. (2021) la precisión de los modelos 1 y 2 basada en AUC fue excelente ($AUC > 0.9$) para *C. pubescens*, *C. officinalis* y *C. calisaya*. Igualmente, la clasificación de la precisión de ambos modelos basada en TSS para *C. calisaya* fue excelente ($TSS > 0.8$), mientras que para *C. pubescens* y *C. officinalis* fue buena ($0.6 < TSS < 0.8$). Del mismo modo, la clasificación de la precisión de ambos modelos basados en la índice kappa para *C. calisaya* fue buena ($0.8 < \text{índice kappa} < 0.9$), mientras que para *C. pubescens* y *C. officinalis* fue justa ($0.6 < \text{índice kappa} < 0.8$). Vargas Aguilar (2021) también obtuvo resultados similares basados en AUC (0.928) utilizando el algoritmo de Maxent para el género *Cinchona*. Los modelos 1 y 2 no presentan diferencias significativas en la precisión basadas en AUC, TSS e índice kappa para las tres especies de *Cinchona*. Por ende y considerando el principio de parsimonia, el modelo 1 es considerado el mejor modelo para predecir la presencia de *C. pubescens*, *C. officinalis* y *C. calisaya* (Guisan et al., 2002; Lopatin et al., 2016).

Los modelos con baja sensibilidad conllevan a esfuerzos y recursos desperdiciados o innecesarios para la conservación de especies (Shabani et al., 2018). Por ende, es necesario conocer la medida en que el modelo clasifica correctamente la presencia y ausencia de una especie. Ante esto, el criterio TSS es considerado como la métrica más confiable para medir el rendimiento del modelo (Resquin et al., 2020). En nuestro estudio se buscó obtener modelos con alta sensibilidad y especificidad (Ghareghan et al., 2020). Sin embargo, prevalecimos la sensibilidad frente a la especificidad del modelo, desde el punto de vista de conservación (Barbet-Massin et al., 2012). Ya que nuestros resultados pretenden contribuir con el Plan de Acción para el Repoblamiento Forestal con Especies del género *Cinchona* (Árbol de la Quina) 2020-2022, en el Perú, aprobada mediante la RD N.º 067-2020- MINAGRI-DV-DIAR-AGRO RURAL-DE (Albán-Castillo et al., 2020).

4.4. Patrones de localidad de presencia de las tres especies de *Cinchona* en el Perú

Los modelos generados demuestran que las áreas de alta probabilidad de presencia (probabilidad > 0.75) se encuentran en el norte del Perú a lo largo de la Cordillera de los Andes, con un porcentaje de 42 %, 47 % y 68 % para *C. pubescens*, *C. calisaya* y *C. officinalis* respectivamente. Estos resultados son concordantes con la alta distribución registrada por Huamán et al. (2019) para *C. pubescens* y *C. officinalis* en esta zona. Sin embargo, los resultados encontrados para la distribución de *C. calisaya* en el norte de Perú, difieren con los resultados obtenidos por Zevallos (1989), el cual señala que la distribución registrada para esta especie se encuentra en su mayoría en el sur del Perú, específicamente en la Región Puno. Esta diferencia podría deberse a la falta de fiabilidad espacial (datos de latitud y longitud) y bajo número de registros de presencia (39 registros) que obtuvimos para esta especie.

Los resultados obtenidos en este estudio muestran que el área de alta probabilidad de presencia (probabilidad > 0.75) calculada a nivel de Perú por el modelo 1, fue mayor que el área calculada por el modelo 2 en un 8 % y 42 % para *C. calisaya* y *C. pubescens* respectivamente. Esto generó diferencias a nivel departamental, cambiando el puesto de los departamentos con mayor área de alta probabilidad de presencia calculada para ambos modelos. Mientras que, para *C. officinalis* las áreas de alta probabilidad calculadas por el modelo 1 y 2 se mantuvieron prácticamente semejantes con una diferencia de tan solo el 2 % a nivel de Perú. Lo cual explica que para *C. officinalis* los puestos de los departamentos con mayor área de alta probabilidad de presencia se mantuvieron constantes para ambos modelos.

Nuestros resultados al igual que los obtenidos por Vargas Aguilar (2021) demuestran que, las Regiones Lima y Lambayeque presentan áreas muy pequeñas (área <500km²) de alta probabilidad de presencia de *C. pubescens*, *C. officinalis* y *C. calisaya*; sin embargo, estas dos regiones fueron enlistadas en el Plan de Acción para el Repoblamiento Forestal con Especies del género *Cinchona* (Árbol de la Quina) 2020-2022. Por lo que sugerimos que los resultados obtenidos en esta investigación sirvan y refuercen las áreas priorizadas en dicho Plan desde un punto de vista ecológico y estadístico.

V. CONCLUSIONES

- ✓ Nuestros resultados demostraron que los GLM presentaron un excelente desempeño para predecir la presencia / ausencia de *C. pubescens*, *C. officinalis* y *C. calisaya*. El modelo resultante seleccionado para predecir la presencia / ausencia para *C. pubescens* fue $GLM = -10.7521 + 0.3398(\text{Carbono}) + 0.2397(\text{Bio3}) - 0.0079(\text{Bio19}) - 2.7184(\text{PH}) + 0.1748(\text{CIC}) + 0.0290(\text{Bio15})$, para *C. officinalis* fue $GLM = -14.7971 + 1.9415(\text{Carbono}) - 3.3730(\text{Nitrógeno}) - 0.0124(\text{Bio13}) + 0.3319(\text{CIC}) + 0.2033(\text{Bio8})$, y para *C. calisaya* fue $GLM = -21.4605 + 0.10374(\text{Arcilla}) - 0.05(\text{Bio19}) + 1.1879(\text{Nitrógeno}) - 0.116(\text{Bio15})$.
- ✓ La interpretación y el análisis de las curvas de respuesta demostraron que, las variables edáficas al igual que las variables bioclimáticas son predictoras clave en la modelación de la distribución de *C. pubescens*, *C. officinalis* y *C. calisaya*. También, se demostró que las variables edáficas y bioclimáticas deben presentar un rango de valores específicos alrededor de la media, para obtener alta probabilidad de presencia para estas tres especies.
- ✓ Se encontró que el departamento de San Martín presenta la mayor superficie a nivel departamental, con alta probabilidad de encontrar presencia de *C. pubescens* y *C. officinalis*, con un valor de 19836.31 km² (19.68 %) y 26200.76 km² (24.44 %) respectivamente. Asimismo, ocupa el cuarto lugar a nivel departamental, con la mayor superficie con alta probabilidad de encontrar presencia de *C. calisaya*, con un valor de 18123.29 km² (10 %). Por lo antes mencionado, los mayores esfuerzos de reforestación deberán centrarse en este departamento.
- ✓ Nuestros resultados evidencian que el departamento de Amazonas ocupa el sexto lugar a nivel departamental con alta idoneidad de hábitat para encontrar la presencia de las tres especies de *Cinchona*. Por lo cual, este departamento debe de considerarse como área prioritaria para el repoblamiento de estas tres especies.

VI. RECOMENDACIONES

- ✓ Se recomienda centrar nuevos esfuerzos en la modelación de la distribución de *C. calisaya*, ya que en nuestro estudio somos conscientes de que, nuestros datos estuvieron espacialmente sesgados y el número de presencias reales observadas (43) fue muy bajo. Por ende, no es muy recomendable utilizar los mapas obtenidos de distribución de presencia / ausencia con fines de conservación o reforestación de esta especie.
- ✓ A pesar de que la metodología empleada para este estudio demostró resultados prometedores, recomendamos realizar nuevas investigaciones sobre la MDE, aplicando nuevas técnicas de modelado estadístico como Maxent, redes neuronales artificiales, bosques aleatorios entre otros, con la finalidad de corroborar nuestros resultados y de esta manera implementar planes de conservación y reforestación adecuados para estas tres especies.
- ✓ También se recomienda realizar validaciones en campo con el objetivo de aumentar la fiabilidad de los resultados obtenidos para las tres especies de *Cinchona*.
- ✓ Por último, nuestro código generado para modelar la presencia / ausencia de *C. pubescens*, *C. officinalis* y *C. calisaya*, estará disponible para ser reproducido o aplicado a cualquier otra especie de plantas.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alatawi, A. S., Gilbert, F., & Reader, T. (2020). Modelling terrestrial reptile species richness, distributions and habitat suitability in Saudi Arabia. *Journal of Arid Environments*, 178, 104153. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104153>
- Albán-Castillo, J., Chilquillo, E., Melchor- Castro, B., Arakaki, M., León, B., & Suni, M. (2020). Cinchona L. “Árbol de la Quina”: repoblamiento y reforestación en el Perú. *Revista Peruana de Biología*, 27(3), 423–426. <https://doi.org/10.15381/rpb.v27i3.18697>
- Barbet-Massin, M., Jiguet, F., Albert, C. H., & Thuiller, W. (2012). Selecting pseudo-absences for species distribution models: How, where and how many? *Methods in Ecology and Evolution*, 3(2), 327–338. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2011.00172.x>
- Beck, H. E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., & Wood, E. F. (2018). Data Descriptor: Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1 -km resolution. *Nature Publishing Group*, 5, 1–12. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214>
- Brun, P., Thuiller, W., Chauvier, Y., Pellissier, L., Wüest, R. O., Wang, Z., & Zimmermann, N. E. (2020). Model complexity affects species distribution projections under climate change. *Journal of Biogeography*, 47(1), 130–142. <https://doi.org/10.1111/jbi.13734>
- Bystrova, D., Poggiato, G., Bektaş, B., Arbel, J., Clark, J. S., Guglielmi, A., & Thuiller, W. (2021). Clustering Species With Residual Covariance Matrix in Joint Species Distribution Models. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 9, 601384:1-11. <https://doi.org/10.3389/fevo.2021.601384>
- Carus, J., Heuner, M., Paul, M., & Schröder, B. (2017). Plant distribution and stand characteristics in brackish marshes: Unravelling the roles of abiotic factors and interspecific competition. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 196, 237–247. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2017.06.038>
- Centeno, J. (2023). *Diversidad de helechos arbóreos en una gradiente de elevación - Reserva de Biosfera del Manu* [Tesis de grado, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco].

<https://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/20.500.12918/7663>

- Chauvier, Y., Thuiller, W., Brun, P., Lavergne, S., Descombes, P., Karger, D. N., Renaud, J., & Zimmermann, N. E. (2021). Influence of climate, soil, and land cover on plant species distribution in the European Alps. *Ecological Monographs*, *91*(2), 1–14. <https://doi.org/10.1002/ecm.1433>
- Chen, Q., Yin, Y., Zhao, R., Yang, Y., Teixeira da Silva, J. A., & Yu, X. (2020). Incorporating Local Adaptation Into Species Distribution Modeling of *Paeonia mairei*, an Endemic Plant to China. *Frontiers in Plant Science*, *10*, 1–15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01717>
- De Marco, P., & Nóbrega, C. C. (2018). Evaluating collinearity effects on species distribution models: An approach based on virtual species simulation. *Plos One*, *13*(9), e0202403. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0202403>
- Fournier, A., Barbet-Massin, M., Rome, Q., & Courchamp, F. (2017). Predicting species distribution combining multi-scale drivers. *Global Ecology and Conservation*, *12*, 215–226. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2017.11.002>
- García, L., Veneros, J., Chavez, S. G., Oliva, M., & Rojas-Briceño, N. B. (2022). World historical mapping and potential distribution of *Cinchona* spp. in Peru as a contribution for its restoration and conservation. *Journal for Nature Conservation*, *70*, 126290. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2022.126290>
- García, L., Veneros, J., Chávez, S., Oliva, M., & Briceño, N. (2021). Historical world mapping and current distribution in Peru of *Cinchona* spp.: Contribution to restoration and conservation strategies. *Figshare*. <https://doi.org/https://doi.org/10.6084/m9.figshare.14246327.v3>
- Ghareghan, F., Ghanbarian, G., Pourghasemi, H. R., & Safaeian, R. (2020). Prediction of habitat suitability of *Morina persica* L. species using artificial intelligence techniques. *Ecological Indicators*, *112*, 106096. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106096>
- Guisan, A., Edward, T. C., Jr, & Hastie, T. (2002). Generalized linear and generalized additive models in studies of species distributions: setting the scene. *Ecological Modelling*, *157*, 89–100. www.elsevier.com/locate/ecolmodel
- Hailu, B. T., Siljander, M., Maeda, E. E., & Pellikka, P. (2017). Assessing spatial

- distribution of *Coffea arabica* L. in Ethiopia's highlands using species distribution models and geospatial analysis methods. *Ecological Informatics*, 42, 79–89. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2017.10.001>
- Hengl, T., Mendes de Jesus, J., Heuvelink, G. B. M., Gonzalez, M. R., Kilibarda, M., LastNameBlagotić, A., Shangguan, W., Wright, M. N., Geng, X., Bauer-Marschallinger, B., Guevara, M. A., Vargas, R., MacMillan, R. A., Batjes, N. H., Leenaars, J. G. B., Ribeiro, E., Wheeler, I., Mantel, S., & Kempen, B. (2017). SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. *Plos One*, 12(2), e0169748. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0169748>
- Heuner, M., Weber, A., Schröder, U., Kleinschmit, B., & Schröder, B. (2016). Facilitating political decisions using species distribution models to assess restoration measures in heavily modified estuaries. *Marine Pollution Bulletin*, 110(1), 250–260. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.06.056>
- Huamán, L., Albán, J., & Chilquillo, E. (2019). Aspectos taxonómicos y avances en el conocimiento del estado actual del árbol de la quina (*Cinchona officinalis* L.) en el norte de Perú. *Ecología Aplicada*, 18(2), 145–153. <https://doi.org/10.21704/rea.v18i2.1333>
- Jäger, H., Alencastro, M. J., Kaupenjohann, M., & Kowarik, I. (2013). Ecosystem changes in Galápagos highlands by the invasive tree *Cinchona pubescens*. *Plant and Soil*, 371(1–2), 629–640. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1719-8>
- Kaky, E., Nolan, V., Alatawi, A., & Gilbert, F. (2020). A comparison between Ensemble and MaxEnt species distribution modelling approaches for conservation: A case study with Egyptian medicinal plants. *Ecological Informatics*, 60, 101150. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2020.101150>
- Kargar, M., Akhzari, D., & Saadatfar, A. (2019). Comparing different modeling techniques for predicting presence-absence of some dominant plant species in mountain rangelands, Mazandaran province. *Journal of Rangeland Science*, 9(3), 219–233.
- Karthick, M. (2013). *Cinchona officinalis* L. [Fotografía]. India Biodiversity Portal. <https://indiabiodiversity.org/observation/show/270692>
- Lebrun, M., Nandillon, R., Miard, F., Bourgerie, S., & Morabito, D. (2022). Biochar assisted phytoremediation for metal(loid) contaminated soils. *Assisted*

- Phytoremediation*, 101–130. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822893-7.00010-0>
- Lopatin, J., Dolos, K., Hernández, H. J., Galleguillos, M., & Fassnacht, F. E. (2016). Comparing Generalized Linear Models and random forest to model vascular plant species richness using LiDAR data in a natural forest in central Chile. *Remote Sensing of Environment*, 173, 200–210. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.11.029>
- López-González, E., & Ruiz-Soler, M. (2011). Analisis De Datos Con El Modelo Lineal Generalizado. *Revista Española de Pedagogía*, 248, 59–80. <https://revistadepedagogia.org>
- Maldonado, C., Barnes, C. J., Cornett, C., Holmfred, E., Hansen, S. H., Persson, C., Antonelli, A., & Rønsted, N. (2017). Phylogeny predicts the quantity of antimalarial alkaloids within the iconic yellow Cinchona bark (Rubiaceae: Cinchona calisaya). *Frontiers in Plant Science*, 8(391). <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00391>
- Mesa-Vanegas, A. M., Quinto-Quinto, A., & Blair-Trujillo, S. (2013). Cuantificación de quinina en extractos de Cinchona pubescens y evaluación de la actividad antiplasmodial y citotóxica. *Boletín Latinoamericano y Del Caribe de Plantas Medicinales y Aromaticas*, 12(6), 592–602. <https://www.redalyc.org/pdf/856/85629226004.pdf>
- Meynard, C. N., Leroy, B., & Kaplan, D. M. (2019). Testing methods in species distribution modelling using virtual species: what have we learnt and what are we missing? *Ecography*, 42(12), 2021–2036. <https://doi.org/10.1111/ecog.04385>
- Naimi, B., & Araújo, M. B. (2016). sdm : a reproducible and extensible R platform for species distribution modelling. *Ecography*, 39:, 368–375. <https://doi.org/10.1111/ecog.01881>
- Nair, K. P. P. (2010). Cinchona (Cinchona sp.). In Elsevier (Ed.), *The Agronomy and Economy of Important Tree Crops of the Developing World* (pp. 111–129). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-384677-8.00004-7>
- Nielsen, S. E., Dennett, J. M., & Bater, C. W. (2020). Predicting occurrence, abundance, and fruiting of a cultural keystone species to inform landscape values and priority sites for habitat enhancements. *Forests*, 11, 783. <https://doi.org/10.3390/F11070783>
- Pant, G., Maraseni, T., Apan, A., & Allen, B. L. (2021). Predicted declines in suitable habitat for greater one-horned rhinoceros (*Rhinoceros unicornis*) under future

- climate and land use change scenarios. *Ecology and Evolution*, 11(24), 18288–18304. <https://doi.org/10.1002/ece3.8421>
- Perez, J. (2021). *Diversidad y distribución de las quininas (Cinchona , Rubiaceae) usando dna barcoding para para su conservación en Amazonas* [Tesis de Grado, Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas]. <https://hdl.handle.net/20.500.14077/2329>
- Pulgar-Vidal, J. (2014). Las ocho regiones naturales del Perú. *Terra Brasilis (Nova Série)*, 3. <https://doi.org/10.4000/terrabrasilis.1027>
- Quesquén-Esquen, N. J. (2020). *Influencia de bacterias promotoras del crecimiento vegetal en la aclimatación de plántulas in vitro de Cinchona officinalis. Lambayeque – Perú. 2019.* [Tesis de grado, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo]. <https://hdl.handle.net/20.500.12893/9862>
- Remuzgo, J., Alvarez, J., Sales, F., & Valdivieso, G. (2020). Caracterización taxonómica y fitoquímica de *Cinchona pubescens* y *Ladenbergia oblongifolia* en el ámbito del valle Alto Huallaga - Región Huánuco. *Rebiol*, 40(2), 242–255.
- Resquin, F., Duque-Lazo, J., Acosta-Muñoz, C., Rachid-Casnati, C., Carrasco-Letelier, L., & Navarro-Cerrillo, R. M. (2020). Modelling current and future potential habitats for plantations of *eucalyptus grandis* hill ex maiden and *E. dunnii* Maiden in Uruguay. *Forests*, 11(9), 1–20. <https://doi.org/10.3390/f11090948>
- Rew, J., Cho, Y., & Hwang, E. (2021). A robust prediction model for species distribution using bagging ensembles with deep neural networks. *Remote Sensing*, 13(8), 1–29. <https://doi.org/10.3390/rs13081495>
- Safaei, M., Tarkesh, M., Bashari, H., & Bassiri, M. (2018). Modeling potential habitat of *Astragalus verus* Olivier for conservation decisions: A comparison of three correlative models. *Flora: Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 242, 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2018.03.001>
- Santini, L., Benítez-López, A., Maiorano, L., Čengić, M., & Huijbregts, M. A. J. (2021). Assessing the reliability of species distribution projections in climate change research. *Diversity and Distributions*, 27(6), 1035–1050. <https://doi.org/10.1111/ddi.13252>
- Schwager, P., & Berg, C. (2021). Remote sensing variables improve species distribution

- models for alpine plant species. *Basic and Applied Ecology*, 54, 1–13.
<https://doi.org/10.1016/j.baae.2021.04.002>
- Sevillano-ríos, C. S., & Morales, L. V. (2021). La temperatura y radiación solar explican diferencias en la distribución de dos árboles altoandinos (*Polylepis* spp .) localmente simpátricos en la Cordillera Blanca , Perú. *Neotropical Biodiversity*, 7(1), 327–340.
<https://doi.org/10.1080/23766808.2021.1938887>
- Shabani, F., Kumar, L., & Ahmadi, M. (2018). Assessing accuracy methods of species distribution models: AUC, Specificity, Sensitivity and the True Skill Statistic. *Global Journal of Human Social Science*, 18(1), 6–18.
<https://socialscienceresearch.org/index.php/GJHSS/article/download/2469/2358>
- Shu, C. (2023). *Cinchona calisaya* Wedd. [Fotografía]. iNaturalist.
- Sintayehu, D. W., Dalle, G., & Bobasa, A. F. (2020). Impacts of climate change on current and future invasion of *Prosopis juliflora* in Ethiopia: environmental and socio-economic implications. *Heliyon*, 6(8), e04596.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04596>
- Sousa-Guedes, D., Franch, M., & Sillero, N. (2021). A Spatial Approach for Modeling Amphibian Road-Kills: Comparison of Regression Techniques. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(5), 343. <https://doi.org/10.3390/ijgi10050343>
- Sungirai, M., Moyo, D. Z., De Clercq, P., Madder, M., Vanwambeke, S. O., & De Clercq, E. M. (2018). Modelling the distribution of *Rhipicephalus microplus* and *R. decoloratus* in Zimbabwe. *Veterinary Parasitology: Regional Studies and Reports*, 14, 41–49. <https://doi.org/10.1016/j.vprsr.2018.08.006>
- Tafur, E., Veneros, J., García, L., Gamarra, Ó., Farje, J., & Santistevan, M. (2022). Técnicas no destructivas para la estimación de la biomasa forestal aérea. *Idesia*, 40(3), 7–17. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292022000300007>
- Valavi, R., Guillera-Aroita, G., Lahoz-Monfort, J. J., & Elith, J. (2022). Predictive performance of presence-only species distribution models: a benchmark study with reproducible code. *Ecological Monographs*, 92(1), e01486.
<https://doi.org/10.1002/ecm.1486>
- Vargas Aguilar, C. A. (2021). *Mapas de distribución geográfica histórica y actual de Cinchona sp. en la región Amazonas* [Tesis de Grado, Universidad Nacional Toribio

- Rodríguez de Mendoza de Amazonas]. <https://hdl.handle.net/20.500.14077/2520>
- Vásquez-Martínez, R. (2011). *Cinchona pubescens Vahl*. [Fotografía]. GBIF. <https://www.gbif.org/es/occurrence/4061582975>
- Velazco, S. J. E., Galvão, F., Villalobos, F., & De Marco, P. (2017). Using worldwide edaphic data to model plant species niches: An assessment at a continental extent. *Plos One*, 12(10), 1–24. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0186025>
- Vergara, A. J., Cieza-Tarrillo, D., Ocaña, C., Quiñonez, L., Idrogo-Vasquez, G., Muñoz-Astecker, L. D., Auquiñivin-Silva, E. A., Cruzalegui, R. J., & Arbizu, C. I. (2023). Current and Future Spatial Distribution of the Genus *Cinchona* in Peru: Opportunities for Conservation in the Face of Climate Change. *Sustainability (Switzerland)*, 15(19), 1–16. <https://doi.org/10.3390/su151914109>
- Wan, J. Z., Yu, J. H., Yin, G. J., Song, Z. M., Wei, D. X., & Wang, C. J. (2019). Effects of soil properties on the spatial distribution of forest vegetation across China. *Global Ecology and Conservation*, 18, e00635. <https://doi.org/10.1016/J.GECCO.2019.E00635>
- Wherry, E. T. (1926). Nitrogen as a Factor in Plant Distribution on Mt. Desert Island, Maine. *Ecology*, 7(2), 140–142. <https://doi.org/10.2307/1928942>
- worldclim.org. (2020). *Variables bioclimáticas*. <https://www.worldclim.org/data/bioclim.html>
- Zevallos, P. A. (1989). *Taxonomía, distribución geográfica y status del género Cinchona en el Perú*. lima: Perú