

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



**FACULTAD DE INGENIERÍA ZOOTECNISTA,
BIOTECNOLOGÍA, AGRONEGOCIOS Y CIENCIA DE DATOS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ZOOTECNISTA**

**TESIS PARA OBTENER
EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERA ZOOTECNISTA**

**DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA Y MODELAMIENTO
PREDICTIVO DE *Tetragonisca angustula* EN LA REGIÓN
AMAZONAS**

Autora: Bach. Jhanet Rocio Puscan Inga

Asesor: Ph.D. Rainer Marco Lopez Lapa

Registro: (.....)

**CHACHAPOYAS – PERÚ
2025**

DEDICATORIA

A Dios, fuente infinita de fortaleza, por guiar mis pasos en este camino de crecimiento. Gracias por iluminar mi mente con sabiduría, por regalarme paciencia en la incertidumbre y por fortalecer mi espíritu para perseverar, incluso cuando los desafíos parecían insuperables.

A mi amado hijo, Fabricio André, mi razón, mi alegría y mi mayor inspiración. Tu amor incondicional ha sido mi motor, tu risa pura mi refugio en los días difíciles y tu existencia el recordatorio constante de que los sueños — por grandes que sean— siempre valen la pena. Este triunfo no es solo mío: es nuestro.

A mis padres, Wilian Fredy Puscan Alva e Icelita Inga Quistan, por haberme regalado el tesoro de la educación y por sostenerme con su amor en cada adversidad. Su esfuerzo, sacrificio y ejemplo son la base firme sobre la cual se erigen mis logros.

A mis abuelos, cuya herencia más valiosa fue la humildad de ser de pueblo; de ellos aprendí a caminar con sencillez, recordando siempre de dónde vengo y hacia dónde debo ir.

A mis hermanos, familiares y amistades, que con su aliento sincero y sus palabras de ánimo me acompañaron en este recorrido, celebrando cada paso hacia la meta de convertirme en profesional.

En memoria de mi hija Keysie, que desde el cielo me acompaña. Su breve pero inmenso paso por mi vida me enseñó a ser valiente, a no rendirme y a encontrar fortaleza en el amor que trasciende el tiempo y la distancia. Esta meta alcanzada también le pertenece.

AGRADECIMIENTO

Al Programa Nacional de Investigación Científica y Estudios Avanzados (PROCIENCIA), por el financiamiento otorgado a través del Proyecto N° PE501088346-2024-PROCIENCIA, titulado “Estudio de la variabilidad genética y distribución de poblaciones de *Tetragonisca angustula* en altitudes medias y altas de la región Amazonas y caracterización genética de polinizadores de la tribu Meliponini en simpatria”. Su apoyo fue determinante para la ejecución de este estudio, desarrollado en el Laboratorio de Fisiología Molecular (FISIOLAB) del Instituto de Investigación en Ganadería y Biotecnología (IGBI) de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas (UNTRM).

Al Ph.D. Rainer Marco Lopez Lapa, asesor de esta tesis, por su invaluable orientación, sus aportes técnicos y sus revisiones rigurosas, que enriquecieron el contenido académico y científico de este trabajo. Su compromiso y conocimiento fueron pilares fundamentales para la culminación exitosa de esta investigación.

A los miembros del Laboratorio FISIOLAB, en especial a Elthon Thomas Hinojosa Enciso, por su constante compañerismo, el intercambio de saberes y el apoyo logístico brindado durante todo el proceso investigativo. Su colaboración y motivación fueron esenciales para el cumplimiento de los objetivos planteados.

**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**

**Dr. SENGUNDO JOSÉ ZAMORA HUAMÁN
DECANO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA ZOOTECNISTA,
BIOTECNOLOGÍA, AGRONEGOCIOS Y CIENCIA DE DATOS**

VISTO BUENO DEL ASESOR DE LA TESIS



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 (X)/Profesional externo (), hace constar que ha asesorado la realización de la Tesis titulada Distribución Geográfica y Modelamiento Predictivo de Tetragonisca angustula en la Región Amazónica.; del egresado Jhanet Rocio Puscan Inga de la Facultad de Ingeniería Zootecnista, Biotecnología, Agronegocios y Ciencia de Datos Escuela Profesional de Ingeniería Zootecnista 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, 29 de setiembre de 2025

Firma y nombre completo del Asesor

Dr. Rainer Marco Lopez Laga

JURADO EVALUADOR DE LA TESIS



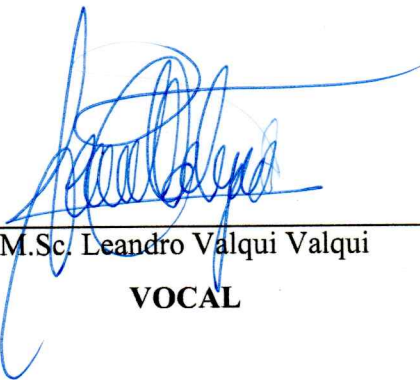
Dr. Nilton Luis Murga Valderrama

PRESIDENTE



M.Sc. Gleni Tatiana Segura Portocarrero

SECRETARIO



M.Sc. Leandro Valqui Valqui

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:

Distribución Geográfica y Modelamiento Predictivo de
Tetragonisca angustula en la Región Amazonas

presentada por el estudiante ()/egresado (X) Jhanet Rocío Puscan Inga

de la Escuela Profesional de Ingeniería Zootecnista

con correo electrónico institucional 7373938551@untrm.edu.pe

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


- a) La citada Tesis tiene 17 % de similitud, según el reporte del software Turnitin que se adjunta a la presente, el que es menor (X) / igual () al 25% de similitud que es el máximo permitido en la UNTRM.
- b) 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, 24 de octubre del 2025


SECRETARIO


VOCAL


PRESIDENTE

OBSERVACIONES:

.....
.....

REPORTE TURNITIN

DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA Y MODELAMIENTO PREDICTIVO DE *Tetragonisca angustula* EN LA REGIÓN AMAZONAS

INFORME DE ORIGINALIDAD

17%	16%	8%	6%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	4%
2	repository.pedagogica.edu.co Fuente de Internet	1%
3	core.ac.uk Fuente de Internet	1%
4	www.gob.pe Fuente de Internet	1%
5	repositorio.utn.edu.ec Fuente de Internet	<1%
6	Submitted to Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas Trabajo del estudiante	<1%
7	ouci.dntb.gov.ua Fuente de Internet	<1%
8	Submitted to Universidad Autónoma de Nuevo León Trabajo del estudiante	<1%
9	archive.org Fuente de Internet	<1%
10	www.researchgate.net Fuente de Internet	<1%
11	Bassi Noziglia, Juan Alberto. "Planeamiento estrategico de la Provincia de Huallaga",	<1%

Milton A. Murga J.
33430926

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE LA TESIS



UNTRM

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

ANEXO 3-5

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL

En la ciudad de Chachapoyas, el día 04 de noviembre del año 2025 siendo las 11:30 horas, el aspirante: Ihanet Rocio Poscan Inga, asesorado por Ph.D. Rainer Marco López Lapa defiende en sesión pública presencial (X) / a distancia () la Tesis titulada: Distribución geográfica y modelamiento predictivo de Tetragonisca Angustula en la región Amazonas., para obtener el Título Profesional de Ingeniero Zootecnista, a ser otorgado por la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas; ante el Jurado Evaluador, constituido por:

Presidente: Dr. Milton Luis Murga Valderrama.

Secretario: M.Sc. Gleni Tatiana Segura Portocarrero.

Vocal: M.Sc. Leandro Valqui Valqui.

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.

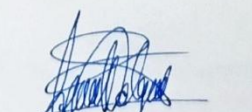
Seguidamente, a puerta cerrada, el Jurado Evaluador determinó la calificación global concedida a la sustentación de la Tesis para obtener el Título Profesional, en términos de:

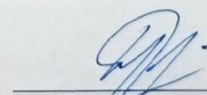
Aprobado (X) por Unanimidad (X)/Mayoría () Desaprobado ()

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 12:20 horas del mismo día y fecha, el Jurado Evaluador concluye el acto de sustentación de la Tesis para obtener el Título Profesional.


SECRETARIO


VOCAL


PRESIDENTE

OBSERVACIONES:
.....

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iii
AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS	iv
VISTO BUENO DEL ASESOR DE LA TESIS	v
JURADO EVALUADOR DE LA TESIS	vi
CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE LA TESIS.....	vii
REPORTE TURNITIN.....	viii
ACTA DE SUSTENTACIÓN DE LA TESIS.....	ix
ÍNDICE GENERAL	x
ÍNDICE DE TABLAS	xii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
RESUMEN	xiv
ABSTRACT	xv
I. INTRODUCCIÓN.....	16
II. MATERIAL Y MÉTODOS	21
2.1. Materiales, equipos y programas	21
2.2. Área geográfica del estudio.....	22
2.3. Material de origen biológico	24

2.4.	Flujo de trabajo metodológico	25
2.5.	Registros de presencia de la especie	26
2.6.	Cartografía geoespacial y bases temáticas	29
2.7.	Adquisición de datos ambientales.....	29
2.8.	Procesamiento y estandarización de variables ambientales.....	31
2.9.	Multicolinealidad de variables ambientales	32
2.10.	Modelamiento de la distribución actual	32
2.11.	Evaluación de la precisión del modelo.....	34
III.	RESULTADOS	35
3.1.	Selección de variables relevantes.....	35
3.2.	Identificación de variables con mayor aporte al modelo	36
3.3.	Evaluación del desempeño predictivo del modelo.....	38
3.4.	Modelado de la distribución potencial actual	39
IV.	DISCUSIÓN	46
V.	CONCLUSIONES	52
VI.	RECOMENDACIONES.....	53
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54
	ANEXOS	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Materiales, equipos y programas.	21
Tabla 2. Coordenadas de presencia de <i>Tetragonisca angustula</i> tomadas en campo.	27
Tabla 3. Coordenadas de presencia de <i>Tetragonisca angustula</i> tomadas de GBIF.....	28
Tabla 4. Variables bioclimáticas para la distribución potencial actual de <i>Tetragonisca angustula</i>	30
Tabla 5. Parámetros empleados en MaxEnt.....	33
Tabla 6. Estimaciones de las contribuciones relativas de las variables ambientales al modelo MaxEnt.....	36
Tabla 7. Áreas de distribución de <i>Tetragonisca angustula</i> en la región Amazonas.....	42
Tabla 8. Áreas de distribución potencial actual de <i>Tetragonisca angustula</i> por provincias.....	45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización de la región Amazonas en el Perú .	23
Figura 2. <i>Tetragonisca angustula</i> (Latreille, 1811).	24
Figura 3. Procedimiento metodológico para analizar la distribución actual de <i>Tetragonisca angustula</i> .	26
Figura 4. Correlación de las variables.	35
Figura 5. Importancia de variables.	37
Figura 6. Área bajo la curva (AUC).	38
Figura 7. Datos de presencia de <i>Tetragonisca angustula</i> en la región Amazonas y provincias colindantes San Ignacio y Jaén (Cajamarca), Datem del Marañón (Loreto), Rioja, Moyobamba, Mariscal Cáceres, El Dorado, Picota y Bellavista (San Martín)...	40
Figura 8. Datos de presencia de <i>Tetragonisca angustula</i> en la región Amazonas.	41
Figura 9. Área potencial actual de <i>Tetragonisca angustula</i> en la región Amazonas.	43
Figura 10. Distribución potencial actual de <i>Tetragonisca angustula</i> en la región Amazonas.	44

RESUMEN

El estudio evaluó la distribución geográfica y la idoneidad ambiental de *Tetragonisca angustula* en la región Amazonas, Perú. Se utilizaron 38 registros de presencia obtenidos tanto en campo como en la base de datos GBIF, los cuales fueron analizados mediante el algoritmo MaxEnt (v.3.4.4). Para el modelamiento se consideraron 24 variables ambientales (bioclimáticas, topográficas, hidrológicas y de cobertura vegetal), aplicando un control de multicolinealidad (coeficiente de Pearson ≤ 0.70) y el método Jackknife para estimar la importancia relativa de cada variable.

El modelo alcanzó un valor de AUC de 0.984, lo que refleja una alta capacidad predictiva. Las variables con mayor influencia fueron la cobertura vegetal (75.2%) y la pendiente (10.6%), seguidas por la distancia a cuerpos de agua y ciertos factores climáticos. En conjunto, solo el 8.03% del territorio de Amazonas mostró condiciones óptimas para la especie, concentradas principalmente en las provincias de Rodríguez de Mendoza, Chachapoyas, Luya, Bongará, Utcubamba y Bagua; mientras que Condorcanqui presentó extensas áreas sin idoneidad, asociadas a su ecosistema de selva baja húmeda.

Este trabajo representa la primera aproximación espacial de *Tetragonisca angustula* en el Perú y aporta información útil para la conservación de polinizadores del Neotrópico y del grupo Meliponini, así como para la planificación territorial en la Amazonía nororiental.

Palabras clave: Meliponini, modelamiento ecológico, MaxEnt, variables ambientales, conservación de polinizadores, Amazonía nororiental.

ABSTRACT

This study evaluated the geographic distribution and environmental suitability of *Tetragonisca angustula* in the Amazonas region of Peru. A total of 38 presence records, obtained from field collections and the GBIF database, were analyzed using the MaxEnt algorithm (v.3.4.4). Twenty-four environmental variables (bioclimatic, topographic, hydrological, and vegetation cover) were included, applying multicollinearity control (Pearson ≤ 0.70) and Jackknife tests to estimate each variable's relative contribution.

The model achieved an AUC value of 0.984, indicating a high predictive performance. The most influential variables were vegetation cover (75.2%) and slope (10.6%), followed by distance to water bodies and specific climatic factors. Overall, only 8.03% of the Amazonas territory showed suitable conditions for the species, mainly concentrated in Rodríguez de Mendoza, Chachapoyas, Luya, Bongará, Utcubamba, and Bagua provinces, whereas Condorcanqui exhibited large areas of low suitability due to its humid lowland forest ecosystem.

This research represents the first spatial assessment of *Tetragonisca angustula* in Peru and provides valuable information for the conservation of Neotropical pollinators and the Meliponini group, as well as for land-use planning in the northeastern Amazon.

Keywords: Meliponini, ecological modeling, MaxEnt, environmental variables, pollinator conservation, northeastern Amazon.

I. INTRODUCCIÓN

La interacción entre plantas e insectos representa uno de los procesos ecológicos más relevantes del planeta, siendo la polinización un mecanismo esencial para la reproducción vegetal y el equilibrio de los ecosistemas. Este fenómeno también beneficia al ser humano al contribuir a la conservación de la biodiversidad y la seguridad alimentaria. La protección de los hábitats naturales y la diversidad del paisaje se reconocen como estrategias efectivas para mantener las poblaciones de polinizadores silvestres (Garibaldi *et al.*, 2014). Entre los principales agentes polinizadores se encuentran las abejas, que cumplen un papel fundamental en la fecundación de plantas tanto silvestres como cultivadas (Papa *et al.*, 2022). A nivel global, se estima que las abejas intervienen en el 5 a 8 % de la producción alimentaria mundial y participan en la polinización de más de la mitad de los cultivos de frutas y semillas consumidos por las personas (Fernandes *et al.*, 2024).

En regiones tropicales y subtropicales, las abejas sin aguijón de la tribu Meliponini (Hymenoptera: Apidae) conforman uno de los grupos más diversos y ecológicamente relevantes. A diferencia de *Apis mellifera*, presentan adaptaciones que les permiten prosperar en ambientes boscosos continuos, donde actúan como principales polinizadores. Se calcula que intervienen en la polinización del 30 al 50 % de las plantas y del 70 al 90 % de los árboles tropicales, siendo esenciales para la regeneración natural y la estabilidad de los ecosistemas neotropicales (Ramalho, 2004). Además, alrededor de 250 especies vegetales muestran adaptaciones florales específicas para su polinización por meliponinos, evidenciando una coevolución prolongada y altamente especializada (Manrique & Santana, 2008).

Taxonómicamente, los meliponinos pertenecen a la subfamilia Apinae, que agrupa 19 tribus. Cuatro de ellas conforman el grupo de las abejas corbiculadas: Meliponini (abejas sin aguijón), Apini (abejas de la miel), Euglossini (abejas de las orquídeas) y Bombini (abejorros). Dentro de Meliponini se reconocen aproximadamente 42 géneros y unas 500 especies distribuidas en zonas tropicales y subtropicales (Hurtado-Burrillo, 2015). El Neotrópico concentra la mayor diversidad, con cerca de 400 especies y 33 géneros. Brasil destaca con 259 especies registradas, seguido de Perú (175), Ecuador (132), Colombia (129) y Venezuela (83) (Céspedes-Llave, 2024). Estos valores resaltan la importancia del Neotrópico como centro de diversificación del grupo y la urgencia de fortalecer

inventarios biológicos y estrategias de conservación que aseguren su permanencia frente a amenazas actuales.

El género *Tetragonisca* comprende cuatro especies neotropicales: *Tetragonisca buchwaldi*, *Tetragonisca weyrauchi*, *Tetragonisca fiebrigi* y *Tetragonisca angustula* (Guzmán, 2022). Esta última presenta una amplia distribución desde el sur de México hasta el norte de Argentina, estableciendo nidos principalmente entre los 100 y 1800 m s.n.m. Diversos autores sugieren que dicha amplitud podría corresponder a un complejo de especies con adaptaciones locales (Guzmán, 2022). Las obreras de *Tetragonisca angustula* poseen rasgos morfológicos variables según el entorno. De acuerdo con León (2023), su tamaño oscila entre 4 y 5 mm, con un cuerpo esbelto y ligeramente mayor en climas fríos (Oliveira *et al.*, 2004). Su abdomen es amarillo, contrastando con la cabeza y tórax de color negro brillante; las patas posteriores tienen una pequeña corbícula destinada al transporte de polen. El ciclo de vida varía entre 24 y 76 días (Leocádio *et al.*, 2024). Los machos, en cambio, carecen de corbícula, presentan antenas más largas y un tórax más ancho, mientras que las reinas, tras el apareamiento (entre los 2 y 7 días), desarrollan un abdomen más voluminoso, lo que facilita su identificación (Leocádio *et al.*, 2024).

La estructura morfológica de la especie se relaciona con su organización social y la arquitectura de sus colonias. Según Torres *et al.* (2004), *Tetragonisca angustula* forma pequeñas colonias en cavidades de árboles, ramas, madrigueras abandonadas o estructuras artificiales. La entrada del nido consiste en un tubo de cera transparente, suave y poroso de unos 8 mm de diámetro, recubierto con resina. En el interior, las abejas dividen el espacio en una zona de cría, compuesta por panales horizontales, y otra de almacenamiento, formada por recipientes oscuros y ovalados donde conservan néctar y polen. Esta organización interna refleja una división del trabajo bien definida. Balbuena y Farina (2020) mencionan que las colonias suelen estar conformadas por una reina y cerca de 5000 obreras (entre 2000 y 8000), que asumen funciones distintas según su edad. También describen una subcasta denominada “guardianas”, más robustas y con patas mayores que las recolectoras, responsables de vigilar la entrada del nido, ya sea desde el vuelo o sobre el tubo de acceso. Este sistema social, junto con su capacidad de adaptación, permite un rango de vuelo de 400 m en zonas tropicales hasta cerca de 2 km en función

de la disponibilidad floral (Van Nieuwstadt & Iraheta, 1996; Araújo *et al.*, 2004; Jaramillo *et al.*, 2024).

Desde un enfoque ecológico y productivo, *Tetragonisca angustula* es una de las abejas sin aguijón más apreciadas en América Latina por su comportamiento higiénico, su tolerancia ambiental y la alta calidad de su miel. Este producto, valorado desde tiempos precolombinos, se utiliza tradicionalmente para tratar afecciones respiratorias y oculares (Gómez & Torres, 2025). Investigaciones recientes han identificado en su miel compuestos bioactivos con propiedades anticancerígenas, antibacterianas, antifúngicas, antiinflamatorias y antivirales, entre ellos luteína, ácido cinámico, fraxina, hiperósido, osthol, culmorina y uncarina C (Delgado & Espinoza, 2023). Su composición de azúcares reductores —principalmente fructosa, glucosa y sacarosa— depende de la flora circundante (Caballero *et al.*, 2025). En la Amazonía peruana, alrededor del 3,4 % de las colonias de *Tetragonisca angustula* son criadas o aprovechadas para la producción de miel silvestre (Delgado *et al.*, 2023). Además, la meliponicultura representa una fuente sostenible de ingresos, dado que la miel de abejas sin aguijón puede alcanzar precios internacionales de hasta 100 USD/kg, muy por encima de los 20 a 40 USD/kg de la miel de *Apis mellifera* (Rocha *et al.*, 2023).

En el Perú, la crianza de abejas sin aguijón ha adquirido notable relevancia. Actualmente se desarrolla en 14 departamentos, entre ellos San Martín, Cusco, Amazonas, Madre de Dios y Loreto, principalmente en comunidades rurales e indígenas como los pueblos Awajún, Asháninka, Ticuna y Kukama Kukamiria (Ramos, 2024). En el mercado nacional, una botella de miel puede alcanzar precios de S/.70 y, en zonas como Tingo María, hasta S/.200 (Inforegión Redacción, 2024). El Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana (IIAP) promueve prácticas tecnificadas para la crianza de estas abejas, fomentando el uso de cajas racionales que permiten multiplicar nidos y mejorar la productividad sin afectar el bosque (Agropress, 2020). No obstante, las poblaciones de Meliponini enfrentan amenazas crecientes. Jabel (2025) señala que la deforestación, la competencia con *Apis mellifera* y el tráfico ilegal de colmenas han reducido sus poblaciones, motivo por el cual en 2024 el Congreso peruano las declaró sujetos de derechos. Además, Castilhos *et al.* (2019) advierten que el cambio climático, los ácaros, los pesticidas y la agricultura intensiva generan mortalidad y efectos subletales que ponen en riesgo sus colonias. La competencia con abejas melíferas africanizadas invasoras

representa una de las principales amenazas para las abejas nativas sin aguijón, ya que limita su supervivencia en los ecosistemas amazónicos (de Oliveira *et al.*, 2017; Toledo-Hernández *et al.*, 2022). Ante este panorama, resulta urgente fortalecer la investigación sobre las abejas silvestres, promover su conservación y documentar sus interacciones con la flora nativa (Torres *et al.*, 2007).

El reconocimiento de la relevancia ecológica y económica de *Tetragonisca angustula* ha impulsado el interés por identificar los factores que condicionan su distribución, especialmente frente al cambio climático y la transformación del paisaje. Las variaciones climáticas actuales y proyectadas constituyen una de las principales amenazas para los polinizadores, afectando su abundancia, comportamiento y distribución (Polce *et al.*, 2014). Comprender cómo las variables ambientales determinan su presencia permite anticipar escenarios futuros y orientar acciones de conservación.

Las metodologías que vinculan las condiciones climáticas con la distribución de los polinizadores facilitan la identificación de zonas potencialmente adecuadas para su permanencia (Dew *et al.*, 2019). Se reconoce que el clima influye directamente en la distribución de las especies, al modificar su nicho ecológico y sus límites geográficos (He *et al.*, 2019; He *et al.*, 2023). En este contexto, los modelos de nicho ecológico o modelos de distribución de especies (SDMs, por sus siglas en inglés) se han convertido en herramientas clave en biogeografía, conservación y estudios de cambio climático (He *et al.*, 2023). Estos modelos combinan registros de presencia con variables ambientales, bajo el principio de que las poblaciones tienden a mantenerse en equilibrio con su entorno (Elith & Leathwick, 2009).

De acuerdo con Miller (2010), los SDMs emplean datos georreferenciados de presencia (variable dependiente) y variables ambientales independientes como clima, topografía, altitud, cobertura terrestre y suelo. La evidencia demuestra que el aumento de temperatura puede provocar desplazamientos en la distribución de las especies hacia mayores latitudes o zonas más frías (Hegland *et al.*, 2009). Según Flores (2015), el desarrollo de estos modelos se ha visto favorecido por los avances en programación, la disponibilidad de información geoespacial y el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Entre los métodos más usados para estimar la distribución potencial de especies destacan el Algoritmo Genético para la Generación de Reglas (GARP), el modelo de Máxima Entropía (MaxEnt), el Algoritmo Regional de Correspondencia Climática (CLIMEX) y

el modelo de Envolvente Climática (BIOCLIM) (Zhang *et al.*, 2021). De todos ellos, MaxEnt es el más empleado por su precisión, facilidad de uso y disponibilidad gratuita. Este modelo permite analizar datos ambientales y proyectar la distribución actual y futura de las especies, generando mapas de idoneidad ambiental y métricas de desempeño como el Área Bajo la Curva (AUC) (Cárdenas *et al.*, 2023).

Su fortaleza radica en la estabilidad de sus resultados, incluso cuando se dispone de pocos datos. Además, ofrece gran capacidad de procesamiento, flexibilidad operativa y visualización eficiente mediante SIG (Shi *et al.*, 2023). Los productos generados son mapas temáticos que reflejan los grados de idoneidad ambiental, consolidando a MaxEnt como una herramienta de referencia en biogeografía y conservación (Zhang *et al.*, 2021). En los últimos años, múltiples estudios han aplicado MaxEnt para analizar la distribución potencial de insectos polinizadores, obteniendo modelos con alto nivel predictivo que ayudan a comprender sus patrones ecológicos y orientar acciones de conservación (Li *et al.*, 2023).

Pese a la importancia ecológica y socioeconómica de *Tetragonisca angustula*, aún se desconoce con precisión su rango de distribución en la región Amazonas y los factores que determinan su presencia. Esta carencia limita la toma de decisiones en conservación, ordenamiento territorial y promoción de la meliponicultura, que podría constituir una alternativa productiva sostenible para las comunidades locales.

En este contexto, la presente investigación tiene como finalidad determinar la distribución geográfica de *Tetragonisca angustula* en la región Amazonas y elaborar un modelo predictivo que identifique las áreas con condiciones ambientales favorables para su presencia. El estudio busca reconocer las zonas de mayor idoneidad, analizar las variables que influyen en su distribución actual y proyectar posibles áreas de presencia potencial. Este enfoque contribuye al conocimiento ecológico de la especie y brinda una herramienta estratégica para diseñar planes de conservación y promover un aprovechamiento sostenible.

II. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Materiales, equipos y programas

Para el desarrollo del presente estudio sobre la distribución potencial de *Tetragonisca angustula* en la región Amazonas, se empleó exclusivamente cartografía de libre acceso y fuentes abiertas, ampliamente utilizadas en estudios de biodiversidad y distribución de fauna silvestre. Esta elección metodológica asegura la reproducibilidad del trabajo tanto a nivel local como nacional, promoviendo su aplicación en futuras investigaciones sobre conservación y manejo sostenible de especies nativas.

Tabla 1.

Materiales, equipos y programas.

Categoría	Componente	Explicación
Materiales	Puntos de colecta (GPS)	Coordenadas tomadas en campo con GPS.
	Registros secundarios (GBIF)	Datos de ocurrencia descargados de Global Biodiversity Information Facility (GBIF).
	Límites políticos	Regiones y provincias de Perú, descargados de Geo GPS Perú.
	Variables bioclimáticas	Capas ráster obtenidas de WorldClim v2.1.
	Modelo digital de elevación (DEM)	Descargado de USGS Earth Explorer.
	Distancia a cuerpos de agua	Capa hidrográfica extraída de QGIS.
	Cobertura vegetal	Descargada del GeoServidor del MINAM (Ministerio del Ambiente, Perú).
	Variables derivadas	Pendiente y orientación, generadas a partir del DEM en QGIS.
Equipos	GPS portátil (Garmin Montana 700)	Obtención de coordenadas precisas.
	Laptop HP 17	Procesamiento y análisis de la información espacial, equipada con un procesador Intel® Core™ i7-1065G7.
Software	QGIS 3.34.9	Manejo y análisis geoespacial.
	MaxEnt 3.4.4.	Modelación de la distribución potencial.
	Microsoft Office 16	Organización, depuración y sistematización de los registros de presencia.

2.2. Área geográfica del estudio

La investigación se desarrolló en la región Amazonas, ubicada en el nororiente del Perú, entre los paralelos 3°0' y 7°2' S y los meridianos 77°0' y 78°42' O. Este territorio, con una extensión aproximada de 42 050 km², presenta un relieve accidentado dominado por ecosistemas amazónicos de variada complejidad ambiental (Meza *et al.*, 2020).

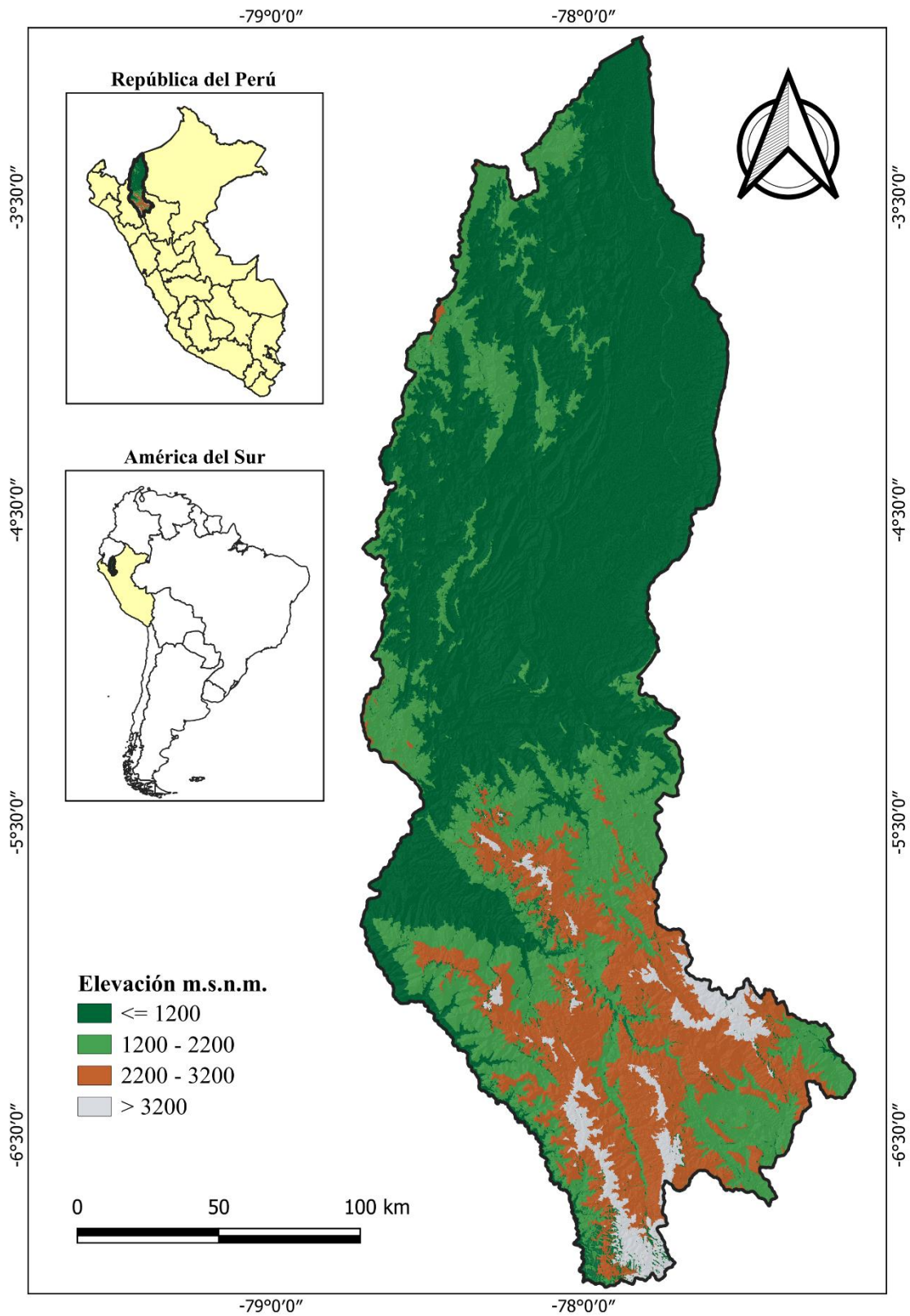
La región muestra un amplio gradiente altitudinal que se extiende desde los 120 m s. n. m. en las zonas bajas del norte hasta los 4900 m s. n. m. en los límites andinos (Gómez-Fernández *et al.*, 2025; Cotrina *et al.*, 2020). Su clima es heterogéneo, con predominio de las categorías cálido húmedo, cálido seco y templado cálido ligeramente húmedo. Las temperaturas máximas pueden alcanzar hasta 40 °C en la selva baja, mientras que en los sectores montañosos se registran valores mínimos cercanos a 2 °C. Asimismo, presenta marcados contrastes hídricos, con zonas de déficit anual de hasta 924 mm y otras con excedentes superiores a 3000 mm (Meza *et al.*, 2022).

Administrativamente, Amazonas está conformada por siete provincias: Bagua, Bongará, Chachapoyas, Condorcanqui, Luya, Rodríguez de Mendoza y Utcubamba. Su economía se sustenta principalmente en actividades agrícolas y ganaderas, las cuales ocupan aproximadamente el 24,9 % del territorio y aportan el 51,22 % del producto interno bruto regional (Gómez-Fernández *et al.*, 2025).

Estas características geográficas y ecológicas convierten a la región Amazonas en un espacio estratégico para estudios biogeográficos y genéticos de polinizadores nativos, donde el modelamiento de distribución de especies contribuye a identificar refugios climáticos y zonas prioritarias para la conservación de *Tetragonisca angustula* y otros representantes de la tribu Meliponini.

Figura 1.

Localización de la región Amazonas en el Perú.



2.3. Material de origen biológico

La especie seleccionada para el presente estudio fue *Tetragonisca angustula* (Latreille, 1811), integrante de la tribu Meliponini (Hymenoptera: Apidae), conocida en el Perú como “abeja angelita” o “virgencita” (García & Torres, 2025) y en Brasil como “jataí”. Se caracteriza por su coloración dorada metálica, una región mesepisternal con pigmentación negra (Oliveira *et al.*, 2004) y la ausencia de aguijón funcional, rasgo distintivo del grupo. Es una abeja de pequeño tamaño, con hábitos de nidificación en troncos huecos, muros de piedra o cavidades naturales (Macedo *et al.*, 2025), y destaca por su importancia ecológica como polinizadora clave en ecosistemas tropicales, además de poseer un alto valor socioeconómico por su producción de miel (Abou-Shaara, 2024). Los ejemplares empleados en este estudio fueron identificados mediante la evaluación de caracteres morfológicos diagnósticos descritos en literatura especializada (Vélez-Ruiz *et al.*, 2013; Shackleton *et al.*, 2018; Guzmán Rojas, 2022) y contrastados con las descripciones taxonómicas del inventario de Rasmussen & Delgado (2019).

Las observaciones morfológicas se complementaron con documentación fotográfica realizada en el Laboratorio de Fisiología Molecular (2024), donde se conservaron los ejemplares de referencia empleados para el análisis.

Figura 2.

Tetragonisca angustula (Latreille, 1811).



Fuente: Laboratorio de Fisiología Molecular (2024).

2.4. Flujo de trabajo metodológico

La distribución potencial de *Tetragonisca angustula* para el periodo 1970–2000 fue estimada mediante el enfoque de Modelamiento de Distribución de Especies (SDM), utilizando el algoritmo MaxEnt (Maximum Entropy Modeling). Este método se fundamenta en el principio de máxima entropía, el cual permite predecir áreas ambientalmente adecuadas para una especie a partir de sus registros de presencia y un conjunto de variables ambientales.

El procedimiento metodológico se estructuró en una secuencia de etapas representadas en el flujograma de la Figura 3. En dicho esquema, se distingue con color gris a las variables y herramientas utilizadas durante el análisis, el color amarillo señala la herramienta de modelamiento empleada, el blanco corresponde a los datos de la especie y el azul claro representa los productos resultantes.

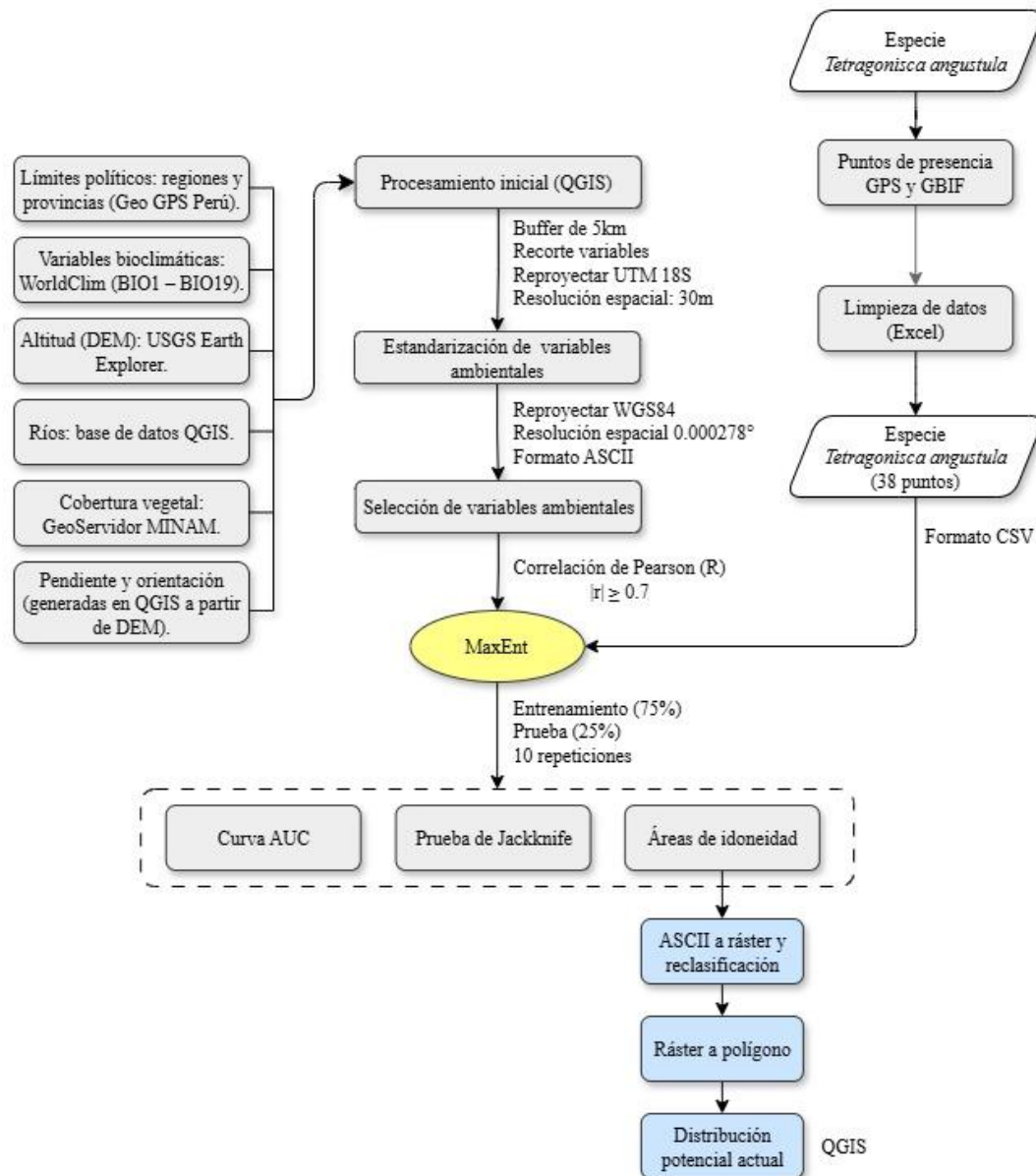
De manera general, el proceso comprendió:

- Recolección y depuración de registros de presencia, provenientes de colectas de campo y de la base de datos GBIF.
- Selección y estandarización de variables ambientales, incluyendo factores bioclimáticos, topográficos e hidrológicos.
- Evaluación de multicolinealidad para conservar únicamente variables independientes y representativas.
- Ejecución del modelo en MaxEnt bajo parámetros ajustados para optimizar su desempeño y precisión.
- Validación estadística del modelo mediante el valor del área bajo la curva (AUC) y pruebas Jackknife.
- Generación de mapas de idoneidad ambiental, reclasificados en categorías según el nivel de adecuación del hábitat.

Este esquema metodológico permitió integrar información ambiental y biológica de forma coherente, garantizando la replicabilidad y solidez del modelamiento espacial aplicado a *Tetragonisca angustula* en la región Amazonas.

Figura 3.

*Procedimiento metodológico para analizar la distribución actual de *Tetragonisca angustula*.*



2.5. Registros de presencia de la especie

El estudio se desarrolló con la autorización de investigación científica en fauna silvestre N.º D000116-2025-MIDAGRI-SERFOR-DGGSPFFS-DGSPFS, emitida por el Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR).

Las coordenadas geográficas (latitud, longitud y altitud) fueron registradas durante el trabajo de campo utilizando un receptor GPS Garmin Montana 700, en formato de grados, minutos y segundos (DMS). Posteriormente, dichos datos se transformaron al formato

decimal (DD) bajo el sistema de referencia WGS84 para su compatibilidad con los sistemas de información geográfica.

El trabajo de campo comprendió colectas en las provincias de Condorcanqui, Bagua, Bongará y Rodríguez de Mendoza (región Amazonas), así como en San Ignacio y Jaén (Cajamarca), Datem del Marañón (Loreto), y en meliponarios ubicados en Rioja y Moyobamba (San Martín). Además de los registros primarios, se incorporaron datos secundarios obtenidos de la base de datos Global Biodiversity Information Facility (GBIF), descargados mediante la herramienta de ocurrencias con DOI <https://doi.org/10.15468/dl.n5xnba> (GBIF Occurrence Download, 2025).

Inicialmente, se reunieron todos los registros disponibles de *Tetragonisca angustula* con el propósito de maximizar la cobertura espacial y garantizar la representatividad ecológica. Posteriormente, los datos fueron depurados en Microsoft Excel, eliminando duplicados, coordenadas erróneas y registros sin georreferenciación completa, conservando únicamente aquellos localizados dentro o en el entorno del área de estudio (Zizka *et al.*, 2019).

Tras el filtrado, se obtuvieron 38 puntos de presencia válidos, integrando tanto los registros propios como los procedentes de GBIF. Estos fueron convertidos a formato .CSV y utilizados como insumos de entrada para el modelamiento en MaxEnt (Geoinnova, 2020).

Aunque los registros abarcaron varias regiones del norte peruano (Amazonas, Loreto, San Martín y Cajamarca), el análisis espacial y la interpretación cartográfica se restringieron exclusivamente a la región Amazonas, donde se localizaron 16 puntos de presencia confirmados.

Esta delimitación permitió enfocar el modelamiento en el rango ecológico más representativo para la especie dentro del ámbito amazónico nororiental.

Tabla 2.

Coordenadas de presencia de Tetragonisca angustula tomadas en campo.

ID	Región	Provincia	Coordenadas	
			Longitud	Latitud
1	Amazonas	Bongará	-5.81661111	-77.8452222
2	Amazonas	Bongará	-5.81772222	-77.8482222
3	Amazonas	Bongará	-5.78466667	-77.8876111
4	Amazonas	Bongará	-5.70780556	-77.9061389
5	Amazonas	Bongará	-5.68263889	-77.9224167

6	Amazonas	Bongará	-5.67125	-77.9293889
7	Amazonas	Rodríguez de Mendoza	-6.37790833	-77.5189944
8	Amazonas	Rodríguez de Mendoza	-6.37767778	-77.5187
9	Amazonas	Rodríguez de Mendoza	-6.41172222	-77.5490972
10	Amazonas	Rodríguez de Mendoza	-6.41166667	-77.5488889
11	Amazonas	Rodríguez de Mendoza	-6.4275	-77.5325
12	Amazonas	Rodríguez de Mendoza	-6.39888889	-77.4797222
13	Amazonas	Rodríguez de Mendoza	-6.44694444	-77.4766667
14	Amazonas	Rodríguez de Mendoza	-6.56694444	-77.3788889
15	Amazonas	Bagua	-5.05497667	-78.3413783
16	Amazonas	Condorcanqui	-4.05876167	-77.7608017
17	San Martín	Mariscal Cáceres	-6.48055556	-77.2691667
18	San Martín	Mariscal Cáceres	-6.48055556	-77.2694444
19	San Martín	Mariscal Cáceres	-6.47777778	-77.2711111
20	San Martín	Mariscal Cáceres	-6.47805556	-77.2725
21	San Martín	Mariscal Cáceres	-6.475	-77.2688889
22	San Martín	Mariscal Cáceres	-6.57388889	-77.2169444
23	San Martín	Mariscal Cáceres	-6.51555556	-77.2461111
24	San Martín	Rioja	-6.03362333	-77.2667
25	San Martín	Moyobamba	-5.97028333	-77.0260467
26	Loreto	Datem del Marañon	-4.61282	-77.6032383
27	Cajamarca	Jaén	-5.73988833	-78.8402067
28	Cajamarca	San Ignacio	-5.146215	-79.005325
29	Cajamarca	San Ignacio	-5.153935	-79.013975
30	Cajamarca	San Ignacio	-5.11538667	-79.0050583

Tabla 3.

Coordenadas de presencia de Tetragonisca angustula tomadas de GBIF.

ID	Región	Provincia	Coordenadas	
			Longitud	Latitud
1	Amazonas	Rodríguez de Mendoza	-6.064253	-77.180964
2	San Martín	Mariscal Cáceres	-6.338155	-76.5633
3	San Martín	Picota	-6.460083	-76.336108
4	San Martín	Picota	-6.428438	-76.462836
5	San Martín	Picota	-6.48	-76.356
6	San Martín	Picota	-6.479845	-76.354438
7	San Martín	Bellavista	-6.56973	-76.132408
8	San Martín	El Dorado	-6.21448	-76.818345

2.6. Cartografía geoespacial y bases temáticas

Los insumos cartográficos utilizados para el modelamiento fueron obtenidos en formato *shapefile* (shp) e incluyeron los límites distritales, provinciales y departamentales de la región Amazonas y de las zonas adyacentes. Estas capas se descargaron desde el portal del Instituto Geográfico Nacional (IGN), disponible en <https://www.geogpsperu.com/>. Posteriormente, todos los archivos fueron incorporados al software QGIS versión 3.34.9, donde se llevó a cabo la delimitación precisa del área de estudio. A través de este entorno geoespacial se realizaron las operaciones de recorte, reproyección y ediciones necesarias para asegurar la coherencia espacial de los insumos y su compatibilidad con las capas ambientales y los registros biológicos.

El conjunto de bases temáticas procesadas constituyó la estructura cartográfica fundamental para el desarrollo del modelamiento de distribución potencial de *Tetragonisca angustula*, garantizando un marco espacial homogéneo y adecuado para los análisis posteriores.

2.7. Adquisición de datos ambientales

Para el modelamiento de la distribución potencial de *Tetragonisca angustula*, se integraron un conjunto de 24 variables ambientales representativas de las condiciones climáticas, topográficas y del paisaje en el área de estudio. Las 19 variables bioclimáticas se obtuvieron de la base de datos WorldClim versión 2.1 (<https://www.worldclim.org/>), con una resolución espacial de 30 segundos de arco (~1 km²), ampliamente empleada en estudios de nicho ecológico y escenarios de cambio climático (Fick & Hijmans, 2017).

Adicionalmente, se incorporó un Modelo Digital de Elevación (DEM) descargado desde la plataforma USGS EarthExplorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) con resolución de 30 metros, a partir del cual se derivaron las variables altitud, pendiente y orientación mediante las herramientas de análisis espacial del software QGIS versión 3.34.9. Estas variables fisiográficas influyen directamente en los microclimas locales, en la estructura de la vegetación y en la disponibilidad de recursos florales, factores determinantes en la distribución de abejas nativas (Naudiyal *et al.*, 2021).

La variable de cobertura vegetal fue descargada del Geoportal del Ministerio del Ambiente (MINAM) (<https://geoservidor.minam.gob.pe/>) correspondiente al año más reciente disponible. Esta capa fue reprocesada y ajustada al área de análisis, considerando

que la heterogeneidad del paisaje constituye un elemento clave para la presencia y permanencia de polinizadores (Neira *et al.*, 2024).

Asimismo, se generó una capa ráster de distancia a cuerpos de agua mediante la herramienta “Distancia a objetos vectoriales” de QGIS, a partir de la red hidrográfica base de *OpenStreetMap*. Este indicador permite evaluar la proximidad a fuentes hídricas, recurso esencial en la ecología de las abejas sin aguijón, que emplean el agua en la termorregulación de la colonia y la elaboración de cera y miel (Rosa-Fontana *et al.*, 2020). De esta manera, el conjunto de variables seleccionadas proporciona una descripción integral del entorno físico y climático de la región Amazonas, asegurando una representación adecuada de los factores que influyen en la distribución actual de *Tetragonisca angustula*.

Tabla 4.

Variables bioclimáticas para la distribución potencial actual de Tetragonisca angustula

Código	Variable ambiental	Unidad
BIO 1	Temperatura media anual	°C
BIO 2	Rango medio diario (Media mensual (temperatura máxima - temperatura mínima))	°C
BIO 3	Isotermalidad (BIO2/BIO7) (×100)	%
BIO 4	Estacionalidad de la temperatura (desviación estándar ×100)	%
BIO 5	Temperatura máxima del mes más cálido	°C
BIO 6	Temperatura mínima del mes más frío	°C
BIO 7	Rango anual de temperatura (BIO5-BIO6)	°C
BIO 8	Temperatura media del trimestre más húmedo	°C
BIO 9	Temperatura media del trimestre más seco	°C
BIO 10	Temperatura media del trimestre más cálido	°C
BIO 11	Temperatura media del trimestre más frío	°C
BIO 12	Precipitación anual	mm
BIO 13	Precipitación del mes más lluvioso	mm
BIO 14	Precipitación del mes más seco	mm
BIO 15	Estacionalidad de la precipitación (coeficiente de variación)	%
BIO 16	Precipitación del trimestre más húmedo	mm
BIO 17	Precipitación del trimestre más seco	mm

BIO 18	Precipitación del trimestre más cálido	mm
BIO 19	Precipitación del trimestre más frío	mm
Dem	Elevación	msnm
Slop	Pendiente	grados
Aspect	Orientación	grados
CV	Cobertura vegetal	%
DW	Distancia de cuerpos de agua	m

2.8. Procesamiento y estandarización de variables ambientales

Tetragonisca angustula presenta un rango de vuelo estimado entre 400 metros y 2 kilómetros, dependiendo de la disponibilidad floral y las condiciones del entorno (Van Nieuwstadt & Iraheta, 1996; Araújo *et al.*, 2004; Jaramillo *et al.*, 2024). No obstante, en el presente estudio se adoptó un *buffer* de 5 kilómetros alrededor del polígono que abarca todas las zonas de muestreo localizadas en la región Amazonas y provincias colindantes —San Ignacio y Jaén (Cajamarca), Datem del Marañón (Loreto), y Rioja, Moyobamba, Mariscal Cáceres, El Dorado, Picota y Bellavista (San Martín)—. Este margen más amplio se aplicó como una medida conservadora destinada a incorporar la heterogeneidad ambiental, la conectividad ecológica entre colonias, posibles errores de georreferenciación y el área accesible potencial (*M-area*) propuesta por Soberón & Peterson (2005) y Barve *et al.* (2011). En conjunto, esta decisión metodológica permitió modelar la distribución de la especie dentro de un rango ecológicamente plausible, reflejando tanto la dinámica espacial de los hábitats como el comportamiento de dispersión de las colonias.

A partir de dicho *buffer*, todas las variables ambientales fueron recortadas para restringir el análisis al área espacial definida. Posteriormente, las capas ráster fueron reproyectadas al sistema de coordenadas UTM zona 18S, garantizando la coherencia geoespacial con la cartografía regional y estableciendo una resolución uniforme de 30 metros (0.000278°) por píxel. Esta resolución permitió identificar microrefugios climáticos, corredores ecológicos y fragmentos de hábitat que suelen pasar desapercibidos en resoluciones más gruesas (~1 km²), mejorando así la precisión ecológica y espacial del modelo (Morgan & Guénard, 2019; Radović *et al.*, 2025).

Con el objetivo de compatibilizar las capas con los requerimientos del software MaxEnt, las variables fueron posteriormente transformadas al sistema de coordenadas geográficas

WGS84 y convertidas al formato ASCII, tipo de archivo de entrada requerido por el programa para ejecutar el modelamiento de la distribución potencial.

Todos los procedimientos de recorte, reproyección, estandarización y conversión de formatos fueron realizados en el software QGIS versión 3.34.9, asegurando la trazabilidad del flujo de trabajo y la reproducibilidad del modelo.

2.9. Multicolinealidad de variables ambientales

Para optimizar la precisión del modelo y evitar la redundancia informativa entre las variables ambientales, se aplicó un control de multicolinealidad, procedimiento indispensable en el modelamiento ecológico (Merow *et al.*, 2013). Este análisis permite identificar aquellas variables altamente correlacionadas que podrían distorsionar las estimaciones de idoneidad ambiental y reducir la capacidad predictiva del modelo.

De las 24 variables iniciales consideradas, se evaluaron las correlaciones mediante el coeficiente de Pearson, calculado en el lenguaje de programación R (versión 4.5.1). Como criterio de selección, se adoptó un umbral de correlación ≤ 0.70 , valor ampliamente aceptado en estudios de modelamiento de nicho ecológico por ofrecer un equilibrio adecuado entre independencia estadística y representatividad ambiental (Dormann *et al.*, 2013; Hosseini *et al.*, 2025).

Las variables que superaron este umbral fueron descartadas, conservándose únicamente aquellas que aportaban información complementaria y no redundante. De esta manera, se redujo el riesgo de sobreajuste y se fortaleció la robustez y estabilidad estadística del modelo final generado en MaxEnt.

2.10. Modelamiento de la distribución actual

El modelamiento de la distribución potencial de *Tetragonisca angustula* se realizó mediante el algoritmo MaxEnt versión 3.4.4, una herramienta ampliamente utilizada para estimar áreas de idoneidad ambiental a partir de registros de presencia. Para su ejecución, los datos se dividieron aleatoriamente en 75 % para entrenamiento y 25 % para validación, siguiendo el criterio metodológico propuesto por Cárdenas *et al.* (2023).

El modelo fue configurado con un multiplicador de regularización (RM) igual a 2.0, valor sugerido por Lissovsky y Dudov (2021), quienes recomiendan ajustar este parámetro de manera cuidadosa, pues influye directamente en la complejidad del modelo y evita el sobreajuste. Asimismo, se efectuaron 10 réplicas bajo el método *bootstrap* y se estableció un máximo de 5000 iteraciones, manteniendo los valores predeterminados para el umbral

de convergencia (0.00001) y el número de puntos de fondo (10 000), de acuerdo con Phillips y Dudík (2008) y Meza-Mori *et al.* (2025).

Durante el proceso, se aplicó la prueba Jackknife, que permitió evaluar la contribución individual de cada variable ambiental al modelo. Este análisis consistió en comparar el rendimiento del modelo cuando cada variable fue utilizada de forma aislada y cuando fue omitida, determinando así su peso relativo en la predicción (Phillips *et al.*, 2006). La salida final se generó en formato logístico, expresando la probabilidad de presencia de la especie en función de los gradientes ambientales (Phillips & Dudík, 2008).

Con los resultados obtenidos, se delimitó el área total de idoneidad ambiental para *Tetragonisca angustula*, cuyos valores oscilaron entre 0 (baja idoneidad) y 1 (alta idoneidad). El mapa resultante fue reclasificado en cuatro categorías interpretativas: alta idoneidad (>0.6), idoneidad moderada (0.4–0.6), baja idoneidad (0.2–0.4) y sin idoneidad (< 0.2), siguiendo los criterios de Guzmán *et al.* (2022) y Rojas-Briceño *et al.* (2022).

Finalmente, los productos espaciales generados por MaxEnt fueron integrados en el software QGIS versión 3.34.9, lo que permitió realizar un análisis espacial detallado y una representación cartográfica precisa circunscrita exclusivamente al territorio de la región Amazonas.

Tabla 5.

Parámetros empleados en MaxEnt.

Parámetro	Valor empleado	Referencia metodológica
Porcentaje de datos para entrenamiento	75%	Cárdenas <i>et al.</i> (2023)
Porcentaje de datos para validación	25%	Cárdenas <i>et al.</i> (2023)
Multiplicador de regularización (RM)	2	Lisovsky & Dudov (2021)
Réplicas	10 (<i>bootstrap</i>)	Meza-Mori <i>et al.</i> (2025)
Iteraciones máximas	5000	Phillips & Dudík (2008)
Puntos de fondo	10 000	MaxEnt default
Umbral de convergencia	0.00001	MaxEnt default
Formato de salida	Logístico	Phillips & Dudík (2008)

2.11. Evaluación de la precisión del modelo

La evaluación de la precisión del modelo se efectuó mediante el valor del área bajo la curva (AUC), calculado a partir de la curva Característica Operativa del Receptor (ROC). Este indicador cuantifica la capacidad del modelo para distinguir entre áreas ambientalmente adecuadas e inadecuadas para la presencia de la especie (Warren & Seifert, 2011).

El AUC es una de las métricas más utilizadas en el modelamiento de nicho ecológico, ya que proporciona una medida independiente del umbral de corte y permite evaluar la calidad predictiva del modelo. Un valor de AUC cercano a 1 indica una predicción excelente, mientras que un valor cercano a 0.5 sugiere un desempeño aleatorio o deficiente.

De acuerdo con la clasificación propuesta por Phillips *et al.* (2006), Zhang *et al.* (2019), Cárdenas *et al.* (2023) y Meza-Mori *et al.* (2025), los rangos de interpretación del AUC se establecen como: excelente (0.9–1.0), bueno (0.8–0.9), aceptable (0.7–0.8), deficiente (0.6–0.7) y fallido (0.5–0.6).

Este procedimiento permitió verificar la solidez y fiabilidad de las predicciones generadas por el modelo de MaxEnt, garantizando que las áreas de mayor idoneidad identificadas correspondieran efectivamente a condiciones ambientales favorables para *Tetragonisca angustula* en la región Amazonas.

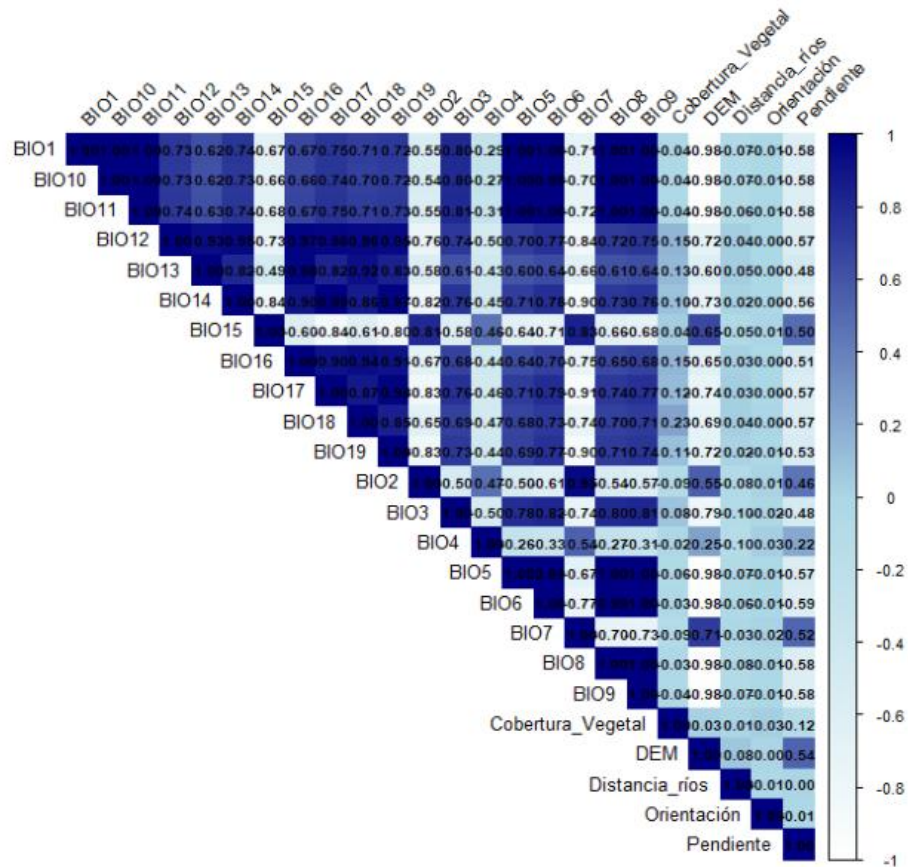
III. RESULTADOS

3.1. Selección de variables relevantes

Los resultados obtenidos se representaron gráficamente en la Figura 4, donde se observa la matriz de correlación entre las 24 variables analizadas. A partir de este proceso de depuración, se seleccionaron nueve variables independientes con correlaciones ≤ 0.70 , las cuales fueron utilizadas para la modelación de *Tetragonisca angustula*. Estas variables corresponden a BIO1 (temperatura media anual), BIO4 (estacionalidad de la temperatura), BIO7 (rango anual de temperatura), BIO12 (precipitación anual), BIO15 (estacionalidad de la precipitación), pendiente, orientación, distancia a cuerpos de agua y cobertura vegetal.

Figura 4.

Correlación de las variables.



La selección final garantizó la inclusión de factores climáticos, topográficos e hidrológicos clave para la comprensión del nicho ecológico de la especie, constituyendo una base sólida para la generación del modelo de distribución en MaxEnt.

3.2. Identificación de variables con mayor aporte al modelo

La Tabla 6 muestra las contribuciones relativas de las variables ambientales al modelo generado con el algoritmo MaxEnt, así como su importancia de permutación. Según el manual metodológico de MaxEnt (Phillips, 2010), la contribución porcentual se obtiene durante la fase de entrenamiento y refleja el incremento de la ganancia asociado a cada variable conforme el modelo se ajusta. En contraste, la importancia de la permutación se calcula a partir del modelo final y mide la reducción del desempeño (AUC) cuando los valores de una variable se permutan aleatoriamente, proporcionando una estimación más estable de su influencia real (Schnase *et al.*, 2021).

Aunque la contribución porcentual permite identificar variables influyentes durante el ajuste del modelo, su interpretación debe considerarse orientativa, ya que depende del orden en que el algoritmo incorpora las variables (Wang *et al.*, 2024). Por ello, se recomienda complementar su análisis con la importancia de la permutación, que ofrece una visión más robusta del grado de dependencia del modelo frente a cada variable ambiental.

Los resultados del análisis Jackknife evidenciaron que la cobertura vegetal presentó la mayor contribución individual (72.2 %), lo que indica que esta variable concentra la información más relevante para explicar la presencia de *Tetragonisca angustula* en la región de estudio. En segundo lugar, la pendiente registró un aporte del 10.6 %, siendo la variable cuya exclusión provocó la mayor reducción en la ganancia del modelo, lo que demuestra su aporte complementario. También destacaron la distancia a cuerpos de agua (5.7 %), el rango anual de temperatura (BIO7) con 3.3 % y la temperatura media anual (BIO1) con 2.6 %.

En cambio, variables como la estacionalidad de la temperatura (BIO4) (1.5 %), orientación (0.7 %), estacionalidad de la precipitación (BIO15) (0.2 %) y precipitación anual (BIO12) (0.2 %) mostraron aportes menores.

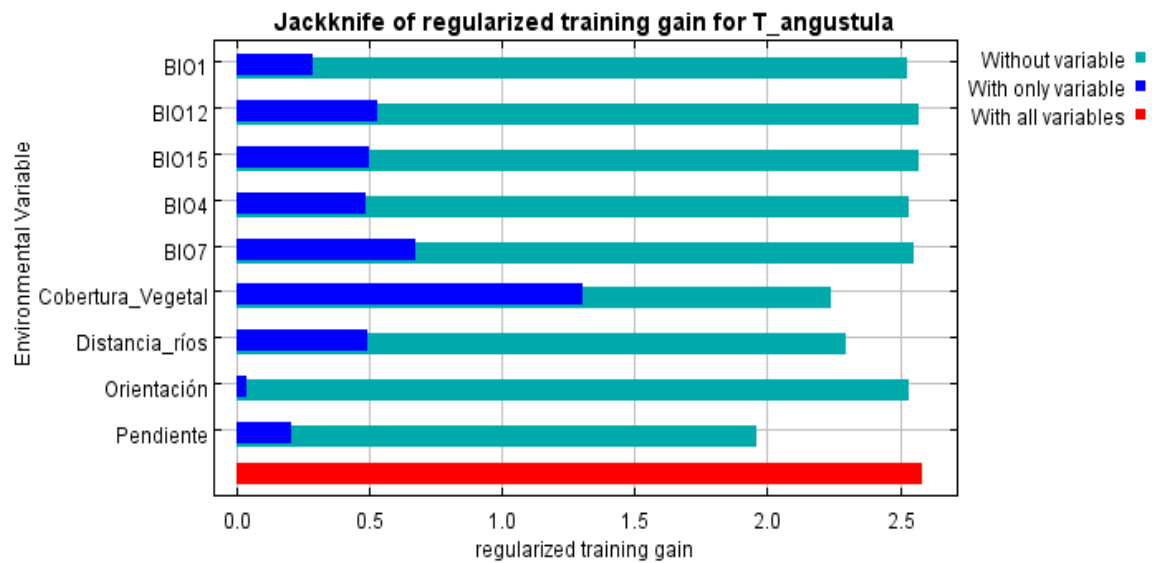
Tabla 6.

Estimaciones de las contribuciones relativas de las variables ambientales al modelo MaxEnt.

Variable	Contribución porcentual	Importancia de la permutación
Cobertura vegetal	75.2	21.1
Pendiente	10.6	45.6
Distancia_ríos	5.7	20
BIO7	3.3	2.3
BIO1	2.6	3.9
BIO4	1.5	2.5
Orientación	0.7	1.2
BIO15	0.2	0.7
BIO12	0.2	2.8

Figura 5.

Importancia de variables.



En conjunto, estos resultados indican que la estructura de la vegetación y los factores topográficos —especialmente la pendiente y la proximidad a fuentes de agua— son los principales determinantes del hábitat potencial de *Tetragonisca angustula* en la región Amazonas. Esto resalta la influencia directa de la heterogeneidad del paisaje y la disponibilidad de cobertura natural en la distribución de esta especie polinizadora.

3.3. Evaluación del desempeño predictivo del modelo

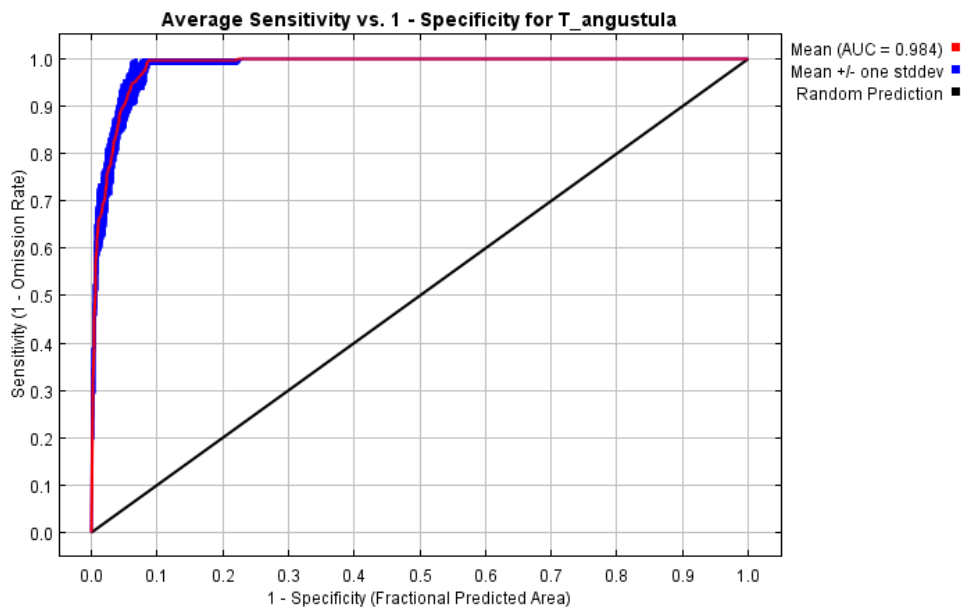
El modelo de distribución potencial de *Tetragonisca angustula* alcanzó un valor promedio de AUC de 0.984, lo que indica un rendimiento excelente y una alta capacidad para discriminar entre áreas de hábitat adecuado e inadecuado. Este valor refleja la eficacia del algoritmo MaxEnt en la identificación de patrones ambientales asociados a la presencia de la especie.

La curva ROC (Receiver Operating Characteristic) evidenció altos niveles de sensibilidad y especificidad, demostrando que el modelo predijo correctamente la mayoría de las observaciones positivas y negativas. Asimismo, la baja desviación estándar obtenida entre las diez réplicas ejecutadas bajo el método *bootstrap* confirma la estabilidad y consistencia de las predicciones.

De acuerdo con los criterios de evaluación propuestos por Phillips *et al.* (2006) y Cárdenas *et al.* (2023), los modelos con valores de AUC superiores a 0.9 se consideran altamente precisos y confiables. Por tanto, los resultados de este estudio confirman que el modelo desarrollado presenta una excelente capacidad predictiva, siendo adecuado para describir el patrón de distribución potencial de *Tetragonisca angustula* en la región Amazonas.

Figura 6.

Área bajo la curva (AUC).



3.4. Modelado de la distribución potencial actual

El modelo de distribución potencial se elaboró empleando 38 registros de presencia de *Tetragonisca angustula*, obtenidos a partir de colectas de campo y de la base de datos del Global Biodiversity Information Facility (GBIF), abarcando registros procedentes de las regiones Amazonas, Loreto, San Martín y Cajamarca (Figura 7). Sin embargo, el análisis espacial y la interpretación cartográfica se focalizaron exclusivamente en el departamento de Amazonas, considerando los 16 puntos de presencia ubicados dentro de sus límites (Figura 8).

Figura 7.

*Datos de presencia de *Tetragonisca angustula* en la región Amazonas y provincias colindantes San Ignacio y Jaén (Cajamarca), Datem del Marañón (Loreto), Rioja, Moyobamba, Mariscal Cáceres, El Dorado, Picota y Bellavista (San Martín).*

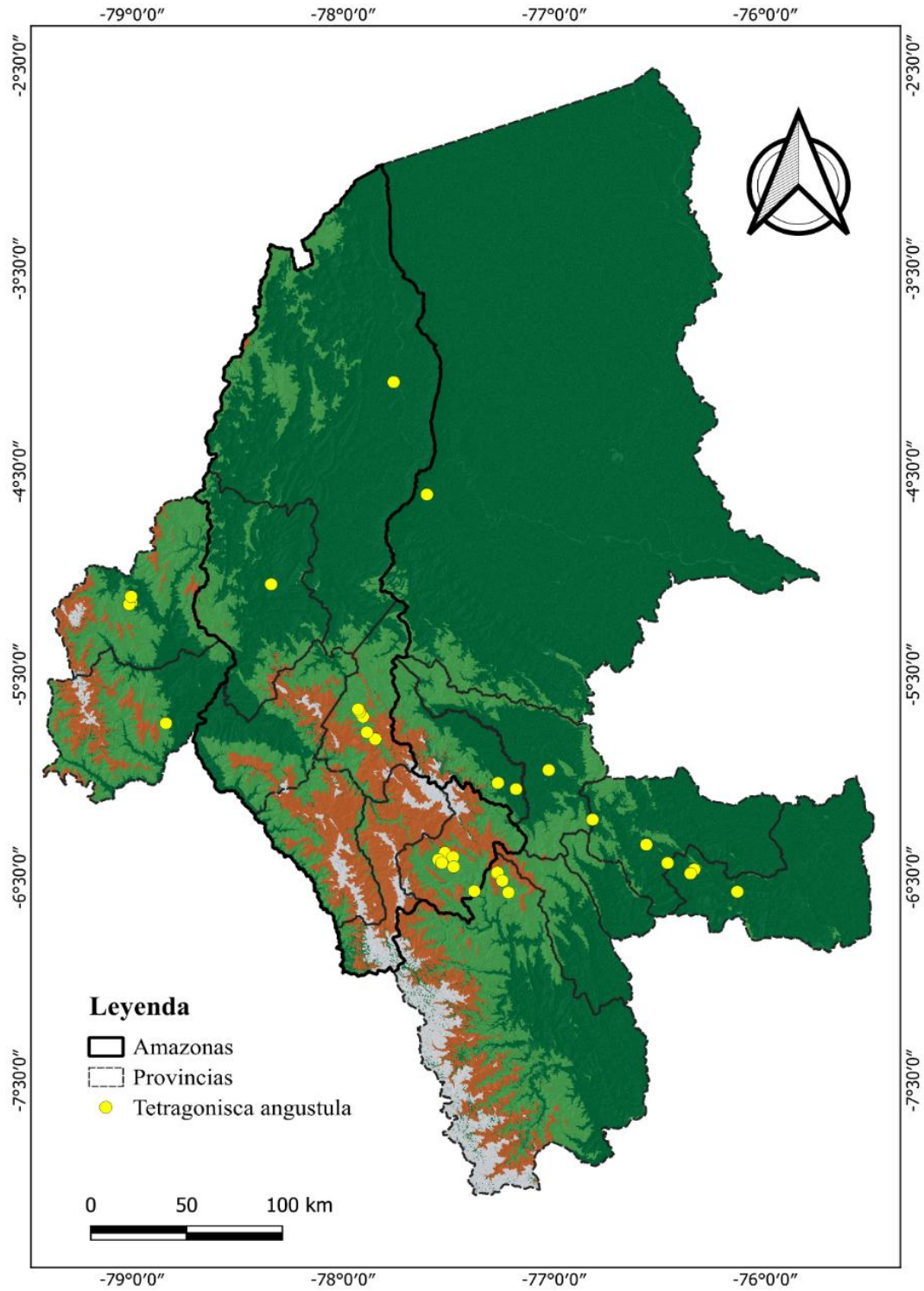
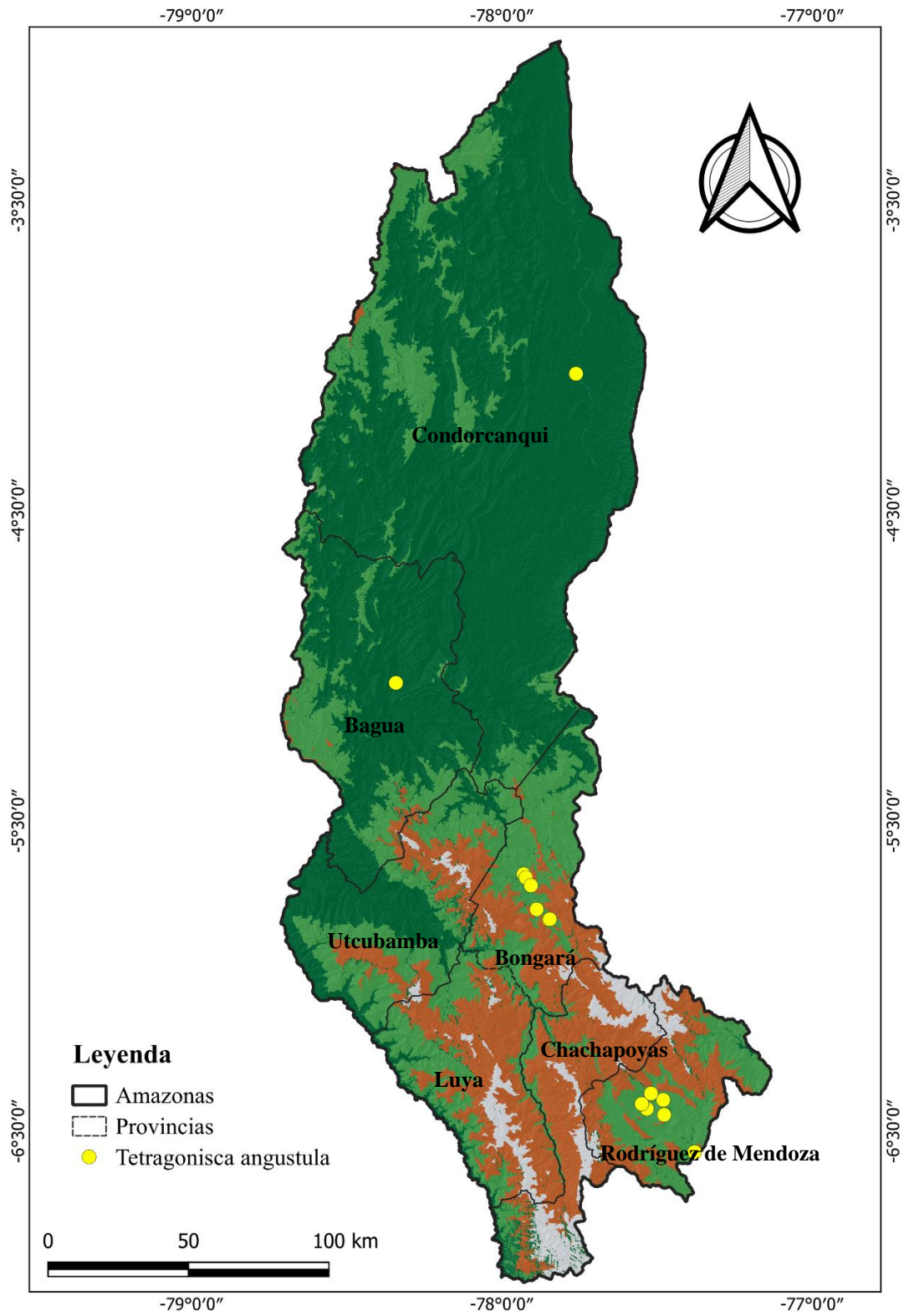


Figura 8.

Datos de presencia de Tetragonisca angustula en la región Amazonas.



Los resultados del modelamiento evidenciaron cuatro categorías de idoneidad ambiental (Tabla 7). Las áreas sin idoneidad (< 0.2) abarcan la mayor proporción del territorio y se distribuyen principalmente en las zonas de mayor altitud de Chachapoyas, Luya y Bongará, caracterizadas por temperaturas bajas y limitada disponibilidad floral, así como en amplias zonas de Condorcanqui, donde la alta humedad y los ecosistemas de selva baja no favorecen la presencia de la especie.

Las áreas de baja idoneidad (0.2–0.4) aparecen de forma fragmentada en Bagua, Utcubamba, Luya y Bongará, donde la presión antrópica y la deforestación han reducido los hábitats naturales, aunque persisten pequeños parches con condiciones favorables. En cambio, las zonas de idoneidad moderada (0.4–0.6) se concentran en valles interandinos y áreas de ceja de selva entre 1200 y 1800 m s. n. m., con climas cálido-húmedos y vegetación secundaria que permiten la permanencia de colonias estables.

Finalmente, las áreas de alta idoneidad (> 0.6) se ubican principalmente en las provincias de Rodríguez de Mendoza, Chachapoyas, Luya, Bongará, Utcubamba y Bagua, donde confluyen condiciones de altitud intermedia, alta cobertura vegetal y proximidad a fuentes hídricas. Estas zonas representan los ambientes más propicios para el desarrollo y conservación de *Tetragonisca angustula*.

La Tabla 7 resume la extensión territorial correspondiente a cada categoría de idoneidad dentro del departamento de Amazonas, cuya superficie total asciende a 3 872 207.44 ha. De este total, el 1.40 % (54 395.25 ha) corresponde a áreas de alta idoneidad, el 2.02 % (78 171.63 ha) a idoneidad moderada, el 4.61 % (178 476.61 ha) a baja idoneidad y el 91.97 % (3 561 163.95 ha) a zonas sin idoneidad ambiental.

Tabla 7.

Áreas de distribución de Tetragonisca angustula en la región Amazonas.

Descripción	Rango	Área (ha)	Área (%)
Sin idoneidad	< 0.2	3 561 163.95	91.97
Baja idoneidad	0.2 - 0.4	178 476.61	4.61
Idoneidad moderada	0.4 - 0.6	78 171.63	2.02
Alta idoneidad	> 0.6	54 395.25	1.40
Total		3872207.44	100

Las Figuras 9 y 10 muestran la representación espacial de la distribución potencial actual de *Tetragonisca angustula* en Amazonas, donde se aprecia una marcada concentración de áreas favorables en pisos altitudinales intermedios, lo que evidencia la sensibilidad de la especie frente a variaciones climáticas y cambios en la cobertura vegetal.

Figura 9.

Área potencial actual de Tetragonisca angustula en la región Amazonas.

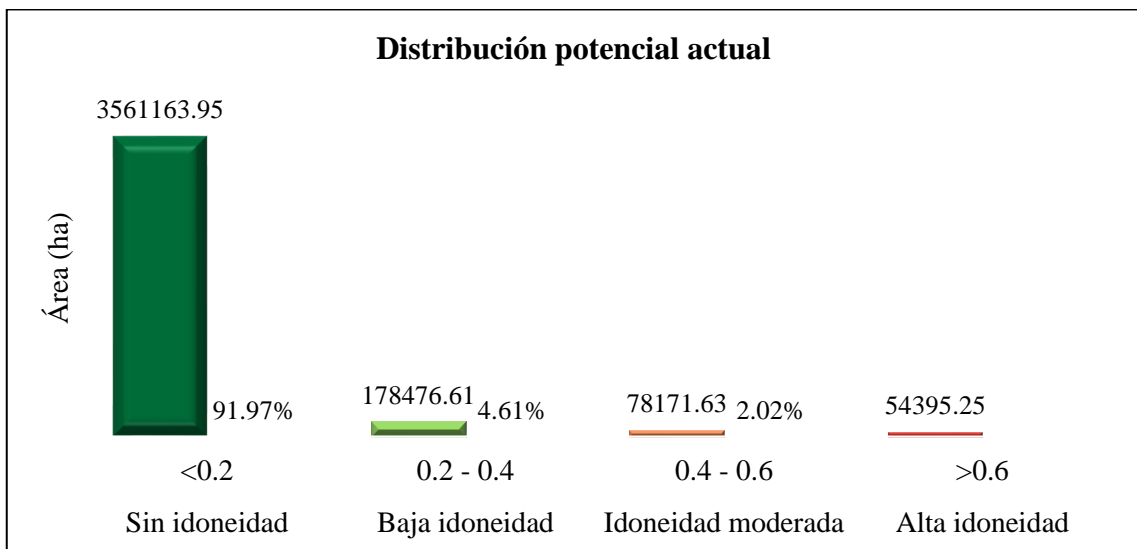
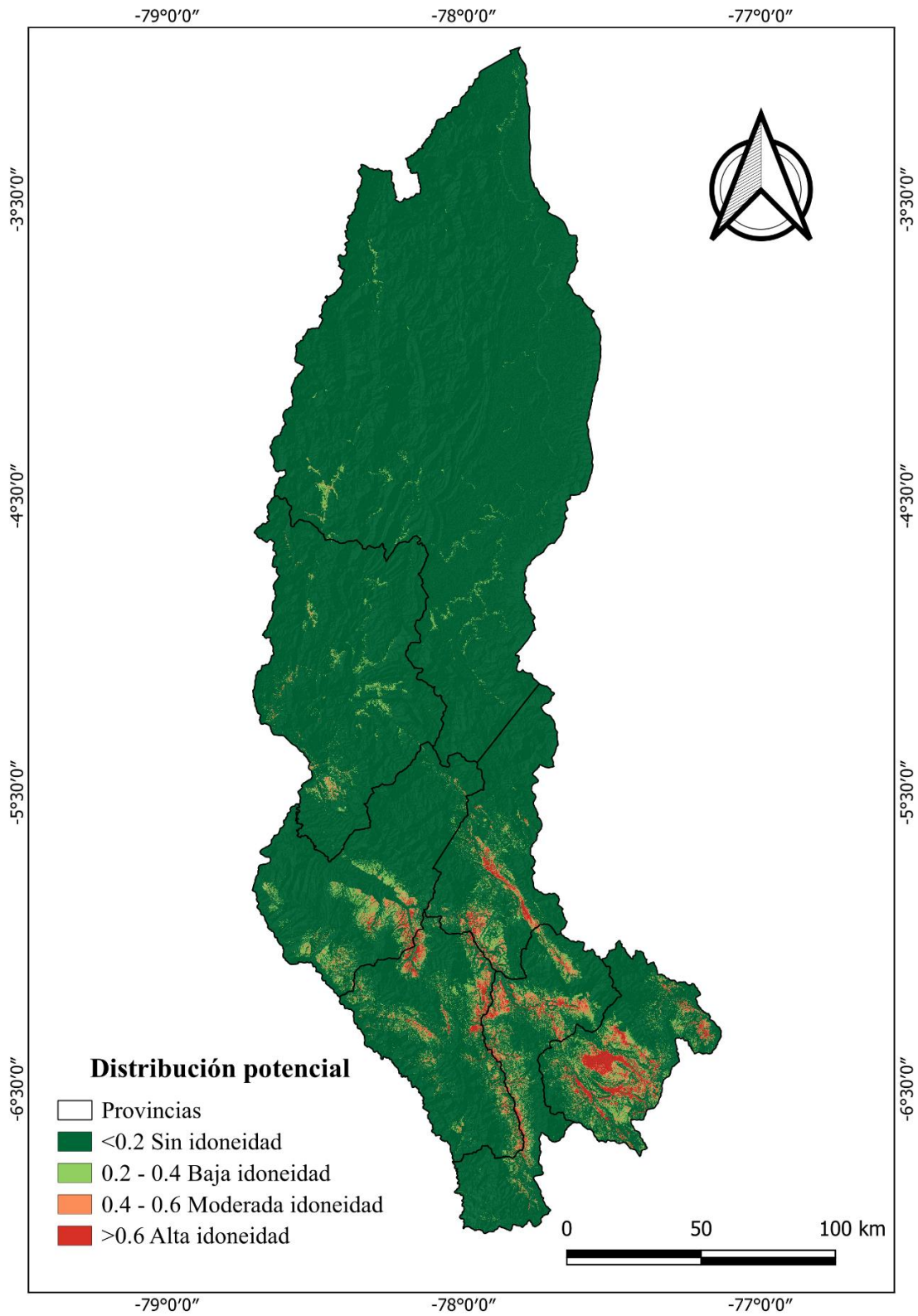


Figura 10.

Distribución potencial actual de Tetragonisca angustula en la región Amazonas.



A nivel provincial, la mayor extensión de hábitat altamente favorable se registró en Rodríguez de Mendoza (22 784.44 ha), seguida de Chachapoyas (10 383.49 ha), Luya (10 339.38 ha), Bongará (7 733.49 ha), Utcubamba (2 913.41 ha) y Bagua (253.14 ha). En conjunto, estas provincias concentran 54 407.35 ha de alta idoneidad ambiental, configurando los principales núcleos de conservación y potencial aprovechamiento meliponicultor en la región.

Tabla 8.

*Áreas de distribución potencial actual de *Tetragonisca angustula* por provincias.*

Provincia	Rango				Área (ha)
	Sin idoneidad	Baja idoneidad	Moderada idoneidad	Alta idoneidad	
	<0.2	0.2 - 0.4	0.4 - 0.6	>0.6	
Bagua	556499.35	15054.67	2558.65	253.14	574365.81
Bongará	240441.97	20625.79	10299.69	7733.49	279100.94
Chachapoyas	218387.98	30683.25	18627.77	10383.49	278082.49
Condorcanqui	1754187.52	13542.1	732.64		1768462.26
Luya	270579.93	29434.95	14874.54	10339.38	325228.8
Rodríguez de Mendoza	173070.46	38979.65	20592.72	22784.44	255427.27
Utcubamba	347174.38	30212.29	10525.28	2913.41	390825.36
Total	3560341.59	178532.7	78211.29	54407.35	3871492.93

IV. DISCUSIÓN

Hasta el momento, no se habían desarrollado estudios sobre la distribución potencial de *Tetragonisca angustula* en el Perú. Las investigaciones previas se enfocaron principalmente en aspectos biológicos, morfológicos o productivos, sin abordar la dimensión espacial de la idoneidad ambiental. En ese sentido, los resultados del presente trabajo representan un aporte pionero, al constituir la primera evaluación de la distribución potencial de la especie en la región Amazonas, lo que permite identificar zonas prioritarias para su conservación y para el fortalecimiento de la meliponicultura en la Amazonía nororiental peruana. Estudios que integran modelamiento de nicho y morfometría alar en *Apis mellifera* han evidenciado que las variaciones ambientales y geográficas influyen en la forma de las alas, afectando la capacidad de vuelo y dispersión de las abejas. Dado que estos rasgos están asociados con la conectividad entre colonias, futuras investigaciones sobre *Tetragonisca angustula* deberían incorporar análisis morfométricos que evalúen posibles respuestas fenotípicas locales frente a la fragmentación del paisaje (Peil & Aranda, 2021). En conjunto, este trabajo constituye un punto de partida para la integración de herramientas de modelamiento, genética y manejo sostenible, orientadas a garantizar la persistencia de *Tetragonisca angustula* ante el cambio climático y las presiones antrópicas crecientes en la Amazonía peruana.

A fin de identificar los determinantes ecológicos asociados a la presencia de *Tetragonisca angustula*, se analizó la contribución relativa de diversas variables ambientales que influyen en su distribución dentro de la región Amazonas. La fuerte influencia de la cobertura vegetal coincide con lo reportado por Guzmán (2022) en Colombia, quien la identificó como un factor clave en la presencia de la especie. De manera similar, Rasmussen y Delgado (2019) destacaron la afinidad de las abejas sin aguijón por ambientes de ceja de selva en el Perú, lo cual concuerda con las áreas de alta idoneidad determinadas en este estudio. Sin embargo, los resultados difieren de lo observado en Brasil (Oliveira *et al.*, 2004), donde la altitud no tuvo un efecto significativo sobre su distribución. En el caso de la región Amazonas, la variable pendiente mostró una influencia determinante, posiblemente debido a la topografía accidentada que genera microhábitats diferenciados con variada disponibilidad de cavidades para nidificación y oferta floral. Estos hallazgos evidencian que la importancia relativa de las variables ambientales puede variar según la escala espacial de análisis, de modo que factores

considerados secundarios en estudios amplios pueden adquirir relevancia ecológica en contextos locales heterogéneos.

El análisis Jackknife evidenció que la cobertura vegetal y la pendiente fueron las variables con mayor aporte al modelo de distribución potencial de *Tetragonisca angustula*. La predominancia de la cobertura vegetal refleja la dependencia de esta especie por ambientes con vegetación secundaria y mosaicos de hábitats que ofrecen cavidades para la nidificación y una alta diversidad floral. Por su parte, la variable pendiente se asocia a la heterogeneidad topográfica, la cual genera microhábitats con diferentes condiciones de temperatura, humedad y disponibilidad de recursos. Resultados similares se han reportado en Asia, donde la distribución de *Bombus chinensis* se relaciona estrechamente con la configuración del relieve (Hu *et al.*, 2022). Asimismo, estudios realizados en África sobre especies del género *Melipona* han demostrado que la cobertura vegetal y la heterogeneidad ambiental son factores esenciales para la persistencia de las poblaciones (Assefa & Lemma, 2022). En conjunto, estas coincidencias sugieren que los patrones identificados en Amazonas concuerdan con tendencias observadas en otros linajes de la tribu Meliponini en distintas regiones del mundo, lo que refuerza la importancia de la estructura del paisaje y la variabilidad ambiental en la distribución de *Tetragonisca angustula*.

A nivel provincial se observaron contrastes marcados en la distribución potencial de *Tetragonisca angustula*. La provincia de Condorcanqui presentó la mayor extensión sin idoneidad ambiental, asociada a su paisaje de Amazonía baja caracterizado por bosques húmedos continuos, alta pluviosidad y escasa heterogeneidad de hábitats. Aunque estas condiciones favorecen a otros organismos tropicales, no resultan óptimas para *Tetragonisca angustula*, que requiere ambientes más abiertos, con disponibilidad de cavidades y diversidad floral. En contraste, Rodríguez de Mendoza registró la mayor superficie de hábitat altamente idóneo. Su localización en un piso altitudinal intermedio, su clima cálido-húmedo, la abundancia de vegetación secundaria y la cercanía a cursos de agua conforman un entorno propicio para el establecimiento y permanencia de las colonias. Este patrón confirma lo señalado por Rasmussen y Delgado (2019) y Conrad *et al.* (2021), quienes resaltan la relevancia de la heterogeneidad ambiental en la persistencia de las abejas sin aguijón. En ese sentido, Rodríguez de Mendoza se consolida como un

núcleo estratégico para la conservación y el aprovechamiento sostenible de *Tetragonisca angustula* en la Amazonía nororiental peruana.

En el contexto del cambio climático, este estudio constituye una línea base inédita para el Perú. Investigaciones en diferentes regiones del mundo demuestran que los polinizadores experimentarán reducciones y desplazamientos de hábitat en horizontes temporales cercanos. En Irán y Australia, por ejemplo, se ha proyectado una contracción y redistribución de áreas idóneas para abejas silvestres y melíferas bajo escenarios climáticos futuros (Rahimi *et al.*, 2021; Tennakoon *et al.*, 2024). De manera similar, en África se ha estimado que hacia 2030–2070 la idoneidad de hábitat para abejas y plantas polinizadoras sufrirá desplazamientos altitudinales y cambios en la superposición de nichos (Gebremedhn *et al.*, 2024). Estos patrones globales son coherentes con lo observado en Amazonas, donde se anticipa que *Tetragonisca angustula* podría ver reducida su distribución actual y desplazarse hacia pisos altitudinales superiores (Abou-Shaara, 2024).

Asimismo, estudios con otros insectos sociales han demostrado la versatilidad del modelado de nicho para distintos fines. Por ejemplo, la aplicación de MaxEnt a especies como *Solenopsis geminata* y *Vespa velutina* permitió predecir su expansión bajo escenarios de cambio climático en Europa, África y América (Lee *et al.*, 2021; Tennakoon *et al.*, 2024). Este trabajo, centrado en una especie nativa de importancia ecológica y productiva, demuestra cómo MaxEnt puede ser empleado para identificar áreas críticas y apoyar la conservación de polinizadores nativos.

De igual forma, reconstrucciones paleoecológicas han mostrado que distintas especies de abejas experimentaron desplazamientos Desde el Último Período Glacial hasta hoy, identificando rutas de expansión histórica y refugios que favorecieron su persistencia (Huang *et al.*, 2022). Integrar este enfoque (modelos actuales, paleoproyecciones y escenarios futuros) permitiría identificar no solo áreas de persistencia histórica, sino también regiones con mayor probabilidad de funcionar como refugios climáticos para *Tetragonisca angustula*. Investigaciones sobre el origen y diversificación de abejas (género *Apis*) sugieren que la historia biogeográfica y la existencia de refugios glaciares han sido determinantes en la configuración actual de sus distribuciones, lo que refuerza la importancia de combinar modelado de nicho con análisis genéticos (Ji, 2021).

Desde una perspectiva aplicada, la identificación de Rodríguez de Mendoza, Chachapoyas y Luya como provincias con mayor idoneidad representa una oportunidad estratégica para impulsar la meliponicultura sostenible. Estas áreas no solo reúnen condiciones ambientales favorables para el establecimiento de *Tetragonisca angustula*, sino que también poseen una sólida tradición agrícola que puede facilitar su integración en cadenas de valor locales. Esta articulación entre idoneidad ecológica y aprovechamiento productivo ha sido destacada como un elemento fundamental para lograr un desarrollo sostenible de la meliponicultura en América Latina (Cortopassi-Laurino *et al.*, 2006; Adler *et al.*, 2023).

Al comparar estos resultados con el modelo de aptitud apícola elaborado por Gómez-Fernández *et al.* (2025), se observa que el patrón de distribución es aún más restringido para *Tetragonisca angustula*. Dicho estudio reporta que el 3,4 % del territorio de Amazonas presenta condiciones altamente favorables para la apicultura, el 79,2 % es moderadamente apto, el 17,2 % marginal y solo el 0,2 % no apto. En contraste, el presente modelamiento indica una proporción mucho menor de áreas con alta y moderada idoneidad (3,42 % en total), lo que sugiere que *Tetragonisca angustula* requiere condiciones ambientales más específicas que las abejas del género *Apis* utilizadas en la apicultura tradicional. Esta diferencia podría atribuirse a los requerimientos ecológicos propios de *Tetragonisca angustula*, una especie meliponina que prefiere microclimas cálidos, húmedos y con abundante vegetación nativa, así como a su limitada capacidad de dispersión en comparación con las abejas manejadas (*Apis mellifera*). Además, variables tales como altitud, dispersión del hábitat y las modificaciones en el uso del suelo pueden restringir la disponibilidad de sitios adecuados para nidificación y forrajeo (Cane, 2001).

Por otro lado, considerando las proyecciones climáticas mencionadas por Gómez-Fernández *et al.* (2025), que estiman incrementos de temperatura de entre 3 y 8 °C y reducciones en la precipitación, es probable que las áreas de alta idoneidad para *Tetragonisca angustula* se vean aún más reducidas en el futuro. Dichos cambios podrían afectar la productividad, persistencia y distribución de las colonias silvestres, resaltando la urgencia de implementar acciones de conservación junto con un seguimiento continuo que integre enfoques de cambio climático y manejo del territorio

Asimismo, la delimitación espacial de áreas idóneas puede orientar planes de manejo comunitario y políticas de conservación frente a la creciente presión antrópica (expansión agrícola, urbanización y deforestación) que amenaza tanto a la especie como a los sistemas productivos asociados. Estas presiones no solo reducen la disponibilidad de hábitats adecuados, sino que también generan impactos directos sobre los aspectos biológicos y el comportamiento de *Tetragonisca angustula*. Diversos estudios han evidenciado que la transformación del paisaje puede ocasionar alteraciones morfológicas y funcionales en las colonias de abejas sin aguijón, afectando su capacidad de vuelo, tamaño corporal y eficiencia de forrajeo, lo que a largo plazo compromete la estabilidad de las colonias y la eficacia polinizadora (Andreazzi *et al.*, 2025). De igual modo, la pérdida de cobertura arbórea y la fragmentación del bosque disminuyen la disponibilidad de árboles hospedadores utilizados para la nidificación, limitando la expansión y supervivencia de las colonias silvestres (Demetrio *et al.*, 2025). Por otro lado, investigaciones recientes han evidenciado que las abejas meliponinas pueden acumular metales pesados, como plomo, cadmio y mercurio, en sus tejidos corporales y en los productos apícolas cuando habitan en entornos contaminados, lo que las convierte en bioindicadores sensibles del grado de degradación ambiental (de Matos *et al.*, 2021). De acuerdo con estos resultados, investigaciones recientes en la Amazonía peruana indican que más del 50 % de los hábitats de las abejas sin aguijón *Melipona eburnea* y *Tetragonisca angustula* se encuentran actualmente en áreas de alto riesgo de deforestación, principalmente por la tala de árboles utilizados para la nidificación, la explotación ilegal de madera y la expansión agrícola (IIAP, 2025). El estudio, llevado a cabo en la Reserva de Biosfera Avireri-Vraem (Junín), documentó 51 colmenas silvestres y 21 especies de árboles utilizadas como sitios de anidación, incluyendo *Guarea guidonia*, *Ficus insipida*, *Aniba gigantiflora* y *Cedrelinga cateniformis*, muchas de las cuales están entre las más explotadas ilegalmente en la región.

Estos resultados reafirman la necesidad de implementar estrategias integrales de conservación que incluyan la restauración ecológica, la creación de corredores biológicos y la promoción de sistemas agroecológicos compatibles con los polinizadores. Asimismo, el estudio del IIAP (2025) sugiere otorgar reconocimiento legal a los hábitats de estas abejas bajo la perspectiva de los Derechos de la Naturaleza, con el objetivo de asegurar su conservación frente a la explotación desmedida.

En conjunto, los resultados del presente estudio confirman que la conservación de *Tetragonisca angustula* requiere un enfoque multidimensional que integre factores ecológicos, antrópicos y climáticos. Solo mediante esta visión integral será posible garantizar la persistencia de la especie como polinizador clave y su aprovechamiento sostenible en beneficio de la meliponicultura y las comunidades amazónicas. La región Amazonas, además de albergar una alta diversidad de abejas sin aguijón, constituye un territorio estratégico para asegurar la permanencia de *Tetragonisca angustula* frente a los escenarios de cambio global.

Si bien el modelo obtenido presentó un valor de AUC alto (0.984), es importante reconocer ciertas limitaciones. El número de registros de presencia empleados (38 puntos) resulta relativamente reducido, lo que podría generar cierto grado de sobreajuste. Aunque el desempeño general del modelo es robusto, la representación espacial podría estar condicionada por la baja densidad de datos disponibles. Asimismo, las variables antrópicas incluidas no reflejan con precisión presiones locales como el uso de agroquímicos o la fragmentación del hábitat, factores que influyen directamente en la persistencia de las colonias. Finalmente, dado que MaxEnt, pese a su solidez estadística, puede sobreestimar áreas idóneas en ausencia de validación independiente, se recomienda que futuras investigaciones amplíen el muestreo de campo, contrasten modelos mediante otros algoritmos y consideren variables complementarias (genéticas, morfométricas, antrópicas y climáticas) para fortalecer la representatividad y aplicabilidad del modelo.

V. CONCLUSIONES

1. El análisis de distribución espacial de *Tetragonisca angustula* en la región Amazonas permitió determinar una distribución geográfica fragmentada, con presencia restringida a zonas específicas, lo que evidencia el efecto de variables ambientales sobre la delimitación de su hábitat.
2. Se identificaron las provincias de Rodríguez de Mendoza, Chachapoyas y Luya como áreas con mayor densidad poblacional e idoneidad ambiental para *Tetragonisca angustula*, constituyendo zonas estratégicas para la conservación y el fortalecimiento de la meliponicultura sostenible en la región.
3. El análisis de las variables ambientales indicó que la cobertura vegetal y la pendiente se consideran las variables de mayor impacto en la distribución de la especie, resaltando la importancia de ambientes con vegetación secundaria y microhábitats adecuados que proveen recursos florales y sitios de nidificación.
4. Las proyecciones del modelo MaxEnt permitieron predecir áreas potenciales de presencia de *Tetragonisca angustula* en la región, ofreciendo información valiosa para anticipar desplazamientos o reducciones de distribución proyectada bajo distintos escenarios de cambio climático y orientar estrategias de manejo y conservación.
5. Este estudio constituye la primera evaluación de la predicción de distribución potencial de *Tetragonisca angustula* en el Perú, integrando herramientas predictivas y análisis ambiental, y estableciendo una base científica para futuras investigaciones, programas de conservación adaptativa y manejo comunitario de abejas nativas.

VI. RECOMENDACIONES

- Se recomienda ampliar el muestreo de campo en provincias con menor información, como Condorcanqui y Bagua, con el fin de mejorar la representatividad del modelo y robustecer los resultados.
- Asimismo, es necesario incorporar escenarios de cambio climático en futuras simulaciones de MaxEnt para predecir posibles desplazamientos de la especie y orientar acciones de mitigación frente a la pérdida de hábitat.
- También se sugiere integrar los análisis de distribución con estudios genéticos poblacionales, lo cual permitirá evaluar la conectividad y variabilidad genética de *Tetragonisca angustula*.
- Finalmente, se recomienda fomentar programas de meliponicultura sostenible en las zonas de alta idoneidad identificadas, priorizando la capacitación de comunidades locales en el manejo racional de colmenas, y promover la protección legal de áreas clave mediante su inclusión en planes de conservación y ordenamiento territorial regional.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abou-Shaara, H. (2024). Using maximum entropy algorithm to analyze changes in the distribution of the stingless bees, *Tetragonisca angustula* (Latreille, 1811), in response to future climatic conditions. *Journal of the Entomological Research Society*, 26(2), 281-295. doi:<https://orcid.org/0000-0001-7208-6526>
- Abou-Shaara, H. F., & Al-Khalaf, A. A. (2022). Using maximum entropy algorithm to analyze current and future distribution of the Asian hornet, *Vespa velutina*, in Europe and North Africa under climate change conditions. *J Entomol Res Soc*, 24, 7-21. doi:0.51963/jers.v24i1.2011
- Adler, M., Escóbar-Márquez, L., Solis-Soto, M. T., & Pinto, C. F. (2023). Stingless bees: uses and management by meliponiculturist women in the Chaco region of Bolivia. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 19(1), 5. doi:10.1186/s13002-022-00574-0
- Agropress. (28 de Octubre de 2020). Investigadores peruanos logran tecnología para criar abejas sin aguijón. *Agropress*. <https://agropress.pe/innovacion-y-tecnologia/investigadores-peruanos-logran-tecnologia-para-criar-abejas-sin-aguijon/>
- Andreazzi, A. P., Dallacqua, R. P., & Aranda, R. (2025). Variation in wings shape of the common Neotropical stingless bee *Tetragonisca angustula* (Hymenoptera: Meliponini) across an urbanization gradient. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 97(4), e20241101. doi:<https://doi.org/10.1590/0001-3765202520241101>
- Araújo, E. D., Costa, M., Chaud-Netto, J., & Fowler, H. G. (2004). Body size and flight distance in stingless bees (Hymenoptera: Meliponini): inference of flight range and possible ecological implications. *Brazilian Journal of Biology*, 64, 563-568. doi: <https://doi.org/10.1590/S1519-69842004000400003>

- Assefa, A., & Lemma, M. (2022). Ecological niche modeling for stingless bees (genus *Melipona*) in Waghemira and North Wollo zones of Amhara Regional State, Ethiopia. *Scientific African*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2022.e01102>
- Baker, D. J., Maclean, I. M., & Gaston, K. J. (2024). Effective strategies for correcting spatial sampling bias in species distribution models without independent test data. *Diversity and Distributions*, *30*(3). doi: <https://doi.org/10.1111/ddi.13802>
- Balbuena, M. S., & Farina, W. M. (2020). Chemosensory reception in the stingless bee *Tetragonisca angustula*. *Journal of Insect Physiology*, *125*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jinsphys.2020.104076>
- Barve, N., Barve, V., Jiménez-Valverde, A., Lira-Noriega, A., Maher, S. P., Peterson, A. T., . . . Villalobos, F. (2011). The crucial role of the accessible area in ecological niche modeling and species distribution modeling. *Ecological Modelling*, *222*(11), 1810-1819. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.02.011>
- Caballero Méndez, L. C., Salazar Ríos, D., Chica Builes, J. F., & Franco-Montoya, L. N. (2025). Native stingless bees, their social and ecosystem roles—a review. *Veterinarska Stanica*, *56*(4). doi:<https://doi.org/10.46419/vs.56.4.10>
- Cane, J. H. (2001). Habitat fragmentation and native bees: a premature verdict?. *Conservation Ecology*, *5*(1). <http://www.consecol.org/vol5/iss1/art3/>
- Cárdenas, G. P., Bravo, N., Barboza, E., Salazar, W., Ocaña, J., Vázquez, M., . . . Arbizu, C. I. (2023). Current and Future Distribution of Shihuahuaco (*Dipteryx* spp.) under Climate Change Scenarios in the Central-Eastern Amazon of Peru. *Sustainability*, *15*(10). doi: <https://doi.org/10.3390/su15107789>
- Castilhos, D., Bérnago, G. C., Gramacho, K. P., & Gonçalves, L. S. (2019). Bee colony losses in Brazil: a 5-year online survey. *Apidologie*, *50*. doi:<https://doi.org/10.1007/s13592-019-00642-7>
- Céspedes-Llave, A. Á. (2024). Las abejas sin aguijón (Apidae: Apinae: Meliponini) de Bolivia: una aproximación al conocimiento sobre su riqueza y distribución

geográfica. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 95.
doi:10.22201/ib.20078706e.2024.95.5420

Conrad, K. M., Peters, V. E., & Rehan, S. M. (2021). Tropical bee species abundance differs within a narrow elevational gradient. *Scientific reports*, 11(1), 23368. doi:https://doi.org/10.1038/s41598-021-02727-9

Cortopassi-Laurino, M., Imperatriz-Fonseca, V. L., Roubik, D. W., Dollin, A., Heard, T., Aguilar, I., . . . Nogueira-Neto, P. (2006). Global meliponiculture: challenges and opportunities. *Apidologie*, 37(2), 275-292. doi:https://doi.org/10.1051/apido:2006027

Cotrina Sánchez, D. A., Barboza Castillo, E., Rojas Briceño, N. B., Oliva, M., Torres, G. C., Amasifuen Guerra, C. A., & Bandopadhyay, S. (2020). Distribution models of timber species for forest conservation and restoration in the Andean-Amazonian landscape, North of Peru. *Sustainability*, 12(19). doi:https://doi.org/10.3390/su12197945

de Matos Barbosa, M., Fernandes, A. C., Alves, R. S., Alves, D. A., Junior, F. B., Batista, B. L., . . . Carneiro, M. F. (2021). Effects of native forest and human-modified land covers on the accumulation of toxic metals and metalloids in the tropical bee *Tetragonisca angustula*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 215, 112147. doi:https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112147

de Oliveira, F. A., de Abreu, A. T., de Oliveira Nascimento, N., Froes-Silva, R. E., Antonini, Y., Nalini Jr., H. A., & de Lena, J. C. (2017). Evaluation of matrix effect on the determination of rare earth elements and As, Bi, Cd, Pb, Se and In in honey and pollen of native Brazilian bees (*Tetragonisca angustula* – Jataí) by Q-ICP-MS. *Talanta*, 162. doi:https://doi.org/10.1016/j.talanta.2016.10.058

Delgado, C., & Espinoza, R. V. (2023). Physicochemical parameters and chemoprofiling of honey of two species of stingless bees in the Peruvian Amazon. *Food and Humanity*, 1, 1145-1156. doi:https://doi.org/10.1016/j.foohum.2023.08.017

- Delgado, C., Mejía, K., Rasmussen, C., & Romero, R. (2023). Traditional knowledge of stingless bees (Hymenoptera: Apidae: Meliponini) in the Peruvian Amazon. *Ethnobiology Letters*, *14*(1). doi:10.14237/ebl.14.1.2023.1772
- Demetrio, R., Muñoz-Schrader, O., Faria, J., Baselly-Villanueva, J. R., Cardenas, D., Isuiza, M., . . . Espinoza, R. V. (2025). Spatial distribution, tree host associations, and deforestation threats on two stingless bee species in the Peruvian Amazon. *Journal of Ecology and Environment*, *49*. doi:https://doi.org/10.5141/jee.25.021
- Dew, R. M., Silva, D. P., & Rehan, S. M. (2019). Range expansion of an already widespread bee under climate change. *Global Ecology and Conservation*, *17*. doi:https://doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00584
- Dormann, C. F., Elith, J., Bacher, S., Buchmann, C., Carl, G., Carré, G., . . . Lautenbach, S. (2013). Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography*, *36*(1), 27-46. doi: https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2012.07348.x
- Elith, J., & Leathwick, J. R. (2009). Modelos de distribución de especies: explicación ecológica y predicción a través del espacio y el tiempo. *Revisión anual de ecología, evolución y sistemática*, *40*(1). doi:https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.110308.120159
- Fernandes Biscassi, G., Ferreira Rabêlo, W., Sardeli, R., Rodrigues Garcia, G. R., Brigante, J., Daam, M. A., . . . Vieira, E. M. (2024). Residual determination and acute toxicity of the neonicotinoid clothianidin in the neotropical stingless bee *Tetragonisca angustula* Latreille, 1811 (Apidae: Meliponini). *Chemosphere*, *349*. doi:https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140878
- Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International journal of climatology*, *37*(12), 4302-4315. doi: https://doi.org/10.1002/joc.5086
- Flores, D. D. (2015). Distribución y evaluación de los grados de amenaza de abejas solitarias (Hymenoptera: Apoidea) en Cuba.

[https://accesoabierto.uh.cu/files/original/2129437/TMDaryl_David_Cruz_Flores_\[2016\].pdf](https://accesoabierto.uh.cu/files/original/2129437/TMDaryl_David_Cruz_Flores_[2016].pdf)

- Fourcade, Y., Engler, J. O., Rödder, D., & Secondi, J. (2014). Mapping species distributions with MAXENT using a geographically biased sample of presence data: a performance assessment of methods for correcting sampling bias. *PloS one*, 9(5). doi:<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0097122>
- García, F. S., & Torres, D. M. (2025). Formación de núcleos *Tetragonisca angustula* en producción urbana de Villavicencio: Un estudio empírico. *Documentos de Trabajo ECAPMA*, 9, 65 - 108. doi:<https://doi.org/10.22490/ECAPMA.8380>
- Garibaldi, L. A., Carvalheiro, L. G., Leonhardt, S. D., Aizen, M. A., Blaauw, B. R., Isaacs, R., . . . Winfree, R. (2014). From research to action: enhancing crop yield through wild pollinators. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 12(8). doi:<https://doi.org/10.1890/130330>
- Gebremedhn, H., Gebrewahid, Y., Haile, G. G., Hadgu, G., Atsbha, T., Hailu, T. G., & Bezabih, G. (2024). Projecting the impact of climate change on honey bee plant habitat distribution in Northern Ethiopia. *Scientific Reports*, 14(1), 15866. doi:<https://doi.org/10.1038/s41598-024-66949-3>
- Geoinnova. (2020). Maxent para modelos de distribución de especies. <https://geoinnova.org/blog-territorio/maxent-para-modelos-de-distribucion-de-especies/>
- Global Biodiversity Information Facility (GBIF). (24 de Junio de 2025). GBIF Occurrence Download. doi: <https://doi.org/10.15468/dl.n5xnba>
- Gómez, F. S., & Torres, D. M. (2025). Formación de núcleos *Tetragonisca angustula* en producción urbana de Villavicencio: Un estudio empírico. *Working Papers ECAPMA*, 9. doi:<https://doi.org/10.22490/ECAPMA.8380>
- Gómez-Fernández, D., García, L., Silva-López, J. O., Guevara, J. V., Carrión., E. A., Salas-Lopez, R., . . . Rojas-Briceño, N. B. (2025). Suitability of the Amazonas

region for beekeeping and its future distribution under climate change scenarios. *Ecological Informatics*, 87, 103082. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2025.103082>

Guzmán, B. K., Cotrina-Sánchez, A., Allauja-Salazar, E. E., Tarifeno, C. M., Sandoval, J. D., Cerna, M. Y., . . . Oliva, M. (2022). Predicting potential distribution and identifying priority areas for conservation of the Yellow-tailed Woolly Monkey (*Lagothrix flavicauda*) in Peru. *Journal for Nature Conservation*, 70, 126302. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jnc.2022.126302>

Guzmán, R. D. (2022). Diversidad morfológica y genética de *Tetragonisca angustula* (Hymenoptera: Apidae) en Cundinamarca, Colombia. *Repositorio Universidad Nacional de Colombia*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/81692>

He, Y., Ma, J., & Chen, G. (2023). Potential geographical distribution and its multi-factor analysis of *Pinus massoniana* in China based on the maxent model. *Ecological Indicators*, 154. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110790>

He, Z. X., Qiao, J. Y., Yan, Q. X., Tan, Z. L., & Wang, M. (2019). Quantitative evaluation of ruminal methane and carbon dioxide formation from formate through C-13 stable isotope analysis in a batch culture system. *animal*, 13(1). doi:<https://doi.org/10.1017/S1751731118000691>

Hegland, P. J., Nielsen, A., Lázaro, A., Bjercknes, A.-L., & Totland, Ø. (2009). How does climate warming affect plant-pollinator interactions? *Ecology letters*, 12(2). doi:<https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01269.x>

Hosseini, N., Mehrabian, A., Nasab, F. K., Mostafavi, H., & Ghorbanpour, M. (2025). Forecasting the future distribution of *Zataria multiflora* in Iran affected by climate change: a MaxEnt approach. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 24(4), 771-783. doi:<https://doi.org/10.1186/s12862-025-02431-6>

Hu, X., Ding, G., Ma, F., Naeem, M., Li, Y., Huang, J., & An, J. (2022). The cuckoo bumble bee, *Bombus chinensis*, has a fragmented habitat, as revealed using the

maximum entropy approach (Hymenoptera: Apidae). *Apidologie*, 53(4), 36.
doi:<https://doi.org/10.1007/s13592-022-00942-5>

Huang, M. J., Hughes, A. C., Xu, C. Y., Miao, B. G., Gao, J., & Peng, Y. Q. (2022). Mapping the changing distribution of two important pollinating giant honeybees across 21000 years. *Glob Ecol Conserv* 39.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.gecco.2022.e02282>

Hurtado-Burrillo, M. (2015). Caracterización molecular y morfométrica del género scaptotrigona (apidae meliponini) en mesoamérica., (pág. Universidad de Murcia). <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=234321>

Info región Redacción. (16 de Febrero de 2024). *Oportunidad de bionegocio en Loreto con abejas sin aguijón*. Info región. https://inforegion.pe/oportunidad-de-bionegocio-en-loreto-con-abejas-sin-aguijon/?utm_source

Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana (IIAP). (12 de Setiembre de 2025). Abejas sin aguijón en peligro: más de la mitad de sus hábitats en la Amazonía están amenazados por la deforestación. *Gobierno del Perú*. <https://www.gob.pe/institucion/iiap/noticias/1245572-abejas-sin-aguijon-en-peligro-mas-de-la-mitad-de-sus-habitats-en-la-amazonia-estan-amenazados-por-la-deforestacion>

Jabiel, S. (2025). Colmenas en resistencia para salvar a las abejas nativas de Perú frente a la pérdida de bosques. *EL PAÍS*. <https://elpais.com/america-futura/2025-06-17/colmenas-en-resistencia-para-salvar-a-las-abejas-nativas-de-peru-frente-a-la-perdida-de-bosques.html>

Jaramillo , M. A., Reyes-Palencia, J., & Jiménez, P. (2024). Floral biology and flower visitors of cocoa (*Theobroma cacao* L.) in the upper Magdalena Valley, Colombia. *Flora*, 313. doi:<https://doi.org/10.1016/j.flora.2024.152480>

Ji, Y. (2021). The geographical origin, refugia, and diversification of honey bees (*Apis* spp.) based on biogeography and niche modeling. *Apidologie*, 52(2), 367-377.
doi:<https://doi.org/10.1007/s13592-020-00826-6>

- Laboratorio de Fisiología Molecular. (2024). *Tetragonisca angustula* (Latreille, 1811). Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas.
- Lee, C. M., Lee, D. S., Kwon, T. S., Athar, M., & Park, Y. S. (2021). Predicting the global distribution of *Solenopsis geminata* (Hymenoptera: Formicidae) under climate change using the MaxEnt model. *Insects*, *12*(3), 229. doi: <https://doi.org/10.3390/insects12030229>
- Leocádio, R. R., Segundo, A. K., & Pessin, G. (2024). A Brazilian native bee (*Tetragonisca angustula*) dataset for computer vision. *Data in Brief*, *55*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.dib.2024.110659>
- León-Bravo, W. E. (2023). Control de plagas para *Tetragonisca Angustula*: Diseño, prototipado y evaluación. *Reto*, *11*(1). doi:<https://doi.org/10.23850/reto.v11i1.5779>
- Li, S., Wang, Z., Zhu, Z., Tao, Y., & Xiang, J. (2023). Predicting the potential suitable distribution area of *Emeia pseudosauteri* in Zhejiang Province based on the MaxEnt model. *Scientific Reports*, *13*(1). doi:<https://doi.org/10.1038/s41598-023-29009-w>
- Lisovsky, A. A., & Dudov, S. V. (2021). Species-distribution modeling: advantages and limitations of its application. 2. MaxEnt. *Biology Bulletin Reviews*, *11*(3), 265-275. doi:10.1134/S2079086421030087
- Macedo, N. S., de Sousa Silveira, Z., Dantas, D. M., dos Santos Barbosa, C. R., Dos Santos, A. T., de Medeiros Brito, T. A., . . . Bezerra da Cunha, F. A. (2025). Chemical characterization, antibacterial and antifungal activity of honey pots and pollen pots obtained from the stingless bee *Tetragonisca angustula* (Latreille, 1811). *Food and Chemical Toxicology*, *197*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fct.2025.115305>
- Manrique, A. J., & Santana, W. C. (2008). Flavonoides, actividades antibacteriana y antioxidante de propóleos de abejas sin aguijón, *Melipona quadrifasciata*, *Melipona compressipes*, *Tetragonisca angustula* y *Nannotrigona* sp. de Brasil y

Venezuela. *Zootecnia Tropical*, 26(2).
https://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S0798-72692008000200010&script=sci_arttext

- Merow, C., Smith, M. J., & Silander Jr, J. A. (2013). A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter. *Ecography*, 36(10), 1058-1069. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2013.07872.x>
- Meza, M. G., Barboza, C. E., Torres, G. C., Cotrina, S. D., Guzman, V. B., Oliva, M., . . . Rojas, B. N. (2020). Predictive modelling of current and future potential distribution of the spectacled bear (*Tremarctos ornatus*) in Amazonas, northeast Peru. *Animals*, 10(10), 1816. doi:<https://doi.org/10.3390/ani10101816>
- Meza, M. G., Rojas-Briceño, N. B., Cotrina, S. A., Oliva-Cruz, M., Olivera, T. C., Hoyos, C. M., . . . Torres, G. C. (2022). Potential current and future distribution of the Long-Whiskered Owlet (*Xenoglaux loweryi*) in Amazonas and San Martin, NW Peru. *Animals*, 12(14), 1794. doi:<https://doi.org/10.3390/ani12141794>
- Meza-Mori, G., Nematollahi, S., Guerra, C. A., Oliva-Cruz, M., Coronel-Castro, E., Guzmán, C. T., & Darvishi, A. (2025). Integrating MaxEnt and InVEST modeling methods to identify priority areas for the conservation of emblematic and endemic wildlife in the Peruvian Tropical Andes. *Global Ecology and Conservation*, e03626. doi:<https://doi.org/10.1016/j.gecco.2025.e03626>
- Miller, J. (2010). Species distribution modeling. *Geography Compass*, 4(6). doi:<https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2010.00351.x>
- Morgan, B., & Guénard, B. (2019). New 30 m resolution Hong Kong climate, vegetation, and topography rasters indicate greater spatial variation than global grids within an urban mosaic. *Earth System Science Data*, 11(3), 1083-1098. doi:<https://doi.org/10.5194/essd-11-1083-2019>
- Naudiyal, N., Wang, J., Ning, W., Gaire, N. P., Peili, S., Yanqiang, W., . . . Ning, S. (2021). Potential distribution of *Abies*, *Picea*, and *Juniperus* species in the sub-

- alpine forest of Minjiang headwater region under current and future climate scenarios and its implications on ecosystem services supply. *Ecological Indicators*, 121, 107131. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107131>
- Neira, P., Blanco-Moreno, J. M., Olave, M., Caballero-López, B., & Sans, F. X. (2024). Effects of agricultural landscape heterogeneity on pollinator visitation rates in Mediterranean oilseed rape. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 363, 108869. doi:<https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108869>
- Oliveira, R. D., Nunes, F. M., Campos, A. P., Vasconcelos, S. M., Roubik, D., Goulart, L. R., & Kerr, W. E. (2004). Genetic divergence in *Tetragonisca angustula* Latreille, 1811 (Hymenoptera, Meliponinae, Trigonini) based on RAPD markers. *Genetics and Molecular Biology*, 27, 181-186. doi:<https://doi.org/10.1590/S1415-47572004000200009>
- Papa, G., Maier, R., Durazzo, A., Lucarini, M., Karabagias, I. K., Plutino, M., . . . Negri, I. (2022). The honey bee *Apis mellifera*: An insect at the interface between human and ecosystem health. *Biology*, 11(2), 233. doi:<https://doi.org/10.3390/biology11020233>
- Peil, A. C., & Aranda, R. (2021). Potential niche modeling distribution and wing geometric morphometrics of *Apis mellifera* in the Brazilian Pantanal. *Sociobiology*, 68(2), e5629-e5629. doi:10.13102/sociobiology.v68i2.5629
- Phillips, S. (2010). A brief tutorial on Maxent. doi:<https://doi.org/10.5531/cbc.linc.3.1.6>
- Phillips, S. J., & Dudík, M. (2008). Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 31(2), 161-175. doi:<https://doi.org/10.1111/j.0906-7590.2008.5203.x>
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological modelling*, 190(3-4), 231-259. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>

- Polce, C., Garratt, M. P., Termansen, M., Ramirez-Villegas, J., Challinor, A. J., Lappage, M. G., . . . Biesmeijer, J. C. (2014). Climate-driven spatial mismatches between British orchards and their pollinators: increased risks of pollination deficits. *Global change biology*, 20(9). doi: <https://doi.org/10.1111/gcb.12577>
- Radović, A., Kapelj, S., & Taylor, L. T. (2025). Utilizing Remote Sensing Data for Species Distribution Modeling of Birds in Croatia. *Diversity*, 17(6), 399. doi:<https://doi.org/10.3390/d17060399>
- Rahimi, E., Barghjelveh, S., & Dong, P. (2021). Estimating potential range shift of some wild bees in response to climate change scenarios in northwestern regions of Iran. *Journal of Ecology and Environment*, 45(1), 14. doi:<https://doi.org/10.1186/s41610-021-00189-8>
- Ramalho, M. (2004). Stingless bees and mass flowering trees in the canopy of Atlantic Forest: a tight relationship. *Acta Botanica Brasilica*, 18, 37-47. doi:<https://doi.org/10.1590/S0102-33062004000100005>
- Ramos, M. (14 de Febrero de 2024). *Loreto: Abejas sin aguijón amazónicas, una oportunidad sostenible de bionegocio*. <https://www.actualidadambiental.pe/loreto-abejas-sin-aguijon-amazonica-una-oportunidad-sostenible-de-bionegocio/>
- Rasmussen, C., & Delgado, C. (2019). Abejas sin aguijón (Apidae: Meliponini) en Loreto, Perú. https://repositorio.iiap.gob.pe/bitstream/20.500.12921/396/1/Delgado_libro_2019a.pdf
- Rocha, V. M., Portela, R. D., Dos Anjos, J. P., De Souza, C. O., & Umsza-Guez, M. A. (2023). Stingless bee propolis: composition, biological activities and its applications in the food industry. *Food Production, Processing and Nutrition*, 5(1). <https://doi.org/10.1186/s43014-023-00146-z>
- Rojas-Briceño, N. B., García, L., Cotrina-Sánchez, A., Goñas, M., Salas López, R., Silva López, J. O., & Oliva-Cruz, M. (2022). Land suitability for cocoa cultivation in

- Peru: AHP and MaxEnt modeling in a GIS environment. *Agronomy*, 12(12), 2930. doi:<https://doi.org/10.3390/agronomy12122930>
- Rosa-Fontana, A. D., Dorigo, A. S., Soares-Lima, H. M., Nocelli, R. C., & Malaspina, O. (2020). Is the water supply a key factor in stingless bees' intoxication?. *Journal of Insect Science*, 20(6), 26. doi:<https://doi.org/10.1093/jisesa/ieaa127>
- Schnase, J. L., Carroll, M. L., Gill, R. L., Tamkin, G. S., Li, J., Strong, S. L., . . . Spradlin, C. S. (2021). Toward a Monte Carlo approach to selecting climate variables in MaxEnt. *PloS one*, 16(3), e0237208. doi: 10.1371/journal.pone.0237208
- Shackleton, K., Alves, D. A., & Ratnieks, F. L. (2018). Organization enhances collective vigilance in the hovering guards of *Tetragonisca angustula* bees. *Behavioral Ecology*, 29(5). doi:<https://doi.org/10.1093/beheco/ary086>
- Shi, X., Wang, J., Zhang, L., Chen, S., Zhao, A., Ning, X., . . . Wang, Z. (2023). Prediction of the potentially suitable areas of *Litsea cubeba* in China based on future climate change using the optimized MaxEnt model. *Ecological Indicators*, 148. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110093>
- Soberon, J., & Peterson, A. T. (2005). Interpretation of models of fundamental ecological niches and species' distributional areas. doi:<https://doi.org/10.17161/bi.v2i0.4>
- Tennakoon, S., Apan, A., & Maraseni, T. (2024). Unravelling the impact of climate change on honey bees: An ensemble modelling approach to predict shifts in habitat suitability in Queensland, Australia. *Ecology and Evolution*, 14(4), e11300. doi:<https://doi.org/10.1002/ece3.11300>
- Toledo-Hernández, E., Pena-Chora, G., Hernández-Velázquez, V. M., Lormendez, C. C., Toribio-Jiménez, J., Romero-Ramírez, Y., & León-Rodríguez, R. (2022). The stingless bees (Hymenoptera: Apidae: Meliponini): a review of the current threats to their survival. *Apidologie*, 53(1), 8. doi:<https://doi.org/10.1007/s13592-022-00913-w>

- Torres, A., Garedew, A., Schmolz, E., & Lamprecht, I. (2004). calorimetric investigation of the antimicrobial action and insight into the chemical properties of “angelita” honey—a product of the stingless bee *Tetragonisca angustula* from Colombia. *Thermochimica Acta*, 415. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tca.2003.06.005>
- Torres, A., Hoffmann, W., & Lamprecht, I. (2007). Thermal investigations of a nest of the stingless bee *Tetragonisca angustula* Illiger in Colombia. *Thermochimica Acta*, 458. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tca.2007.01.024>
- Van Nieuwstadt, M. G., & Iraheta, C. R. (1996). Relation between size and foraging range in stingless bees (Apidae, Meliponinae). *Apidologie*, 27(4). doi:<https://doi.org/10.1051/apido:19960404>
- Velez-Ruiz, R. I., Gonzalez, V. H., & Engel, M. S. (2013). Observations on the urban ecology of the Neotropical stingless bee *Tetragonisca angustula*(Hymenoptera: Apidae: Meliponini). *Journal of Melittology*(15). <https://journals.ku.edu/melittology/article/view/4528/4220>
- Wang, X., Li, Z., Zhang, L., Wang, Y., Liu, Y., & Ma, Y. (2024). The optimized Maxent model reveals the pattern of distribution and changes in the suitable cultivation areas for *Reaumuria songarica* being driven by climate change. *Ecology and Evolution*, 14(7), e70015. doi: <https://doi.org/10.1002/ece3.70015>
- Warren, D. L., & Seifert, S. N. (2011). Ecological niche modeling in Maxent: the importance of model complexity and the performance of model selection criteria. *Ecological applications*, 21(2), 335-342. doi: <https://doi.org/10.1890/10-1171.1>
- Zhang, J., Jiang, F., Li, G., Qin, W., Li, S., Gao, H., . . . Zhang, T. (2019). Maxent modeling for predicting the spatial distribution of three raptors in the Sanjiangyuan National Park, China. *Ecology and evolution*, 9(11), 6643-6654. doi: <https://doi.org/10.1002/ece3.5243>
- Zhang, Y., Tang, J., Ren, G., Zhao, K., & Wang, X. (2021). Global potential distribution prediction of *Xanthium italicum* based on Maxent model. *Scientific reports*, 11(1). doi:<https://doi.org/10.1038/s41598-021-96041-z>

Zizka, A., Silvestro, D., Andermann, T., Azevedo, J., Duarte Ritter, C., Edler, D., . . .
Antonelli, A. (2019). CoordinateCleaner: Standardized cleaning of occurrence
records from biological collection databases. *Methods in Ecology and Evolution*,
10(5), 744-751. doi:10.1111/2041-210X.13152

ANEXOS

Anexo 1.

Constancia del Comité Institucional de Ética de la Investigación (CIEI).



UNIVERSIDAD NACIONAL
TORIBIO RODRÍGUEZ DE
MENDOZA DE AMAZONAS

Comité Institucional de Ética de la
Investigación (CIEI)

CONSTANCIA

CIEI-N° 00116.

El que suscribe, presidente del comité institucional de ética en investigación de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, deja constancia que el proyecto de investigación titulado:

“Estudio de la variabilidad genética y distribución de poblaciones de *Tetragonisca angustula* en altitudes medias y altas de la región Amazonas y caracterización genética de polinizadores de la tribu Meliponini en simpatria.”

Ha sido evaluado por el comité, habiéndose encontrado que el proyecto está elaborado de acuerdo a los estándares propuestos para cumplir con los lineamientos éticos en la investigación y que se ejecutará bajo el patrocinio de (la/el): Laboratorio de Fisiología Molecular (FISIO LAB) del Instituto de Investigación en Ganadería y Biotecnología (IGBI) de la Facultad de Ingeniería Zootecnista, Agronegocios y Biotecnología de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas (UNTRM); bajo la responsabilidad de **RAINER MARCO LÓPEZ LAPA**, como Investigador principal.

Chachapoyas, 27 de noviembre de 2024.

C/c
ciei



Firmado digitalmente por:
TORRES ARMAS ELIAS
ALBERTO FIR 18033004 hard
Motivo: Soy el autor del
documento
Fecha: 02/12/2024 16:21:44-0500

Anexo 3.

*Visita al Meliponario Yantaló (Moyobamba, San Martín) para la georreferenciación de la especie *Tetragonisca angustula*.*



Anexo 4.

*Visita al Meliponario Don Mario (Rioja, San Martín) para la georreferenciación de la especie *Tetragonisca angustula*.*



Anexo 5.

*Identificación morfológica de *Tetragonisca angustula* mediante observación bajo estereoscopio en el Laboratorio de Fisiología Molecular (FISIO LAB).*



Anexo 6.

Registros de presencia de *Tetragonisca angustula* obtenidos en campo.

Sample ID	Genus	Species	Sex	Collection Date	País	Región	Provincia	Sector	Lugar exacto	Latitud	Longitud	Elevación (m.s.n.m)
MLP00007	Tetragonisca	angustula	SELECCION	10-04-2024	Perú	Amazonas	Bongará	Florida	Beirut	5°48'59.8"S	77°50'42.8"W	1768
MLP00015	Tetragonisca	angustula	SELECCION	10-04-2024	Perú	Amazonas	Bongará	Florida	Beirut	5°49'03.8"S	77°50'53.6"W	1844
MLP00033	Tetragonisca	angustula	SELECCION	10-04-2024	Perú	Amazonas	Bongará	Florida	Vulcaniza	5°47'04.8"S	77°53'15.4"W	1730
MLP00037	Tetragonisca	angustula	SELECCION	10-04-2024	Perú	Amazonas	Bongará	Yambrasbamba	La Esperanza	5°42'28.1"S	77°54'22.1"W	2012
MLP00049	Tetragonisca	angustula	SELECCION	10-04-2024	Perú	Amazonas	Bongará	Yambrasbamba	Santa Rosa	5°40'57.5"S	77°55'20.7"W	2163
MLP00057	Tetragonisca	angustula	SELECCION	10-04-2024	Perú	Amazonas	Bongará	Yambrasbamba	La Florida	5°40'16.5"S	77°55'45.8"W	1974
MLP00061	Tetragonisca	angustula	SELECCION	20-04-2024	Perú	Amazonas	Rodríguez de Mendoza	San Nicolas	Piscigranja Caserío Michina	6°22'40.47"S	77°31'08.38"W	1571
MLP00065	Tetragonisca	angustula	SELECCION	20-04-2024	Perú	Amazonas	Rodríguez de Mendoza	San Nicolas	Piscigranja Caserío Michina	6°22'39.64"S	77°31'07.32"W	1571
MLP00068	Tetragonisca	angustula	SELECCION	20-04-2024	Perú	Amazonas	Rodríguez de Mendoza	Huambo	Sargento	6°24'42.20"S	77°32'56.75"W	1602
MLP00075	Tetragonisca	angustula	SELECCION	20-04-2024	Perú	Amazonas	Rodríguez de Mendoza	Huambo	Centro Recreacional Los Milagros	6°24'42"S	77°32'56"W	1670
MLP00083	Tetragonisca	angustula	SELECCION	20-04-2024	Perú	Amazonas	Rodríguez de Mendoza	Huambo	Centro Recreacional Los Milagros	6°25'39"S	77°31'57"W	1663
MLP00088	Tetragonisca	angustula	SELECCION	20-04-2024	Perú	Amazonas	Rodríguez de Mendoza	San Nicolás	Cementerio	6°23'56"S	77°28'47"W	1584
MLP00100	Tetragonisca	angustula	SELECCION	20-04-2024	Perú	Amazonas	Rodríguez de Mendoza	Santa Rosa	Ramos 1	6°26'49"S	77°28'36"W	1852
MLP00107	Tetragonisca	angustula	SELECCION	20-04-2024	Perú	Amazonas	Rodríguez de Mendoza	Chirimoto	Zarumilla	6°34'01"S	77°22'44"W	1171
MLP00115	Tetragonisca	angustula	SELECCION	21-04-2024	Perú	Amazonas	Mariscal Cáceres	Huicungo	Abralajas	6°28'50"S	77°16'09"W	2024
MLP00119	Tetragonisca	angustula	SELECCION	21-04-2024	Perú	Amazonas	Mariscal Cáceres	Huicungo	Abralajas	6°28'50"S	77°16'10"W	2030
MLP00125	Tetragonisca	angustula	SELECCION	21-04-2024	Perú	Amazonas	Mariscal Cáceres	Huicungo	Abralajas	6°28'40"S	77°16'16"W	2072
MLP00131	Tetragonisca	angustula	SELECCION	21-04-2024	Perú	Amazonas	Mariscal Cáceres	Huicungo	Abralajas	6°28'41"S	77°16'21"W	2085
MLP00148	Tetragonisca	angustula	SELECCION	21-04-2024	Perú	Amazonas	Mariscal Cáceres	Huicungo	Abralajas	6°28'30"S	77°16'08"W	1975
MLP00156	Tetragonisca	angustula	SELECCION	21-04-2024	Perú	Amazonas	Mariscal Cáceres	Huicungo	La Unión	6°34'26"S	77°13'01"W	1327
MLP00186	Tetragonisca	angustula	SELECCION	22-04-2024	Perú	Amazonas	Mariscal Cáceres	Huicungo	Mashuyacu	6°30'56"S	77°14'46"W	1526
MLP00252	Tetragonisca	angustula	SELECCION	25-05-2024	Perú	Amazonas	Bagua	Imaza	Yamayakat	5°03.2986"S	78°20.4827"W	401
MLP00253	Tetragonisca	angustula	SELECCION	26-05-2024	Perú	Amazonas	Condorcanqui	Río Santiago	Yutupis	4°03.5257"S	77°45.6481"W	206
MLP00275	Tetragonisca	angustula	SELECCION	27-05-2024	Perú	Amazonas	Datem del Marañón	Manseriche	Santa Rosa	4°36.7692"S	77°36.1943"W	177
MLP00289	Tetragonisca	angustula	SELECCION	28-05-2024	Perú	Cajamarca	Jaén	Jaén	Finca La Arboleda	5°44.3933"S	78°50.4124"W	1210
MLP00383	Tetragonisca	angustula	SELECCION	29-05-2024	Perú	Cajamarca	San Ignacio	San Ignacio	ARC San Ignacio	5°08.7729"S	79°00.3195"W	1284
MLP00392	Tetragonisca	angustula	SELECCION	29-05-2024	Perú	Cajamarca	San Ignacio	San Ignacio	Finca Los Pinos	5°09.2361"S	79°00.8385"W	1334
MLP00424	Tetragonisca	angustula	SELECCION	29-05-2024	Perú	Cajamarca	San Ignacio	San Ignacio	Finca Mielosa	5°06.9232"S	79°00.3035"W	1348
	Tetragonisca	angustula		24/03/2025	Perú	San Martín	Rioja	Segunda Jerusalén	Meliponario Don Mario	6°02.0174"S	77°16.0020"W	965
	Tetragonisca	angustula		25/03/2025	Perú	San Martín	Moyobamba	Yantaló	Museo Yantaló	5°58.2170"S	77°01.5628"W	907