

1 The Biologist (Lima), 2026, vol. 24 (1), XX-XX.

2 DOI: <https://doi.org/10.62430/rtb20262412147>

3 Este artículo es publicado por la revista The Biologist (Lima) de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemática, Universidad
4 Nacional Federico Villarreal, Lima, Perú. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia
5 Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0) [<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es>] que
6 permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada de su
7 fuente original.



8

9

ORIGINAL ARTICLE / ARTÍCULO ORIGINAL

10

Multi-criterion evaluation of territorial suitability for beekeeping using geographic

11

information systems in the Alto Pozuzo basin, Peru

12

Evaluación multicriterio de la aptitud territorial para la apicultura mediante sistemas de

13

información geográfica en la cuenca del Alto Pozuzo, Perú

14

Esteban Navarro-Espinoza¹ & José Iannacone^{2,3}

15

¹ Facultad de Ingeniería Geográfica, Ambiental y Ecoturismo (FIGAE). Escuela Universitaria
16 de Postgrado. Universidad Nacional Federico Villarreal, Lima, Perú.

17

² Facultad de Ciencias Naturales y Matemática (FCNM). Grupo de investigación de

18

Sostenibilidad Ambiental (GISA). Escuela Universitaria de Postgrado. Universidad Nacional

19

Federico Villarreal (UNFV), Lima, Perú.

20

³ Facultad de Ciencias Biológicas. Universidad Ricardo Palma. Lima. Peru.

21

* Corresponding author: enavarroe@undac.edu.pe

22

Running Head: Territorial suitability for beekeeping using geographic information systems

23


Navarro-Espinoza & Iannacone

24

25

Esteban Navarro-Espinoza:  <https://orcid.org/0000-0002-2918-2966>

26

José Iannacone:  <https://orcid.org/0000-0003-3699-4732>

27

28

ABSTRACT

29

The identification of suitable areas for beekeeping is essential for territorial planning and the

30

sustainable management of ecosystem services associated with pollination. This study aimed

31 to evaluate territorial suitability for beekeeping in the Alto Pozuzo watershed, Peru, through
32 the integration of Geographic Information Systems (GIS), Multi-Criteria Evaluation (MCE),
33 and the Analytic Hierarchy Process (AHP). The spatial model integrated variables related to
34 land use and land cover, elevation, slope, temperature, precipitation, and distance to water
35 sources. The criteria were standardized and weighted using expert judgment, generating a
36 continuous beekeeping suitability index in ArcGIS 10.8. Additionally, spatial autocorrelation
37 analyses (Moran's I and LISA) and territorial validation were conducted using productive
38 information from 40 georeferenced apiaries. The land use and land cover classification
39 achieved an overall accuracy of 80.0% and a Kappa coefficient of 0.76. The results revealed a
40 heterogeneous spatial distribution of beekeeping suitability, with medium and high suitability
41 categories predominating (67.94% of the watershed area). The most favorable areas were
42 associated with diverse vegetation cover, intermediate climatic conditions, and proximity to
43 water resources. Furthermore, significant spatial clusters of high suitability were identified,
44 along with a positive relationship between the territorial suitability index and annual honey
45 production. It is concluded that the integration of GIS, MCE, AHP, and spatial analysis
46 constitutes a robust and replicable approach for the sustainable planning of beekeeping in
47 tropical montane ecosystems.

48 **Keywords:** Beekeeping - territorial suitability - Geographic Information Systems -
49 multicriteria evaluation - Analytic Hierarchy Process - spatial autocorrelation

50

51 **RESUMEN**

52 La identificación de zonas aptas para la apicultura es fundamental para la planificación
53 territorial y la gestión sostenible de los servicios ecosistémicos asociados a la polinización. El
54 objetivo del estudio fue evaluar la aptitud territorial para la apicultura en la cuenca del Alto
55 Pozuzo, Perú, mediante la integración de Sistemas de Información Geográfica (SIG),
56 Evaluación Multicriterio (EMC) y el Proceso Analítico Jerárquico (AHP). El modelo espacial
57 integró variables relacionadas con uso y cobertura del suelo, altitud, pendiente, temperatura,
58 precipitación y distancia a fuentes de agua. Los criterios fueron estandarizados y ponderados
59 mediante juicio de expertos, generándose un índice continuo de aptitud apícola en ArcGIS 10.8.
60 Adicionalmente, se aplicaron análisis de autocorrelación espacial (Moran's I y LISA) y
61 contrastación territorial utilizando información productiva de 40 apiarios georreferenciados.
62 La clasificación de uso y cobertura del suelo presentó una exactitud global de 80,0 % y un

63 coeficiente Kappa de 0,76. Los resultados evidenciaron una distribución territorial heterogénea
64 de la aptitud apícola, con predominio de categorías media y alta (67,94 % de la superficie de
65 la cuenca). Las zonas más favorables se asociaron con cobertura vegetal diversa, condiciones
66 climáticas intermedias y proximidad a recursos hídricos. Asimismo, se identificaron
67 agrupamientos espaciales significativos de alta aptitud y una relación positiva entre el índice
68 de aptitud territorial y la producción anual de miel. Se concluye que la integración de SIG,
69 EMC, AHP y análisis espacial constituye un enfoque robusto y replicable para la planificación
70 sostenible de la apicultura en ecosistemas montanos tropicales.

71 **Palabras clave:** Apicultura - aptitud territorial - autocorrelación espacial - evaluación
72 multicriterio - Sistemas de Información Geográfica

73

74 INTRODUCCIÓN

75 La apicultura constituye una actividad estratégica para la conservación de los servicios
76 ecosistémicos asociados a la polinización y al mantenimiento de la biodiversidad. La
77 disponibilidad de recursos florales, la estructura del paisaje y las condiciones ambientales
78 influyen directamente en el desarrollo de las colonias de abejas y en la productividad apícola,
79 especialmente en ecosistemas montanos tropicales, caracterizados por elevada heterogeneidad
80 ecológica (Abou-Shaara, 2019; Sarı *et al.*, 2020).

81 Sin embargo, procesos como el cambio de uso del suelo, la expansión agrícola y la
82 fragmentación del paisaje han reducido la disponibilidad de hábitats seminaturales y recursos
83 florales necesarios para la actividad apícola. Estas transformaciones territoriales afectan la
84 estabilidad ecológica de los sistemas de polinización y limitan la sostenibilidad productiva de
85 los apiarios, evidenciando la necesidad de incorporar herramientas de planificación territorial
86 orientadas a identificar áreas ambientalmente favorables para la apicultura (Fotso-Kamga *et*
87 *al.*, 2024).

88 En este contexto, la integración de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y técnicas de
89 Evaluación Multicriterio (EMC) ha sido ampliamente utilizada para modelar aptitud territorial
90 en actividades dependientes de variables ambientales. Diversos estudios han aplicado el
91 Proceso Analítico Jerárquico (AHP) para evaluar aptitud apícola mediante variables
92 relacionadas con uso y cobertura del suelo, altitud, pendiente, temperatura, precipitación y
93 proximidad a fuentes de agua (Mercan & Acıbuca, 2024; Roque *et al.*, 2024).

94 No obstante, gran parte de las investigaciones previas se limita a la generación de mapas de
95 aptitud basados en clasificaciones discretas, sin incorporar análisis de autocorrelación espacial
96 ni contrastación territorial mediante información productiva georreferenciada de apiarios.
97 Asimismo, en el contexto peruano aún son escasos los estudios orientados a evaluar la aptitud
98 apícola mediante enfoques espaciales integrados en ecosistemas montanos tropicales (Cotrina-
99 Sánchez *et al.*, 2023).

100 La cuenca Alto Pozuzo, ubicada en la provincia de Oxapampa y perteneciente a la Reserva de
101 Biosfera Oxapampa–Asháninka–Yánesha, presenta una elevada diversidad biológica y
102 heterogeneidad ambiental que favorecen el desarrollo de la apicultura. Sin embargo, la
103 localización de apiarios se realiza frecuentemente sin criterios técnicos de evaluación
104 territorial, limitando el aprovechamiento sostenible de los recursos ambientales y la
105 planificación espacial de la actividad (Municipalidad Provincial de Oxapampa, 2024).

106 En este contexto, el objetivo del estudio fue evaluar la aptitud territorial para la apicultura en
107 la cuenca del Alto Pozuzo mediante la integración de Sistemas de Información Geográfica,
108 Evaluación Multicriterio y el Proceso Analítico Jerárquico, incorporando además análisis de
109 autocorrelación espacial y contrastación territorial con información productiva de apiarios
110 georreferenciados. El estudio propone un enfoque espacial integrado orientado a fortalecer la
111 planificación territorial y la gestión sostenible de la apicultura en ecosistemas montanos
112 tropicales.

113

114 **MATERIALES Y MÉTODOS**

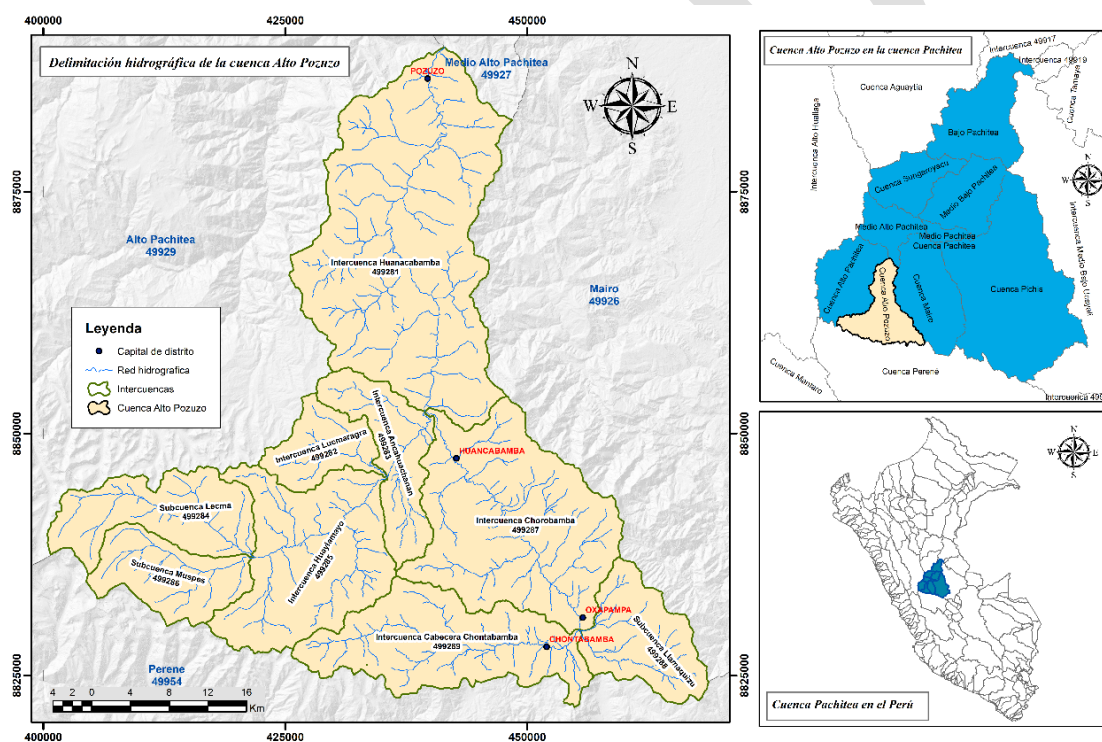
115 **Área de estudio**

116 El estudio se desarrolló en la cuenca Alto Pozuzo, ubicada en la provincia de Oxapampa, región
117 Pasco, en la zona central del Perú (Figura 1). El área forma parte de la cuenca del río Pachitea
118 y de la Reserva de Biosfera Oxapampa–Asháninka–Yánesha, reconocida por su elevada
119 diversidad biológica y heterogeneidad ambiental. La cuenca presenta una superficie
120 aproximada de 191 503 ha y un gradiente altitudinal entre 711 y 5 028 msnm, configurando
121 una marcada variabilidad climática, topográfica y ecológica.

122 La cobertura del territorio está conformada principalmente por bosques montanos, vegetación
123 secundaria, pastizales y áreas agrícolas, condiciones que favorecen la disponibilidad de
124 recursos florales y el desarrollo de la actividad apícola. Sin embargo, los cambios de uso del

125 suelo y la expansión de actividades agropecuarias han modificado parcialmente la estructura
126 del paisaje y reducido áreas seminaturales relevantes para la provisión de néctar y polen.

127 La selección de la cuenca Alto Pozuzo como unidad de análisis responde a su importancia
128 ecológica y a la limitada disponibilidad de estudios espaciales orientados a evaluar aptitud
129 apícola en ecosistemas montanos tropicales del Perú (Cotrina-Sánchez *et al.*, 2023). Además,
130 la presencia de sistemas agroforestales y actividades apícolas de pequeña escala convierte a la
131 cuenca en un territorio representativo para el análisis espacial de la aptitud territorial para la
132 apicultura. Asimismo, el trabajo de campo, la recopilación de información espacial y la
133 validación territorial se desarrollaron durante el año 2025.



134
135 **Figura 1.** Área de estudio: cuenca del Alto Pozuzo, provincia de Oxapampa, región Pasco,
136 Perú.

137 Datos espaciales y variables de análisis

138 La modelación de la aptitud apícola se desarrolló mediante la integración de información
139 geoespacial proveniente de imágenes satelitales, modelos digitales de elevación y cartografía
140 temática oficial. Se consideraron variables ecológicas, climáticas, topográficas e hidrológicas
141 relacionadas con la disponibilidad de recursos florales y las condiciones ambientales favorables
142 para el desarrollo de colonias de *Apis mellifera* Linnaeus, 1758 (Mercan & Acıbuca, 2024).

143 La información de uso y cobertura del suelo fue obtenida a partir de imágenes multiespectrales
 144 Sentinel-2B MSI correspondientes al periodo seco de 2025, seleccionadas por presentar baja
 145 cobertura nubosa (<10 %). Se utilizaron las bandas espectrales B2, B3, B4 y B8 con resolución
 146 espacial de 10 m para la discriminación de coberturas vegetales relevantes para la evaluación
 147 de aptitud apícola.

148 Las variables topográficas fueron derivadas del Modelo Digital de Elevación ALOS PALSAR
 149 (12,5 m), a partir del cual se generaron capas de altitud, pendiente y distancia euclidiana a la
 150 red hídrica mediante herramientas de análisis espacial en ArcGIS 10.8. Asimismo, se
 151 incorporaron variables climáticas de temperatura media anual y precipitación anual
 152 provenientes de WorldClim versión 2.1.

153 Los criterios integrados en el modelo incluyeron uso y cobertura del suelo, altitud, pendiente,
 154 temperatura media anual, precipitación anual y distancia a fuentes de agua, seleccionados en
 155 función de su influencia sobre la disponibilidad de néctar y polen y las condiciones ecológicas
 156 requeridas para la actividad apícola (Salehizadeh *et al.*, 2020; Sari *et al.*, 2020).

157 Todos los datos espaciales fueron reproyectados al sistema WGS 84 / UTM zona 18 Sur y
 158 estandarizados a una resolución espacial de 10 m para garantizar compatibilidad geométrica y
 159 consistencia espacial en el análisis multicriterio (Tabla 1).

160 **Tabla 1.** Criterios seleccionados para el modelado de aptitud apícola.

Criterio	Importancia	Autor que lo recomienda
Temperatura óptima	Rango de temperatura apta entre 10.1°C y 28°C	Abou-Shaara (2014); Czekońska <i>et al.</i> (2023)
Precipitación	La precipitación esperada oscila entre 1275 mm y 1800 mm anuales	Sari & Ceylan (2017); Roque <i>et al.</i> (2024)
Distancia a cuerpos de agua	Distancia máxima de 500 m de una fuente de agua limpia	Campana <i>et al.</i> (2019); Sari & Ceylan (2017)
Disponibilidad de flora melífera	Presencia alta de plantas melíferas, en un radio de 2-3 km alrededor del colmenar	Sari & Ceylan (2017)
Altitud	Ubicación de los colmenares entre 0 y 2500 msnm	Czekońska <i>et al.</i> (2023)
Pendiente	La pendiente afecta la accesibilidad, la estabilidad del terreno y el manejo de colmenas	Campana <i>et al.</i> (2019)

161

162 **Clasificación del uso y cobertura del suelo (LULC)**

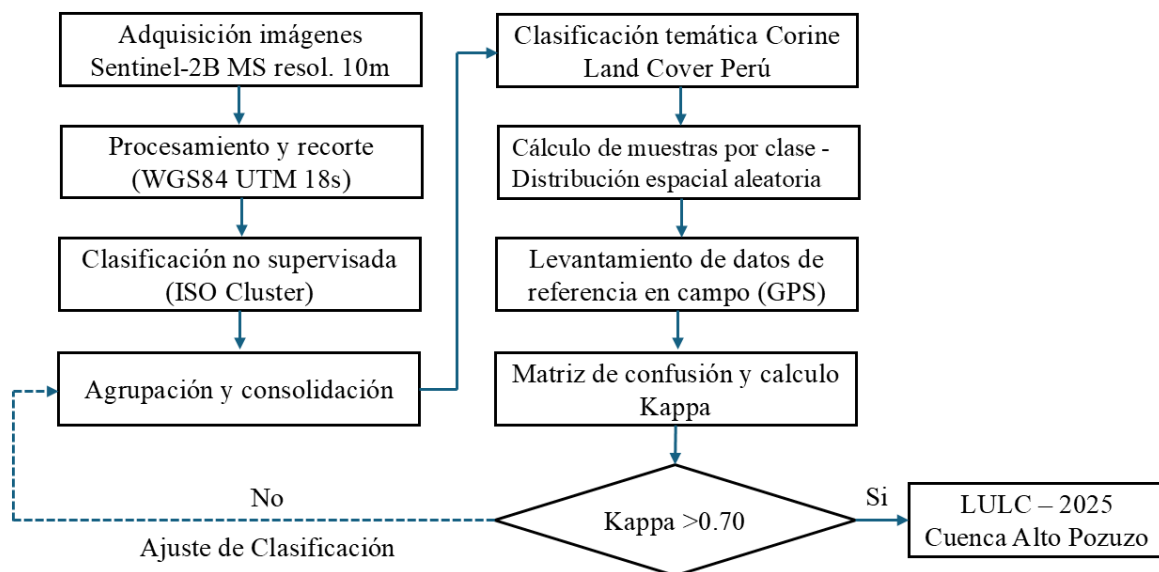
163 La clasificación del uso y cobertura del suelo (LULC) se realizó utilizando imágenes
 164 multiespectrales Sentinel-2B MSI correspondientes al año 2025, con resolución espacial de 10
 165 m. Las imágenes fueron preprocesadas mediante recorte y estandarización espacial en el
 166 sistema de coordenadas WGS 84 / UTM zona 18 Sur.

167 La clasificación temática se desarrolló mediante el algoritmo ISO Cluster Unsupervised
168 Classification en ArcGIS 10.8, seguida de interpretación visual y reclasificación temática
169 utilizando la metodología CORINE Land Cover adaptada al Perú. Se identificaron categorías
170 relacionadas con bosques, vegetación secundaria, áreas agrícolas, pastizales, pajonales
171 andinos, cuerpos de agua y zonas urbanizadas.

172 La delimitación y ajuste de las clases se complementaron mediante interpretación visual de
173 imágenes de alta resolución y verificación de campo utilizando puntos georreferenciados
174 distribuidos aleatoriamente según representatividad espacial de cada cobertura.

175 La precisión temática de la clasificación fue evaluada mediante una matriz de confusión,
176 calculándose exactitud global, exactitud del productor, exactitud del usuario y coeficiente
177 Kappa (Rwanga & Ndambuki, 2017). La clasificación alcanzó una exactitud global de 80,0 %
178 y un coeficiente Kappa de 0,76, indicando concordancia sustancial entre el mapa clasificado y
179 los datos de referencia.

180 El mapa final de uso y cobertura del suelo fue incorporado como criterio ecológico dentro del
181 modelo multicriterio para la evaluación de la aptitud territorial para la apicultura (Figura 2).



183 **Figura 2.** Flujo metodológico para la clasificación y validación del uso y cobertura del suelo
184 (LULC).

185 **Evaluación multicriterio y ponderación de criterios mediante AHP**

186 La evaluación multicriterio se desarrolló mediante la integración de variables ambientales y
187 territoriales relacionadas con la aptitud apícola utilizando el Proceso Analítico Jerárquico

188 (Analytic Hierarchy Process, AHP), metodología ampliamente aplicada en estudios de aptitud
 189 territorial y toma de decisiones espaciales multicriterio (Saaty, 1980). Los criterios
 190 considerados incluyeron uso y cobertura del suelo, distancia a fuentes de agua, altitud,
 191 temperatura, precipitación y pendiente, seleccionados en función de su influencia sobre la
 192 disponibilidad de recursos florales y las condiciones ecológicas favorables para la actividad
 193 apícola.

194 La ponderación de criterios se realizó mediante matrices de comparación por pares construidas
 195 a partir de juicios de expertos y apicultores con experiencia en la cuenca Alto Pozuzo,
 196 utilizando la escala fundamental de Saaty con valores entre 1 y 9 (Tabla 2). Se evaluaron 45
 197 matrices de comparación, seleccionándose únicamente aquellas con relación de consistencia
 198 (CR) inferior a 0,10 para garantizar coherencia en los juicios emitidos. Posteriormente, las
 199 matrices consistentes fueron integradas mediante la media geométrica elemento a elemento
 200 para obtener una matriz de comparación consensuada, procedimiento ampliamente utilizado en
 201 procesos de decisión multicriterio grupal (Tabla 3).

202 Los pesos relativos de cada criterio fueron obtenidos mediante normalización matricial y
 203 cálculo del vector de prioridades. La consistencia de los juicios fue evaluada mediante el índice
 204 de consistencia (CI) y la relación de consistencia (CR), adoptándose como criterio de
 205 aceptación valores de $CR \leq 0,10$ (Saaty & Vargas, 1991). Los pesos obtenidos fueron
 206 incorporados posteriormente en el modelo de combinación lineal ponderada para la generación
 207 del índice espacial de aptitud apícola.

208 **Tabla 2.** Estructura general de la matriz de comparación por pares del AHP

A	C1	C2	C3	...	Cn
C1	a ₁₁	a ₁₂	a ₁₃	...	a _{1n}
C2	a ₂₁	a ₂₂	a ₂₃	...	a _{2n}
C3	a ₃₁	a ₃₂	a ₃₃	...	a _{3n}
...
Cn	a _{n1}	a _{n2}	a _{n3}	...	a _{nn}

209

210 **Tabla 3.** Escala fundamental de importancia relativa propuesta por Saaty (1980).

Menos importancia				Igual	Más importancia			
Extrema	Muy fuerte	Fuerte	Moderada	importancia	Moderada	Fuerte	Muy fuerte	Extrema
1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9

211

212 De las 35 matrices elaboradas por expertos y apicultores, únicamente se seleccionaron aquellas
213 con relación de consistencia (CR) inferior a 0,10. Las matrices válidas fueron posteriormente
214 integradas mediante la media geométrica elemento a elemento para generar una matriz
215 consensuada de comparación por pares.

216 La matriz normalizada se genera dividiendo cada elemento de la matriz de comparación por
217 pares entre la suma de los valores de su respectiva columna, de acuerdo con la siguiente
218 expresión (Sarı & Şen, 2021):

$$219 \quad a_{ij}^1 = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad \dots (1)$$

220 Posteriormente, los pesos relativos de cada criterio (w_i) se obtienen mediante el promedio de
221 los valores normalizados por fila (Sarı & Şen, 2021):

$$222 \quad w_i = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n a'_{ij} \quad \dots (2)$$

223 Para evaluar la consistencia de los juicios emitidos se calculó el valor propio máximo (λ_{max})
224 de la matriz de comparación mediante la siguiente expresión (Saaty, 1980):

$$225 \quad \lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} w_j}{w_i} \quad \dots (3)$$

226 El índice de consistencia (CI) es un indicador de confiabilidad de valores de preferencia dados
227 y ponderaciones calculadas; el CI se calcula con la Fórmula 4 (Saaty, 1994).

$$228 \quad CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad \dots (4)$$

229 Finalmente, el Ratio de Consistencia (CR) se calcula, según Saaty & Vargas (1991); valores
230 superiores a 0,1 requieren una revisión de los valores de preferencia incluidos en la matriz de
231 comparación por pares (Saaty, 1980).

$$232 \quad CR = \frac{CI}{RI} \quad \dots (5)$$

233 El índice de consistencia aleatoria (RI) adoptado para seis criterios fue 1,24, de acuerdo con
234 Saaty (1980) y Cotrina-Sánchez *et al.* (2023).

235 Los juicios de comparación correspondientes a las matrices consistentes ($CR \leq 0,10$) fueron
236 integrados mediante la media geométrica de las comparaciones pareadas, procedimiento
237 utilizado en aplicaciones AHP para sintetizar evaluaciones individuales conservando la

238 proporcionalidad y propiedad recíproca de las matrices de comparación (Saaty, 1987). La
239 matriz sintetizada obtenida fue utilizada para el cálculo de los pesos relativos del modelo
240 multicriterio.

241 **Modelamiento espacial de la aptitud apícola**

242 El modelamiento espacial de la aptitud apícola se desarrolló mediante la integración de
243 variables ecológicas, climáticas, topográficas e hidrológicas en un entorno de Sistemas de
244 Información Geográfica (SIG). Para ello, se aplicó una combinación lineal ponderada
245 (Weighted Linear Combination, WLC) utilizando los pesos derivados del Proceso Analítico
246 Jerárquico (AHP), metodología ampliamente utilizada en estudios de aptitud territorial y
247 evaluación multicriterio (Estoque & Murayama, 2010; Sari *et al.*, 2020).

248 Previo a la integración multicriterio, las variables fueron estandarizadas en una escala continua
249 entre 0 y 1, donde los valores cercanos a 1 representan condiciones más favorables para la
250 actividad apícola. Los rangos de aptitud ecológica fueron definidos considerando antecedentes
251 científicos, requerimientos ecológicos de *A. mellifera* y características ambientales de la cuenca
252 Alto Pozuzo (Abou-Shaara, 2014; Salehizadeh *et al.*, 2020; Sari *et al.*, 2020). Los criterios
253 ecológicos utilizados en el modelo espacial se presentan en la Tabla 4 y Figura 3.

254 Posteriormente, las capas normalizadas fueron integradas mediante álgebra de mapas
255 utilizando la siguiente expresión:

$$256 \quad IATA = \sum_{i=1}^n (W_i \times X_i) \quad \dots (6)$$

257 Donde:

258 $IATA$: Corresponde al índice de aptitud territorial apícola.

259 W_i : Representa el peso asignado al criterio i .

260 X_i : Corresponde al valor normalizado de cada criterio i .

261 $i = 1, 2, \dots, 6$ representa los criterios integrados en el modelo multicriterio.

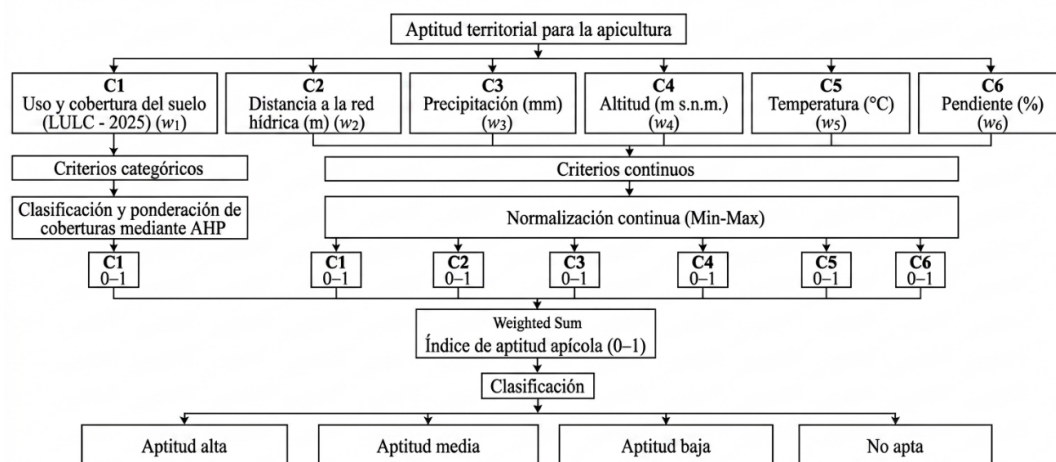
262 Se incorporaron restricciones espaciales asociadas a áreas incompatibles para la instalación de
263 apiarios, incluyendo zonas urbanizadas, infraestructura vial y sectores clasificados como “No
264 apta” según los criterios definidos en la Tabla 4. Estas restricciones fueron integradas como
265 máscaras binarias dentro del modelo espacial con el propósito de excluir áreas con elevada

266 perturbación antrópica y limitada disponibilidad de recursos florales (Asensio *et al.*, 2016;
 267 Şişman & Aydınoglu, 2020).

268 Finalmente, el índice continuo de aptitud apícola fue reclasificado en categorías ordinales de
 269 aptitud territorial (alta, media, baja y no apta), facilitando su interpretación espacial y
 270 aplicación en procesos de planificación territorial y gestión sostenible de la apicultura.

271 **Tabla 4.** Rangos de aptitud ecológica utilizados en el modelo espacial apícola.

Criterios ambientales y territoriales	Alta	Media	Baja	No apta
Uso y cobertura del suelo (LULC)	Bosques secundarios, matorrales	Pastizales, bosques densos	Cultivos, plantaciones forestales	Áreas urbanas, carreteras, asentamientos humanos
Distancia a la red hídrica (m)	<500	500–1000	1000–2000	>2000
Altitud (msnm)	500–1500	1500–2500	2500–3200	<500 o >3200
Temperatura (°C)	20–28	15–20	28–32	<15 o >32
Precipitación (mm/año)	1000–2000	800–1000 / 2000–2500	600–800 / 2500–3000	<600 o >3000
Pendiente (%)	0–15	15–30	30–45	>45



272 **Figura 3.** Modelo conceptual del proceso de evaluación multicriterio para la aptitud apícola.
 273

274 **Análisis espacial y validación del modelo**

275 Con el propósito de evaluar la coherencia territorial del modelo multicriterio y la distribución
 276 espacial de la aptitud apícola, se aplicaron técnicas de estadística espacial y procedimientos de
 277 validación utilizando información productiva de apiarios georreferenciados.

278 La estructura espacial del índice de aptitud apícola fue evaluada mediante autocorrelación
 279 espacial global utilizando el estadístico Global Moran's I, con el propósito de identificar
 280 patrones espaciales agrupados, dispersos o aleatorios en la distribución del índice (Correa *et*
 281 *al.*, 2021). Complementariamente, se aplicaron Indicadores Locales de Asociación Espacial

282 (LISA) para identificar agrupamientos espaciales significativos de alta y baja aptitud, así como
283 sectores con comportamiento espacial atípico. El análisis espacial se desarrolló utilizando
284 herramientas de estadística espacial implementadas en ArcGIS 10.8.

285 La validación territorial del modelo se realizó mediante el análisis de la relación entre el índice
286 de aptitud apícola y la producción anual de miel registrada en 40 apiarios georreferenciados
287 distribuidos en diferentes unidades ambientales de la cuenca del Alto Pozuzo. La selección de
288 los apiarios consideró representatividad espacial y disponibilidad de información productiva
289 consistente.

290 Posteriormente, se evaluaron diferencias del índice de aptitud apícola entre los radios de
291 pecoreo de 1000, 2000 y 3000 m mediante la prueba no paramétrica de Kruskal–Wallis.
292 Asimismo, la relación entre el índice de aptitud territorial y la producción anual de miel fue
293 analizada mediante pruebas de correlación estadística, previa evaluación de normalidad de las
294 variables. Estos procedimientos permitieron evaluar la coherencia espacial y la capacidad
295 explicativa del modelo multicriterio respecto a la distribución territorial del potencial apícola
296 y al comportamiento productivo observado en los apiarios evaluados.

297 **Aspectos éticos:** Se garantizó la confidencialidad de la información proporcionada por los
298 apicultores y el uso exclusivamente académico y científico de los datos. Asimismo, la
299 investigación no involucró intervenciones directas que generaran efectos adversos sobre el
300 entorno o las actividades productivas locales.

301

302 **RESULTADOS**

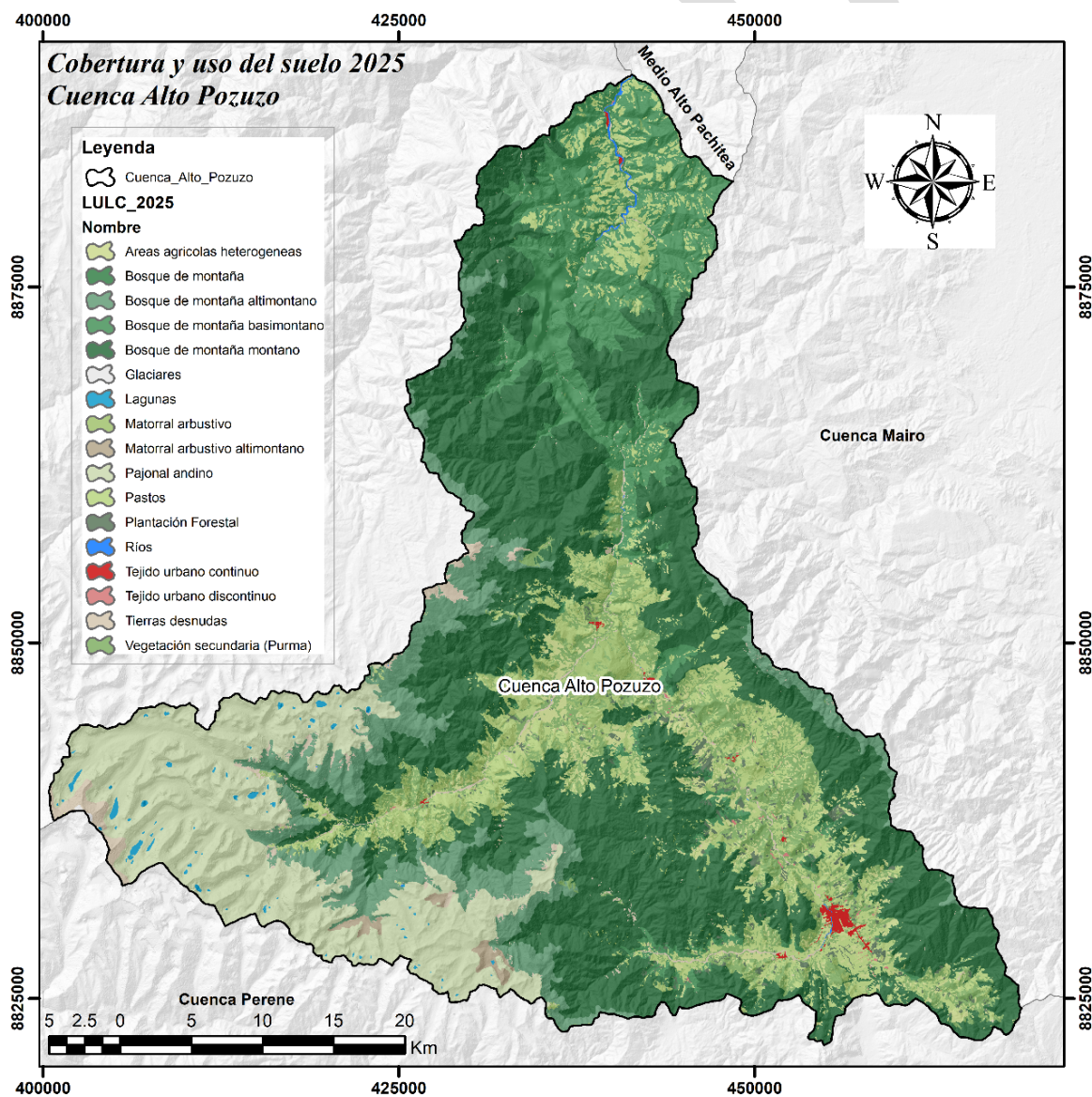
303 **Uso y cobertura del suelo**

304 La clasificación del uso y cobertura del suelo evidenció una marcada heterogeneidad espacial
305 en la cuenca Alto Pozuzo, asociada a la interacción entre ecosistemas montaños tropicales y
306 áreas intervenidas por actividades antrópicas (Figura 4). Predominaron las coberturas naturales,
307 principalmente bosque denso alto de tierra firme (60,38 %) y pajonal andino (14,90 %),
308 seguidas por pastizales (7,74 %) y vegetación secundaria (7,20 %) (Tabla 5). Estas coberturas
309 conforman una matriz ecológica favorable para la disponibilidad de recursos florales y la
310 conectividad del paisaje, factores relevantes para el desarrollo de la actividad apícola.

311 Las coberturas asociadas a vegetación secundaria, matorral arbustivo y pastos presentaron
312 mayor importancia relativa dentro del modelo multicriterio debido a su contribución potencial

313 a la disponibilidad de recursos florales y conectividad ecológica del paisaje. Estas unidades
314 territoriales favorecen la provisión de néctar y polen para *A. mellifera*, especialmente en
315 sectores con heterogeneidad vegetal y menor grado de perturbación antrópica. En contraste, las
316 áreas agrícolas heterogéneas, plantaciones forestales y zonas urbanizadas presentaron menor
317 contribución relativa dentro del modelo de aptitud apícola.

318 La clasificación temática alcanzó una exactitud global de 80,0 % y un coeficiente Kappa de
319 0,76, indicando concordancia sustancial entre las categorías clasificadas y los datos de
320 referencia (Tabla 6). Estos resultados evidencian una adecuada confiabilidad temática del mapa
321 LULC para su incorporación en el modelo multicriterio de aptitud apícola.



322

323 **Figura 4.** Clasificación del uso y cobertura del suelo en la cuenca Alto Pozuzo.

324 **Tabla 5.** Clases de uso y cobertura del suelo identificadas en la cuenca Alto Pozuzo.

Código LULC	Cobertura	Descripción	Píxel	Ha	%
3.3.5	Arbustal / área intervenida	Vegetación arbustiva secundaria en zonas alteradas por actividad antrópica.	680941	6809,41	3,56
2.4	Áreas agrícolas heterogéneas	Mosaico de cultivos temporales y permanentes con parcelas en descanso.	592124	5921,24	3,09
3.4	Áreas sin o con poca vegetación	Terrenos con suelo, arena o rocas expuestas, como suelo desnudo, rocas expuestas y canteras.	301786	3017,86	1,58
3.1.3	Bosque denso alto de tierra firme	Incluye: Bosque de montaña, bosque de montaña altimontano, bosque de montaña basimontano, bosque de montaña montano	11563894	115638,94	60,38
3.3.1.1	Pajonal andino	Vegetación herbácea altoandina dominada por gramíneas naturales.	2852710	28527,1	14,90
2.3	Pastos	Cobertura herbácea natural o cultivada destinada al pastoreo.	1481371	14813,71	7,74
3.2.1	Plantación forestal	Áreas reforestadas con especies forestales manejadas.	172898	1728,98	0,90
5.1	Superficies de agua	Lagunas, arroyos, ríos	67552	675,52	0,35
3.3.3.1	Vegetación secundaria (Purma)	Áreas en regeneración natural posteriores a intervención.	1379213	13792,13	7,20
1.1	Zonas urbanizadas	Terrenos cubiertos por edificaciones continuas, discontinuas y otras estructuras artificiales, como urbano mixto o edificado.	57811	578,11	0,30
Total			19150300	191503	100,00

325

326 **Tabla 6.** Indicadores de precisión de la clasificación LULC.

LULC	Validación										Total, fila	Exactitud de usuario %	
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10			
Mapa clasificado	C1	42	6	5	0	1	2	0	0	2	0	58	72,41
	C2	5	38	2	0	0	0	0	0	5	0	50	76,00
	C3	2	0	33	6	5	0	0	4	0	0	50	66,00
	C4	6	2	7	310	5	7	2	0	29	0	368	84,24
	C5	0	0	38	0	153	0	0	0	0	0	191	80,10
	C6	14	7	0	0	1	86	0	0	2	0	110	78,18
	C7	1	1	0	5	0	0	39	0	5	0	51	76,47
	C8	2	0	6	0	0	0	0	42	0	0	50	84,00
	C9	5	2	1	5	0	3	1	0	82	3	102	80,39
	C10	1	0	10	0	0	0	0	0	0	39	50	78,00
Total, columna		78	56	102	326	165	98	42	46	125	42	1080	
Exactitud del productor %		53,85	67,86	32,35	95,09	92,73	87,76	92,86	91,30	65,60	92,86		
Proporción de acuerdo observado					Po	0,800							
Proporción de acuerdo esperado por azar					Pe	0,166							
Coeficiente Kappa					K	0,760							

327

328 **Ponderación de criterios mediante AHP**

329 La ponderación de criterios mediante el AHP evidenció diferencias en la importancia relativa
 330 de las variables ambientales y territoriales incorporadas en el modelo de aptitud apícola (Tabla

331 7). El LULC presentó el mayor peso relativo ($w = 0,42$), indicando que la estructura ecológica
 332 del paisaje y la disponibilidad potencial de recursos florales constituyen los principales
 333 condicionantes espaciales para el desarrollo de la actividad apícola en la cuenca Alto Pozuzo.

334 La distancia a fuentes de agua presentó una importancia relativa intermedia ($w = 0,20$),
 335 reflejando la relevancia de la disponibilidad hídrica para el comportamiento de pecoreo y la
 336 regulación térmica de las colonias de *A. mellifera*. Las variables climáticas asociadas a la
 337 precipitación ($w = 0,12$) y la temperatura ($w = 0,10$) también evidenciaron influencia
 338 significativa dentro del modelo, debido a su efecto sobre la disponibilidad floral y las
 339 condiciones ecológicas requeridas para la actividad apícola.

340 Las variables topográficas, como altitud ($w = 0,11$) y pendiente ($w = 0,05$), presentaron menor
 341 peso relativo; sin embargo, su influencia espacial resultó relevante en sectores con fuertes
 342 gradientes geomorfológicos y limitaciones de accesibilidad para el establecimiento y manejo
 343 de apiarios.

344 Los valores de relación de consistencia obtenidos para las matrices de comparación fueron
 345 inferiores al umbral de aceptación establecido ($CR \leq 0,10$), evidenciando coherencia en los
 346 juicios emitidos por los expertos y confiabilidad en el proceso de ponderación multicriterio.

347 En conjunto, los resultados evidencian que la aptitud territorial para la apicultura en la cuenca
 348 Alto Pozuzo depende principalmente de la interacción entre cobertura vegetal favorable,
 349 disponibilidad hídrica y condiciones climáticas adecuadas. Estos patrones reflejan la influencia
 350 de la heterogeneidad ecológica del paisaje sobre la distribución espacial del potencial apícola.

351 **Tabla 7.** Matriz de comparación por pares (media geométrica), criterios de primer nivel.

Criterios		C1	C2	C3	C4	C5	C6	Pesos (w)
LULC	C1	1,00	2,80	4,73	3,17	4,97	5,21	0,42
Dist. red hídrica	C2	0,36	1,00	1,11	2,99	2,97	3,28	0,20
Precipitación	C3	0,21	0,90	1,00	1,00	1,04	3,00	0,12
Altitud	C4	0,32	0,33	1,00	1,00	1,04	3,00	0,11
Temperatura	C5	0,20	0,34	0,96	0,96	1,00	3,23	0,10
Pendiente	C6	0,19	0,31	0,33	0,33	0,31	1,00	0,05

352 Max. eigenvalue (λ_{max}) = 6,2474; $n = 6$; Índice de consistencia (CI) = 0,0495; Índice aleatorio (RI) = 1,24;
 353 Relación de consistencia (CR) = 0,04.

354

355 La matriz de comparación por pares para las coberturas LULC evidenció mayor importancia
 356 relativa de la vegetación secundaria ($w = 0,26$), matorral arbustivo ($w = 0,24$) y pastos ($w =$
 357 $0,20$) dentro del modelo multicriterio, debido a su contribución potencial a la disponibilidad de
 358 recursos florales y conectividad ecológica del paisaje. En contraste, las áreas agrícolas
 359 heterogéneas y las plantaciones forestales presentaron menor peso relativo en la evaluación de
 360 la aptitud territorial apícola (Tabla 8).

361

362 **Tabla 8.** Matriz de la media geométrica de comparación por pares de LULC.

Criterios		C1	C2	C3	C4	C5	C6	Pesos (w)
Vegetación secundaria	C1	1,00	0,88	2,85	1,33	1,81	4,93	0,26
Matorral arbustivo	C2	1,14	1,00	1,00	1,93	2,52	4,90	0,24
Pastos	C3	0,35	1,00	1,00	2,28	1,66	4,93	0,20
Bosque denso	C4	0,75	0,52	0,44	1,00	1,13	4,48	0,14
Áreas agrícolas heterogéneas	C5	0,55	0,40	0,60	0,89	1,00	1,42	0,11
Plantaciones forestales	C6	0,20	0,20	0,20	0,22	0,70	1,00	0,05

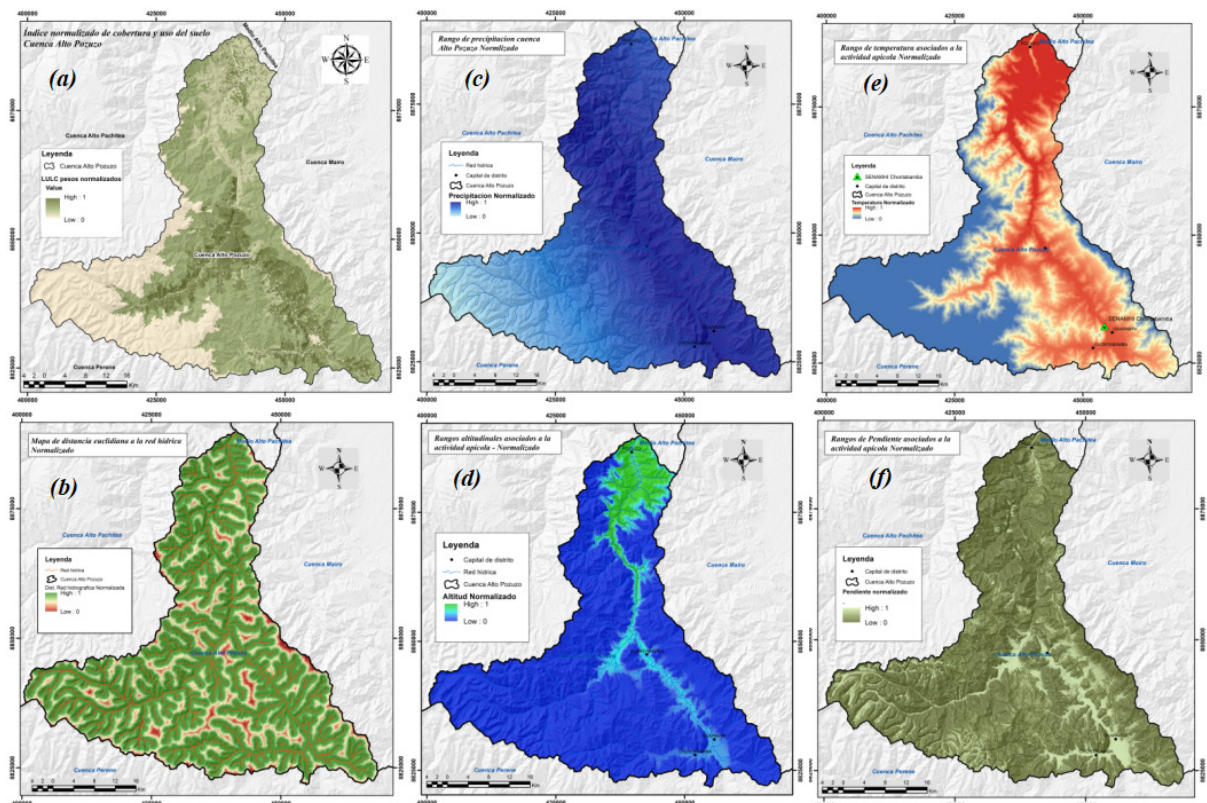
363 Max. eigenvalue (λ_{max}) = 6,275; $n = 6$; índice de consistencia (CI) = 0,055; índice aleatorio (RI) = 1,24;
 364 relación de consistencia (CR) = 0,044.

365

366 **Distribución espacial de la aptitud apícola**

367 La integración de variables ecológicas, climáticas, topográficas e hidrológicas permitió
 368 representar espacialmente la aptitud territorial para la apicultura en la cuenca del Alto Pozuzo.
 369 Las capas normalizadas evidenciaron una marcada heterogeneidad ambiental asociada a
 370 gradientes de cobertura vegetal, altitud, temperatura, precipitación y accesibilidad hídrica,
 371 factores que condicionan la disponibilidad de recursos florales y el desarrollo de la actividad
 372 apícola.

373 La Figura 5 muestra la distribución espacial de las variables integradas en el modelo
 374 multicriterio, evidenciando patrones territoriales diferenciados asociados a cobertura vegetal,
 375 gradientes altitudinales, condiciones climáticas y accesibilidad hídrica. En conjunto, las
 376 variables revelaron que los sectores con vegetación diversa, temperaturas intermedias y
 377 proximidad a fuentes de agua presentaron condiciones más favorables para el establecimiento
 378 de apiarios.



379

380 **Figura 5.** Variables normalizadas del modelo multicriterio apícola.

381 Variables normalizadas utilizadas en el modelo multicriterio: (a) uso y cobertura del suelo (LULC); (b) distancia
 382 euclidiana a la red hídrica; (c) altitud; (d) temperatura media anual; (e) precipitación anual; y (f) pendiente.

383

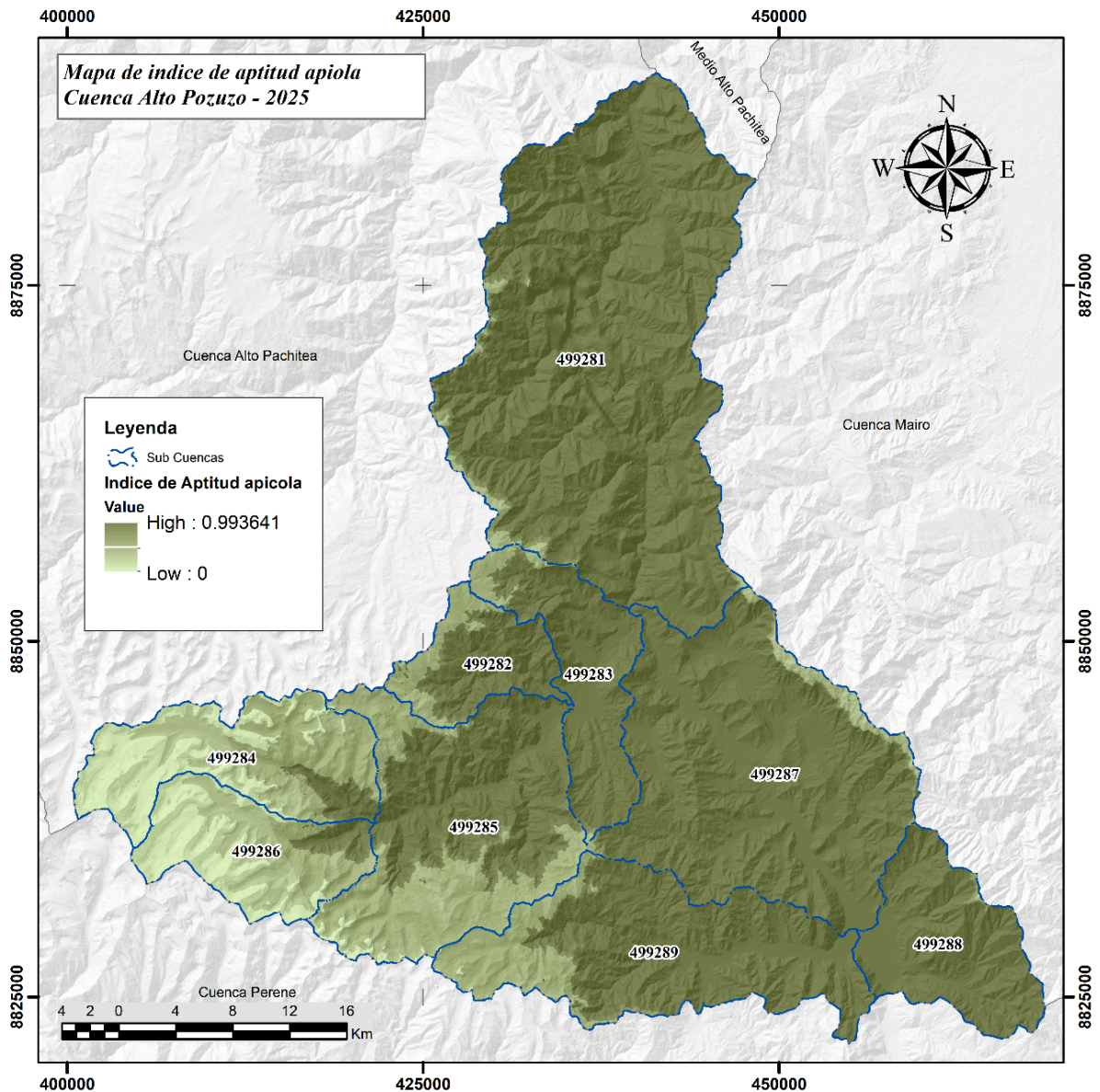
384 La clasificación espacial de la aptitud territorial apícola evidenció diferencias entre unidades
 385 hidrográficas de la cuenca del Alto Pozuzo (Tabla 9). Las intercuenas Chorobamba (0,80),
 386 Ancahuachanan (0,78), Huancabamba (0,73) y la subcuenca Llamaquizú (0,78) presentaron los
 387 mayores índices ponderados de aptitud territorial, asociados principalmente al predominio de
 388 categorías media y alta, así como a la presencia de coberturas vegetales favorables, condiciones
 389 climáticas intermedias y disponibilidad hídrica adecuada. En contraste, las subcuencas Lecma
 390 (0,29) y Muspes (0,30) registraron los menores niveles de aptitud debido al predominio de
 391 áreas clasificadas como no aptas, relacionadas con limitaciones topográficas, elevadas altitudes
 392 y restricciones climáticas. A escala general, la cuenca Alto Pozuzo presentó un índice
 393 ponderado de 0.66, correspondiente a una aptitud territorial media, con predominio de
 394 superficies clasificadas en las categorías media y alta para el desarrollo de la actividad apícola.

395 Los mayores valores del índice de aptitud territorial apícola se concentraron principalmente en
 396 sectores con predominio de vegetación secundaria, matorral arbustivo, pastos y coberturas

397 boscosas localizadas en gradientes altitudinales intermedios, donde convergen condiciones
398 favorables de temperatura, disponibilidad hídrica y diversidad floral. Estas configuraciones
399 ecológicas favorecen la disponibilidad continua de néctar y polen, así como el comportamiento
400 de pecoreo de *A. mellifera*. En contraste, las áreas clasificadas como de baja aptitud o no aptas
401 se localizaron predominantemente en sectores altoandinos con pendientes pronunciadas,
402 restricciones climáticas y limitada cobertura vegetal favorable, condiciones que reducen el
403 potencial territorial para el establecimiento y manejo sostenible de apiarios.

404 Las áreas urbanizadas, carreteras principales y sectores altamente intervenidos fueron
405 restringidos dentro del modelo espacial debido a sus limitaciones para el establecimiento de
406 apiarios y al potencial efecto negativo de las perturbaciones antrópicas sobre la actividad
407 apícola. Estas zonas presentaron menor disponibilidad de cobertura floral y mayor
408 fragmentación ecológica del paisaje.

409 La distribución espacial del índice continuo de aptitud territorial apícola evidenció un patrón
410 heterogéneo dentro de la cuenca Alto Pozuzo. Los mayores niveles de aptitud se concentraron
411 principalmente en las intercuenas 499287 (Chorobamba) y 499283 (Ancahuachanan), así
412 como en la subcuenca 499288 (Llamaquizú), las cuales presentaron los valores medios más
413 altos del índice. En contraste, las subcuenas 499284 (Lecma) y 499286 (Muspes) registraron
414 menores niveles promedio de aptitud, asociados a mayores limitaciones biofísicas y
415 ambientales. Asimismo, algunas unidades hidrográficas mostraron mayor variabilidad espacial
416 interna del índice, reflejando diferencias territoriales en las condiciones de aptitud apícola
417 dentro de la cuenca. La representación espacial del índice continuo se presenta en la Figura 6.



418

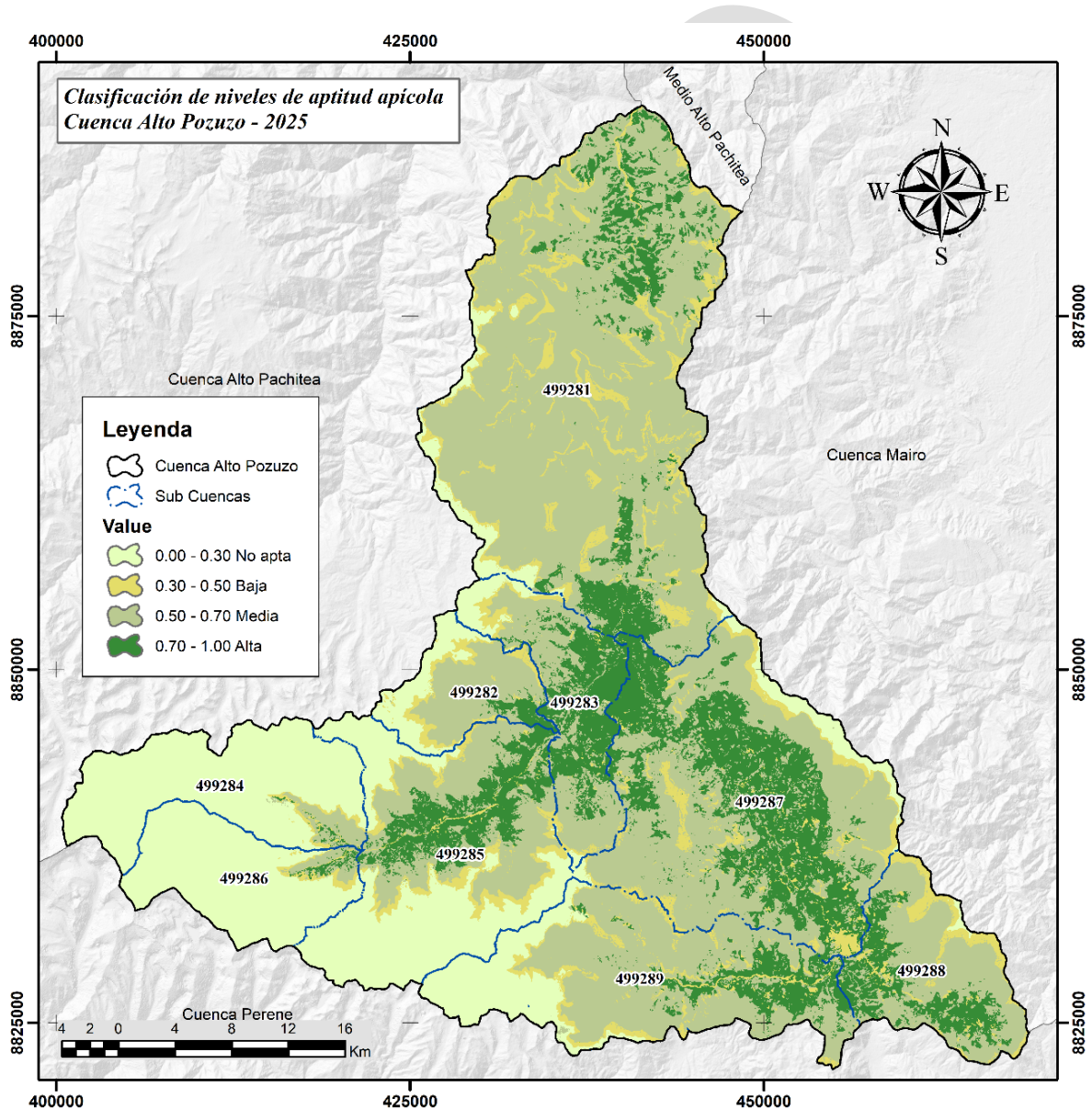
419 **Figura 6.** Distribución espacial del índice continuo de aptitud apícola en la cuenca Alto
420 Pozuzo.

421

422 Con fines interpretativos, el índice continuo fue reclasificado en categorías ordinales de aptitud
423 territorial apícola (alta, media, baja y no apta), permitiendo identificar espacialmente sectores
424 con diferente potencial para el establecimiento y manejo sostenible de apiarios (Figura 7). Las
425 mayores aptitudes territoriales se registraron en las intercuenas 499287 (Chorobamba; índice
426 = 0,80), 499283 (Ancahuachanan; índice = 0,78) y en la subcuenca 499288 (Llamaquizú; índice
427 = 0,78), donde predominaron condiciones ambientales favorables relacionadas con cobertura
428 vegetal diversa, disponibilidad hídrica y gradientes altitudinales intermedios. Asimismo, la

429 cuenca Alto Pozuzo presentó un índice ponderado general de 0,66, correspondiente a una
430 aptitud territorial media.

431 En contraste, las menores aptitudes se localizaron principalmente en las subcuencas 499284
432 (Lecma; índice = 0,29) y 499286 (Muspes; índice = 0,30), asociadas a restricciones
433 topográficas, climáticas y limitada cobertura vegetal favorable. En conjunto, estos patrones
434 reflejan la influencia de la heterogeneidad ecológica y territorial sobre la distribución espacial
435 del potencial apícola dentro de la cuenca Alto Pozuzo.



436
437 **Figura 7.** Clasificación de niveles de aptitud territorial apícola en la cuenca del Alto Pozuzo.

438

439 **Tabla 9.** Distribución espacial de categorías de aptitud territorial apícola en la cuenca Alto
 440 Pozuzo

Código	Unidad Hidrográfica Nombre	No Apta 0,00-0,30		Baja 0,30-0,50		Media 0,50-0,70		Alta 0,70-1,00		Índice ponderado		
		Ha	%	Ha	%	Ha	%	Ha	%			
499281	Intercuenca Huancabamba	56386,21	1827,41	3,24	6243,92	11,07	42371,33	75,15	5943,55	10,54	0,73	Alta
499282	Intercuenca Lucmaragra	7026,54	2035,36	28,97	876,32	12,47	3624,78	51,59	490,08	6,97	0,59	Media
499283	Intercuenca Acahuachanan	10818,44	1069,23	9,88	719,66	6,65	4918,03	45,47	4111,52	38,00	0,78	Alta
499284	Subcuenca Lecma	14125,09	12897,66	91,32	314,11	2,22	806,81	5,71	106,51	0,75	0,29	No Apta
499285	Intercuenca Huaylamayo	24365,15	10569,56	43,39	2050,17	8,41	7419,95	30,45	4325,47	17,75	0,56	Media
499286	Subcuenca Muspes	10577,02	9541,21	90,21	315,83	2,99	527,25	4,98	192,73	1,82	0,30	No Apta
499287	Intercuenca Chorobamba	34490,82	1540,89	4,47	2868,86	8,32	17614,89	51,07	12466,18	36,14	0,80	Alta
499288	Subcuenca Llamaquizú	11454,49	124,7	1,09	1511,98	13,2	6858,96	59,88	2958,85	25,83	0,78	Alta
499289	Intercuenca Cabecera Chontabamba	22259,24	4895,43	21,99	1986,68	8,93	12610,06	56,65	2767,07	12,43	0,65	Media
49928	Cuenca Alto Pozuzo	191503,00	44501,45	23,24	16887,53	8,82	96752,06	50,52	33361,96	17,42	0,66	Media

441

442 La cuenca Alto Pozuzo presentó un índice ponderado general de aptitud territorial de 0,66,
 443 correspondiente a una categoría media. Predominaron las categorías de aptitud media (50,52
 444 %) y alta (17,42 %), evidenciando que amplios sectores de la cuenca reúnen condiciones
 445 ambientales favorables para el desarrollo sostenible de la actividad apícola.

446

447 **Autocorrelación espacial de la aptitud territorial apícola**

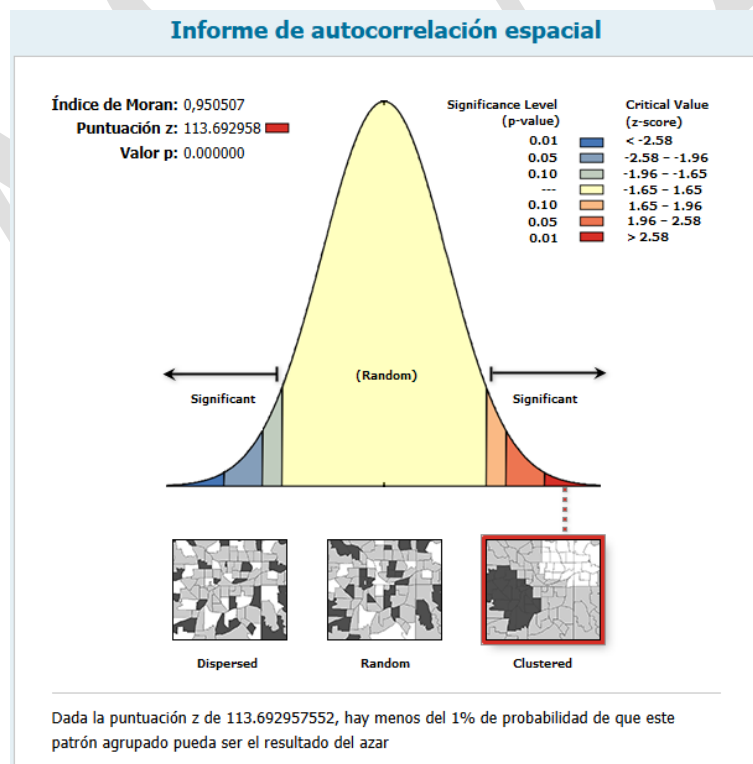
448 El análisis de autocorrelación espacial evidenció que la distribución del índice de aptitud
 449 territorial apícola en la cuenca Alto Pozuzo presenta un patrón espacial no aleatorio. El
 450 estadístico Global Moran's I mostró autocorrelación espacial positiva y estadísticamente
 451 significativa ($I = 0,95$; $z = 113,69$; $p < 0,001$), indicando la existencia de agrupamientos
 452 espaciales de aptitud similar dentro del territorio evaluado.

453 Los resultados evidenciaron que las áreas con alta aptitud territorial apícola tienden a
 454 concentrarse espacialmente en sectores con condiciones ecológicas favorables, mientras que
 455 las zonas de baja aptitud se asociaron principalmente a restricciones topográficas y climáticas
 456 presentes en sectores altoandinos. Este comportamiento confirma la existencia de dependencia

457 espacial en la distribución del potencial apícola y refleja la influencia conjunta de las variables
458 ambientales integradas en el modelo multicriterio.

459 El análisis local mediante Indicadores Locales de Asociación Espacial (LISA) permitió
460 identificar agrupamientos espaciales significativos de alta aptitud territorial (High–High) en
461 sectores con cobertura vegetal favorable, disponibilidad hídrica y condiciones climáticas
462 intermedias (Figura 9). En contraste, los agrupamientos Low–Low se localizaron
463 predominantemente en áreas con elevadas pendientes, mayores altitudes y limitada
464 disponibilidad de recursos florales. Asimismo, se identificaron sectores con comportamiento
465 espacial atípico (High–Low y Low–High), asociados a zonas de transición ecológica y elevada
466 heterogeneidad ambiental del paisaje. Estos patrones evidencian que la aptitud territorial
467 apícola responde a una organización espacial estructurada y no aleatoria dentro de la cuenca
468 del Alto Pozuzo.

469 En conjunto, los resultados obtenidos mediante Moran's I y análisis LISA fortalecen la
470 coherencia espacial del modelo multicriterio y evidencian la utilidad del análisis espacial para
471 identificar áreas prioritarias para el desarrollo sostenible de la apicultura en ecosistemas
472 montanos tropicales.

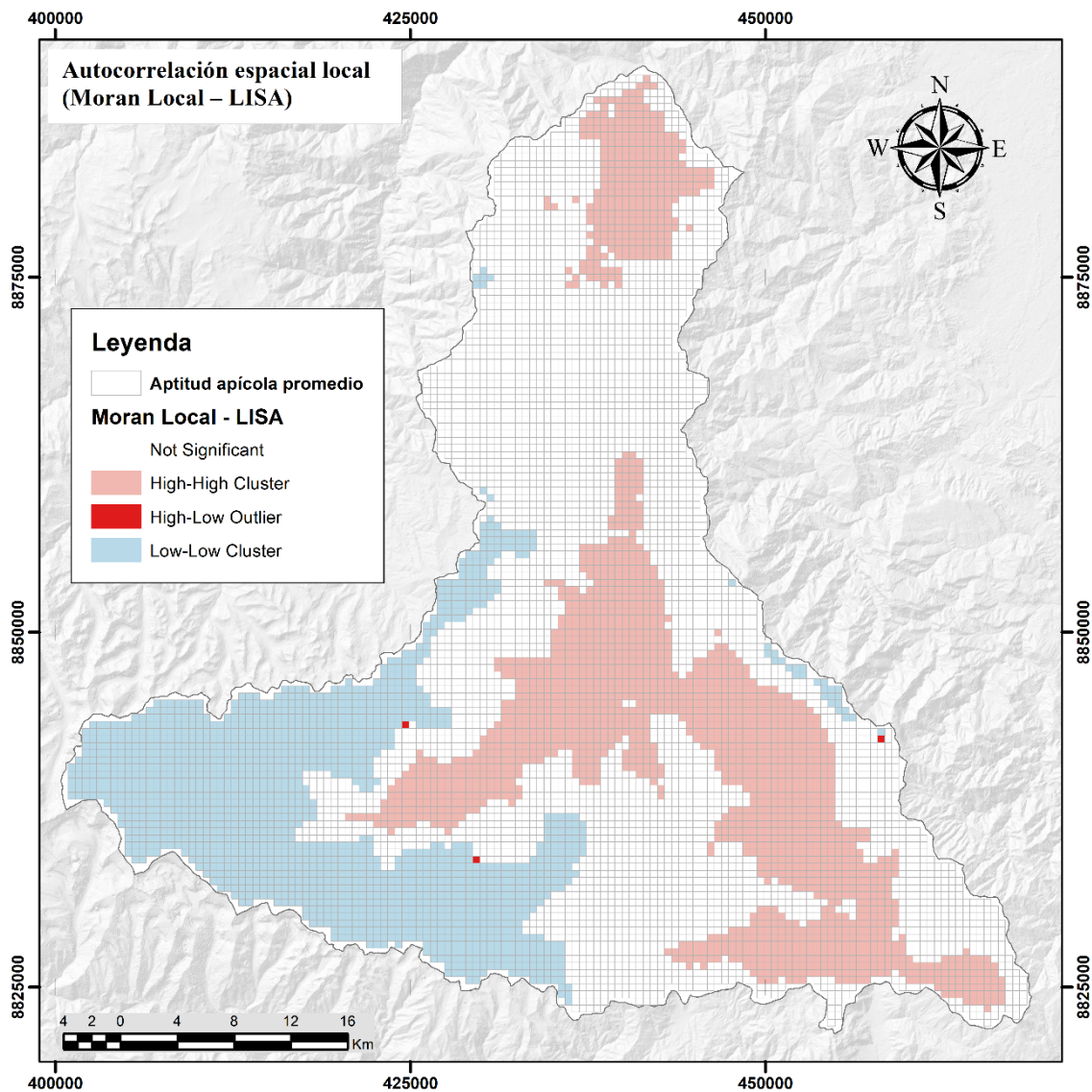


473

474 **Figura 8.** Autocorrelación espacial global del índice de aptitud territorial apícola mediante

475

Moran's I.



476

477 **Figura 9.** Agrupamientos espaciales del índice de aptitud territorial apícola mediante análisis
 478 LISA.

479

480 **Relación entre aptitud territorial apícola y producción de miel**

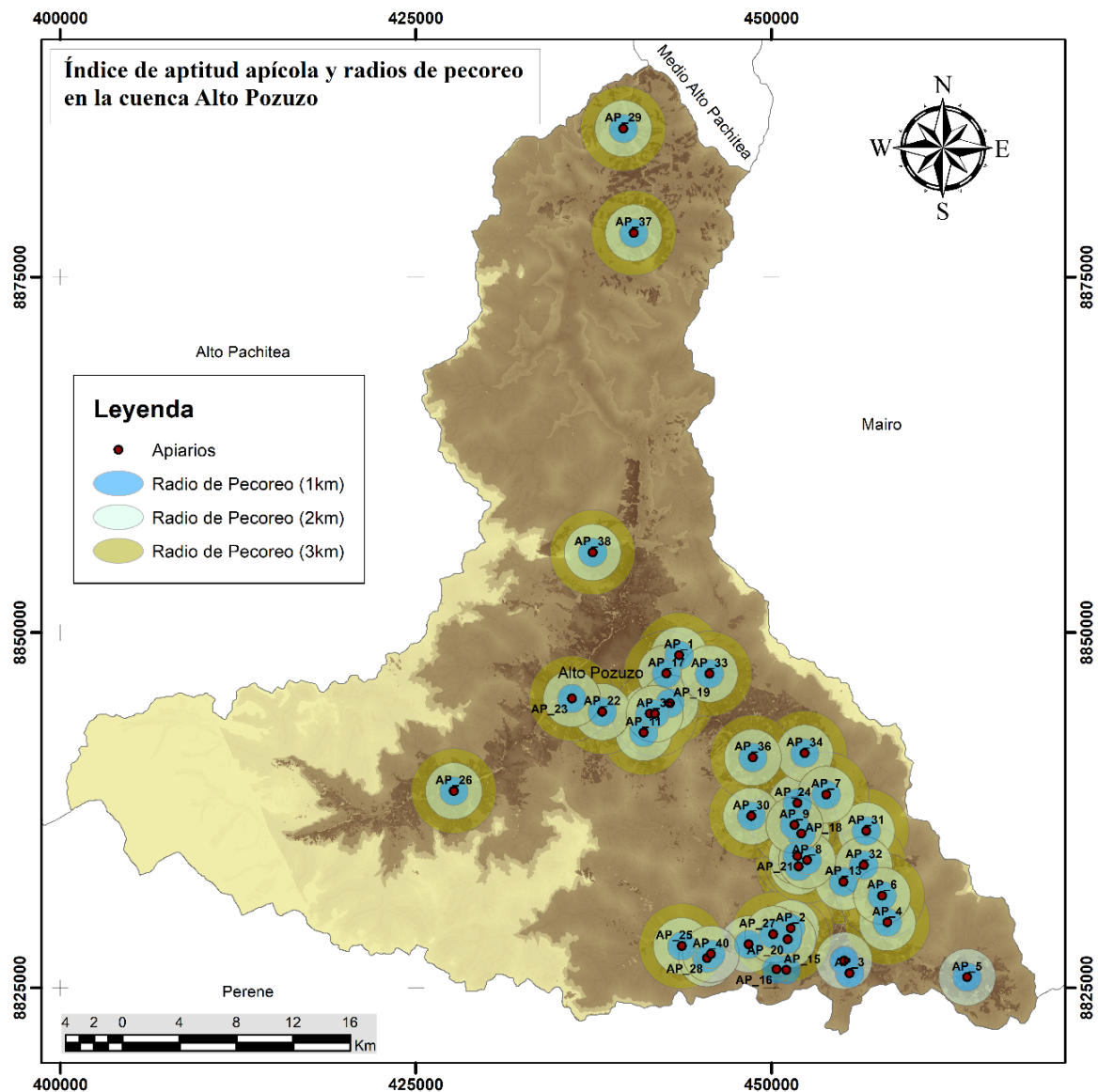
481 La validación territorial del modelo de aptitud territorial apícola evidenció una relación positiva
 482 entre el índice de aptitud territorial y la producción anual de miel registrada en los apiarios
 483 evaluados. En general, los apiarios localizados en zonas con mayores valores del índice
 484 presentaron niveles superiores de producción, respaldando la coherencia espacial y funcional
 485 del modelo multicriterio desarrollado.

486 El análisis mediante estadística zonal evidenció variaciones del índice de aptitud territorial
 487 apícola en función de los radios de pecoreo evaluados (1000, 2000 y 3000 m). Los resultados

488 mostraron diferencias estadísticamente significativas entre las escalas espaciales analizadas (H
489 $= 8,76$; $p = 0,01$), indicando que la escala de análisis influye en la representación territorial del
490 potencial apícola. El radio de 1000 m presentó los mayores valores promedio del índice de
491 aptitud, evidenciando condiciones más favorables para la actividad apícola en el entorno
492 inmediato de los apiarios. La distribución espacial de los apiarios georreferenciados y sus
493 radios de pecoreo se presentan en la Figura 10.

494 Previamente al análisis de correlación, se evaluó la normalidad de las variables mediante la
495 prueba de Shapiro–Wilk. Debido a que la producción anual de miel no presentó distribución
496 normal ($p < 0,05$), se aplicó el coeficiente de correlación no paramétrico de Spearman. Los
497 resultados evidenciaron una correlación positiva y estadísticamente significativa entre el índice
498 de aptitud territorial apícola y la producción anual de miel ($\rho = 0,65$; $p < 0,001$; $n = 40$),
499 indicando que mayores valores de aptitud territorial tienden a asociarse con mayores niveles
500 de producción apícola.

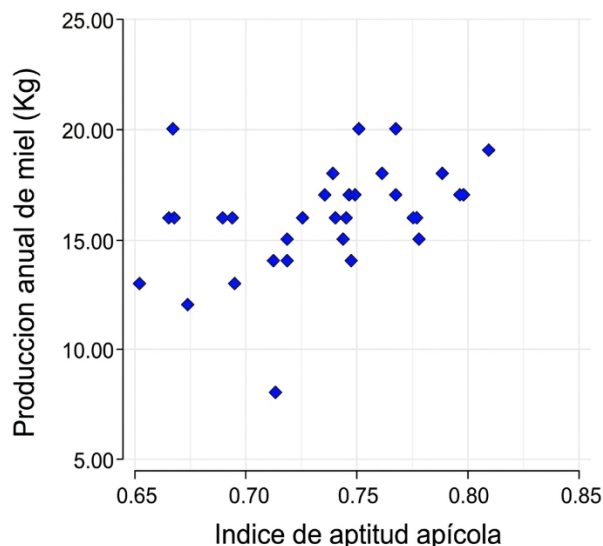
501 Estos resultados evidencian que la integración de variables ambientales mediante evaluación
502 multicriterio constituye una aproximación adecuada para representar espacialmente el
503 potencial productivo de la actividad apícola. Asimismo, la incorporación de información
504 productiva georreferenciada fortaleció la validación territorial del modelo y aportó evidencia
505 empírica sobre la funcionalidad espacial de las zonas identificadas como aptas para la
506 apicultura.



507

508 **Figura 10.** Índice de aptitud territorial apícola y radios de pecoreo en la cuenca Alto Pozuzo.

509 La relación entre el índice de aptitud territorial apícola y la producción anual de miel evidenció
 510 una tendencia positiva entre ambas variables, indicando que los apiarios localizados en zonas
 511 con mayores niveles de aptitud territorial presentaron, en general, mayores niveles de
 512 producción. La distribución espacial y comportamiento de esta relación se representan en la
 513 Figura 11.



514

515 **Figura 11.** Relación entre el índice de aptitud territorial apícola y la producción anual de miel
 516 en apiarios georreferenciados.

517 Los resultados del análisis estadístico evidenciaron diferencias significativas del índice de
 518 aptitud apícola según la distancia de pecoreo evaluada ($H = 8,76$; $p = 0,01$). El radio de 1000
 519 m presentó los mayores valores promedio del índice de aptitud y el rango promedio más alto,
 520 diferenciándose estadísticamente de las distancias de 2000 m y 3000 m, las cuales no mostraron
 521 diferencias significativas entre sí. Estos resultados sugieren que las condiciones más favorables
 522 para la actividad apícola se concentran en el entorno inmediato de los apiarios. Los resultados
 523 estadísticos obtenidos se presentan en la Tabla 10.

524 **Tabla 10.** Relación estadística entre aptitud territorial apícola y producción de miel según
 525 radios de pecoreo.

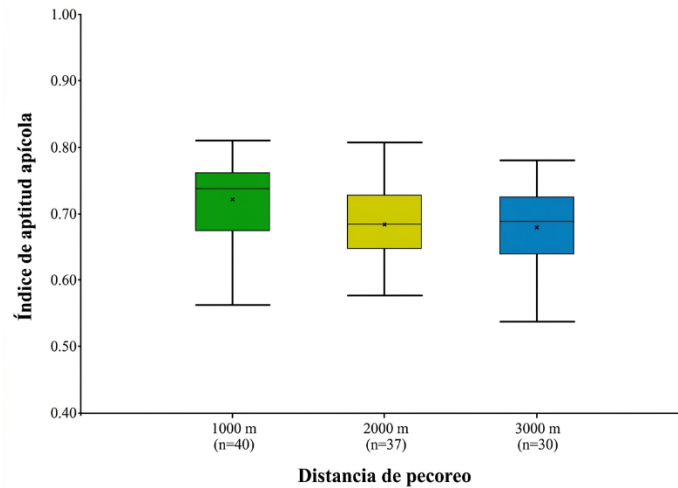
Variable	Grupos Distancia de pecoreo (metros)	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
Índice de aptitud territorial apícola	1000 m	40	0,72	0,05	0,73	8,76	0,01
Índice de aptitud territorial apícola	2000 m	37	0,68	0,07	0,68		
Índice de aptitud territorial apícola	3000 m	30	0,67	0,06	0,68		

526

527 La distribución del índice de aptitud apícola según la distancia de pecoreo evidenció mayores
 528 valores medianos y menor dispersión en el radio de 1000 m en comparación con las distancias
 529 de 2000 m y 3000 m, las cuales presentaron comportamientos similares. Asimismo, el análisis
 530 estadístico mostró diferencias significativas entre las distancias evaluadas ($H = 8,76$; $p =$
 531 $0,0125$), indicando que las condiciones más favorables para la actividad apícola se concentran

532 en el entorno inmediato de los apiarios. La variabilidad y distribución del índice de aptitud
533 apícola según la distancia de pecoreo se presentan en la Figura 12.

534



535

536 **Figura 12.** Índice de aptitud territorial apícola según distancia de pecoreo (prueba de Kruskal-
537 Wallis).

538

539 DISCUSIÓN

540 Los resultados obtenidos evidencian que la aptitud territorial para la apicultura en la cuenca del
541 Alto Pozuzo está fuertemente condicionada por la interacción entre cobertura vegetal,
542 disponibilidad hídrica, variabilidad climática y características geomorfológicas del territorio.
543 La distribución espacial observada refleja la influencia de la heterogeneidad ecológica del
544 paisaje montano tropical sobre la disponibilidad de recursos florales y la funcionalidad
545 territorial de la actividad apícola. Estos patrones coinciden con estudios desarrollados en
546 ecosistemas tropicales y mediterráneos, donde la diversidad de cobertura vegetal y la
547 complejidad ambiental constituyen factores determinantes en la distribución espacial del
548 potencial apícola (Sari *et al.*, 2020; Mercan & Acıbuca, 2024).

549 El uso y cobertura del suelo presentó la mayor influencia dentro del modelo multicriterio,
550 evidenciando que la estructura ecológica del paisaje constituye el principal condicionante
551 territorial de la actividad apícola. Las unidades dominadas por vegetación secundaria, matorral
552 arbustivo y pastos favorecen la disponibilidad continua de néctar y polen, además de mantener
553 conectividad ecológica y heterogeneidad floral, factores relevantes para el comportamiento de
554 pecoreo de *A. mellifera*. Este comportamiento coincide con investigaciones previas que

555 destacan la importancia de los hábitats seminaturales y la diversidad floral en la sostenibilidad
556 y productividad de los sistemas apícolas (Escobedo-Kenefic *et al.*, 2014; Abou-Shaara, 2019).

557 La autocorrelación espacial positiva evidenciada mediante Moran's I y los agrupamientos
558 identificados mediante análisis LISA indican que la aptitud territorial apícola presenta una
559 estructura espacial organizada y no aleatoria. Estos patrones sugieren que la distribución del
560 potencial apícola responde a gradientes ambientales y ecológicos que operan de manera
561 conjunta sobre el territorio. La incorporación de estadística espacial permitió fortalecer la
562 coherencia geográfica del modelo multicriterio y aportar una dimensión analítica adicional
563 respecto a estudios de aptitud territorial apícola basados únicamente en clasificación
564 multicriterio (Mercan & Acıbuca, 2024; Roque *et al.*, 2024).

565 Uno de los principales aportes del estudio corresponde a la contrastación territorial del modelo
566 mediante información productiva georreferenciada de apiarios. La relación positiva entre el
567 índice de aptitud territorial apícola y la producción anual de miel evidencia que las zonas
568 identificadas como favorables mediante el modelo multicriterio presentan correspondencia
569 funcional con el comportamiento productivo observado en campo. La incorporación de apiarios
570 georreferenciados y radios de pecoreo permitió complementar la evaluación espacial mediante
571 evidencia empírica, fortaleciendo la capacidad explicativa y aplicabilidad territorial del modelo
572 desarrollado (Fotso-Kamga *et al.*, 2024; Mercan & Acıbuca, 2024).

573 A diferencia de estudios basados únicamente en clasificaciones discretas de aptitud, el presente
574 trabajo integró normalización continua de variables, evaluación multicriterio, análisis espacial
575 y contrastación productiva en un territorio andino-amazónico caracterizado por elevada
576 heterogeneidad ecológica. Esta aproximación permitió representar con mayor precisión los
577 gradientes espaciales de aptitud territorial apícola y fortalecer la interpretación territorial del
578 potencial productivo asociado a la actividad apícola.

579 No obstante, el estudio presenta algunas limitaciones relacionadas con la incorporación de
580 variables dinámicas asociadas a la fenología floral, la disponibilidad temporal de recursos
581 melíferos y las prácticas de manejo apícola, factores que también influyen sobre la
582 productividad de las colonias. Asimismo, la producción de miel puede verse condicionada por
583 aspectos biológicos y socioeconómicos no incluidos en el modelo espacial. En este sentido,
584 futuras investigaciones podrían incorporar variables ecológicas temporales, métricas de
585 conectividad del paisaje y monitoreo productivo de largo plazo para fortalecer la capacidad
586 predictiva de los modelos de aptitud territorial apícola en ecosistemas tropicales de montaña.

587 La integración de Sistemas de Información Geográfica, Evaluación Multicriterio y Proceso
588 Analítico Jerárquico permitió modelar la aptitud territorial para la apicultura en la cuenca del
589 Alto Pozuzo mediante un índice espacial continuo basado en variables ecológicas, climáticas,
590 topográficas e hidrológicas. El modelo evidenció una distribución espacial heterogénea del
591 potencial apícola, asociada principalmente a la disponibilidad de cobertura vegetal favorable,
592 condiciones climáticas intermedias y accesibilidad hídrica.

593 Las unidades hidrográficas con mayores niveles de aptitud territorial se relacionaron con
594 paisajes de vegetación secundaria, matorral arbustivo, pastos y mosaicos agroecológicos,
595 mientras que las áreas con menor aptitud se asociaron a restricciones topográficas y climáticas
596 presentes en sectores altoandinos. Asimismo, el análisis de autocorrelación espacial confirmó
597 la existencia de patrones espaciales estructurados en la distribución del potencial apícola dentro
598 de la cuenca.

599 La relación positiva entre el índice de aptitud territorial apícola y la producción anual de miel
600 evidenció coherencia funcional entre el modelo espacial y el comportamiento productivo
601 observado en los apiarios evaluados. Desde una perspectiva metodológica, esta investigación
602 demuestra que el análisis espacial con Sistemas de Información Geográfica (SIG), la
603 evaluación multicriterio y el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) constituyen una herramienta
604 robusta para la planificación territorial, la gestión sostenible de la apicultura y la priorización
605 de áreas con potencial para el establecimiento de apiarios en ecosistemas montanos tropicales
606 como la cuenca Alto Pozuzo.

607

608 **Author contributions: CRediT (Contributor Roles Taxonomy)**

609 **ELNE** = Esteban Luis Navarro-Espinoza

610 **JI** = José Iannacone

611

612 **Conceptualization:** ELNE, JI

613 **Data curation:** ELNE, JI

614 **Formal Analysis:** ELNE, JI

615 **Funding acquisition:** ELNE, JI

616 **Investigation:** ELNE, JI

617 **Methodology:** ELNE, JI

618 **Project administration:** ELNE, JI

619 **Resources:** ELNE, JI

620 **Software:** ELNE, JI

621 **Supervision:** ELNE, JI

622 **Validation:** ELNE, JI

623 **Visualization:** ELNE, JI

624 **Writing – original draft:** ELNE, JI

625 **Writing – review & editing:** ELNE, JI

626

627 **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

628 Abou-Shaara, H. F. (2014). The foraging behaviour of honey bees, *Apis mellifera*: a review.
629 *Veterinarni Medicina*, 59, 1–10.

630 Abou-Shaara, H. F. (2019). Geographical information system for beekeeping development.
631 *Journal of Apicultural Science*, 63, 5–16.

632 Asensio, V., Flórido, F. G., Ruiz, F., & Rodríguez, J. (2016). Selecting pollinator habitats using
633 GIS-based multi-criteria analysis: A case study in southern Spain. *PLOS One*, 11(10),
634 e0164205.

635 Autoridad Nacional del Agua. (2015). *Delimitación y codificación de unidades hidrográficas*
636 *del Perú: resumen ejecutivo*. <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/1880>

637 Campana, C., Peralta, C., Ceconello, J. C., Pons, D. H., Uranga, J., Scavuzzo, M. C., & Ferral,
638 A. (2019). Geospatial tools applied to the generation of an aptitude map for the development
639 of beekeeping activity in San Javier, Córdoba, Argentina. *2019 XVIII Workshop on Information*
640 *Processing and Control (RPIC)*, 298–302.

641 Correa Ayram, C. A., Mendoza, M. E., Etter, A., & Pérez Salicrup, D. R. (2021). Identificación
642 de áreas prioritarias para la conservación mediante análisis espacial multicriterio y
643 conectividad ecológica. *Revista Latinoamericana de Conservación*, 13, 45–60.

644 Cotrina-Sánchez, A., García, L., Calle, C., Sari, F., Bandopadhyay, S., Rojas-Briceño, N. B.,
645 Meza-Mori, G., Torres Guzmán, C., Auquiñivín-Silva, E., Arellanos, E., & Oliva, M. (2023).
646 Multicriteria Analysis in apiculture: A sustainable tool for rural development in communities
647 and conservation areas of northwest Peru. *Land*, *12*, 1900.

648 Czekońska, K., Łopuch, S., & Miścicki, S. (2023). The effect of meteorological and
649 environmental variables on food collection by honey bees (*Apis mellifera*). *Ecological*
650 *Indicators*, *156*, 111140.

651 Escobedo-Kenefic, N., Dardón Peralta, M. J., López, J. E., Martínez, O., & Cardona, E. (2014).
652 Efecto de la configuración del paisaje en las comunidades de abejas (Apoidea) de un mosaico
653 de bosque pino-encino y áreas agrícolas de Sacatepéquez y Chimaltenango, Guatemala.
654 *Ciencia, Tecnología y Salud*, *1*, 13–20.

655 Estoque, R. C., & Murayama, Y. (2010). Suitability analysis for beekeeping sites in La Union,
656 Philippines, using GIS and multicriteria evaluation techniques. *Research Journal of Applied*
657 *Sciences*, *5*, 242–253.

658 Elmastaş, N., Tozlu, A., & Gürbüz, M. (2022). Determination of suitable beekeeping areas by
659 using Geographic Information Systems and Multi-Criteria Decision Analysis methods: The
660 case of Bingöl Province. *Journal of Geography*, *42*, 1–18.

661 Fotso Kanga, G., Tchuenté, A. T. K., Ndzié, J. P., & Ndzié, J. C. (2024). GIS-based
662 multicriteria and machine learning approaches for beekeeping suitability assessment under
663 environmental variability. *Ecological Informatics*, *82*, 102530.

664 González-Avilés, J. G., Martínez-Morales, M. A., & Sánchez-González, A. (2023).
665 Prioritization of areas for pollinator conservation using multicriteria spatial analysis in
666 fragmented landscapes. *Botanical Sciences*, *101*, 1–15.

667 Mercan, Ç., & Acıbuca, T. (2024). Utilizing FUCOM and AHP methods to identify the optimal
668 beekeeping lands: A case study from Mardin, Türkiye. *PLOS One*, *19*, e0335784.

669 Municipalidad Provincial de Oxapampa. (2024). *Plan Estratégico de Desarrollo Económico*
670 *Local de la Provincia de Oxapampa 2024–2034 (PEDEL)*. [https://bioay.org/wp-](https://bioay.org/wp-content/uploads/2024/06/Plan-Estrategico-de-Desarrollo-Economico-Local-de-la-Provincia-de-Oxapampa-PEDEL-2024-2034-1.pdf)
671 [content/uploads/2024/06/Plan-Estrategico-de-Desarrollo-Economico-Local-de-la-Provincia-](https://bioay.org/wp-content/uploads/2024/06/Plan-Estrategico-de-Desarrollo-Economico-Local-de-la-Provincia-de-Oxapampa-PEDEL-2024-2034-1.pdf)
672 [de-Oxapampa-PEDEL-2024-2034-1.pdf](https://bioay.org/wp-content/uploads/2024/06/Plan-Estrategico-de-Desarrollo-Economico-Local-de-la-Provincia-de-Oxapampa-PEDEL-2024-2034-1.pdf)

673 Pantoja, G., Gómez, M., Contreras, C., Grimau, L., & Montenegro, G. (2017). Determinación
674 de zonas adecuadas para uso apiturístico, mediante evaluación de multicriterios, en sistema de
675 información geográfica: Estudio de caso en la Región O'Higgins, Chile. *Ciencia e*
676 *Investigación Agraria*, 44, 139–153.

677 Roque, N., Fernandez, P., Silveira, C., Vilas-Boas, M., & Anjos, O. (2024). Using analytic
678 hierarchy process to assess beekeeping suitability in portuguese controlled areas: a first
679 approach. *Insects*, 15, 91.

680 Rwanga, S. S., & Ndambuki, J. M. (2017). Accuracy Assessment of Land Use/Land Cover
681 Classification Using Remote Sensing and GIS. *International Journal of Geosciences*, 8, 611–
682 622.

683 Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process*. McGraw-Hill.

684 Saaty, T. L. (1987). The analytic hierarchy process—What it is and how it is used.
685 *Mathematical Modelling*, 9, 161–176.

686 Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (1991). *Prediction, projection, and forecasting*. Kluwer
687 Academic Publishers.

688 Saaty, T. L. (1994). Fundamentals of decision making and priority theory with the analytic
689 hierarchy process. *RWS Publications*.

690 Salehizadeh, A., Khodagholi, M., & Gandomkar, A. (2020). Temperature conditions for
691 determination of beekeeping regions in the light of climate change: Case study: Fars Province.
692 *Environmental and Climate Technologies*, 24, 88–104.

693 Sarı, F., Kandemir, İ., Ceylan, D. A., & Gül, A. (2020). Using AHP and PROMETHEE multi-
694 criteria decision-making methods to define suitable apiary locations. *Journal of Apicultural*
695 *Research*, 59, 546–557.

696 Sarı, F., & Ceylan, D. A. (2017). Site suitability analysis for beekeeping via analytical
697 hierarchy process: Konya example. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and*
698 *Spatial Information Sciences*, IV-4/W4, 345–350.

699 Şişman, S., & Aydınoglu, A. Ç. (2020). Using GIS-based multi-criteria decision analysis
700 techniques in the smart cities. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote*
701 *Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIV-4/W3-2020, 383–389.

702 Received May 5, 2026.

703 Accepted May 25, 2026.

704

ASAP