ISSN Versión Impresa 1816-0719 ISSN Versión en línea 1994-9073 ISSN Versión CD ROM 1994-

The Biologist (Lima), 2026, vol. 24 (1), 89-109

The Biologist (Lima)



ORIGINAL ARTICLE / ARTÍCULO ORIGINAL

MULTI-CRITERION EVALUATION OF TERRITORIAL SUITABILITY FOR BEEKEEPING USING GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS IN THE ALTO POZUZO BASIN, PERU

EVALUACIÓN MULTICRITERIO DE LA APTITUD TERRITORIAL PARA LA APICULTURA MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA EN LA CUENCA DEL ALTO POZUZO, PERÚ

Esteban Navarro-Espinoza[1] & José Iannacone[2,3]

[1] Facultad de Ingeniería Geográfica, Ambiental y Ecoturismo (FIGAE). Escuela Universitaria de Postgrado. Universidad Nacional Federico Villarreal, Lima, Perú.
[2] Facultad de Ciencias Naturales y Matemática (FCNM). Grupo de investigación de Sostenibilidad Ambiental (GISA). Escuela Universitaria de Postgrado. Universidad Nacional Federico Villarreal (UNFV), Lima, Perú.
[3] Facultad de Ciencias Biológicas. Universidad Ricardo Palma. Lima. Peru.
* Corresponding author: enavarroe@undac.edu.pe

Esteban Navarro-Espinoza: https://orcid.org/0000-0002-2918-2966
José Iannacone: https://orcid.org/0000-0003-3699-4732

ABSTRACT

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

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

DOI: https://doi.org/10.62430/rtb20262412147

Keywords: Beekeeping — territorial suitability — Geographic Information Systems — multicriteria evaluation — Analytic Hierarchy Process — spatial autocorrelation

RESUMEN

La identificación de zonas aptas para la apicultura es fundamental para la planificación territorial y la gestión sostenible de los servicios ecosistémicos asociados a la polinización. El objetivo del estudio fue evaluar la aptitud territorial para la apicultura en la cuenca del Alto Pozuzo, Perú, mediante la integración de Sistemas de Información Geográfica (SIG), Evaluación Multicriterio (EMC) y el Proceso Analítico Jerárquico (AHP). El modelo espacial integró variables relacionadas con uso y cobertura del suelo, altitud, pendiente, temperatura, precipitación y distancia a fuentes de agua. Los criterios fueron estandarizados y ponderados mediante juicio de expertos, generándose un índice continuo de aptitud apícola en ArcGIS 10.8. Adicionalmente, se aplicaron análisis de autocorrelación espacial (Moran's I y LISA) y contrastación territorial utilizando información productiva de 40 apiarios georreferenciados. La clasificación de uso y cobertura del suelo presentó una exactitud global de 80,0 % y un coeficiente Kappa de 0,76. Los resultados evidenciaron una distribución territorial heterogénea de la aptitud apícola, con predominio de categorías media y alta (67,94 % de la superficie de la cuenca). Las zonas más favorables se asociaron con cobertura vegetal diversa, condiciones climáticas intermedias y proximidad a recursos hídricos. Asimismo, se identificaron agrupamientos espaciales significativos de alta aptitud y una relación positiva entre el índice de aptitud territorial y la producción anual de miel. Se concluye que la integración de SIG, EMC, AHP y análisis espacial constituye un enfoque robusto y replicable para la planificación sostenible de la apicultura en ecosistemas montanos tropicales.

Palabras clave: AHP — Apicultura — aptitud territorial — autocorrelación espacial — evaluación multicriterio — Sistemas de Información Geográfica

INTRODUCCIÓN

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

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

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

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

La cuenca Alto Pozuzo, ubicada en la provincia de Oxapampa y perteneciente a la Reserva de Biosfera Oxapampa–Asháninka–Yánesha, presenta una elevada

diversidad biológica y heterogeneidad ambiental que favorecen el desarrollo de la apicultura. Sin embargo, la localización de apiarios se realiza frecuentemente sin criterios técnicos de evaluación territorial, limitando el aprovechamiento sostenible de los recursos ambientales y la planificación espacial de la actividad (Municipalidad Provincial de Oxapampa, 2024).

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

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

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

La cobertura del territorio está conformada principalmente por bosques montanos, vegetación secundaria, pastizales y áreas agrícolas, condiciones que favorecen la disponibilidad de recursos florales y el desarrollo de la actividad apícola. Sin embargo, los cambios de uso del suelo y la expansión de actividades agropecuarias han modificado parcialmente la estructura del paisaje y reducido áreas seminaturales relevantes para la provisión de néctar y polen.

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

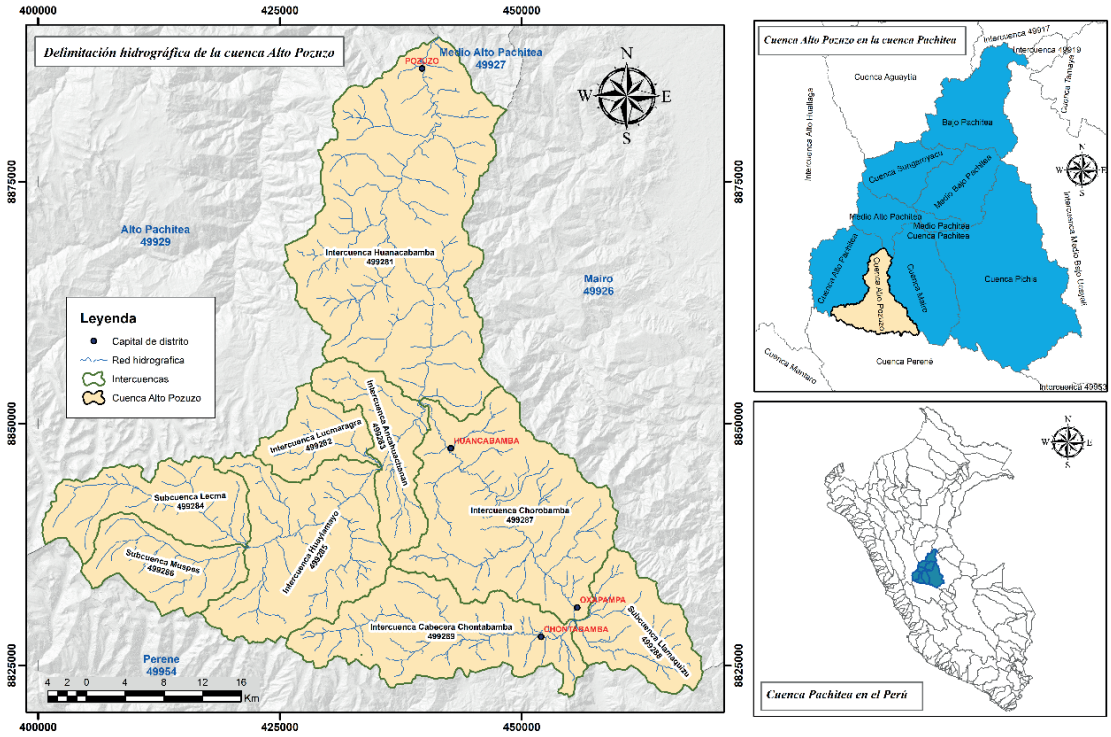


Figura 1. Área de estudio: cuenca del Alto Pozuzo, provincia de Oxapampa, región Pasco, Perú.

Datos espaciales y variables de análisis

La modelación de la aptitud apícola se desarrolló mediante la integración de información geoespacial proveniente de imágenes satelitales, modelos digitales de elevación y cartografía temática oficial. Se consideraron variables ecológicas, climáticas, topográficas e hidrológicas relacionadas con la disponibilidad de recursos florales y las condiciones ambientales favorables para el desarrollo de colonias de *Apis mellifera* Linnaeus, 1758 (Campana *et al*., 2019; Mercan & Acıbuca, 2024).

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

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

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

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

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 *et al.* (2023)
Precipitación	La precipitación esperada oscila entre 1275 mm y 1800 mm anuales	Sarı & Ceylan (2017); Roque *et al.* (2024)
Distancia a cuerpos de agua	Distancia máxima de 500 m de una fuente de agua limpia	Campana *et al.* (2019); Sarı & Ceylan (2017)
Disponibilidad de flora melífera	Presencia alta de plantas melíferas, en un radio de 2-3 km alrededor del colmenar	Sarı & Ceylan (2017)
Altitud	Ubicación de los colmenares entre 0 y 2500 msnm	Czekońska *et al.* (2023)
Pendiente	La pendiente afecta la accesibilidad, la estabilidad del terreno y el manejo de colmenas	Campana *et al.* (2019)

Clasificación del uso y cobertura del suelo (LULC)

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

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

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

La precisión temática de la clasificación fue evaluada mediante una matriz de confusión, calculándose exactitud global, exactitud del productor, exactitud del usuario y

coeficiente Kappa (Rwanga & Ndambuki, 2017). La clasificación alcanzó una exactitud global de 80,0 % y un coeficiente Kappa de 0,76, indicando concordancia sustancial entre el mapa clasificado y los datos de referencia.

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

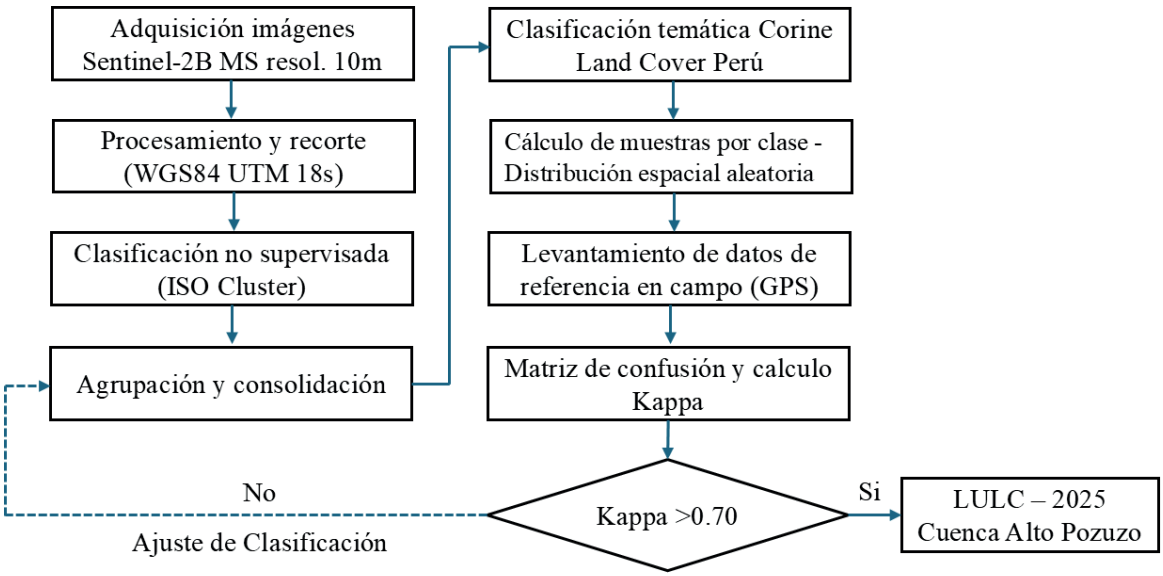


Figura 2. Flujo metodológico para la clasificación y validación del uso y cobertura del suelo (LULC).

Evaluación multicriterio y ponderación de criterios mediante AHP

La evaluación multicriterio se desarrolló mediante la integración de variables ambientales y territoriales relacionadas con la aptitud apícola utilizando el Proceso Analítico Jerárquico (Analytic Hierarchy Process, AHP), metodología ampliamente aplicada en estudios de aptitud territorial y toma de decisiones espaciales multicriterio (Saaty, 1980). Los criterios considerados incluyeron uso y cobertura del suelo, distancia a fuentes de agua, altitud, temperatura, precipitación y pendiente, seleccionados en función de su influencia sobre la disponibilidad de recursos florales y las condiciones ecológicas favorables para la actividad apícola.

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

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

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}

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

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

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

La matriz normalizada se genera dividiendo cada elemento de la matriz de comparación por pares entre la suma de los valores de su respectiva columna, de acuerdo con la siguiente expresión (Sarı & Ceylan, 2017):

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

Posteriormente, los pesos relativos de cada criterio (w_i) se obtienen mediante el promedio de los valores normalizados por fila (Sarı & Ceylan, 2017):

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

Para evaluar la consistencia de los juicios emitidos se calculó el valor propio máximo (λmax) de la matriz de comparación mediante la siguiente expresión (Saaty, 1980):

$$_{nax} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \frac{\sum_{j=1}^{n} a_{ij}w_j}{w_i} \quad \ldots(3)$$

El índice de consistencia (CI) es un indicador de confiabilidad de valores de preferencia dados y ponderaciones calculadas; el CI se calcula con la Fórmula 4 (Saaty, 1987).

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

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

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

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

Los juicios de comparación correspondientes a las matrices consistentes (CR ≤ 0,10) fueron integrados mediante la media geométrica de las comparaciones pareadas, procedimiento utilizado en aplicaciones AHP para sintetizar evaluaciones individuales conservando la proporcionalidad y propiedad recíproca de las matrices de comparación (Saaty, 1987). La matriz sintetizada obtenida fue utilizada para el cálculo de los pesos relativos del modelo multicriterio.

Modelamiento espacial de la aptitud apícola

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

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

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

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

Donde:

IATA: Corresponde al índice de aptitud territorial apícola.

W_i : Representa el peso asignado al criterio .

X_i : Corresponde al valor normalizado de cada criterio .

i = 1, 2,…,6 representa los criterios integrados en el modelo multicriterio.

Se incorporaron restricciones espaciales asociadas a áreas incompatibles para la instalación de apiarios, incluyendo

zonas urbanizadas, infraestructura vial y sectores clasificados como "No apta" según los criterios definidos en la Tabla 4. Estas restricciones fueron integradas como máscaras binarias dentro del modelo espacial con el propósito de excluir áreas con elevada perturbación antrópica y limitada disponibilidad de recursos florales (Asensio *et al.*, 2016; Şişman & Aydınoğlu, 2020).

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

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

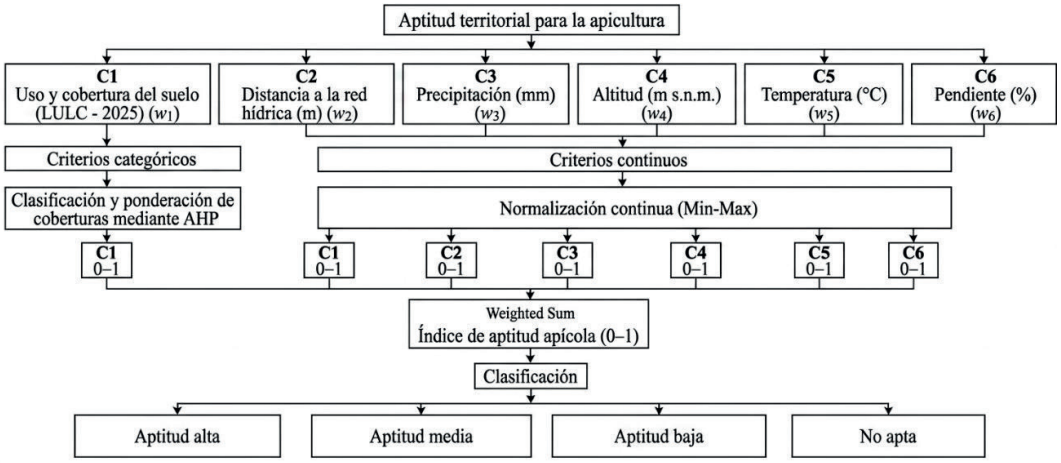


Figura 3. Modelo conceptual del proceso de evaluación multicriterio para la aptitud apícola.

Análisis espacial y validación del modelo

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

La estructura espacial del índice de aptitud apícola fue evaluada mediante autocorrelación espacial global utilizando el estadístico Global Moran's I, con el propósito de identificar patrones espaciales agrupados, dispersos o aleatorios en la distribución del índice (Correa-Ayram *et al.*, 2021). Complementariamente, se aplicaron Indicadores Locales de Asociación Espacial (LISA) para identificar agrupamientos espaciales significativos de alta y baja aptitud, así como sectores con comportamiento espacial atípico. El análisis espacial se desarrolló utilizando herramientas de estadística espacial implementadas en ArcGIS 10.8.

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

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

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

RESULTADOS

Uso y cobertura del suelo

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

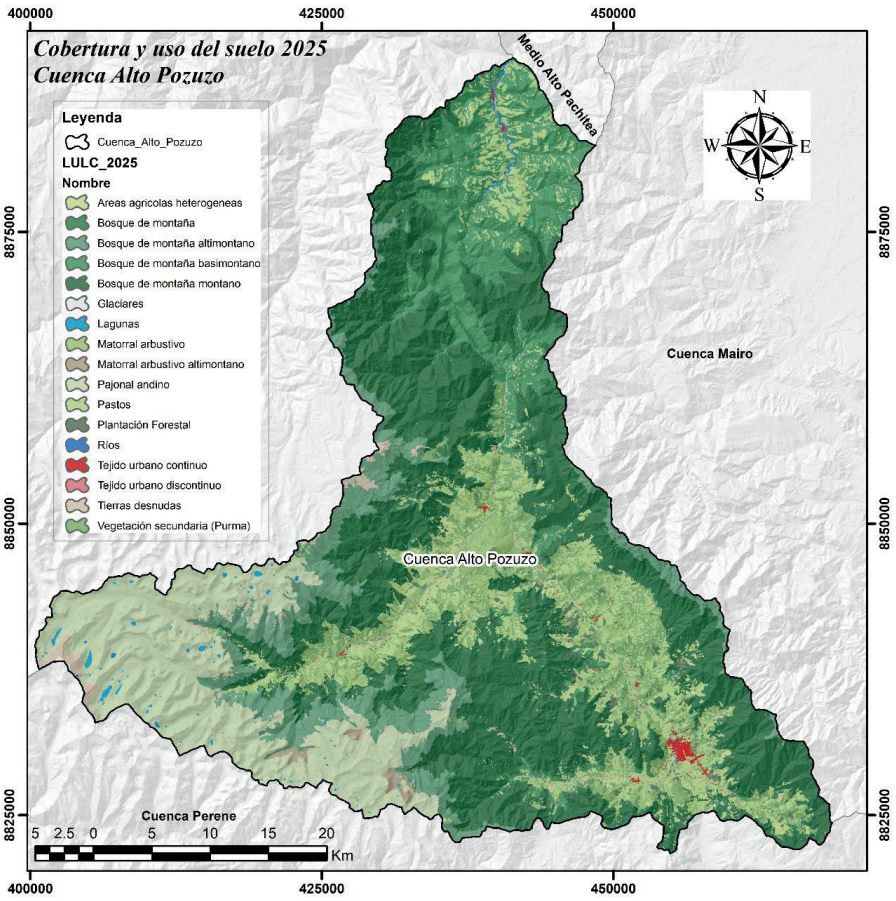


Figura 4. Clasificación del uso y cobertura del suelo en la cuenca Alto Pozuzo.

Las coberturas asociadas a vegetación secundaria, matorral arbustivo y pastos presentaron mayor importancia relativa dentro del modelo multicriterio debido a su contribución potencial a la disponibilidad de recursos florales y conectividad ecológica del paisaje. Estas unidades territoriales favorecen la provisión de néctar y polen para *A. mellifera*, especialmente en sectores con heterogeneidad vegetal y menor grado de perturbación antrópica. En contraste, las áreas agrícolas heterogéneas, plantaciones forestales y zonas urbanizadas presentaron menor contribución relativa dentro del modelo de aptitud apícola.

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

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

Tabla 6. Indicadores de precisión de la clasificación LULC.

		Validación										Total, fila	Exactitud de usuario %
	LULC	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

Ponderación de criterios mediante AHP

La ponderación de criterios mediante el AHP evidenció diferencias en la importancia relativa de las variables ambientales y territoriales incorporadas en el modelo de aptitud apícola (Tabla 7). El LULC presentó el mayor peso relativo (w = 0,42), indicando que la estructura ecológica del paisaje y la disponibilidad potencial de recursos florales constituyen los principales condicionantes espaciales para el desarrollo de la actividad apícola en la cuenca Alto Pozuzo.

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

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

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

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

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

Max. eigenvalue (λmax) = 6,2474; n = 6; Índice de consistencia (CI) = 0,0495; Índice aleatorio (RI) = 1,24; Relación de consistencia (CR) = 0,04.

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

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

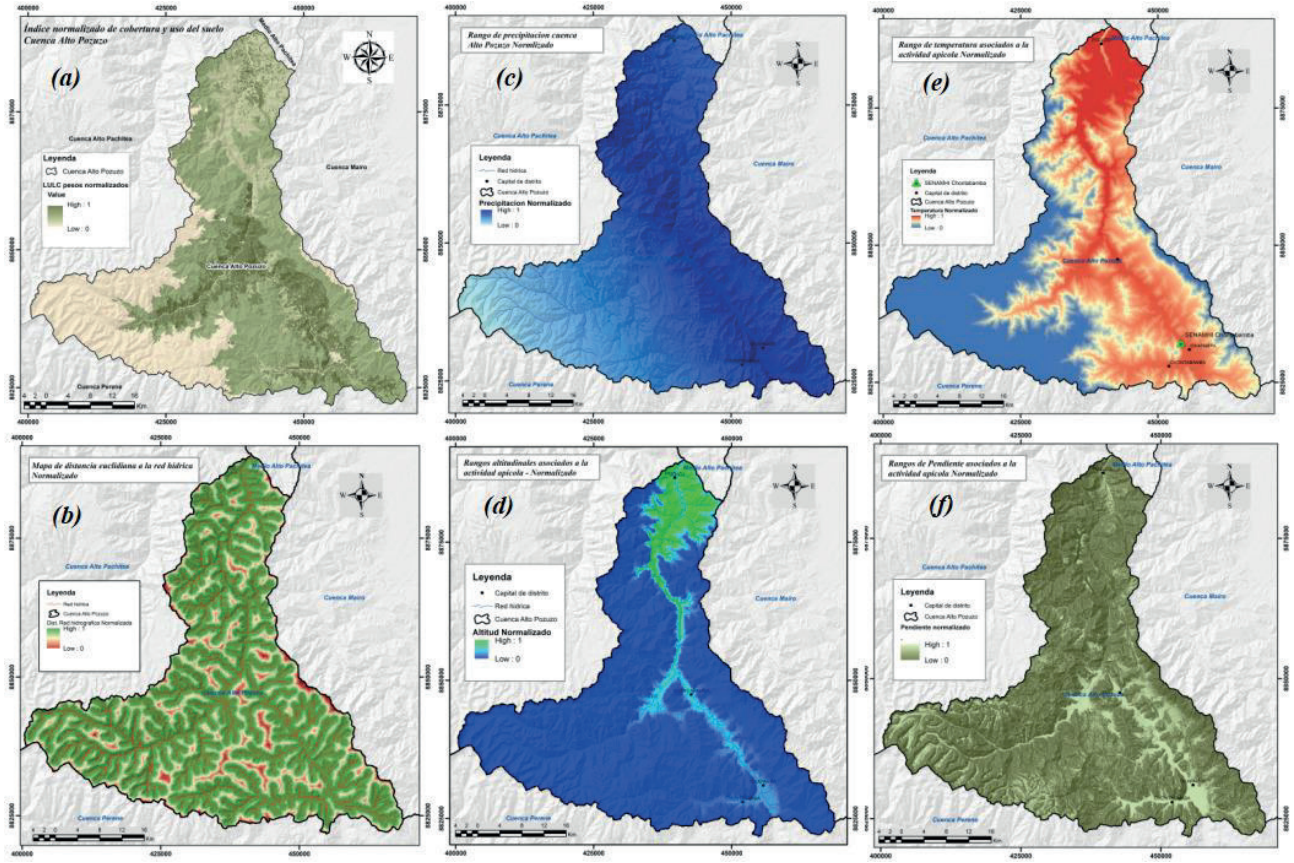
Max. eigenvalue (λmax) = 6,275; n = 6; índice de consistencia (CI) = 0,055; índice aleatorio (RI) = 1,24; relación de consistencia (CR) = 0,044.

Distribución espacial de la aptitud apícola

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

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

La clasificación espacial de la aptitud territorial apícola evidenció diferencias entre unidades hidrográficas de la cuenca del Alto Pozuzo (Tabla 9). Las intercuencas Chorobamba (0,80), Ancahuachanan (0,78), Huancabamba (0,73) y la subcuenca Llamaquizú (0,78) presentaron los mayores índices ponderados de aptitud territorial, asociados principalmente al predominio de categorías media y alta, así como a la presencia de coberturas vegetales favorables, condiciones climáticas intermedias y disponibilidad hídrica adecuada. En contraste, las subcuencas Lecma (0,29) y Muspes (0,30) registraron los menores niveles de aptitud debido



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

Figura 5. Variables normalizadas del modelo multicriterio apícola.

al predominio de áreas clasificadas como no aptas, relacionadas con limitaciones topográficas, elevadas altitudes y restricciones climáticas. A escala general, la cuenca Alto Pozuzo presentó un índice ponderado de 0.66, correspondiente a una aptitud territorial media, con predominio de superficies clasificadas en las categorías media y alta para el desarrollo de la actividad apícola.

Los mayores valores del índice de aptitud territorial apícola se concentraron principalmente en sectores con predominio de vegetación secundaria, matorral arbustivo, pastos y coberturas boscosas localizadas en gradientes altitudinales intermedios, donde convergen condiciones favorables de temperatura, disponibilidad hídrica y diversidad floral. Estas configuraciones ecológicas favorecen la disponibilidad continua de néctar y polen, así como el comportamiento de pecoreo de *A. mellifera*. En contraste, las áreas clasificadas como de baja aptitud o no aptas se localizaron predominantemente en sectores altoandinos con pendientes pronunciadas, restricciones climáticas y limitada cobertura vegetal favorable, condiciones que reducen el potencial territorial para el establecimiento y manejo sostenible de apiarios.

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

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

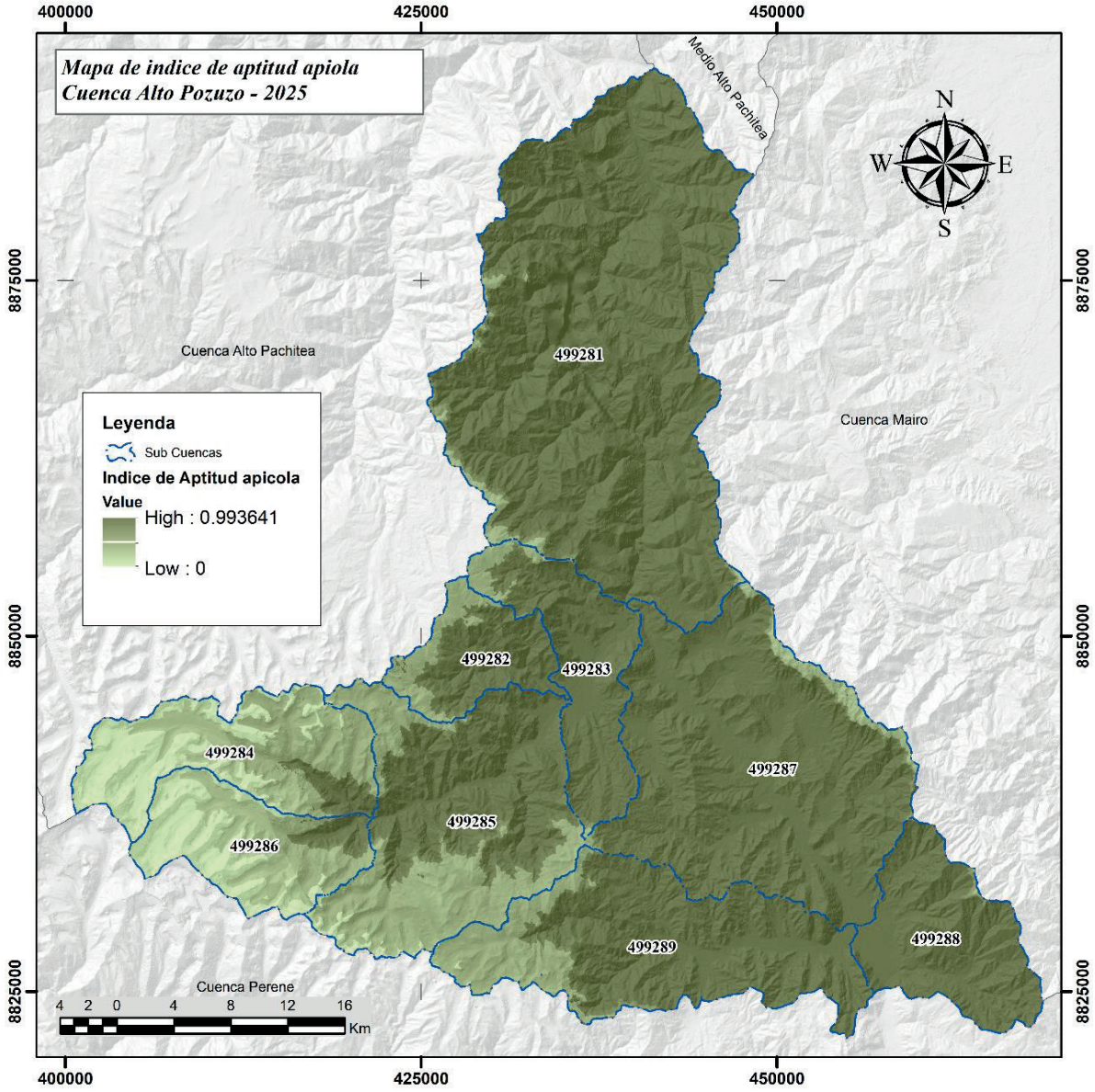


Figura 6. Distribución espacial del índice continuo de aptitud apícola en la cuenca Alto Pozuzo.

Con fines interpretativos, el índice continuo fue reclasificado en categorías ordinales de aptitud territorial apícola (alta, media, baja y no apta), permitiendo identificar espacialmente sectores con diferente potencial para el establecimiento y manejo sostenible de apiarios (Figura 7). Las mayores aptitudes territoriales se registraron en las intercuencas 499287 (Chorobamba; índice = 0,80), 499283 (Ancahuachanan; índice = 0,78) y en la subcuenca 499288 (Llamaquizú; índice = 0,78), donde predominaron condiciones ambientales favorables relacionadas con cobertura vegetal diversa, disponibilidad hídrica y gradientes altitudinales intermedios. Asimismo, la cuenca Alto Pozuzo presentó un índice ponderado general de 0,66, correspondiente a una aptitud territorial media.

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

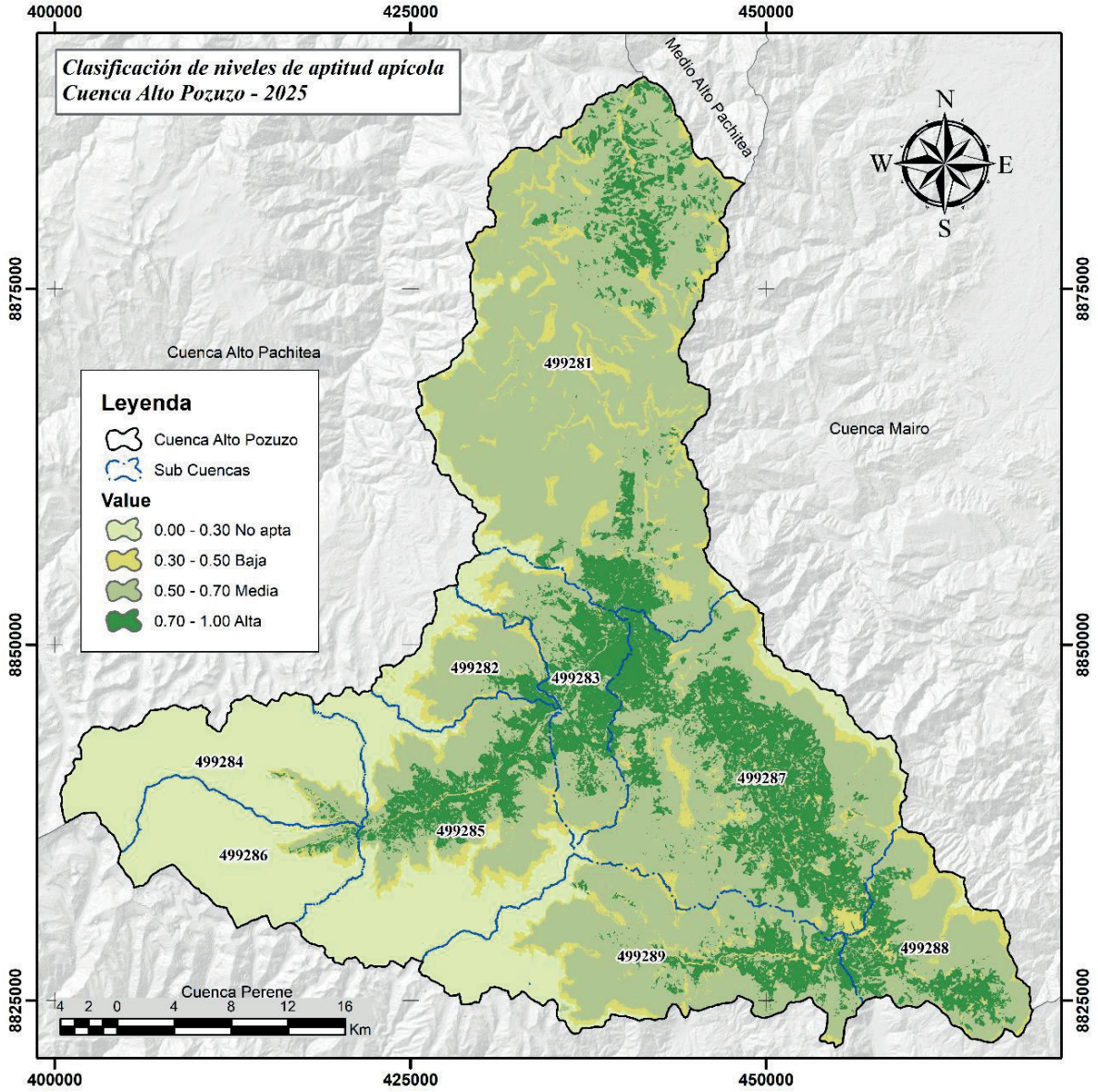


Figura 7. Clasificación de niveles de aptitud territorial apícola en la cuenca del Alto Pozuzo.

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

Unidad Hidrográfica			No Apta 0,00-0,30		Baja 0,30-0,50		Media 0,50-0,70		Alta 0,70-1,00		Índice ponderado	
Código	Nombre	Ha	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 Ancahuachanan	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

(Continúa Tabla 9)

(Continúa Tabla 9)

Unidad Hidrográfica			No Apta 0,00-0,30		Baja 0,30-0,50		Media 0,50-0,70		Alta 0,70-1,00		Índice ponderado	
Código	Nombre	Ha	Ha	%	Ha	%	Ha	%	Ha	%		
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

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

Autocorrelación espacial de la aptitud territorial apícola

El análisis de autocorrelación espacial evidenció que la distribución del índice de aptitud territorial apícola en la cuenca Alto Pozuzo presenta un patrón espacial no aleatorio. El estadístico Global Moran's I mostró autocorrelación espacial positiva y estadísticamente significativa ($I = 0,95$; $z = 113,69$; $p < 0,001$), indicando la existencia de agrupamientos espaciales de aptitud similar dentro del territorio evaluado (Figura 8).

Los resultados evidenciaron que las áreas con alta aptitud territorial apícola tienden a concentrarse espacialmente en sectores con condiciones ecológicas favorables, mientras que las zonas de baja aptitud se asociaron principalmente a restricciones topográficas y climáticas presentes en sectores altoandinos. Este comportamiento confirma la existencia de dependencia espacial en la distribución del potencial apícola y refleja la influencia conjunta de las variables ambientales integradas en el modelo multicriterio.

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

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

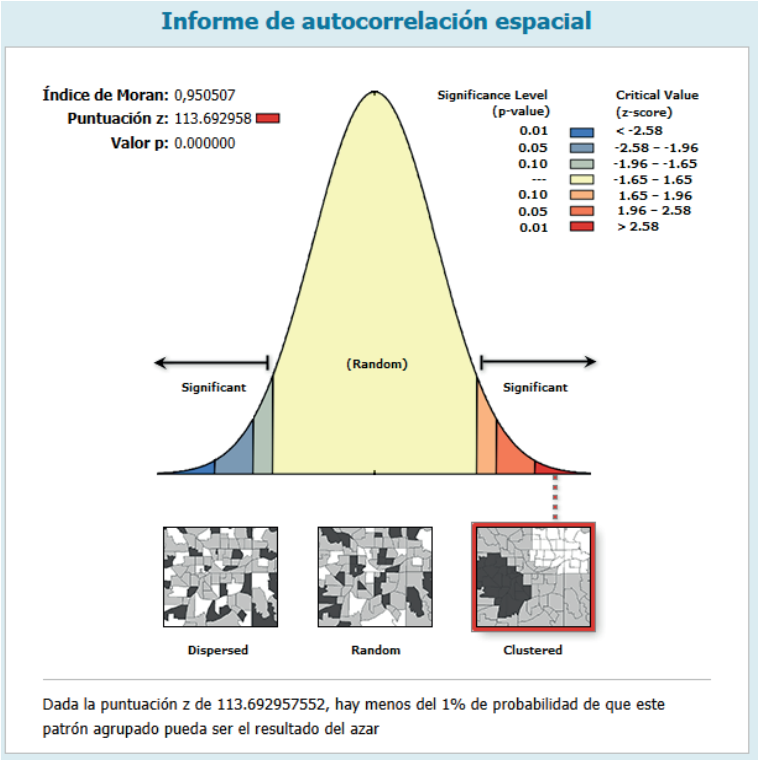


Figura 8. Autocorrelación espacial global del índice de aptitud territorial apícola mediante Moran's I.

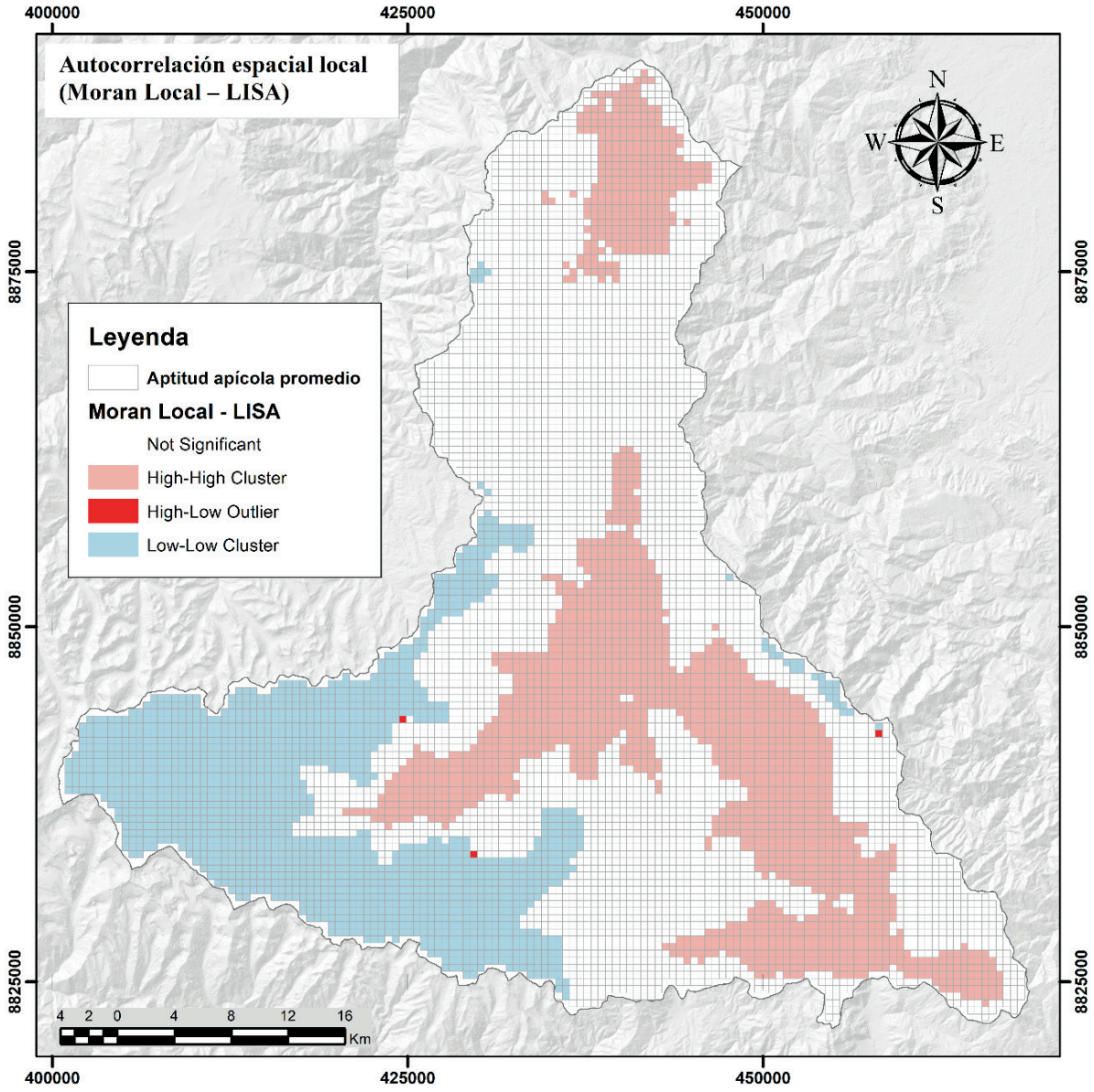


Figura 9. Agrupamientos espaciales del índice de aptitud territorial apícola mediante análisis LISA.

Relación entre aptitud territorial apícola y producción de miel

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

El análisis mediante estadística zonal evidenció variaciones del índice de aptitud territorial apícola en función de los radios de pecoreo evaluados (1000, 2000 y 3000 m). Los resultados mostraron diferencias estadísticamente significativas entre las escalas espaciales analizadas ($H = 8,76$; $p = 0,01$), indicando que la escala de análisis influye en la representación territorial del potencial apícola. El radio de 1000 m presentó los mayores valores promedio del índice de aptitud, evidenciando condiciones más favorables para la actividad apícola en el entorno inmediato de los apiarios. La distribución espacial de los apiarios georreferenciados y sus radios de pecoreo se presentan en la Figura 10.

Previamente al análisis de correlación, se evaluó la normalidad de las variables mediante la prueba de Shapiro–

Wilk. Debido a que la producción anual de miel no presentó distribución normal ($p < 0,05$), se aplicó el coeficiente de correlación no paramétrico de Spearman. Los resultados evidenciaron una correlación positiva y estadísticamente significativa entre el índice de aptitud territorial apícola y la producción anual de miel ($\rho = 0,65$; $p < 0,001$; $n = 40$), indicando que mayores valores de aptitud territorial tienden a asociarse con mayores niveles de producción apícola.

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

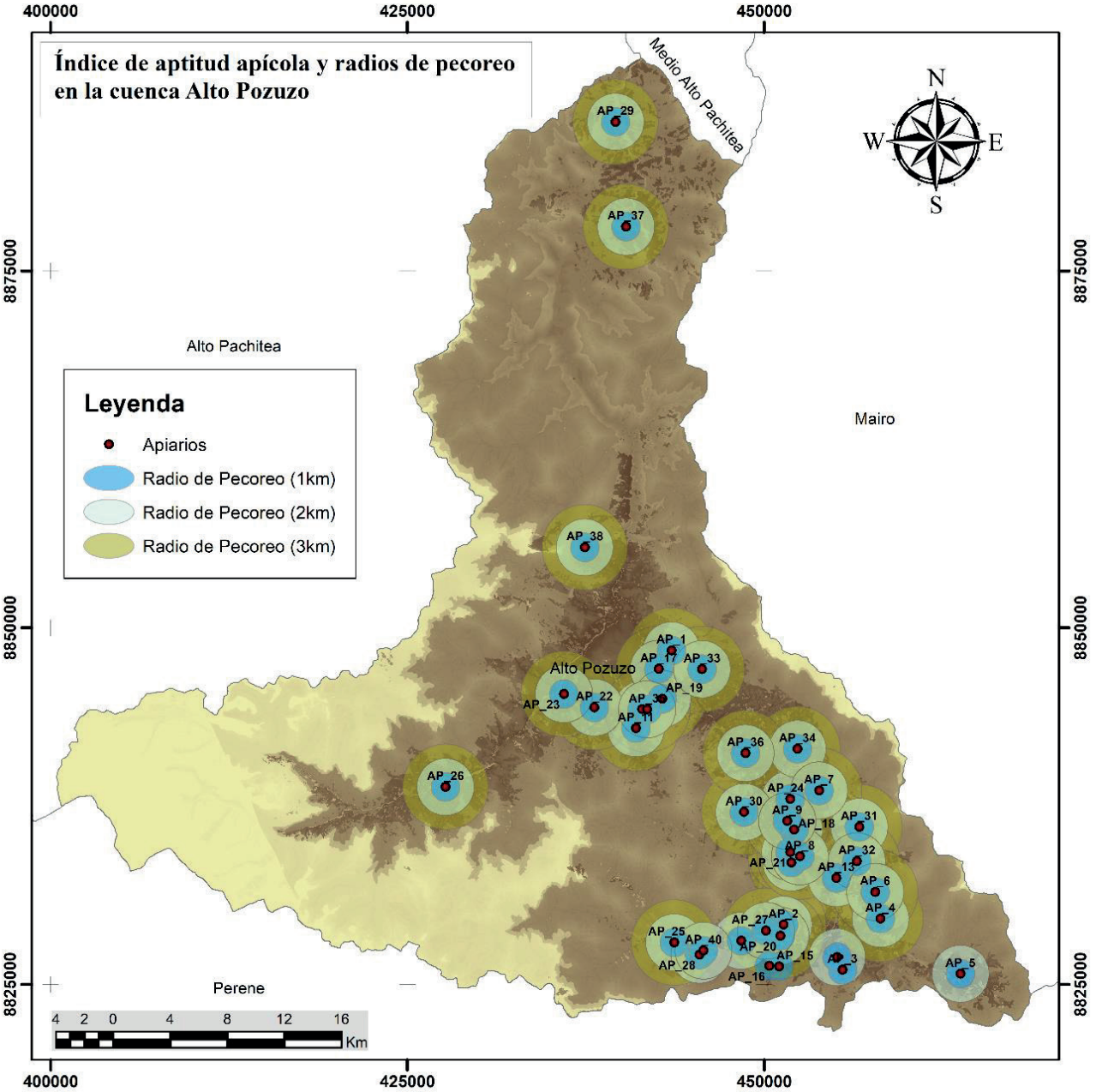


Figura 10. Índice de aptitud territorial apícola y radios de pecoreo en la cuenca Alto Pozuzo.

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

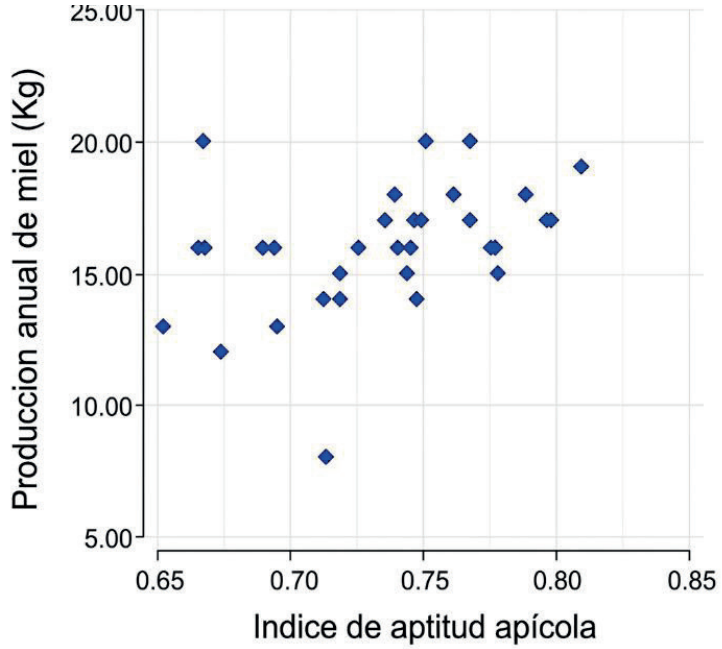


Figura 11. Relación entre el índice de aptitud territorial apícola y la producción anual de miel en apiarios georreferenciados.

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

Tabla 10. Relación estadística entre aptitud territorial apícola y producción de miel según 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		

La distribución del índice de aptitud apícola según la distancia de pecoreo evidenció mayores valores medianos y menor dispersión en el radio de 1000 m en comparación con las distancias de 2000 m y 3000 m, las cuales presentaron comportamientos similares. Asimismo, el análisis estadístico mostró diferencias significativas entre las distancias evaluadas (H = 8,76; p = 0,0125), indicando que las condiciones más favorables para la actividad apícola se concentran en el entorno inmediato de los apiarios. La variabilidad y distribución del índice de aptitud apícola según la distancia de pecoreo se presentan en la Figura 12.

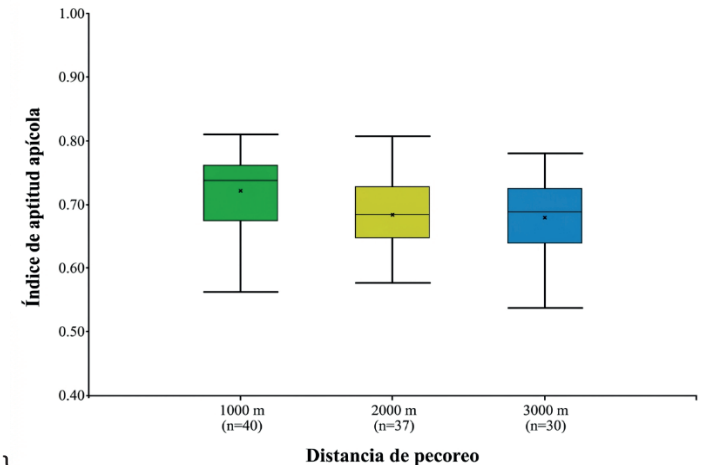


Figura 12. Índice de aptitud territorial apícola según distancia de pecoreo (prueba de Kruskal-Wallis).

DISCUSIÓN

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

El uso y cobertura del suelo presentó la mayor influencia dentro del modelo multicriterio, evidenciando que la estructura ecológica del paisaje constituye el principal condicionante territorial de la actividad apícola. Las unidades dominadas por vegetación secundaria, matorral arbustivo y pastos favorecen la disponibilidad continua de néctar y polen, además de mantener conectividad ecológica y heterogeneidad floral, factores relevantes para el comportamiento de pecoreo de *A. mellifera*. Este comportamiento coincide con investigaciones previas que destacan la importancia de los hábitats seminaturales y la diversidad floral en la sostenibilidad y productividad de los sistemas apícolas (Escobedo-Kenefic *et al.*, 2014; Abou-Shaara, 2019; Elmastaş *et al.*, 2022).

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

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

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

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

La integración de Sistemas de Información Geográfica, Evaluación Multicriterio y Proceso Analítico Jerárquico permitió modelar la aptitud territorial para la apicultura en la cuenca del Alto Pozuzo mediante un índice espacial continuo basado en variables ecológicas, climáticas, topográficas e hidrológicas (González-Áviles *et al.*, 2023). El modelo evidenció una distribución espacial heterogénea del potencial apícola, asociada principalmente a la disponibilidad de cobertura vegetal favorable, condiciones climáticas intermedias y accesibilidad hídrica (Pantoja *et al.*, 2017).

Las unidades hidrográficas con mayores niveles de aptitud territorial se relacionaron con paisajes de vegetación secundaria, matorral arbustivo, pastos y mosaicos agroecológicos, mientras que las áreas con menor aptitud se asociaron a restricciones topográficas y climáticas presentes en sectores altoandinos (Autoridad Nacional del Agua, 2015). Asimismo, el análisis de autocorrelación espacial confirmó la existencia de patrones espaciales estructurados en la distribución del potencial apícola dentro de la cuenca.

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

Author contributions: CRediT (Contributor Roles Taxonomy)

ELNE = Esteban Luis Navarro-Espinoza

JI = José Iannacone

Conceptualization: ELNE, JI

Data curation: ELNE, JI

Formal Analysis: ELNE, JI

Funding acquisition: ELNE, JI

Investigation: ELNE, JI

Methodology: ELNE, JI

Project administration: ELNE, JI

Resources: ELNE, JI

Software: ELNE, JI

Supervision: ELNE, JI

Validation: ELNE, JI

Visualization: ELNE, JI

Writing – original draft: ELNE, JI

Writing – review & editing: ELNE, JI

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Fotso-Kamga, G., Tchuenté, A. T. K., Ndzié, J. P., & Ndzié, J. C. (2024). GIS-based multicriteria and machine

learning approaches for beekeeping suitability assessment under environmental variability. *Ecological Informatics, 82*, 102530.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Received May 5, 2026.

Accepted May 25, 2026.