

More Carranza Rosa A. Y Poquioma Dávila Jordi
PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO (AHP) Y SISTEMAS DE
INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) PARA LA IDENTIFICACIÓ_

 Quick Submit **Quick Submit** Universidad Nacional de Jaen

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:old:::1:3627433915

118 páginas

Fecha de entrega

14 ago 2026, 11:14 a.m. GMT-5

20.793 palabras

116.817 caracteres

Fecha de descarga

14 ago 2026, 11:19 a.m. GMT-5

Nombre del archivo

ARRANZA_JORDI_POQUIOMA_DVILA_INFORME_-JORDI_POQUIOMA_DVILA.pdf

Tamaño del archivo

8.1 MB



UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

Dra. María Marleni Torres Cruz
Responsable de la Unidad de Investigación
en la Facultad de Ingeniería

3% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 15 palabras)

Fuentes principales

- 3% Fuentes de Internet
- 0% Publicaciones
- 1% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

 Dra. María Marleni Torres Cruz
 Responsable de la Unidad de Investigación
 de la Facultad de Ingeniería

Fuentes principales

- 3% Fuentes de Internet
- 0% Publicaciones
- 1% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Fuentes principales

Las fuentes con el mayor número de coincidencias dentro de la entrega. Las fuentes superpuestas no se mostrarán.

1	Internet	www.saaleland.de	<1%
2	Internet	repositorio.unj.edu.pe	<1%
3	Internet	hdl.handle.net	<1%
4	Internet	repositorio.unsaac.edu.pe	<1%
5	Internet	repositorio.ucsm.edu.pe	<1%
6	Trabajos del estudiante	FUNIBER	<1%
7	Internet	www.nepjol.info	<1%
8	Internet	dspace.uii.ac.id	<1%
9	Trabajos del estudiante	Universidad Católica San Pablo	<1%
10	Trabajos del estudiante	Universidad Continental	<1%
11	Internet	cybertesis.uni.edu.pe	<1%

12	Trabajos del estudiante	UTEC Universidad de Ingeniería & Tecnología (NO TOCAR)	<1%
13	Internet	de.slideshare.net	<1%
14	Internet	renati.sunedu.gob.pe	<1%
15	Internet	api-repositorio.unia.edu.pe	<1%
16	Internet	repositori.usu.ac.id	<1%
17	Internet	www.preprints.org	<1%
18	Internet	agritrop.cirad.fr	<1%
19	Internet	alicia.concytec.gob.pe	<1%
20	Internet	es.scribd.com	<1%

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL Y AMBIENTAL



PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO (AHP) Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) PARA LA IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS POTENCIALES DE RELLENO SANITARIO EN JAÉN Y PUCARÁ, CAJAMARCA

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO FORESTAL Y AMBIENTAL

Autor(es): Bach. More Carranza Rosa Analy

Bach. Poquioma Dávila Jordi

Asesor: Mg. Ocaña Zúñiga Candy Lisbeth

Co-asesor: Mg. Huaccha Castillo Annick Estefany

Línea de investigación:

Tecnología para la Gestión Sostenible del Territorio y los Recursos Naturales

JAÉN – AGOSTO – 2026

ÍNDICE

	pág.
RESUMEN	8
ABSTRACT	9
I. INTRODUCCIÓN.....	10
II. ALCANCES Y LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN.....	13
2.1. Alcance de la investigación	13
2.2. Limitaciones del estudio.....	13
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	15
3.1. Materiales y equipos.....	15
3.2. Tipo, enfoque, nivel y diseño de investigación	16
3.2.1. Tipo de investigación	16
3.2.2. Enfoque de investigación	16
3.2.3. Nivel de investigación	16
3.2.4. Diseño de investigación.....	16
3.3. Metodología.....	16
3.3.1. Ubicación del área de estudio.....	16
3.3.2. Métodos	18
IV. RESULTADOS.....	40
4.1. Identificación de las zonas de exclusión por subcriterio	40
4.2. Ponderación de criterios mediante el método AHP.....	49
4.2.1. Submodelos de idoneidad por criterio para el relleno sanitario	52
4.2.2. Modelo de idoneidad final para el relleno sanitario	55
4.3. Determinación del área requerida y selección de polígonos óptimos	57
4.3.1. Dimensionamiento del relleno sanitario.....	57
4.3.2. Dimensionamiento de la celda diaria del relleno sanitario.....	57
4.3.3. Evaluación de la forma de los polígonos (Coeficiente de Compacidad Kc).....	58

4.4. Validación de las áreas de idoneidad	63
4.4.1. Validación estadística (AUC – ROC).....	63
4.4.2. Verificación en campo.....	66
V. DISCUSIÓN.....	78
VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	81
6.1. Conclusiones	81
6.2. Recomendaciones.....	82
VII.REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84
AGRADECIMIENTOS	89
DEDICATORIA	90
ANEXOS	91

ÍNDICE DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. <i>Materiales y equipos utilizados en la ejecución de Tesis</i>	15
Tabla 2. <i>Umbral de reclasificación del distrito de Jaén y Pucará</i>	26
Tabla 3. <i>Escala de Intensidad de Importancia para la comparación de criterios de uno sobre otro</i>	27
Tabla 4. <i>Matriz de criterios principales</i>	28
Tabla 5. <i>Valores del índice de consistencia aleatorio (IA) (Berumen & Redondo, 2007b)</i>	30
Tabla 6. <i>Valores de diseño para rellenos mecanizado y manual según Jaramillo (2002) y MINAM (2018)</i>	31
Tabla 7. <i>Parámetros unificados para el dimensionamiento del relleno sanitario</i>	32
Tabla 8. <i>Coeficiente de compacidad (Kc) – método de Gravelius</i>	35
Tabla 9. <i>Criterios de evaluación y puntuación para verificación en campo</i>	38
Tabla 10. <i>Escala de calificación del puntaje ponderado total</i>	39
Tabla 11. <i>Áreas de subcriterios reclasificados en Jaén y Pucará (Km² y %)</i>	42
Tabla 12. <i>Pesos de criterios y subcriterios mediante AHP</i>	51
Tabla 13. <i>Áreas de los submodelos de aptitud (físico, ambiental, socioeconómico)</i>	53
Tabla 14. <i>Modelo de idoneidad final – áreas muy adecuadas (S3)</i>	56
Tabla 15. <i>Área requerida para relleno sanitario (vida útil 20 años)</i>	57
Tabla 16. <i>Dimensiones de la celda diaria y avance del frente de trabajo</i>	58
Tabla 17. <i>Evaluación de polígonos S3 en Jaén (Kc y aptitud)</i>	59
Tabla 18. <i>Evaluación de polígonos S2 en Pucará (Kc y aptitud)</i>	59
Tabla 19. <i>Verificación de los criterios de exclusión y restricción del polígono A3 – distrito Jaén</i>	68
Tabla 20. <i>Verificación de los criterios de exclusión y restricción del polígono A2 – distrito Pucará</i>	71
Tabla 21. <i>Matriz de comparación por pares de los subcriterios físicos</i>	97
Tabla 22. <i>Matriz normalizada y vector de prioridades (subcriterios físicos)</i>	97
Tabla 23. <i>Consistencia de los juicios para los subcriterios físicos</i>	97
Tabla 24. <i>Matriz de comparación por pares de los subcriterios ambientales</i>	98
Tabla 25. <i>Matriz normalizada y vector de prioridades (subcriterios ambientales)</i>	98
Tabla 26. <i>Consistencia de los juicios para los subcriterios ambientales</i>	98

Tabla 27. Matriz de comparación por pares de los subcriterios socioeconómicos.....	99
Tabla 28. Matriz normalizada y vector de prioridades (subcriterios socioeconómicos)	
.....	99
Tabla 29. Consistencia de los juicios para los subcriterios socioeconómicos	99
Tabla 30. Matriz de comparación por pares de los criterios principales (F, A, E)....	100
Tabla 31. Matriz normalizada y vector de prioridades de los criterios	100
Tabla 32. Consistencia de los juicios para los criterios principales	100
Tabla 33. Multiplicación de matrices de subcriterios con sus respectivos pesos por la matriz de los pesos de los criterios para obtener los pesos globales de los criterios..	101
Tabla 34. Pesos obtenidos de la multiplicación de la tabla 33.....	101
Tabla 35. Comparación de métodos de proyección de RSM (Jaén)	102
Tabla 36. Comparación de métodos de proyección de RSM (Pucará).	103
Tabla 37. Dimensionamiento de la celda diaria Jaén y Pucará	105
Tabla 38. Coeficiente de compacidad (Kc) de los polígonos S3 (Jaén)	106
Tabla 39. Coeficiente de compacidad (Kc) de los polígonos S3 (Pucará)	106
Tabla 40. Puntos para el cálculo del AUC – ROC (Jaén)	107
Tabla 41. Cálculo de la tabla 40.....	107
Tabla 42. Puntos para el cálculo del AUC – ROC (Pucará).....	108
Tabla 43. Cálculo de la tabla 42.....	109
Tabla 44. Coordenadas UTM (WGS84, zona 17S) y cotas (m.s.n.m.) de los puntos topográficos obtenidos mediante SIG – Jaén.....	109
Tabla 45. Coordenadas UTM (WGS84, zona 17S) y cotas (m.s.n.m.) de los puntos topográficos obtenidos mediante SIG – Pucará.....	110
Tabla 46. Coordenadas UTM (WGS84, zona 17S) y cotas (m.s.n.m.) de los puntos topográficos obtenidos mediante SIG – Jaén"	110
Tabla 47. Coordenadas UTM (WGS84, zona 17S) y cotas (m.s.n.m.) de los puntos topográficos obtenidos mediante SIG – Pucará"	111
Tabla 48. Coordenadas UTM de los polígonos seleccionados.....	112

ÍNDICE DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Mapa de ubicación de las áreas de estudio	17
Figura 2. Metodología para la identificación de áreas potenciales para relleno sanitario en Jaén y Pucará.	18
Figura 3. Construcción de jerarquía de los criterios	20
Figura 4. Matrices de subcriterios	28
Figura 5. Subcriterios físicos reclasificados según idoneidad – distrito de Jaén	43
Figura 6. Subcriterio ambientales reclasificados según idoneidad – distrito Jaén	44
Figura 7. Subcriterios socioeconómicos reclasificados según idoneidad – distrito Jaén	45
Figura 8. Subcriterios físicos reclasificados según idoneidad – distrito Pucará.....	46
Figura 9. Subcriterios ambientales reclasificados según idoneidad – distrito Pucará	47
Figura 10. Subcriterios socioeconómicos reclasificados según idoneidad – distrito Pucará	48
Figura 11. Submodelos de idoneidad por criterio – distrito Jaén.....	54
Figura 12. Submodelos de idoneidad por criterio – distrito Pucará.....	54
Figura 13. Mapa de idoneidad final (Jaén y Pucará)	56
Figura 14. Polígonos reclasificados para el distrito de Jaén y Pucará	60
Figura 15. Polígonos aptos y no aptos en el distrito de Jaén.....	61
Figura 16. Polígonos aptos y no aptos en el distrito de Pucará	62
Figura 17. Curva ROC del modelo de aptitud territorial – distrito Jaén.....	63
Figura 18. Curva de corte (sensibilidad y especificidad vs. umbral) – distrito Jaén...	64
Figura 19. Curva ROC del modelo de aptitud territorial – distrito Pucará	65
Figura 20. Curva de corte (sensibilidad y especificidad vs. umbral) – distrito Pucará	66
Figura 21. Área óptima para ubicar un relleno sanitario en el distrito de Jaén (polígono A3)	67
Figura 22. Área óptima para ubicar un relleno sanitario en el distrito de Pucará (polígono A2).....	70
Figura 23. Perfil de la calicata en el polígono A3 – distrito Jaén	73
Figura 24. Ensayo de textura de suelo del polígono A3 – Jaén	74
Figura 25. Ensayo de sedimentación para la muestra del polígono A3 (Jaén) tras 24 h.	75

Figura 26. Perfil de la calicata en el polígono A2 – distrito Pucará	76
Figura 27. Ensayo de textura del suelo del polígono A2 – Pucará	77
Figura 28. Solicitud del Laboratorio de Cómputo para el uso del software ArcGIS....	91
Figura 29. Solicitud del equipo GPS del Laboratorio de Ingeniería Forestal y Ambiental	92
Figura 30. Descarga de cuadros de empalme del Instituto Geográfico Nacional – IGN	93
Figura 31. Descarga de peligros geológicos y otras capas de la plataforma SIGRID del CENEPRED.....	93
Figura 32. Procedimiento para el subcriterio F1 en Jaén	94
Figura 33. Procedimiento para el subcriterio F1 en Pucará	94
Figura 34. Distancia Euclidiana E1 en Jaén.....	95
Figura 35. Distancia euclidiana A2 (red hidrográfica) en Pucará.	95
Figura 36. Distancia euclidiana E2 Jaén	96
Figura 37. Distancia euclidiana E3 Pucará	96
Figura 38. Búsqueda de los reportes anuales de RSM en la página del SIGERSOL.	101
Figura 39. Cálculo del área requerida para el relleno sanitario – distrito Jaén.....	103
Figura 40. Cálculo del área requerida para el relleno sanitario – distrito Pucará ..	104
Figura 41. Cálculo del avance diario de la celda de disposición final para Jaén, año 2026	104
Figura 42. Puntos de corte Jaén.....	107
Figura 43. Puntos de corte Pucará.....	109
Figura 44. Materiales empleados en la visita in situ.....	112
Figura 45. Equipo de trabajo investigando en campo.....	113
Figura 46. Verificación in situ en el polígono A3 - Jaén.....	113
Figura 47. Verificación de los criterios y puntuación A3 - Jaén.....	114
Figura 48. Cobertura vegetal presente en el polígono A3 - Jaén.....	115
Figura 49. Verificación in situ en el polígono A2 - Pucará	115
Figura 50. Verificación de los criterios y puntuación - A2 Pucará	116
Figura 51. Cobertura vegetal presente en el polígono A2 - Pucará	117
Figura 52. Relleno sanitario actual de Jaén ubicado en un área inadecuada.....	118

RESUMEN

La disposición final inadecuada de los residuos sólidos municipales (RSM) genera graves impactos ambientales y sanitarios, problemática que afecta a los distritos de Jaén y Pucará (Cajamarca, Perú). Esta investigación integró el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para identificar áreas potenciales para la instalación de un relleno sanitario. La metodología se estructuró en cinco fases: (i) delimitación del área de estudio, definición de criterios y subcriterios ; (ii) procesamiento y reclasificación de información espacial con resolución ráster de 15 m; (iii) ponderación de criterios y subcriterios mediante AHP (matrices de comparación pareada, escala de Saaty) y generación del modelo de idoneidad; (iv) estimación del área requerida para una vida útil de 20 años y evaluación de la compacidad de los polígonos mediante el coeficiente de Gravelius (Kc); y (v) validación del modelo mediante curvas AUC – ROC y verificación de campo. Los resultados mostraron que el criterio físico tuvo la mayor influencia (53 %), seguido del socioeconómico (32 %) y del ambiental (15 %). En Jaén se identificaron 59,05 Km² (10,65 %) como “muy adecuados”, mientras que en Pucará esta categoría alcanzó 8,94 Km² (4,06 %). El área mínima requerida fue de 11.29 ha en Jaén y de 0.88 ha en Pucará. La validación arrojó valores de AUC de 0.798 y 0.774 respectivamente, lo que indica una confiabilidad aceptable del modelo. Se concluye que la integración de AHP y SIG constituye una herramienta efectiva para la identificación preliminar de áreas potenciales para rellenos sanitarios.

Palabras clave: relleno sanitario, residuos sólidos municipales, análisis multicriterio, modelamiento espacial, idoneidad territorial

ABSTRACT

The improper disposal of municipal solid waste (MSW) causes serious environmental and health impacts, a problem that affects the districts of Jaén and Pucará (Cajamarca, Peru). This study integrated the Analytic Hierarchy Process (AHP) and Geographic Information Systems (GIS) to identify potential sites for landfill construction. The methodology was structured in five phases: (i) delimitation of the study area, definition of criteria and subcriteria; (ii) processing and reclassification of spatial data with a 15-meter raster resolution; (iii) weighting of criteria and subcriteria using AHP (pairwise comparison matrices, Saaty scale) and generation of the suitability model; (iv) estimation of the area required for a 20-year service life and evaluation of the compactness of the polygons using the Gravelius coefficient (K_c); and (v) validation of the model using ROC AUC curves and field verification. The results showed that the physical criterion had the greatest influence (53%), followed by the socioeconomic (32%) and environmental (15%) criteria. In Jaén, 59.05 Km² (10.65%) were identified as “very suitable,” while in Pucará this category amounted to 8.94 Km² (4.06%). The minimum area required was 11.29 ha in Jaén and 0.88 ha in Pucará. Validation yielded AUC values of 0.798 and 0.774, respectively, indicating acceptable model reliability. It is concluded that the integration of AHP and GIS constitutes an effective tool for the preliminary identification of potential areas for sanitary landfill siting.

Keywords: sanitary landfill, municipal solid waste, multi-criteria analysis, territorial suitability, spatial modeling

I. INTRODUCCIÓN

Según la Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2024), a nivel mundial se generan aproximadamente 2,000 millones de toneladas (t) de residuos sólidos cada año, de los cuales al menos el 45% no se gestionan adecuadamente. En este contexto, la generación de residuos sólidos municipales (RSM) ha experimentado un crecimiento acelerado en las últimas décadas, debido al aumento de la población, la urbanización no planificada y los cambios en los patrones de consumo. Según el World Bank Group (WBG, 2018), se estima que para el año 2050 la producción mundial de residuos aumentará más del 70%, lo que representa un desafío crítico para los gobiernos locales y los responsables de la gestión ambiental. La disposición final inadecuada de estos residuos en botaderos a cielo abierto o en áreas no técnicamente seleccionadas genera graves impactos ambientales, tales como la contaminación del suelo y del agua, la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) y la proliferación de vectores sanitarios, lo que afecta directamente la salud pública y la calidad de vida de la población (Jaramillo, 2002; Turab et al., 2021; Nicolini, 2022).

En el Perú, la generación de RSM se ha incrementado en los últimos años, pasando de 6,90 millones de t en 2014 a 8,71 millones de t en 2023, según lo reportado por el Centro Nacional de Planeamiento Estratégico ([CEPLAN], 2025), y el Ministerio del Ambiente ([MINAM], 2024) ha reportado una generación promedio anual de 8,45 millones de t. No obstante, la infraestructura destinada a la disposición final resulta insuficiente; de acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística e Informática ([INEI], 2024), de los 1869 municipios que brindan el servicio de limpieza pública, solo 388 cuentan con un relleno sanitario, lo que representa apenas el 20,8%.

En la región de Cajamarca, la situación es aún más crítica. Durante el período 2016 – 2020, se generaron en promedio 145,673 t anuales de RSM (Sánchez et al., 2023), y en 2021 la cifra ascendió a 157,737 t (MINAM, 2022). De las 127 municipalidades distritales, únicamente 14 disponen de esta infraestructura (11%) y según Sánchez et al. (2023), el 81,9% de los residuos recolectados termina en botaderos a cielo abierto. En este contexto, los distritos de Jaén y Pucará, pertenecientes a la provincia de Jaén, presentan realidades diferenciadas, pero con problemáticas similares. Jaén dispone actualmente de un relleno sanitario; sin embargo, se estima que su vida útil esté próxima a agotarse; Pucará, en cambio, carece totalmente de una infraestructura adecuada para la

disposición final de sus residuos. Ambas situaciones requieren la identificación de nuevas áreas potenciales que cumplan con los criterios técnicos, ambientales, sociales y normativos establecidos (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2021).

10 En el ordenamiento legal peruano, la gestión de RSM se rige actualmente por el Decreto Legislativo N.º 1278, Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos (2017), y su reglamento, el Decreto Supremo N.º 014-2017-MINAM. Estas normas establecen los principios, obligaciones y competencias de los gobiernos nacionales, regionales y locales. Por otro lado, la Ley N.º 29419 (2009) complementa estas reglas, pero pensando en los recicladores, mediante el impulso de su formalización, protección y trabajo asociativo.

3 En cuanto a la ubicación de rellenos sanitarios, la Resolución Ministerial N° 124-2021-MINAM aprueba la "Guía para la identificación de zonas potenciales para infraestructura de disposición final de residuos sólidos municipales", la cual contempla: (i) criterios de exclusión, que inhabilitan automáticamente un sitio, tales como la distancia a cuerpos de agua, a fallas geológicas, a Áreas Naturales Protegidas, Centros Poblados; y (ii) criterios de restricción, que favorecen una evaluación ponderada de un sitio, tales como la pendiente del terreno, el tipo de suelo, la cobertura vegetal y accesibilidad.

La identificación de sitios para la ubicación de un relleno sanitario es un trabajo indispensable y riguroso que integra múltiples criterios (físicos, ambientales y socioeconómicos) y el análisis de información territorial. Ante esta complejidad, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se han convertido en una herramienta clave para manejar y analizar datos espaciales, reduciendo el tiempo de evaluación y facilitando la toma de decisiones (Espejo, 2017; Olaya, 2020). Complementariamente, Saaty (1980) desarrolló el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) como un método de decisión multicriterio fundamentado en la matriz de comparación por pares (PCM), donde se comparan los criterios de dos en dos, asignándoles valores en la escala del 1 al 9 según cuán importante sea uno sobre el otro. Así se obtiene el peso de cada criterio y se calcula la razón de consistencia (CR), que posibilita evaluar la coherencia de los juicios emitidos. La integración del AHP con los SIG logra una ponderación más precisa de los criterios, fortalece el análisis espacial y facilita la superposición de capas de información, logrando mapas claros y exactos (Borja et al., 2019).

Diversos estudios han demostrado la efectividad de la integración AHP – SIG para la identificación de áreas potenciales de rellenos sanitarios y su empleo en diferentes contextos geográficos y problemáticos como: Saldaña y Nájera (2019) en México,

Karakuş et al., (2020) en Turquía, Estacio et al., (2021) en Cerro de Pasco, Silva et al., (2022) en Chachapoyas y Huancas, Zabaleta, (2022) en la Mancomunidad del Alto Utcubamba, Vásquez et al., (2024) en Chota, Vergara et al., (2024) en Rodríguez de Mendoza y, por último, Rivera et al., (2025) en la cuenca del Río Utcubamba, quienes aplicaron con éxito esta metodología, demostrando su capacidad para generar mapas de idoneidad confiables y reducir la subjetividad en la elección de sitios. Estos antecedentes respaldan la pertinencia del enfoque metodológico elegido para los distritos de Jaén y Pucará.

Esta investigación contribuye a reducir la brecha de infraestructura de disposición final de RSM en ambos distritos y, asimismo, ofrece una metodología replicable para otras jurisdicciones con problemáticas similares, fortaleciendo la planificación territorial desde un enfoque de desarrollo sostenible.

Por ello, la presente investigación tiene como objetivo general identificar áreas potenciales para instalar un relleno sanitario, a nivel de reconocimiento territorial, mediante la integración del Proceso Analítico Jerárquico (AHP) y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en los distritos de Jaén y Pucará. Asimismo, se plantean los siguientes objetivos específicos: (i) identificar zonas de exclusión a partir de los subcriterios establecidos; (ii) ponderar los criterios mediante el método AHP y generar el modelo de idoneidad espacial; (iii) determinar el área requerida para un horizonte de proyección de 20 años y priorizar los polígonos con mayor aptitud mediante el coeficiente de compacidad (kc); y (iv) validar las áreas de idoneidad mediante el análisis de la curva AUC – ROC y verificación en campo.

II. ALCANCES Y LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. Alcance de la investigación

La presente investigación comprende la identificación de áreas potenciales para la ubicación de un relleno sanitario a nivel de reconocimiento territorial, que abarca los distritos de Jaén y Pucará (Cajamarca, Perú). El estudio se desarrolla hasta la fase de selección de polígonos con mayor aptitud, basada en criterios físicos, ambientales y socioeconómicos, así como en el dimensionamiento preliminar del área requerida para una vida útil de 20 años y en la evaluación de la compacidad de los polígonos (coeficiente de Gravelius, Kc). La validación del modelo se realizó mediante curvas AUC-ROC y verificación de campo puntual. Sin embargo, el presente trabajo no incluye estudios de ingeniería de detalle, como diseños estructurales del relleno sanitario, estudios de impacto ambiental (EIA), expedientes técnicos, estudios hidrogeológicos profundos, ni análisis de suelos con ensayos de laboratorio normalizados (permeabilidad, capacidad portante, límites de Atterberg, granulometría completa, entre otros). Dichos componentes corresponden a fases posteriores del proyecto, previas a cualquier decisión de inversión.

2.2. Limitaciones del estudio

El desarrollo de la investigación presentó las siguientes limitaciones metodológicas y técnicas, que deben ser consideradas al interpretar los resultados:

Ponderación de criterios (AHP): La asignación de pesos en las matrices de comparación pareada se realizó con base en el juicio de los investigadores, las asesoras y la revisión de literatura especializada (Belalcázar, 2019; MINAM, 2021; Silva et al., 2022; Zabaleta, 2022). No se empleó un panel externo de expertos en geotecnia, ingeniería ambiental y planificación territorial, lo que introduce un cierto grado de subjetividad propio del método AHP. Esta limitación es reconocida y se propone superarla en futuras investigaciones mediante la aplicación del método Delphi o consulta a especialistas de entidades competentes (Municipalidades, MINAM, INGEMMET).

Validación estadística (AUC – ROC): La validación del modelo de aptitud se realizó con 24 puntos de control en total (12 por distrito). Si bien este número es suficiente para un análisis exploratorio y ha sido empleado en estudios similares (Zabaleta, 2022; Vergara et al., 2024), se reconoce que un mayor número de puntos de campo (≥ 30 por distrito) habría aumentado la robustez estadística del modelo y reducido el error estándar en la

estimación del AUC. Por tanto, los valores de AUC obtenidos (0,798 y 0,774) deben interpretarse como una validación preliminar aceptable, pero no definitiva.

Verificación de campo: La verificación de campo no tuvo como finalidad caracterizar individualmente todos los polígonos inicialmente identificados, sino comprobar in situ las condiciones de las alternativas que luego fueron priorizadas por distrito por ello, esta se consideró como un complemento al modelo para validar la viabilidad de las opciones mejor calificadas. En Jaén se verificó el polígono A3 (sector Mochenta) y en Pucará el polígono A2 (sector San Isidro de la Vega). Los polígonos restantes A1, A4 y A6 en Jaén; A5 y A6 en Pucará, clasificados como 'muy adecuados' (S3), no fueron verificados en campo, por lo que los resultados del modelo no han sido contrastados exhaustivamente con la realidad territorial en toda su extensión. Esta limitación no invalida el modelo, pero subraya la necesidad de ampliar el muestreo de campo en estudios posteriores, a fin de corroborar la clasificación del resto de polígonos identificados.

Resolución espacial y calidad de datos: El procesamiento se basó en un modelo digital de elevación (DEM) ALOS PALSAR con resolución de 12,5 m, remuestreado a 15 m, así como en cartografías temáticas a escala 1:100 000 (peligros geológicos, hidrografía, neotectónica). Estas escalas y resoluciones son adecuadas para análisis a nivel distrital y de reconocimiento, pero pueden introducir errores locales en pendientes, distancias y límites de unidades geológicas, especialmente en zonas de relieve accidentado como Pucará. Para un diseño de detalle, se requiere levantamiento topográfico con GPS diferencial y drones (UAV), así como cartografía geotécnica a mayor escala.

Caracterización de suelos: Los ensayos de textura realizados (caída de la bola, cordón, cinta y sedimentación en frasco) son de carácter exploratorio y cualitativo, orientados a una primera aproximación de la textura del suelo. No sustituyen los análisis de laboratorio normalizados (ensayos de permeabilidad, capacidad portante, plasticidad, granulometría, contenido de materia orgánica, pH y nivel freático), que son exigidos por la normativa para la elaboración de expedientes técnicos de rellenos sanitarios.

Estas limitaciones no restan validez al enfoque metodológico AHP – SIG como herramienta de planificación territorial, pero sí delimitan el alcance de las conclusiones, las cuales deben entenderse como una identificación preliminar de áreas de interés, y no como una certificación definitiva de idoneidad para la construcción.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Materiales y equipos

Los materiales y equipos utilizados en el desarrollo de la investigación se detallan en la Tabla 1, clasificados según su tipo y utilidad para cada proceso realizado.

Tabla 1.

Materiales y equipos utilizados en la ejecución de Tesis

Ítem	Tipo	Utilidad
Data cartográfica y satelital	División política, regional y distrital (INEI)	Delimitación de mapas
	Archivos shape de centros poblados, carreteras, minería (MINEDU, INGEMMET)	Procesamiento de datos espaciales, la reclasificación de capas ráster y la elaboración de los mapas de aptitud
Equipos	Laptop Lenovo Core i3	Procesamiento de datos, análisis y redacción del proyecto
	Memoria USB	Almacenamiento de información.
	GPS Garmin	Georreferenciación de puntos de validación y ubicación de áreas potenciales
Software	Software ArcGIS 10.8.3	Determinar las áreas de idoneidad y generar los mapas temáticos
	Google Maps	Verificación complementaria de accesibilidad y cobertura de áreas identificadas
	Microsoft Office 2021	Cálculos, tablas y redacción del informe
Materiales de campo	Libreta de campo	Registro de observaciones y datos in situ
	Hojas bond A4	Toma de notas y verificación de criterios
	Lapicero	Registro de datos
	Palana y barreta	Ejecución de calicatas para evaluar textura del suelo

5

3.2. Tipo, enfoque, nivel y diseño de investigación

3.2.1. Tipo de investigación

La presente investigación es de tipo aplicada, ya que se orienta a resolver un problema práctico y concreto: la identificación de áreas potenciales para ubicar un relleno sanitario en los distritos de Jaén y Pucará.

3.2.2. Enfoque de investigación

La investigación tiene un enfoque cuantitativo, debido a que se trabajó con datos numéricos y mediciones objetivas, tanto en la ponderación de criterios mediante el AHP como en el procesamiento de información espacial y el cálculo de áreas, distancias y coeficientes (coeficiente de compacidad K_c y curvas AUC – ROC).

3.2.3. Nivel de investigación

La investigación es de nivel descriptivo-evaluativo, porque se describen las características físicas, ambientales y socioeconómicas del territorio, y se evalúa la aptitud de las áreas mediante un modelo de idoneidad que clasifica el territorio en categorías de aptitud (inadecuado, moderadamente adecuado y muy adecuado).

3.2.4. Diseño de investigación

El diseño es no experimental, ya que no se manipularon variables ni se realizaron experimentos controlados; por el contrario, se observaron y analizaron las condiciones existentes del territorio a través de la integración de información geoespacial y análisis multicriterio, complementado con verificación in situ de los polígonos seleccionados.

3.3. Metodología

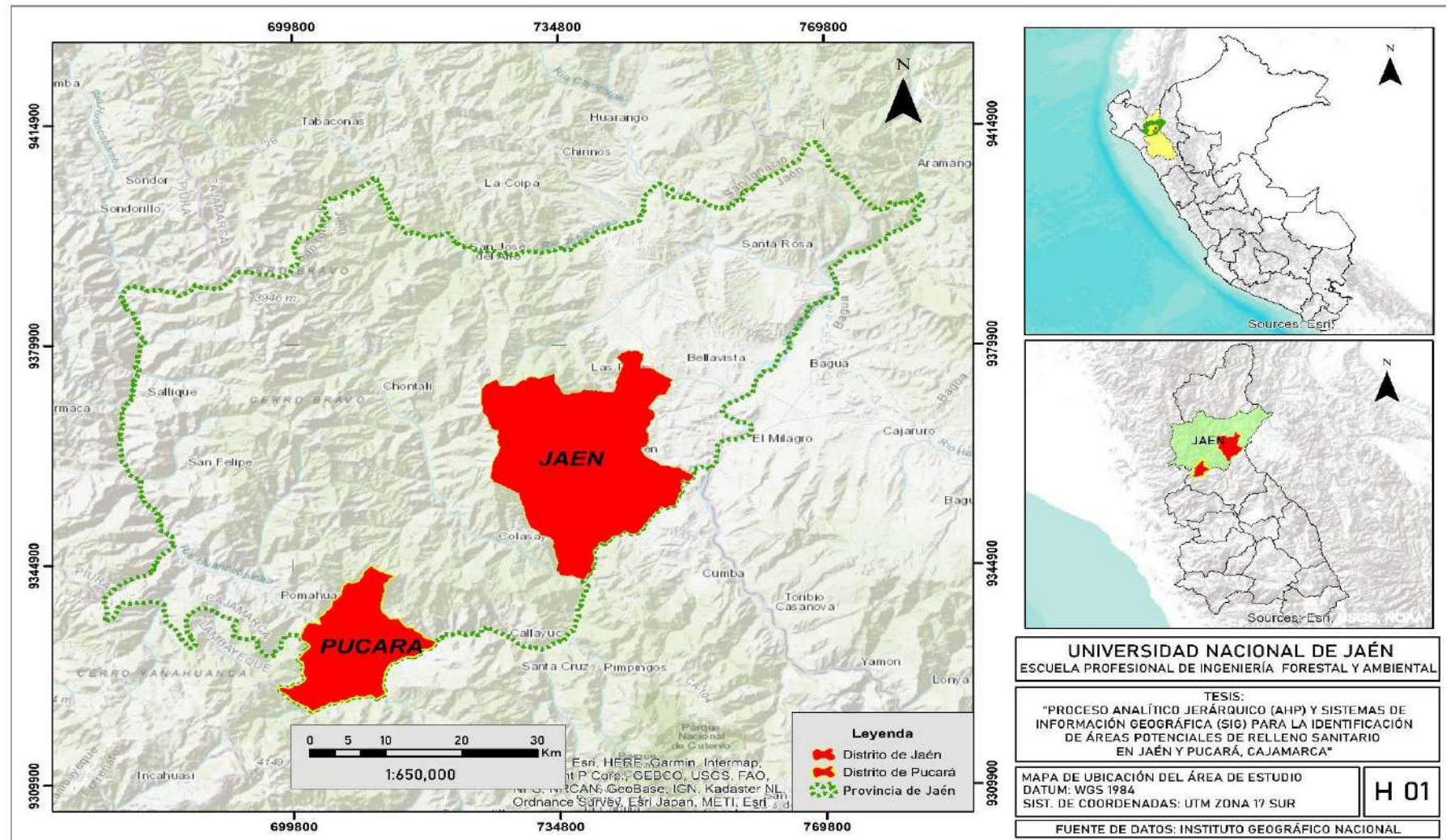
3.3.1. Ubicación del área de estudio

La investigación se desarrolló en el ámbito geográfico de los distritos de Jaén y Pucará, provincia de Jaén, departamento de Cajamarca. El distrito de Jaén se ubica geográficamente en las coordenadas $5^{\circ}42'51''S$ y $78^{\circ}48'42''O$; presenta una topografía de pendiente baja, con altitudes que varían desde los 729 m s. n. m. y cuenta con una superficie de 556.29 Km². Por su parte, el distrito de Pucará se localiza en las coordenadas $6^{\circ}02'20''S$ y $79^{\circ}07'46''O$, caracterizándose por presentar pendientes más empinadas, con una altitud de 900 m s. n. m. y una extensión de 221.14 Km². La ubicación y delimitación de ambos distritos se presentan en la Figura 1.

19

Figura 1.

Mapa de ubicación de las áreas de estudio



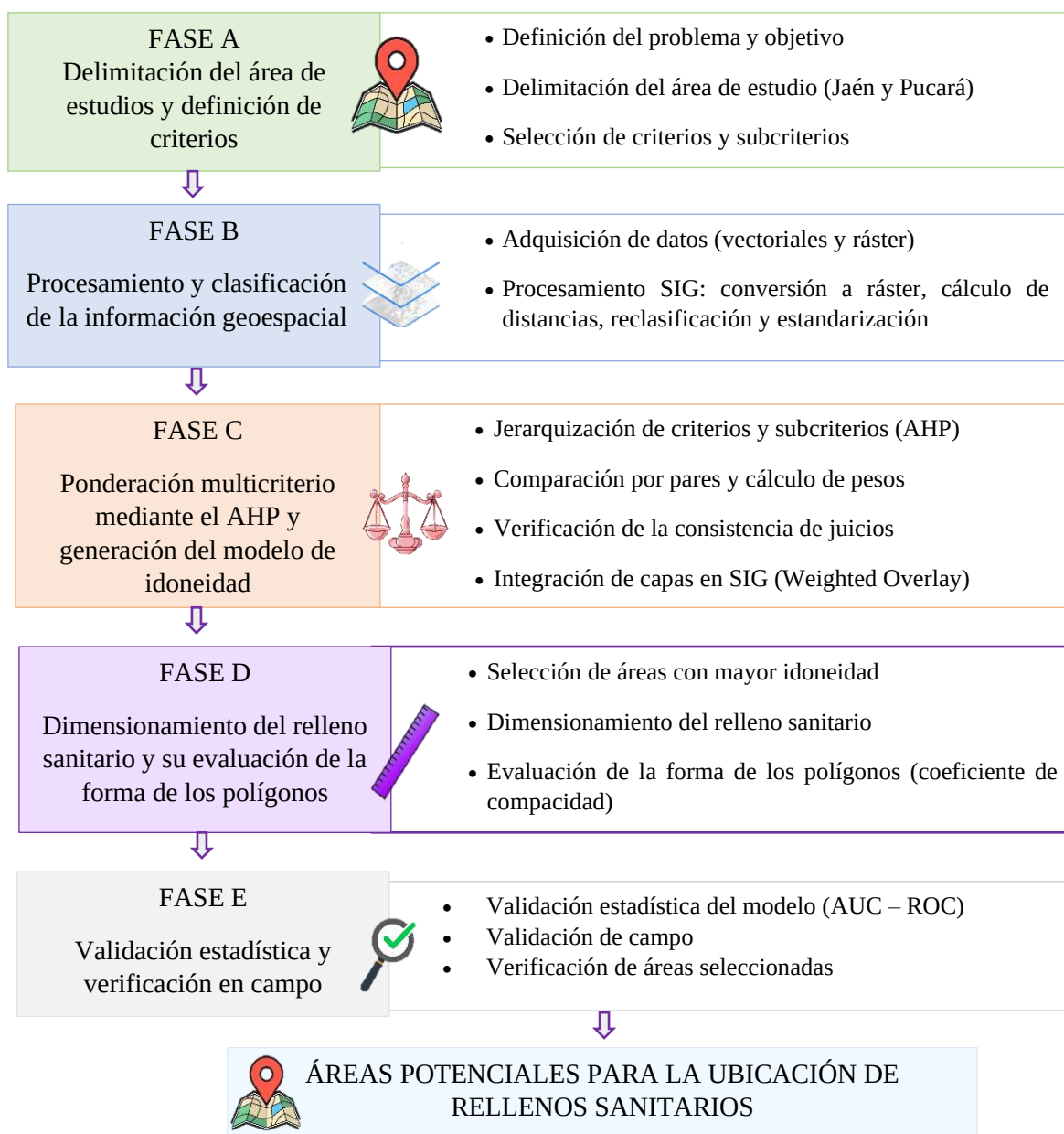
Nota: El mapa muestra la ubicación de los distritos de Jaén (556.29 Km²) y Pucará (221.14 Km²) en la provincia de Jaén, departamento de Cajamarca.

3.3.2. Métodos

La metodología se estructuró en cinco fases secuenciales: A) delimitación del área de estudio y definición de criterios y subcriterios; B) procesamiento y clasificación de la información espacial; C) ponderación multicriterio mediante el AHP y generación del modelo de idoneidad; D) determinación del área requerida y evaluación de la forma de los polígonos; y E) validación estadística mediante la curva AUC – ROC y verificación in situ de las áreas.

Figura 2.

Metodología para la identificación de áreas potenciales para relleno sanitario en Jaén y Pucará.



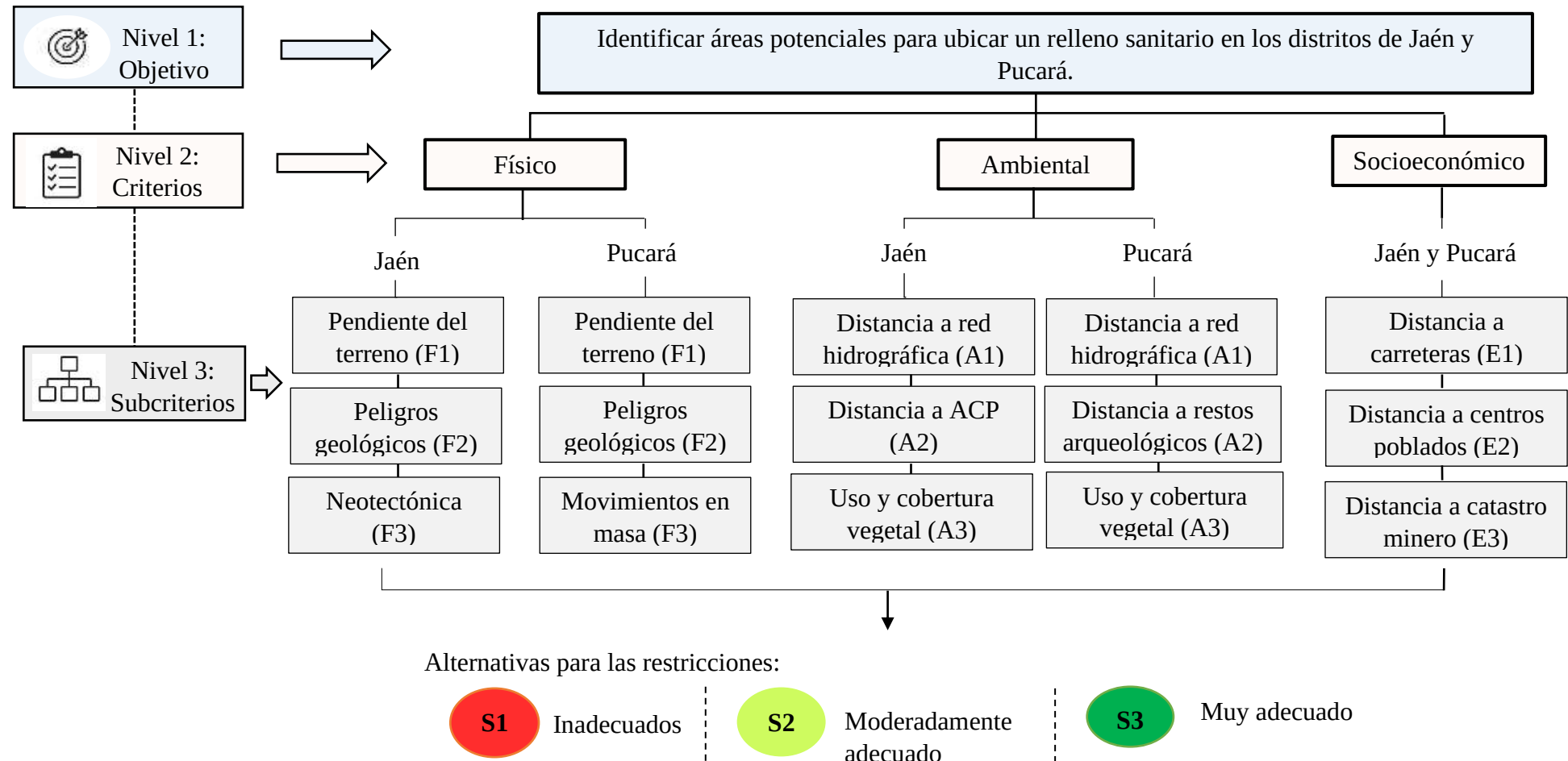
A) Delimitación del área de estudio y determinación de criterios

Se delimitaron cartográficamente los distritos de Jaén y Pucará. A partir de esta base, se identificó la problemática local asociada a la gestión de residuos sólidos, lo que condujo a la necesidad de identificar áreas potenciales para un relleno sanitario.

Para estructurar la evaluación, se elaboró una jerarquía (Figura 3) basada en la "Guía para la identificación de zonas potenciales para la infraestructura de disposición final de residuos sólidos municipales" (MINAM, 2021).

Figura 3.

Construcción de jerarquía de los criterios



A continuación, se describen y justifican los subcriterios empleados en el análisis multicriterio.

A.1) Criterio físico: Este criterio tiene como finalidad garantizar la estabilidad del terreno y evitar riesgos geológicos que puedan comprometer la infraestructura del relleno sanitario. Incluye los siguientes subcriterios:

- ✓ **Pendiente del terreno (F1):** La pendiente del terreno es un factor crítico en la selección de áreas para la instalación de rellenos sanitarios, ya que influye directamente en el control de lixiviados, la estabilidad del sistema y la eficiencia operativa. De acuerdo con Belalcázar Urbano (2019), los rellenos sanitarios deben ubicarse en terrenos con pendientes comprendidas entre 3% y 12%, y no se recomienda superar el 25%, según los lineamientos establecidos por el MINAM (2021).

Las pendientes superiores al 25 % incrementan la inestabilidad de los taludes, dificultan la compactación de los residuos y limitan la maniobrabilidad de la maquinaria pesada, lo que reduce la densidad de compactación requerida y aumenta el riesgo de deslizamientos. Adicionalmente, en pendientes pronunciadas, la velocidad de la escorrentía superficial se incrementa, acelerando los procesos erosivos y favoreciendo el arrastre de contaminantes hacia los cuerpos de agua cercanos, lo que compromete la calidad del entorno.

- ✓ **Peligros geológicos (F2):** La consideración de los peligros geológicos es fundamental para evitar la ubicación de rellenos sanitarios en zonas susceptibles a deslizamientos, derrumbes, hundimientos o fallas activas. La inestabilidad geológica del terreno puede comprometer la integridad estructural del relleno, afectando los sistemas de impermeabilización, el control de lixiviados y la estabilidad de taludes. Un evento geológico podría provocar la exposición de residuos, filtraciones al subsuelo y riesgos para la salud pública. Por ello, el MINAM, (2021) recomienda mantener una distancia mínima de seguridad superior a 1 Km de estas áreas de riesgo, a fin de garantizar la viabilidad técnica y ambiental del proyecto.
- ✓ **Neotectónica (F3) / Movimientos en masa (F3):** La neotectónica (en Jaén) y los movimientos en masa (en Pucará) son factores determinantes para la estabilidad del terreno. La presencia de fallas geológicas activas o de zonas con deslizamientos, derrumbes o flujos de escombros puede generar deformaciones, fracturas y

desplazamientos del suelo que afecten la infraestructura del relleno sanitario, especialmente los sistemas de impermeabilización, y faciliten la migración de lixiviados hacia los acuíferos. Por tanto, se excluyen las áreas cercanas a estas estructuras, estableciendo distancias de seguridad que minimicen el riesgo ante posibles eventos tectónicos o de inestabilidad de ladera.

Consideración conjunta del subcriterio F3: Si algo tienen en común la neotectónica y los movimientos en masa, es que ambos pueden generar serios problemas de inestabilidad en el terreno. Por eso, al incluirlos en el análisis multicriterio, podemos identificar y descartar las zonas peligrosas, garantizando que el relleno sanitario sea seguro para operar y que el entorno esté protegido. Tal como lo señala el MINAM, (2021), la evaluación de estos factores es fundamental para asegurar la viabilidad técnica y ambiental de los sitios seleccionados.

A.2) Criterio ambiental: Este criterio tiene como finalidad prevenir la contaminación de los recursos naturales y cuidar los ecosistemas presentes en el área de estudio, considerando variables que influyen directamente en la calidad del agua, la biodiversidad y el equilibrio ambiental. Incluye los siguientes subcriterios:

- ✓ **Distancia a la red hidrográfica (A1):** La distancia a la red hidrográfica es un factor crítico para prevenir la contaminación de cuerpos de agua superficiales por infiltración o escorrentía de lixiviados. El MINAM, (2021) establece una distancia mínima de 0.5 Km respecto a ríos, quebradas y otras fuentes de agua, con el fin de reducir el riesgo de contaminación directa e indirecta, especialmente durante eventos de lluvia intensa que incrementan la escorrentía superficial.
- ✓ **Distancia a Áreas de Conservación Privada (ACP) A2 _ distrito de Jaén:** Este subcriterio busca proteger ecosistemas frágiles y su biodiversidad. La proximidad de un relleno sanitario podría alterar hábitats, fragmentar el paisaje y afectar especies sensibles. Por ello, se consideran "Muy adecuadas" (S3) solo aquellas zonas con una distancia superior a 3 Km de una ACP.
- ✓ **Distancia a restos arqueológicos A2 _ distrito de Pucará:** En el distrito de Pucará, ante la ausencia de ACP, este subcriterio se orientó a la protección del patrimonio cultural, evaluando la distancia a restos arqueológicos. La proximidad a zonas arqueológicas podría generar daños por excavaciones, movimientos de tierra, polvo o vibraciones, así como riesgos de saqueo o destrucción accidental. En consecuencia,

se establece una distancia mínima de seguridad y se descartan las áreas con presencia de vestigios arqueológicos.

- ✓ **Uso y cobertura vegetal (LULC) (A3):** El tipo de cobertura vegetal y el uso del suelo son indicadores clave del impacto ambiental potencial. Se priorizan terrenos con escasa vegetación o áreas ya intervenidas (pastizales, cultivos, suelos desnudos), ya que su ocupación genera menor afectación ecológica que la intervención en bosques o vegetación densa, y reduce la necesidad de despeje de cobertura vegetal.

A.3) Criterio Socioeconómico: Este criterio se orienta a reducir al máximo los efectos negativos que el relleno sanitario pueda tener sobre la población y lograr que la operación del proyecto sea lo más eficiente posible. Para ello, se toman en cuenta aspectos como la facilidad para llegar al lugar (accesibilidad), si la comunidad está de acuerdo o no con el proyecto (aceptación social), y que no se afecten actividades económicas que ya existen en la zona. Los subcriterios que se consideran son los siguientes:

- ✓ **Distancia a carreteras (E1):** La proximidad a vías de acceso es fundamental para la operatividad del relleno, ya que reduce los costos y tiempos de transporte, optimizando el consumo de combustible y la eficiencia del sistema de recolección. No obstante, se debe mantener una distancia que evite molestias a la población (polvo, ruido, tránsito pesado), buscando un equilibrio entre accesibilidad y minimización de impactos sociales.
- ✓ **Distancia a centros poblados (E2):** La distancia a los centros poblados debe ser suficiente para reducir los riesgos asociados a olores, la proliferación de vectores y la contaminación visual que afectan la calidad de vida de las personas cercanas al área de disposición final. Según MINAM, (2021), se recomienda mantener al menos 0.5 Kmetros de distancia respecto a cualquier centro poblado, así se evitan conflictos con la comunidad y se reducen los riesgos sanitarios.
- ✓ **Distancia al catastro minero (E3):** Este criterio considera la ubicación de concesiones mineras vigentes, con el objetivo de evitar la superposición de usos del suelo y posibles conflictos socioambientales. La actividad minera puede generar incompatibilidad con la disposición de residuos y riesgos de contaminación del suelo y agua, por lo que se prioriza la exclusión de áreas cercanas a estas concesiones.

B) Procesamiento y clasificación de la información espacial

B.1) Adquisición de datos: Se recopiló información geoespacial de diversas fuentes oficiales. Para el subcriterio de pendiente (F1) se descargó un modelo digital de elevación (DEM) de la misión ALOS PALSAR, disponible en el portal de la Alaska Satellite Facility (<https://search.asf.alaska.edu/#/>). Los mapas de peligros geológicos, movimientos en masa, neotectónica y catastro minero se obtuvieron del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET), a través de su geoservidor GEOCATMIN (<https://geocatmin.ingemet.gob.pe/geocatmin/>). La hidrografía se extrajo de las cartas nacionales 12e, 12f y 13e a escala 1:100 000, proporcionadas por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) mediante su visor 3D (<https://www.idep.gob.pe/geovisor/VisorDeMapas-3D/>). Los cursos de agua de orden inferior no representados a dicha escala fueron digitalizados manualmente en QGIS (versión 3.34.12), usando como referencia imágenes del satélite Sentinel-2 (resolución 10 m) con verificación visual de cauce activo. Las Áreas de Conservación Privada (ACP) se obtuvieron del Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado (SERNANP, 2021), a través del geoservidor GEO ANP (<https://geo.sernanp.gob.pe/visorsernanp/>).

La capa de uso y cobertura vegetal (LULC) se generó a partir de una clasificación supervisada de imágenes del satélite Sentinel-2, descargadas del portal Living Atlas de ArcGIS (<https://livingatlas.arcgis.com/landcoverexplorer/>); para mejorar su precisión se aplicó un proceso de clasificación supervisada en ArcGIS 10.8.3. La cartografía vial se descargó del portal de estadísticas del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) (<https://portal.mtc.gob.pe/estadisticas/descarga.html>) y fue actualizada en QGIS, mientras que los restos arqueológicos se obtuvieron del Geo Portal del Ministerio de Cultura (<https://geoportal.cultura.gob.pe/mapa/portal>).

Todo el procesamiento de datos espaciales, tanto en formato vectorial como ráster, se realizó en el laboratorio de cómputo y análisis geoespacial, empleando los softwares ArcGIS 10.8.3 y QGIS 3.34.12. Finalmente, cada capa temática fue convertida a formato ráster con una resolución de 15 m, asegurando la homogeneidad espacial para los análisis posteriores.

B.2) Descripción del procesamiento SIG: Para procesar toda la información espacial se organizó un flujo de trabajo sistemático en ArcGIS 10.8.3, usando para ello las herramientas del módulo Spatial Analyst. A continuación, se detalla cómo se aplicó cada uno de estos subcriterios:

- **Pendiente F1:** Partimos de un DEM de ALOS PALSAR de 12,5 m de resolución. Lo remuestreamos a 15 m, lo recortamos al área de estudio con Clip y generamos el mapa de pendientes usando Slope (Spatial Analyst → Surface → Slope). Luego reclasificamos los valores según los rangos de la Tabla 2.
- **Peligros geológicos F2:** Partiendo de la capa temática de peligros geológicos, se usó la herramienta Euclidean Distance (Spatial Analyst → Distance → Euclidean Distance) para crear un ráster que reflejara qué tan lejos o cerca quedaban las áreas del riesgo. Después, ese ráster se reclasificó según los intervalos establecidos en la Tabla 2.
- **Neotectónica / movimientos de masa F3:** Para este subcriterio se siguió el mismo procedimiento que en los peligros geológicos. A partir de las capas vectoriales, calculamos distancias con Euclidean Distance y reclasificamos el resultado en tres categorías: S1 (Inadecuado, valor 1), S2 (Moderadamente adecuado, valor 2) y S3 (Muy adecuado, valor 3), siguiendo los rangos de la Tabla 2.
- **Distancia a ríos:** Se generó un ráster de distancias a partir de la red hidrográfica utilizando la herramienta Euclidean Distance. Posteriormente, se realizó la reclasificación en función de los umbrales establecidos.
- **ACP / Restos arqueológicos, carreteras, centros poblados y catastro minero:** Para cada uno se generó un ráster de distancias euclidianas y se reclasificó asignando valores 1, 2 y 3, según la Tabla 2.

B.3) Clasificación de las capas de subcriterios por idoneidad: Cada subcriterio fue procesado en formato vectorial y posteriormente convertido a formato ráster con una resolución de 15 m. Posteriormente, se reclasificaron en tres niveles de aptitud territorial, asignándoles un puntaje de 1 a 3, donde 1 es "inadecuado", 2 es "moderadamente adecuado" y 3 es "muy adecuado". Los umbrales de reclasificación (Tabla 2) se establecieron con base en la Guía de diseño, construcción, operación, mantenimiento y cierre de rellenos sanitarios manuales del MINAM (2021) y en la revisión bibliográfica (Belalcázar, 2019; Saldaña & Nájera, 2019; Zabaleta, 2022).

Tabla 2.
Umbrales de reclasificación del distrito de Jaén y Pucará

Criterios	Subcriterios	Aplicación (distrito)	Limitantes (excluido)	Inadecuados (S1)	Moderadamente adecuados (S2)	Muy adecuados (S3)
Físico	Pendiente del terreno (%)	Jaén y Pucará	> 25 %	< 3 %; > 25 %	15 – 25 %	3 – 15 %
	Distancia a peligros geológicos (Km)	Jaén y Pucará	< 1 Km	< 1	1–3	> 3
	Neotectónica (Km)	Jaén	< 1 Km	< 1.2	1.2–3	> 3
	Movimientos de masa (Km)	Pucará	< 1 Km	< 1.2	1.2–3	> 3
Ambiental	Distancia a red hidrográfica (Km)	Jaén y Pucará	< 0.5 Km	< 0.5	0.5–1.2	> 1.2
	Distancia a ACP (Km)	Jaén	-	0–1.2	1.2–3	> 3
	Restos arqueológicos (Km)	Pucará	-	0–1.2	1.2–3	> 3
	Uso y cobertura vegetal	Jaén y Pucará	-	Bosque; cuerpos de agua	pastos y cultivos	suelo desnudo
Socioeconómico	Distancia a carreteras (Km)	Jaén y Pucará	-	< 0.2	> 1	0.2 – 1
	Distancia a centros poblados (Km)	Jaén y Pucará	< 0.5 Km	< 0.5	0.5–1.5	>1.5
	Concesiones mineras (Km)	Jaén y Pucará	< 0.5 Km	< 0.5	0.5–1.5	>1.5

Nota: Los subcriterios “Neotectónica” y “Distancia a Áreas de Conservación Privada (ACP)” se aplicaron solo en Jaén; en Pucará se reemplazaron por "Movimientos en masa" y "Distancia a restos arqueológicos", respectivamente.

C) **Ponderación multicriterio mediante AHP y generación del modelo de idoneidad**

Para determinar la importancia relativa de cada criterio y subcriterio en la selección de áreas potenciales para un relleno sanitario, se aplicó el método AHP desarrollado por Saaty (1980). Este método permite descomponer un problema de decisión en una estructura jerárquica y cuantificar las preferencias mediante PCM, utilizando una escala numérica que refleja la importancia relativa de un elemento sobre otro.

La asignación de valores se realizó utilizando la escala fundamental de Saaty (1980) y (Nantes, 2019) como se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3.

Escala de Intensidad de Importancia para la comparación de criterios de uno sobre otro

Intensidad de importancia	Definición
1	Igual importancia
3	Importancia moderada de uno sobre otro
5	Importancia esencial
7	Importancia demostrada
9	Importancia absoluta
2, 4, 6, 8	Valores intermedios entre ambos juicios adyacentes

El procedimiento se desarrolló en las siguientes dos etapas:

- ❖ **Primera etapa:** Se realizó la construcción de comparaciones por pares. Para cada nivel de la jerarquía se elaboraron matrices cuadradas de orden n , donde n es el número de elementos comparados (criterios o subcriterios). En cada matriz; el elemento a_{ij} representa la importancia del elemento i con respecto al elemento j , según la escala de Saaty (1980).
 - La diagonal principal está compuesta por unos ($a_{ij} = 1$), ya que cada elemento tiene igual importancia consigo mismo.
 - La matriz es recíproca: $a_{ij} = 1/a_{ji}$ para todo $i \neq j$, lo que garantiza que, si un criterio es k veces más importante que otro, el segundo es $1/k$ veces con respecto al primero.

En particular, se construyeron cuatro matrices de comparación: una matriz para los tres criterios principales (Tabla 4). Asimismo, se elaboraron matrices para cada subcriterio (Figura 4).

La asignación de los valores a_{ij} se realizó con base en el juicio de los investigadores, asesores y la revisión de la literatura especializada en selección de rellenos sanitarios, priorizando los factores más determinantes para la estabilidad, la accesibilidad y la protección ambiental.

Tabla 4.

Matriz de criterios principales

Criterio	Físico (F)	Ambiental (A)	Socioeconómico (E)
Físico (F)	1	x	1/x
Ambiental (A)	1/x	1	1/x
Socioeconómico (E)	x	x	1

Figura 4.

Matrices de subcriterios

Matriz AHP de subcriterios del criterio Físico				Matriz AHP de subcriterios del criterio Ambiental				Matriz AHP de subcriterios del criterio Socioeconómico			
	F1	F2	F3		A1	A2	A3		E1	E2	E3
F1				A1				E1			
F2				A2				E2			
F3				A3				E3			

❖ **Segunda etapa:** Se realizó el cálculo del vector de prioridades (pesos). A partir de cada matriz de comparación se calculó el vector propio normalizado (también llamado vector de prioridades), cuyas componentes representan los pesos relativos de cada elemento. El procedimiento fue el siguiente:

- **Normalización de la matriz:** Para cada columna j , se sumaron todos los elementos de esa columna (S_j). Luego, cada elemento (a_{ij}) se dividió entre (S_j), obteniendo la matriz normalizada.

- **Promedio por fila:** Para cada fila i de la matriz normalizada, se calculó el promedio de sus valores, obteniendo el peso w_i del elemento j .

$$w_i = \frac{1}{n} \sum_j \frac{a_{ij}}{S_j}$$

Estos pesos cumplen que $\sum_i^n = 1, w_j = 1$

Alternativamente, el vector de prioridades corresponde al autovector principal de la matriz de comparación, normalizado a suma 1. En la práctica, cualquiera de ambos métodos (promedio normalizado o autovector) produce resultados muy similares.

- **Cálculo del autovalor máximo λ_{max} :** Para poder evaluar la consistencia de los juicios, se requiere calcular el autovalor máximo λ_{max} de la matriz de comparación, el cual consistió en:

La multiplicación de la matriz original A por el vector de prioridades w , obteniendo un nuevo vector $v = Aw$.

Luego, se divide cada componente v_i entre el correspondiente w_i y se obtiene el promedio de esos cocientes:

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(Aw)_i}{w_i}$$

Un valor de λ_{max} cercano a n indica que los juicios son consistentes; valores mayores indican mayor inconsistencia.

- **Verificación de la consistencia de los juicios:** Para validar la coherencia de los juicios, se determinó el Índice de Consistencia (CI) y la Razón de Consistencia (CR), mediante las siguientes expresiones:

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

$$CR = \frac{CI}{IA} \dots (2)$$

donde: n es el orden de la matriz, y λ_{max} es equivalente al vector de comparación, e IA es el Índice Aleatorio (Tabla 5), cuyo valor para $n=3$,

$A=0.58$. Según Saaty (1980), un $CR < 0.10$ indica un nivel aceptable de consistencia.

Tabla 5.

Valores del índice de consistencia aleatorio (IA) (Berumen & Redondo, 2007b)

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
IA	0	0	0.58	0.89	1.11	1.24	1.32	1.40	1.45	1.49

De acuerdo con Saaty, (1987), un valor de CR menor a 0.10 indica que las comparaciones realizadas presentan un nivel aceptable de consistencia; en caso contrario, se recomienda revisar y ajustar los juicios asignados.

- **Generación del modelo de idoneidad en SIG:** Una vez verificada la consistencia y obtenidos los pesos para cada criterio y subcriterio, se integraron en el entorno SIG mediante una combinación lineal ponderada (Weighted Linear Combination), implementada con la herramienta Weighted Overlay (Spatial Analyst → Overlay → Weighted Overlay). Cada capa ráster reclasificada (valores 1, 2, 3), todos en formato ráster con resolución de 15 m y extensión coincidente con los límites distritales.

A cada capa ráster se le asignó el porcentaje de influencia correspondiente, derivado del vector de prioridades del AHP, de modo que la suma de los porcentajes dentro de cada grupo de subcriterios fuese igual al peso del criterio correspondiente.

Ya con los pesos definidos, la herramienta Weighted Overlay se encargó de combinarlo todo. Por lo que, por cada celda del área de estudio, multiplicó el valor de cada capa por su peso porcentual y después sumó todo. El resultado fue un mapa continuo donde los valores oscilan entre 1 y 3. Después, ese ráster continuo se reclasificó en tres categorías claras: S1 (inadecuado), S2 (moderadamente adecuado) y S3 (muy adecuado). Los límites entre categorías se definieron con el método de intervalos naturales de Jenks, que busca maximizar la diferencia entre grupos y minimizar la variedad dentro de cada uno, logrando así una segmentación óptima del territorio según su aptitud.

Este procedimiento se aplicó en dos pasos. Primero, se generaron los submodelos por cada criterio por separado. Luego, se combinaron los tres submodelos (físico, ambiental y socioeconómico, es decir, F, A y S) para obtener el mapa final de idoneidad para cada distrito.

D) Determinación del área requerida y evaluación de la forma de los polígonos

Para asegurarnos de que las zonas calificadas como "muy adecuadas" (S3) realmente cuenten con el espacio suficiente y permitan una operación sin problemas, realizamos un análisis adicional en dos pasos. La primera consistió en dimensionar el relleno sanitario para una vida útil de 20 años. La segunda, en evaluar la compacidad de los polígonos mediante el coeficiente de Gravelius (Kc).

❖ **Primera etapa: dimensionamiento del relleno sanitario:** Se calculó el área mínima necesaria para albergar un relleno sanitario con una vida útil de 20 años. Este cálculo se basó en la proyección de la generación de RSM, considerando la proyección anual de residuos en función de la información histórica disponible. Los datos históricos de generación de RSM (2019-2024) se obtuvieron del Sistema de Información para la Gestión de Residuos Sólidos (SIGERSOL). Para la proyección a 20 años se evaluaron tres métodos (aritmético, interés simple y geométrico) cuyos resultados se presentan en la Tabla 24 y la Tabla 25 (Anexos). El método de interés simple fue seleccionado para ambos distritos por ajustarse mejor a la tendencia histórica observada y presentar valores de proyección más conservadores y consistentes con las capacidades operativas locales.

Los parámetros técnicos se definieron según el tipo de relleno (Tabla 6).

Tabla 6.

Valores de diseño para rellenos mecanizado y manual según Jaramillo (2002) y MINAM (2018)

Distrito	RSM generados (t/día)	Tipo de relleno
Jaén	94.54 (>40 t/día)	mecanizado
Pucará	3.94 (<15 t/día)	manual

Los valores adoptados se resumen en la Tabla 7 (parámetros unificados). Las fórmulas de cálculo, en secuencia, fueron las siguientes:

Tabla 7.

Parámetros unificados para el dimensionamiento del relleno sanitario

Parámetro	Símbolo	Distrito		Unidad de medida	Fuente/ Nota
		Jaén	Pucará		
Tipo del relleno	-	mecanizado	manual	-	
Vida útil del relleno	N	20	20	años	Proyección
Densidad de residuos	D	0.70	0.45	(t/m ³)	MINAM (2018) / Jaramillo (2002)
Material de cobertura de residuos	F_c	1.20	1.20	-	20% del volumen compactado (Jaramillo, 2002)
Factor de seguridad por asentamientos en el relleno	F_s	1.10	1.10	-	MINAM (2018)
Factor de infraestructura del relleno	F_{inf}	1.30 complementaria (30%)	1.30	-	Silva et al. (2022); 30% para caminos, taludes, caseta
Altura media del relleno	H	15	10	m	Según topografía y guía MINAM (2018)
Altura diaria de residuos en la celda	h_c	0.60	1	m	Jaramillo (2002) / MINAM (2018)
Ancho del frente de trabajo	α	12	4	m	Requerimientos de maniobra de maquinaria
Días de operación del relleno al año		300	300	días/año	6 días/semana × 50 semanas (práctica estándar)

Fórmulas empleadas:

$$RSM_{total} = RSM_{promedio} \times N$$

$$V_{comp} (m^3) = \frac{RSM_{anual} (t)}{D (t/m^3)}$$

$$V_{cob} (m^3) = V_{comp} m^3 \times F_c$$

$$V_{seguridad} (m^3) = V_{cob} m^3 \times F_s$$

$$V_{relleno} (m^3) = V_{seguridad} m^3$$

$$A_{disp} (m^2) = \frac{V_{relleno} m^3}{H m}$$

$$A_{terreno} (m^2) = A_{disp} m^2 \times F_{inf}$$

$$A_t (ha) = \frac{A_{terreno} (m^2)}{10000}$$

Donde: V_{comp} : volumen anual de residuos sólidos compactados en m^3 , $D (t/m^3)$ es la densidad de los residuos sólidos compactados, V_{cob} es el volumen con material de cobertura en m^3 , A_{disp} : área requerida para la disposición final de residuos (m^2), A_t es el Área total del terreno expresada en hectáreas (ha).

- **Verificación operativa (celda diaria)**

Para garantizar que las áreas clasificadas como “muy adecuadas” (S3) sean operativamente viables, se dimensionó la celda diaria siguiendo los lineamientos de Jaramillo (2002) y el MINAM (2018). Este cálculo estima el área que se debe habilitar cada día y el avance lineal del frente de trabajo, verificando su compatibilidad con la geometría de los polígonos seleccionados.

Los parámetros adoptados se presentan en la Tabla 7. La generación diaria de RSM se obtuvo a partir de la proyección anual del SIGERSOL (método de interés

simple), dividiendo entre 300 días de operación por año (6 días a la semana, 50 semanas al año). Las fórmulas empleadas son:

$$RSM_{diario} = \frac{RSM_{anual}}{300 \text{ días/año}}$$

$$V_{RS} = \frac{RSM_{diario}}{D_{Compactada}}$$

$$V_{Cobertura} = V_{RS} * 1.20$$

$$V_{Celda} = V_{Cobertura}$$

$$A_{celda} = \frac{V_{celda}}{h_c}$$

$$A_{diario} = \frac{A_{celda}}{\alpha}$$

Donde: $D_{Compactada}$, h_c y α toman los valores definidos según el tipo de relleno (Tabla 7). El cálculo se realizó para los años 2026 y 2046, que representan el inicio y el final de la vida útil del proyecto, con el fin de evaluar la variación del frente de trabajo a lo largo del tiempo.

❖ **Segunda etapa: evaluación de la forma de los polígonos (coeficiente de compacidad Kc).**

Para asegurarnos de que las zonas "muy adecuadas" (S3) también tengan una forma que facilite la construcción del relleno, analizamos la geometría de esos polígonos. Para eso usamos el Coeficiente de Compacidad (Kc), también conocido como índice de Gravelius, que compara el perímetro con el área de cada polígono (Tabla 8). Este indicador nos dice qué tan regular o irregular es un polígono. Si el valor se acerca a 1, quiere decir que la forma es compacta, casi como un círculo, y eso es excelente para un relleno sanitario. Por el contrario, si el coeficiente pasa de 1.75 o 2, la forma ya es alargada o bastante irregular, y eso puede traer complicaciones tanto en el diseño del relleno como en su operación del día a día (Huanca, 1999; Silva et al., 2022).

Tabla 8.
Coeficiente de compacidad (K_c) – método de Gravelius

Cálculo	Fórmula
Coeficiente de compacidad	$K_c = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} \dots (3)$

Donde: P es el perímetro del polígono (Km) y A es su área (Km²).

E) Validación estadística AUC ROC y verificación in situ de las áreas

Para asegurar que los resultados fueran confiables, se combinaron dos estrategias: por un lado, el análisis estadístico mediante la curva AUC – ROC, y por otro, la verificación directa de las áreas en el terreno.

E.1) Validación estadística (AUC – ROC): el AUC permite medir la capacidad del modelo para discriminar entre áreas aptas y no aptas, constituyendo una herramienta eficaz para determinar la precisión de los resultados obtenidos y apoyar la toma de decisiones (Borja et al., 2019). Para ello se generaron aleatoriamente 24 puntos de control distribuidos en cada distrito (12 por distrito). Para cada punto, se determinó su condición real mediante la verificación en campo con GPS y observación directa. Con los pares de datos (valor predicho vs. condición real), se construyó la curva ROC. La curva ROC es un método estándar para evaluar la calidad de los sistemas de predicción, tanto en enfoques deterministas como probabilísticos. Se calcularon la tasa de verdaderos positivos (sensibilidad) y la tasa de falsos positivos (1 - especificidad) mediante las siguientes fórmulas:

Para la curva ROC:

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN} \dots (4)$$

Donde:

TP: Verdaderos positivos

FN: Falsos negativos

Para la tasa de falsos positivos (FPR):

$$FPR = \frac{FP}{FP + TN} \dots (5)$$

Donde:

FP: Falsos positivos

T: Verdaderos negativos

Luego se identificó el umbral de aptitud que maximiza la suma de sensibilidad y especificidad (criterio de Youden), el cual representa el equilibrio óptimo entre la correcta identificación de zonas aptas y la exclusión de zonas no aptas (Lasko et al., 2005).

Finalmente, para la interpretación del AUC se implementó los valores propuestos por Mandrekar (2010):

0.7 – 0.8 es aceptable

0.8 – 0.9 es excelente

> 0.9 es sobresaliente

E.2) Verificación de campo: con base en los resultados del modelo y el análisis ROC, se seleccionaron los polígonos óptimos para la ubicación del relleno sanitario en cada distrito: en Jaén se seleccionó el polígono P3 (código A3) y en Pucará el polígono P2 (código A2), considerando su accesibilidad y capacidad de disposición de residuos. Esta validación se realizó en 2 etapas:

A) Verificación de criterios de exclusión y restricción: se empleó una ficha de recolección, la cual se tomó como referencia solo los criterios que son medibles para la investigación y brindar una puntuación, siguiendo como ejemplo, lo aplicado por Ludeña & Minaya, (2023), donde se debe de evaluar y dar un puntaje a cada criterio estudiado siendo: excelente (5), bueno (3) y malo (1) que se multiplicará por la importancia que representa cada uno de los criterios, dando como resultado el Puntaje Ponderado Total. Para esto, con el empleo del ArcGIS se calculó la distancia para los criterios tales como: peligros geológicos, red hidrográfica, ACP, restos arqueológicos, neotectónica, carreteras y centros poblados; y, con la visita in situ, se evaluaron los criterios como el acceso y la cobertura vegetal del área (Tabla 9).

B) Caracterización del suelo: se realizó la caracterización del suelo mediante una mini calicata de $0.6\text{ m} \times 0.6\text{ m} \times 0.6\text{ m}$ en cada polígono. La calicata permitió complementar la información obtenida mediante SIG con una observación directa de las características del suelo superficial. Se observó el color del suelo y se aplicaron ensayos táctiles y visuales siguiendo los protocolos de Ciancaglini, (2018) y los de la FAO (s. f.). El procedimiento consistió en humedecer una muestra de aproximadamente 25 g hasta formar una bola de 3 a 5 cm de diámetro; la sensación al tacto y la longitud de la cinta obtenida al estirar la masa permitieron clasificar la textura en arenosa, franco-arenosa, franca, franco-limosa, franco-arcillosa, arcillo-arenosa, arcillo-limosa o arcillosa. Adicionalmente, en el distrito de Jaén se realizó el ensayo de sedimentación en frasco, dejando reposar una muestra de suelo en agua durante 24 horas para estimar la proporción de arena, limo y arcilla.

Tabla 9.
Criterios de evaluación y puntuación para verificación en campo

Criterios	Puntaje del indicador			Importancia del criterio (IC)	Puntaje asignado (PA)	Puntaje ponderado total
	Excelente (5)	Bueno (3)	Malo (1)			
Pendiente del terreno (%)	<10%	>10 y <25%	>25%	2		
Distancia a peligros geológicos (Km)	>1 Km	>0.5 Km y <1 Km	<0.5 Km	5		
Neotectónica (Km)	>1 Km	>0.5 Km y <1 Km	<0.5 Km	5		
Movimientos de masa	Bajo peligro	Medio peligro	Alto peligro	5		
Distancia a red hidrográfica (Km)	>1 Km	>0.5 Km y <1 Km	<0.5 Km	4		
Distancia a ACP (Km)	>1 Km	>0.5 Km y <1 Km	<0.5 Km	5		
Restos arqueológicos (Km)	Zonas arqueológicas en un radio >1.5 Km	Zonas arqueológicas en un radio >0.5 y <1.5 Km	Zonas arqueológicas en un radio >0.5 Km	5		
Uso y cobertura vegetal	Suelo desnudo, sin cultivos	Pastos cultivados	Bosques	5		
Distancia a carreteras (Km)	>1 Km	>0.5 Km y <1 Km	<0.5 Km	4		
Distancia a centros poblados (Km)	>1 Km	>0.5 Km y <1 Km	<0.5 Km	5		
Concesiones mineras (Km)	>1 Km	>0.5 Km y <1 Km	<0.5 Km	5		
Accesibilidad	Acceso en buen estado	Acceso en mal estado	Sin acceso	4		
TOTAL						

Nota: Adaptado de D. L. N.º 1278 y su reglamento D. S. N.º 014-2017

Asimismo, se consideró la escala de calificación para el puntaje ponderado total que nos indicará si el área es aceptable para la instalación de un relleno sanitario (tabla 10).

Tabla 10.

Escala de calificación del puntaje ponderado total

Puntaje Ponderado Total	Calificación del Área
0 - 155	Área nada aceptable (mala)
155 - 205	Área poco aceptable (regular)
205 - 255	Área aceptable (moderada)
255 - 270	Área muy aceptable (1ra opción)

Esta información nos permitirá contrastar los resultados obtenidos mediante el AHP y el método de puntuaciones ponderadas establecido por el MINAM.

IV. RESULTADOS

4.1. Identificación de las zonas de exclusión por subcriterio

El procesamiento y la reclasificación de la información espacial permitieron obtener mapas de aptitud para cada subcriterio (Figuras 5 a 10). La Tabla 11 evidencia las áreas (Km² y porcentaje) de las categorías S1 (inadecuado), S2 (moderadamente adecuado) y S3 (muy adecuado) en ambos distritos.

Pendiente (F1), se observa una diferencia significativa entre los distritos, en Jaén, el 54.96% del territorio se clasifica como inadecuado (S1), mientras que en Pucará esta categoría alcanza el 94.34%, lo que evidencia una topografía considerablemente más accidentada en Pucará. Las áreas muy adecuadas (S3) son del 15,48% en Jaén y solo del 2,72% en Pucará, indicando mayores limitaciones físicas en este último distrito.

Con respecto a los peligros geológicos (F2), se observa que Jaén presenta un mayor porcentaje de clasificación muy adecuada (S3) del 64,51%, mientras que Pucará presenta un 46,52%. Esto indica que Jaén presenta más áreas libres de amenazas geológicas, siendo una ventaja relativa para la ubicación de un relleno sanitario.

En cuanto a la neotectónica (F3), en Jaén se observa un 76,53% del territorio como muy adecuado (S3), lo que refleja que existe una baja incidencia de fallas activas. Por otro lado, en cuanto a los movimientos en masa (F3), en Pucará se obtuvo que el 53,94% del territorio mantiene una clasificación de muy adecuada (S3), evidenciando una mayor presencia de fallas activas, debido a su topografía más accidentada. Estos resultados condicionan la aptitud territorial en cada distrito.

Para la red hidrográfica (A1), el distrito de Jaén presenta un 51,68% del territorio con clasificación inadecuada (S1), mientras que en Pucará el porcentaje desciende a 48,07%. Estos resultados evidencian que la cercanía a cuerpos de agua es una limitante espacial muy importante en ambos casos.

Con respecto a las ACP (A2), en Jaén se observa que el 96,42% del territorio mantiene una clasificación de muy adecuada (S3), mientras que en cuanto a los restos arqueológicos (A2) en Pucará se encontró que 89,24% del territorio es muy adecuado (S3). Estos resultados indican que criterios como la conservación y patrimonio cultural no son limitantes de mayor significado en ambos distritos.

Por otro lado, en cuanto al uso y la cobertura vegetal (A3), se observó que en Jaén el 47,81% del territorio se clasifica como inadecuado (S1), debido a la presencia de zonas boscosas y cuerpos de agua, mientras que en Pucará este porcentaje es del 20,62%, debido a que el territorio se encuentra más intervenido, con coberturas en favor a la aptitud del suelo.

El acceso a carreteras (E1) evidencia que en Jaén las áreas clasificadas como muy adecuadas (S3) representan el 39,32% del territorio, mientras que en Pucará se difiere de dicha clasificación, encontrándose que el 47,95% del territorio es moderadamente adecuado (S2), esto debido a la menor cobertura vial.

Para la distancia a centros poblados (E2), ambos distritos presentan patrones similares, con predominio de la categoría moderadamente adecuada (56.35% en Jaén y 55.51% en Pucará), lo que indica una distribución espacial comparable de los asentamientos humanos.

Finalmente, en el subcriterio de catastro minero (E3), Jaén destaca por presentar una mayor proporción de áreas sin restricciones (87.56% en S3), en comparación con Pucará (57.14%). Este último refleja una mayor presencia de áreas inadecuadas (22.16%), lo que evidencia una mayor incidencia de concesiones mineras activas.

Estos resultados indican que el distrito de Jaén presenta mejores condiciones de aptitud territorial, principalmente debido a menores restricciones físicas, mientras que Pucará está fuertemente condicionado por su topografía, sin embargo, tiene ventajas relativas en cobertura vegetal y ciertos aspectos socioeconómicos.

Tabla 11.

Áreas de subcriterios reclasificados en Jaén y Pucará (Km² y %)

Criterios	Subcriterios	Distrito de Jaén						Distrito de Pucará					
		S1		S2		S3		S1		S2		S3	
		Km²	%	Km²	%	Km²	%	Km²	%	Km²	%	Km²	%
Físico (F)	Pendiente (F1)	304.78	54.96	163.90	29.56	85.83	15.48	207.61	94.34	6.47	2.94	5.98	2.72
	Peligros geológicos (F2)	53.85	9.68	143.56	25.81	358.90	64.51	29.24	13.22	89.02	40.26	102.87	46.52
	Neotectónica/ Movimiento masa (F3)	72.28	12.99	58.28	10.48	425.76	76.53	22.71	10.27	79.15	35.80	119.27	53.94
Ambiental (A)	Red hidrográfica (A1)	287.48	51.68	166.22	29.88	102.61	18.44	106.30	48.07	90.17	40.78	24.66	11.15
	ACP/Arqueología (A2)	3.28	0.59	16.64	2.99	536.40	96.42	3.15	1.42	20.65	9.34	197.33	89.24
	Uso y cobertura vegetal (A3)	265.98	47.81	30.89	5.55	259.41	46.63	45.60	20.62	4.55	2.06	170.96	77.32
Socioeconómico (E)	Carreteras (E1)	83.26	14.97	254.33	45.72	218.72	39.32	24.05	10.88	106.03	47.95	91.05	41.17
	Centros poblados (E2)	122.98	22.11	313.45	56.35	119.87	21.55	41.96	18.98	122.74	55.51	56.42	25.52
	Catastro Minero (E3)	29.65	5.33	39.55	7.11	487.11	87.56	49.01	22.16	45.77	20.70	126.35	57.14

Figura 5.

Subcriterios físicos reclasificados según idoneidad – distrito de Jaén

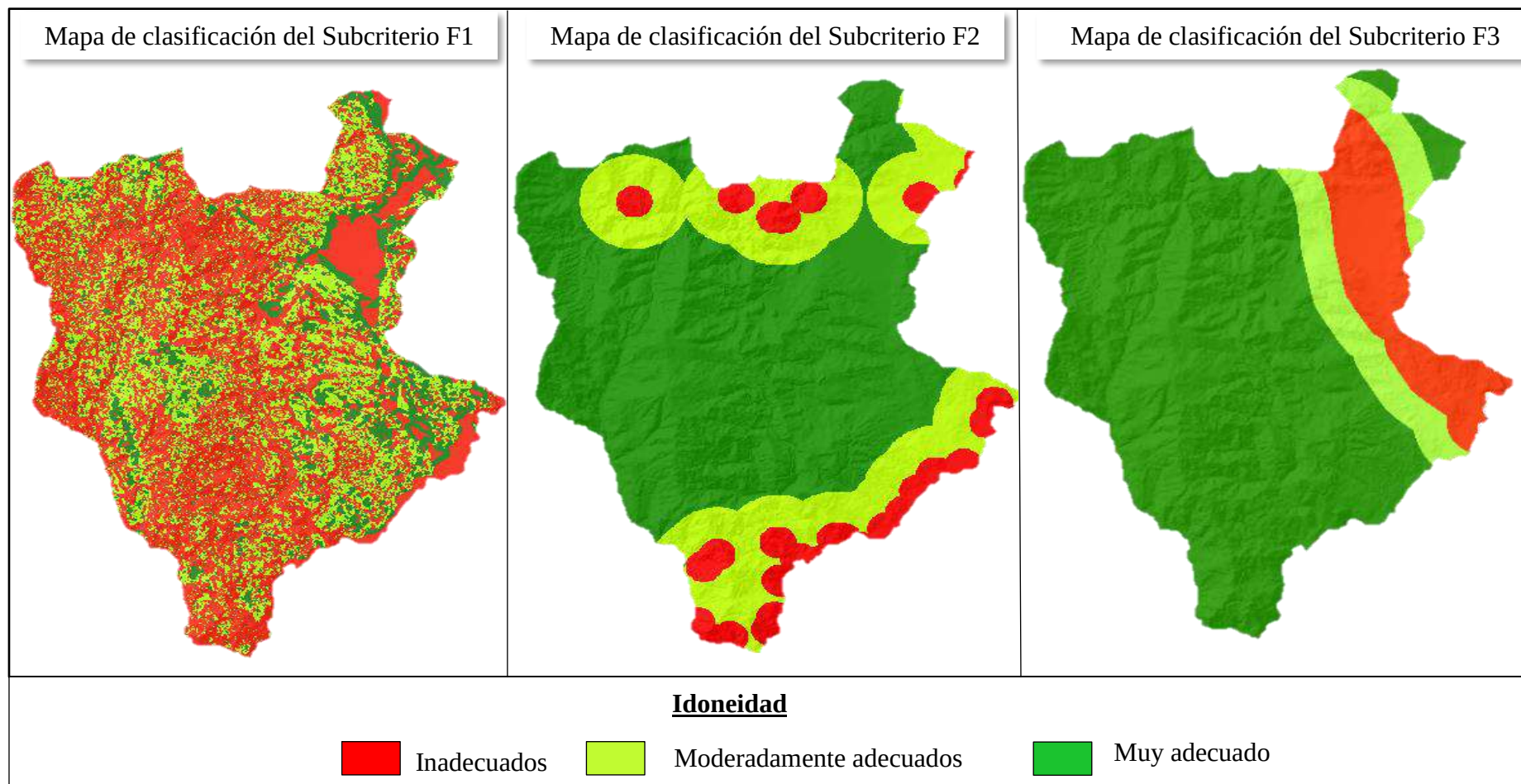


Figura 6.

Subcriterio ambientales reclasificados según idoneidad – distrito Jaén

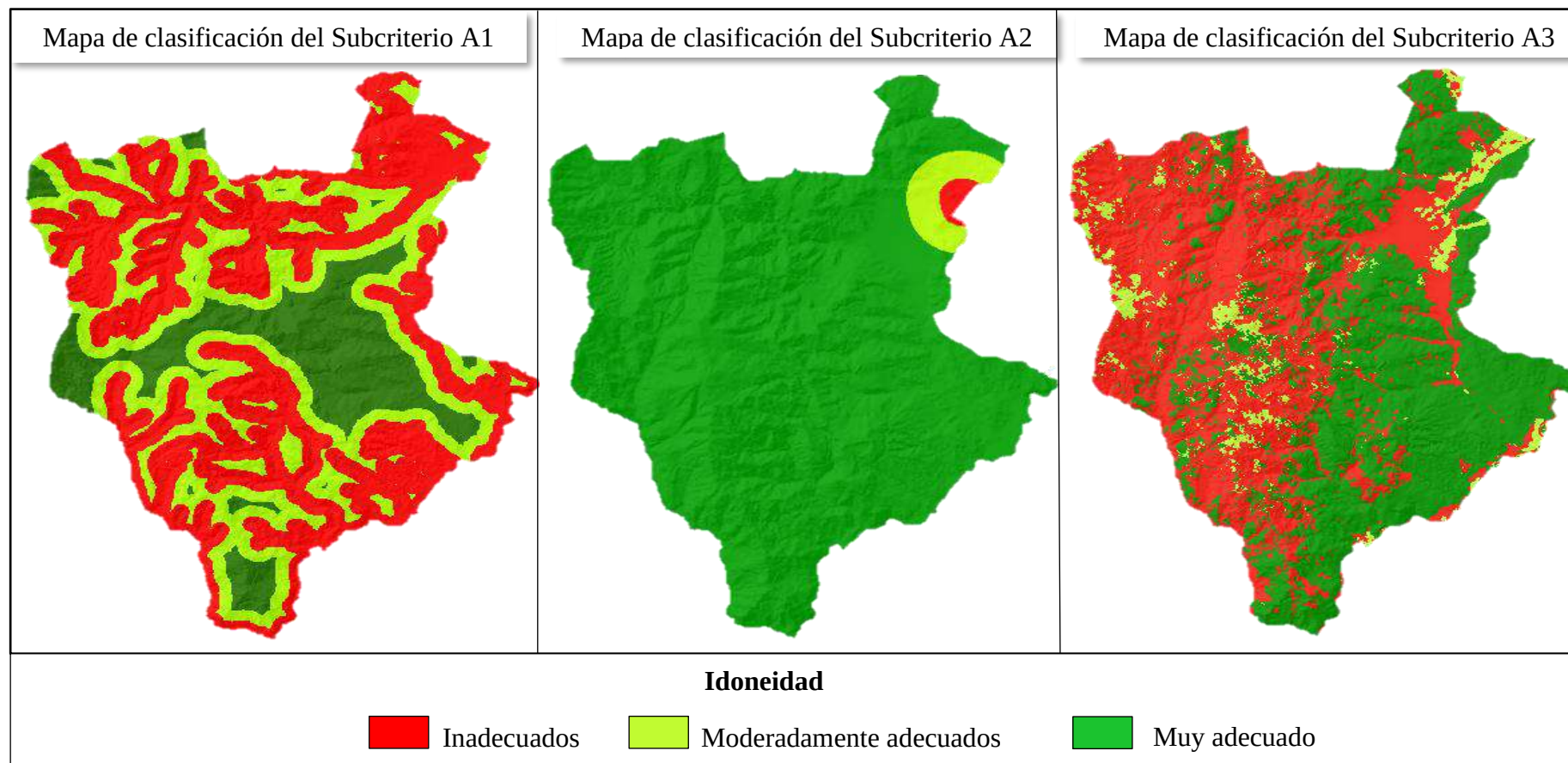


Figura 7.

Subcriterios socioeconómicos reclasificados según idoneidad – distrito Jaén

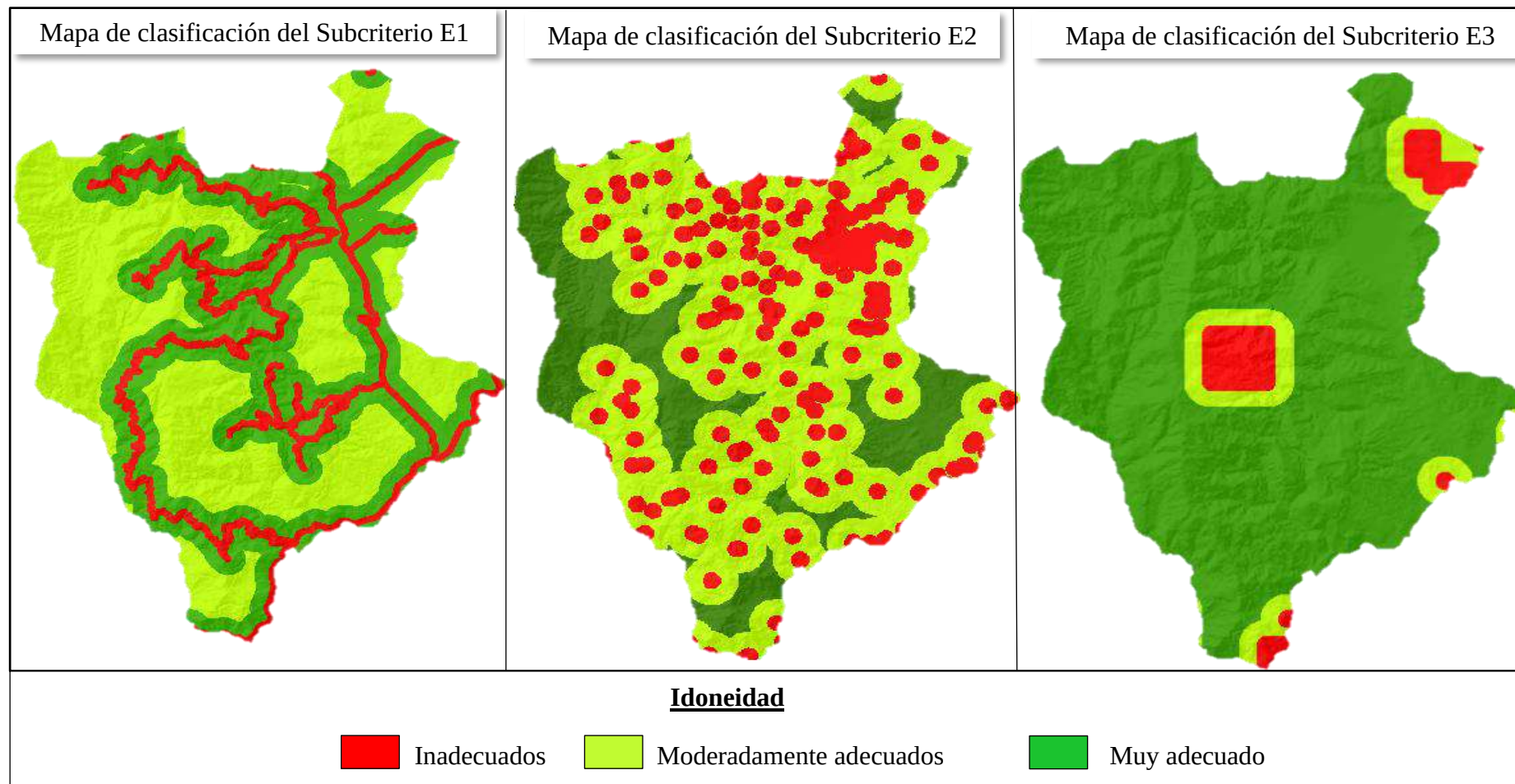


Figura 8.

Subcriterios físicos reclasificados según idoneidad – distrito Pucará

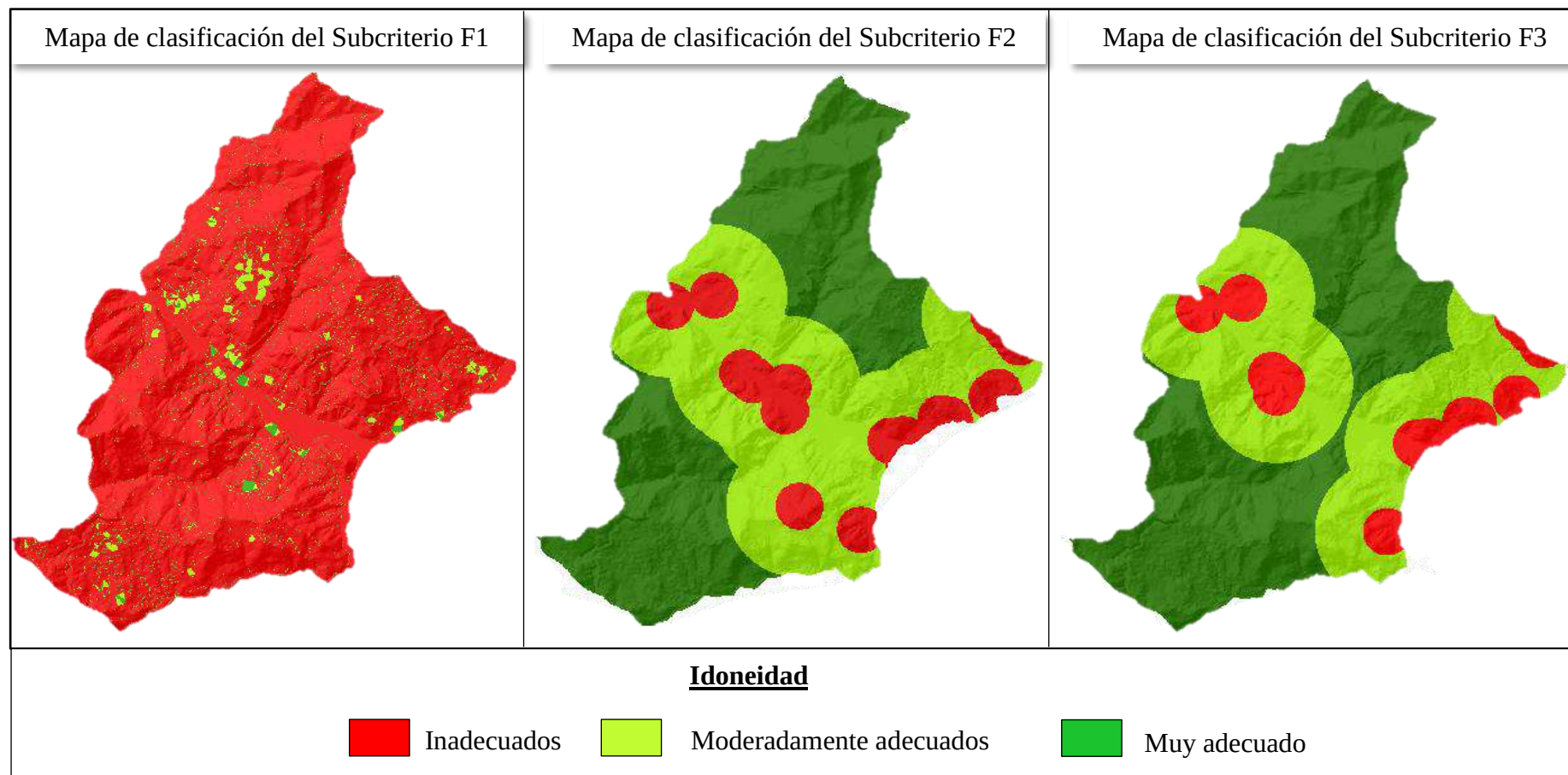


Figura 9.

Subcriterios ambientales reclasificados según idoneidad – distrito Pucará

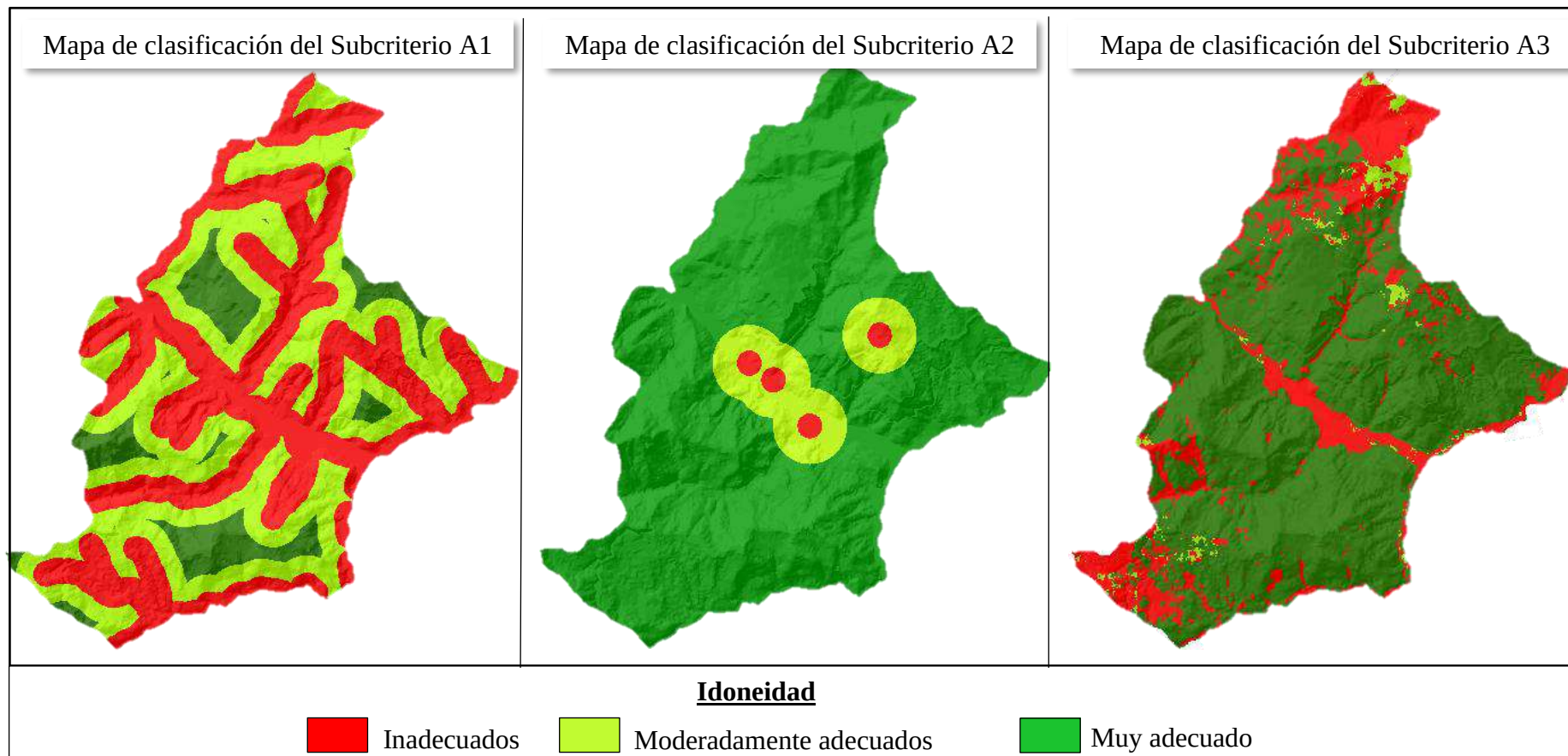
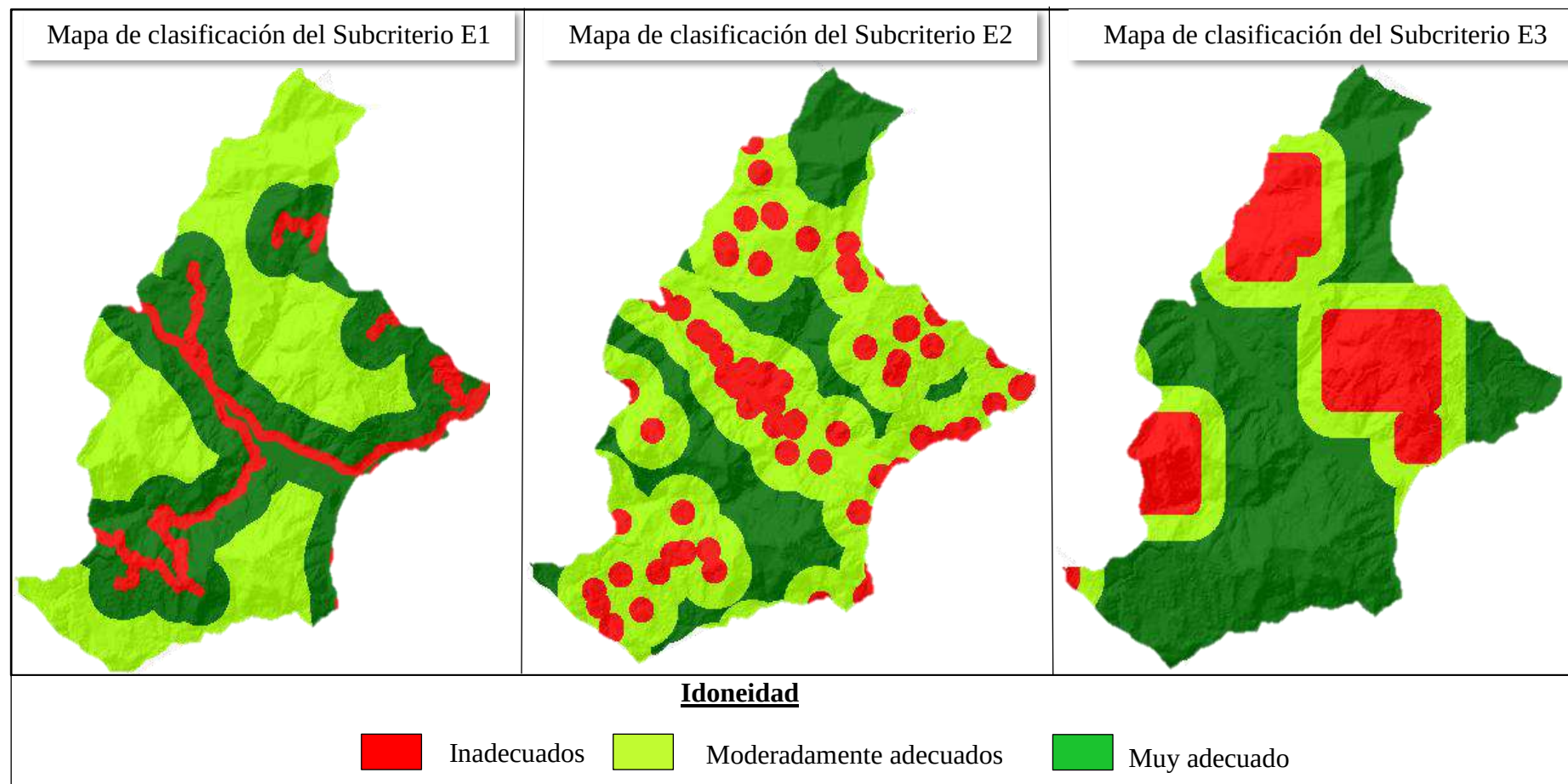


Figura 10.

Subcriterios socioeconómicos reclasificados según idoneidad – distrito Pucará



4.2. Ponderación de criterios mediante el método AHP

La Tabla 12 presenta los pesos porcentuales obtenidos para cada criterio y subcriterio mediante AHP, así como la clasificación de idoneidad resultante (1 = Inadecuado; 2 = Moderadamente adecuado; 3 = Muy adecuado). Los resultados evidencian que el criterio físico concentró la mayor ponderación (53%), seguido del criterio socioeconómico (32%) y el ambiental (15%), lo que refleja que las condiciones de estabilidad del terreno y accesibilidad son los factores más determinantes para la viabilidad técnica de un relleno sanitario en ambos distritos.

Esta jerarquización responde a la necesidad de priorizar condiciones que garanticen la estabilidad, seguridad y operatividad del relleno sanitario. En este sentido, el predominio del criterio físico se justifica debido a que factores como la pendiente del terreno, la estabilidad geotécnica y la ausencia de peligros geológicos constituyen condiciones indispensables para evitar fallas estructurales, deslizamientos y posibles procesos de contaminación, especialmente en relación con la infiltración de lixiviados hacia el subsuelo.

En cuanto al criterio socioeconómico, este refleja la relevancia de accesibilidad y viabilidad del proyecto. Por ello resulta relevante considerar la optimización de los costos de recolección y disposición de los residuos mediante vías de transporte próximas, considerando con ello la distancia a centros poblados a fin de reducir conflictos sociales y riesgos sanitarios. Asimismo, el incluir subcriterios como el catastro minero es relevante para evitar la superposición del uso de suelo y conflictos socioambientales.

Por su parte, el criterio ambiental representa un menor peso relativo, pero no implica que sea menos importante, puesto que responde acorde al proceso metodológico. Dicho de otra manera, los subcriterios ambientales fueron considerados como filtros de exclusión para la eliminación de las áreas no adecuadas que se fueron encontrando durante el análisis. En consecuencia, al superarse las restricciones, el criterio físico y el criterio socioeconómico pasan a ser los más prioritarios, respectivamente.

Dentro del criterio físico, los análisis de los subcriterios muestran que: la pendiente del terreno (F1) representa un 53% del peso, debido a que influye directamente con la estabilidad del sistema, compactación de residuos y control de escorrentía; la neotectónica (F3) representa un 33% del peso, ya que está asociado a la estabilidad del terreno; y, por último, los peligros geológicos (F2) representan el 14% del peso.

Por otro lado, en cuanto al criterio ambiental, los subcriterios analizados evidencian que: el uso y cobertura vegetal (A3) obtuvo la mayor ponderación, representando el 54% del peso, reflejando la importancia de proteger ecosistemas y evitar intervenir áreas de cobertura natural; la distancia a ACP y restos arqueológicos (A2) alcanzó un 30%, considerando relevante preservar el patrimonio natural y cultural; y, finalmente, la distancia a la red hidrográfica (A1) obtiene el menor peso (16%), debido a que su función principal se cumple a través de restricciones espaciales previamente establecidas.

Por último, en el criterio socioeconómico, la distancia a carreteras (E1) es el subcriterio más influyente, con un 63%, lo que evidencia la importancia de la accesibilidad en la viabilidad operativa del relleno sanitario. Le sigue la distancia al catastro minero (E3) con 26%, mientras que la distancia a centros poblados (E2) presenta el menor peso (11%), debido a que ya se ha considerado un umbral mínimo de exclusión que limita su influencia en la etapa de ponderación.

En conjunto, estos resultados evidencian que la selección de áreas aptas para la disposición final de residuos sólidos está fuertemente condicionada por factores físicos, seguidos por aspectos socioeconómicos, mientras que los criterios ambientales cumplen un rol fundamental en la delimitación inicial de áreas no aptas.

Tabla 12.

Pesos de criterios y subcriterios mediante AHP

Objetivo	Criterio	Peso %	Clasificación	Subcriterio	Peso (%)	Clasificación
Identificar áreas potenciales de relleno sanitario en los distritos de Jaén y Pucará	F	53	S3	F1	53	3
				F2	14	1
				(Neotectónica /movimientos en masa) F3	33	2
	A	15	S1	A1	16	1
				(ACP / Restos arqueológicos) A2	30	2
				A3	54	3
	E	32	S2	E1	63	3
				E2	11	1
				E3	26	2

Nota: Clasificación: S1= Inadecuado; S2 = Moderadamente adecuado; S3 = Muy adecuado

4.2.1. Submodelos de idoneidad por criterio para el relleno sanitario

La combinación ponderada de los subcriterios dentro de cada grupo generó los submodelos de aptitud para los criterios físico, ambiental y socioeconómico, tanto para Jaén como para Pucará. La Tabla 13 muestra las áreas resultantes. La Figura 11 y Figura 12 muestran la distribución espacial de estos submodelos.

En el criterio físico, el distrito de Jaén presenta una clara predominancia de áreas clasificadas como moderadamente adecuadas (S2), con un 84.29% del territorio, mientras que las categorías S1 y S3 representan proporciones considerablemente menores. Este comportamiento sugiere que, si bien el territorio no presenta condiciones óptimas en su totalidad, posee características físicas aceptables para la implementación de un relleno sanitario. Por otro lado, en Pucará se observa que el 40,30% del territorio tiene una clasificación de áreas no adecuadas (S1), indicando una limitación física con respecto a la pendiente y a los riesgos geológicos.

En cuanto al criterio ambiental, la clasificación de las áreas en Jaén se encuentra representada por un 54.05% y un 45.03% como moderadamente adecuadas (S2) y muy adecuadas (S3), respectivamente, debido a las condiciones ambientalmente favorables tales como extensa cobertura vegetal, alejadas de cuerpos de agua y de ACP. Sin embargo, en Pucará se encontró un 72,49% del territorio con una clasificación de muy adecuada (S3), indicando áreas de menor sensibilidad ambiental.

Finalmente, en el criterio socioeconómico, tanto Jaén como Pucará presentan una clasificación de áreas moderadamente adecuadas (S2) de un 61,24% y 62,05%, respectivamente. Esto refleja una relevancia intermedia de la accesibilidad, la distancia a centros poblados y las actividades económicas. Sin embargo, Jaén tiene mayores áreas adecuadas (S3), sugiriendo una mejor integración territorial y operatividad

Es decir que estos resultados indican que el distrito de Jaén presenta una mayor homogeneidad en condiciones moderadamente adecuadas, mientras que Pucará destaca por sus condiciones ambientales más favorables, pero con mayores limitaciones físicas. Esta diferenciación resalta la importancia de integrar múltiples criterios en la evaluación, ya que un buen desempeño en un aspecto no garantiza la idoneidad total del territorio.

Tabla 13.

Áreas de los submodelos de aptitud (físico, ambiental, socioeconómico)

Criterio	Categoría	Jaén (Km²)	Jaén (%)	Pucará (Km²)	Pucará (%)
Físico	S1	43.85	8.23	88.68	40.30
	S2	449.39	84.29	121.92	55.41
	S3	39.89	7.48	9.45	4.30
Ambiental	S1	5.11	0.92	6.25	2.83
	S2	300.58	54.05	54.56	24.68
	S3	250.38	45.03	160.22	72.49
Socioeconómico	S1	13.48	2.42	7.10	3.21
	S2	340.69	61.24	137.21	62.05
	S3	202.14	36.34	76.82	34.74

Figura 11.

Submodelos de idoneidad por criterio – distrito Jaén

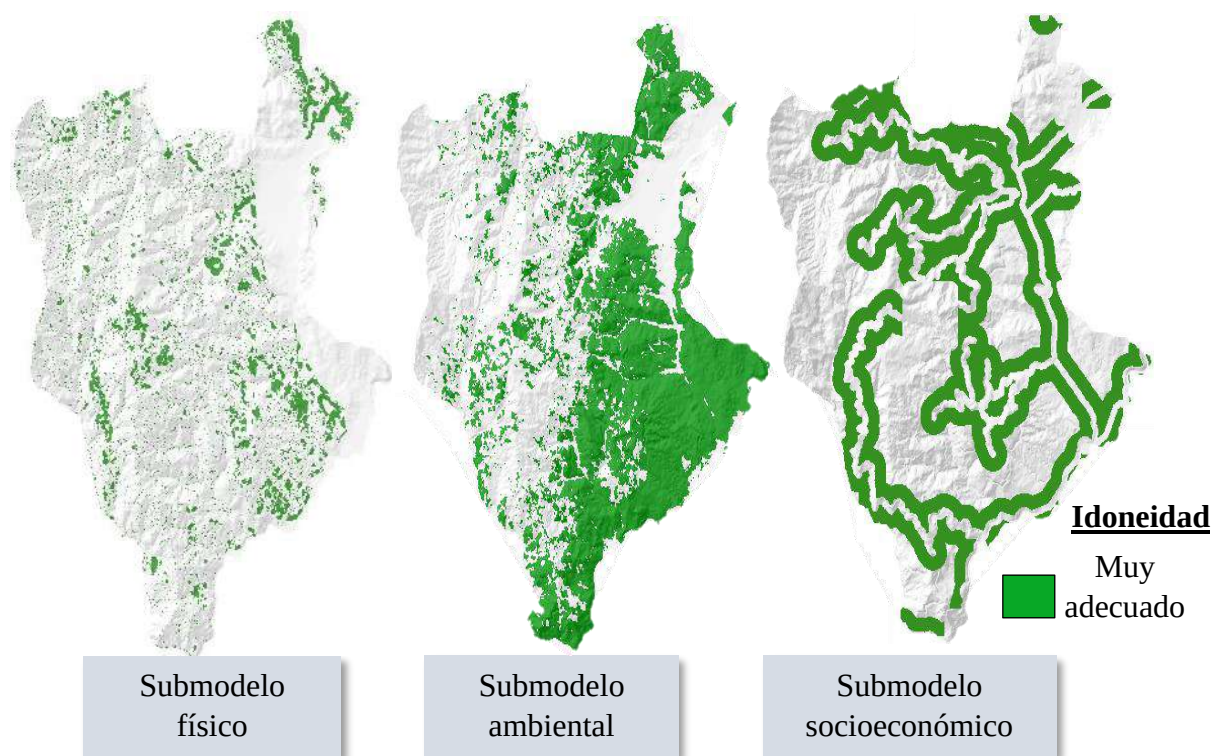
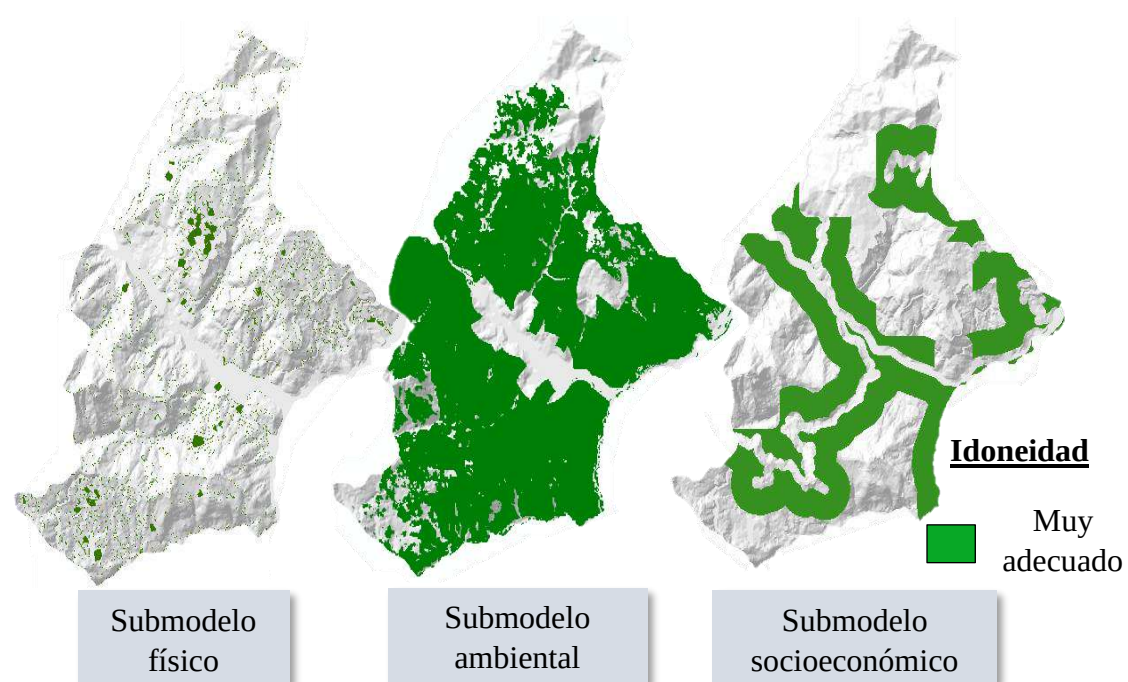


Figura 12.

Submodelos de idoneidad por criterio – distrito Pucará



Nota: Integración ponderada de los subcriterios por cada criterio. El submodelo físico (53% de peso) muestra áreas muy adecuadas en color verde intenso.

4.2.2. Modelo de idoneidad final para el relleno sanitario

La combinación lineal ponderada de los tres submodelos (con pesos 53% (F), 15% (A) y 32% (S) respectivamente), permitió generar el mapa de idoneidad final (Figura 13), integrando de manera conjunta las condiciones y restricciones de cada criterio evaluado.

En el distrito de Jaén, el modelo identificó un total de 59,05 Km² (10,65%) como áreas muy adecuadas (S3) (Tabla 14). Este valor resulta inferior al porcentaje obtenido en los submodelos ambiental (45.03%) y socioeconómico (36.34%), pero ligeramente superior al del submodelo físico (7.48%). Esta diferencia se explica por el mayor peso asignado al criterio físico, el cual actúa como un factor restrictivo dentro del modelo. En efecto, aunque existen amplias zonas con condiciones ambientales favorables, las limitaciones relacionadas con la pendiente del terreno y los peligros geológicos reducen significativamente la superficie clasificada como óptima.

Las áreas muy adecuadas se localizan principalmente en sectores de pendientes moderadas (5-15%), alejadas de zonas con peligros geológicos, con cobertura de pastos o suelos desnudos, y con adecuada accesibilidad, evidenciada por su cercanía a la red vial. Por otro lado, las áreas inadecuadas (S1) representan una proporción reducida del territorio (13.17 Km²; 2.38%), asociadas principalmente a zonas con pendientes pronunciadas (>25%), proximidad a cuerpos de agua (<0.5 Km) o presencia de cobertura boscosa densa. La mayor parte del territorio (86.97%) se clasifica como moderadamente adecuada (S2), lo que indica que, si bien no cumple con todas las condiciones óptimas, podría ser considerada viable mediante la implementación de medidas de mitigación y manejo adecuado.

En el distrito de Pucará, las áreas "Muy adecuadas" (S3) son más reducidas, alcanzando 8.94 Km² (4.06%) del territorio. Esta menor proporción se atribuye principalmente a las restricciones del criterio físico, especialmente la presencia de movimientos en masa y condiciones de pendiente, así como a la influencia de factores culturales como la presencia de restos arqueológicos. La mayor extensión del territorio (200.68 Km²; 91.20%) corresponde a la categoría moderadamente adecuada (S2), lo que refleja condiciones intermedias de aptitud. Finalmente, las áreas inadecuadas (S1) abarcan 10.43 Km² (4.74%), asociadas a zonas con mayores restricciones físicas y ambientales.

Estos resultados evidencian que, si bien ambos distritos presentan una alta proporción de áreas moderadamente adecuadas, Jaén dispone de una mayor superficie potencialmente

óptima (S3) en comparación con Pucará. Esto sugiere que las condiciones territoriales en Jaén son relativamente más favorables para la localización de un relleno sanitario, sin embargo, en ambos casos será necesario considerar medidas de gestión ambiental y técnica para garantizar la viabilidad del proyecto

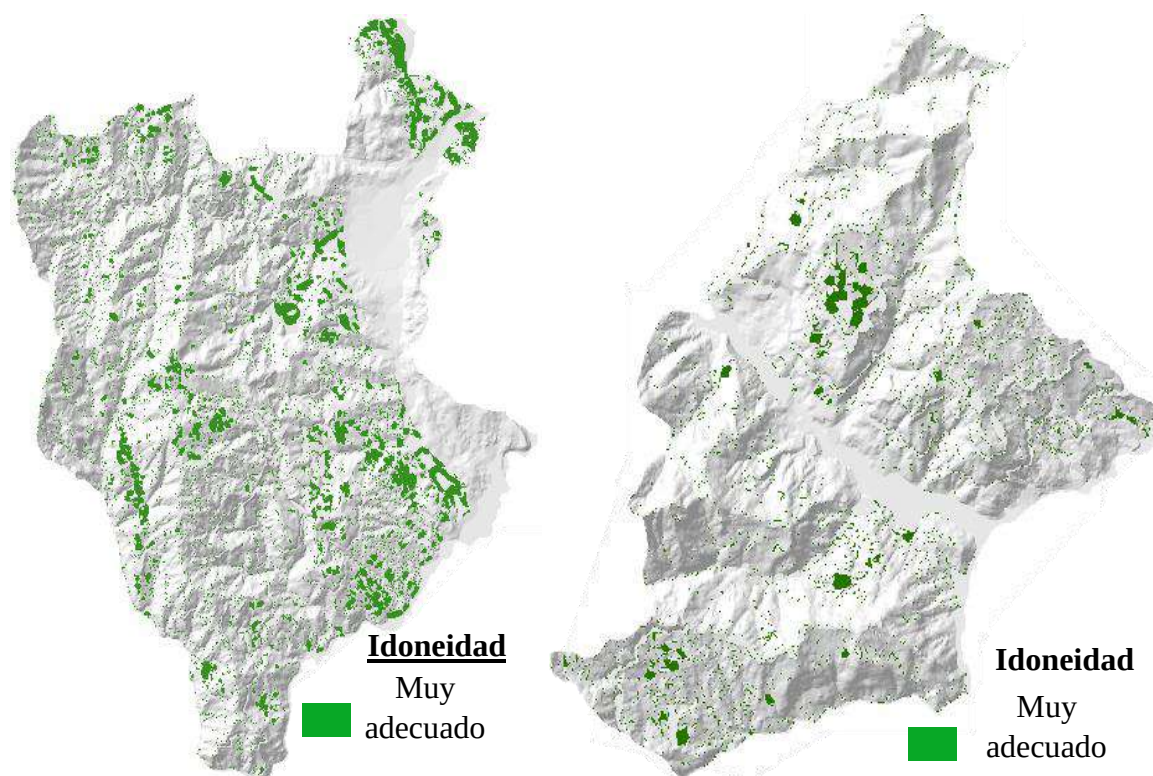
Tabla 14.

Modelo de idoneidad final – áreas muy adecuadas (S3)

Categoría	Jaén (Km ²)	Jaén (%)	Pucará (Km ²)	Pucará (%)
S1	13.17	2.38	10.43	4.74
S2	482.30	86.97	200.68	91.20
S3	59.05	10.65	8.94	4.06

Figura 13.

Mapa de idoneidad final (Jaén y Pucará)



4.3. Determinación del área requerida y selección de polígonos óptimos

4.3.1. Dimensionamiento del relleno sanitario

El área mínima requerida para un relleno sanitario con una vida útil de 20 años se calculó en 11.29 ha para el distrito de Jaén y en 0.88 ha para el distrito de Pucará (Tabla 15).

Tabla 15.

Área requerida para relleno sanitario (vida útil 20 años)

Concepto	Distrito	
	Jaén	Pucará
RSM total acumulado (t/año)	34,538.94	1,121.65
Cantidad de RSU generados en 20 años (t)	690,778.70	23,027.48
Volumen de RSU sin cobertura (m ³)	986,826.71	51,172.19
Volumen de RSU con cobertura (m ³)	1,184,192.05	61,406.63
Volumen final de RSU (m ³)	1,302,611.26	67,547.29
Área de disposición requerida (m ²)	86,840.75	6,754.73
Área total requerida (m ²)	112,892.98	8,781.15
Área total requerida (ha)	11.29	0.88

4.3.2. Dimensionamiento de la celda diaria del relleno sanitario

En el distrito de Jaén, el avance diario requerido para el relleno mecanizado aumenta de 22.5 m/día en 2026 a 32.31 m/día en 2046, lo cual es técnicamente viable en terrenos con pendientes moderadas (5 – 15 %) y con un frente de trabajo de 12 m de ancho, como los que presenta el polígono A3. El incremento obedece al crecimiento natural de la generación de residuos.

En el distrito de Pucará, el avance diario para el relleno manual se mantiene prácticamente constante de 2.62 m/día en 2026 a 2.50 /día en 2046, valor que resulta adecuado para la operación con una cuadrilla reducida (3 - 4 trabajadores) y vehículos recolectores de pequeño porte. El frente de trabajo de 4 m de ancho es compatible con la accesibilidad del polígono A2.

Los resultados confirman que los polígonos óptimos seleccionados (A3 en Jaén y A2 en Pucará) cumplen con el área mínima requerida (Tabla 16) y con las exigencias operativas de avance y frente de trabajo. Por lo tanto, la integración AHP-SIG seguida de la

verificación del dimensionamiento de celdas respalda la idoneidad técnica de las áreas propuestas.

Tabla 16.

Dimensiones de la celda diaria y avance del frente de trabajo

Distrito	Tipo de relleno	Año	RSM_{anual} (t/año)	RSM_{diario} (t/día)	Volumen de celda (m ³ /día)	Área de celda (m ² /día)	Avance diario (m/día)
Jaén	Mecanizado	2026	28360.99	94.54	162.1	270.10	22.51
Jaén	Mecanizado	2046	40716.88	135.72	232.67	387.78	32.31
Pucará	Manual	2026	1181.10	3.94	10.50	10.50	2.62
Pucará	Manual	2046	1121.65	3.74	9.97	9.98	2.50

Nota: los valores de la tabla han sido redondeados a dos decimales para facilitar la lectura; los cálculos exactos se presentan en el Anexo 37.

4.3.3. Evaluación de la forma de los polígonos (Coeficiente de Compacidad Kc)

Se identificaron 8 polígonos en cada distrito (Figura 14). Los polígonos que cumplen con el área mínima requerida y $Kc < 1.75$ son óptimos (Tablas 17 y 18).

En el distrito de Jaén, de los ocho polígonos evaluados, todos presentaron un Kc inferior a 1.75, lo que indica que todos tienen una forma geométricamente adecuada (Tabla 17). Sin embargo, para la selección final se debe considerar también su tamaño y accesibilidad. Los polígonos A1, A3, A4 y A6 cumplen con el área mínima requerida (>11.29 ha) y presentan buena forma, una accesibilidad de buena a regular, concentrados en dos sectores: Chamaya y Mochenta. Por otro lado los polígonos A2, A5, A7 y A8, presentan buena forma, pero fueron descartados por no alcanzar el área mínima o por estar muy alejados de la red vial principal.

Tabla 17.
Evaluación de polígonos S3 en Jaén (Kc y aptitud)

Polígono	Código	Kc	Clase de forma (KC<1.75)	Área (ha)	¿Cumple con el área mínima?	Accesibilidad	Aptitud final
P1	A1	1.59	I	13.12	si	buena	apto
P2	A2	1.19	I	9.73	no	regular	no apto
P3	A3	1.17	I	14.47	si	buena	apto
P4	A4	1.13	I	15.68	si	regular	apto
P5	A5	1.20	I	1.05	no	buena	no apto
P6	A6	1.36	I	14.90	si	regular	apto
P7	A7	1.16	I	4.71	no	regular	no apto
P8	A8	1.15	I	7.84	no	regular	no apto

En Pucará, de los ocho polígonos, solo cinco (A4, A5, A6, A7 y A8) presentaron un Kc inferior a 1.75, siendo el A2 el único que, además de tener una forma compacta (Kc=1.09), supera el área mínima requerida de 0.88 ha y presenta accesibilidad viable (regular). Los polígonos A1 y A3, con $Kc > 2$, se consideran no aptos debido a su geometría extremadamente irregular que dificultaría su operación (Tabla 18).

Tabla 18.
Evaluación de polígonos S2 en Pucará (Kc y aptitud)

Polígono	Código	Kc	Clase de forma	Área (ha)	¿Cumple con el área mínima?	Accesibilidad	Aptitud final
P1	A1	4.01	III	62.12	si	regular	no apto
P2	A2	1.09	I	9.11	si	regular	apto
P3	A3	2.05	III	13.14	si	regular	no apto
P4	A4	1.18	I	9.30	si	regular	no apto
P5	A5	1.36	I	25.50	si	mala	apto
P6	A6	1.34	I	5.04	si	regular	apto
P7	A7	1.32	I	6.94	si	mala	no apto
P8	A8	1.48	I	16.67	si	mala	no apto

Figura 14.

Polígonos reclasificados para el distrito de Jaén y Pucará

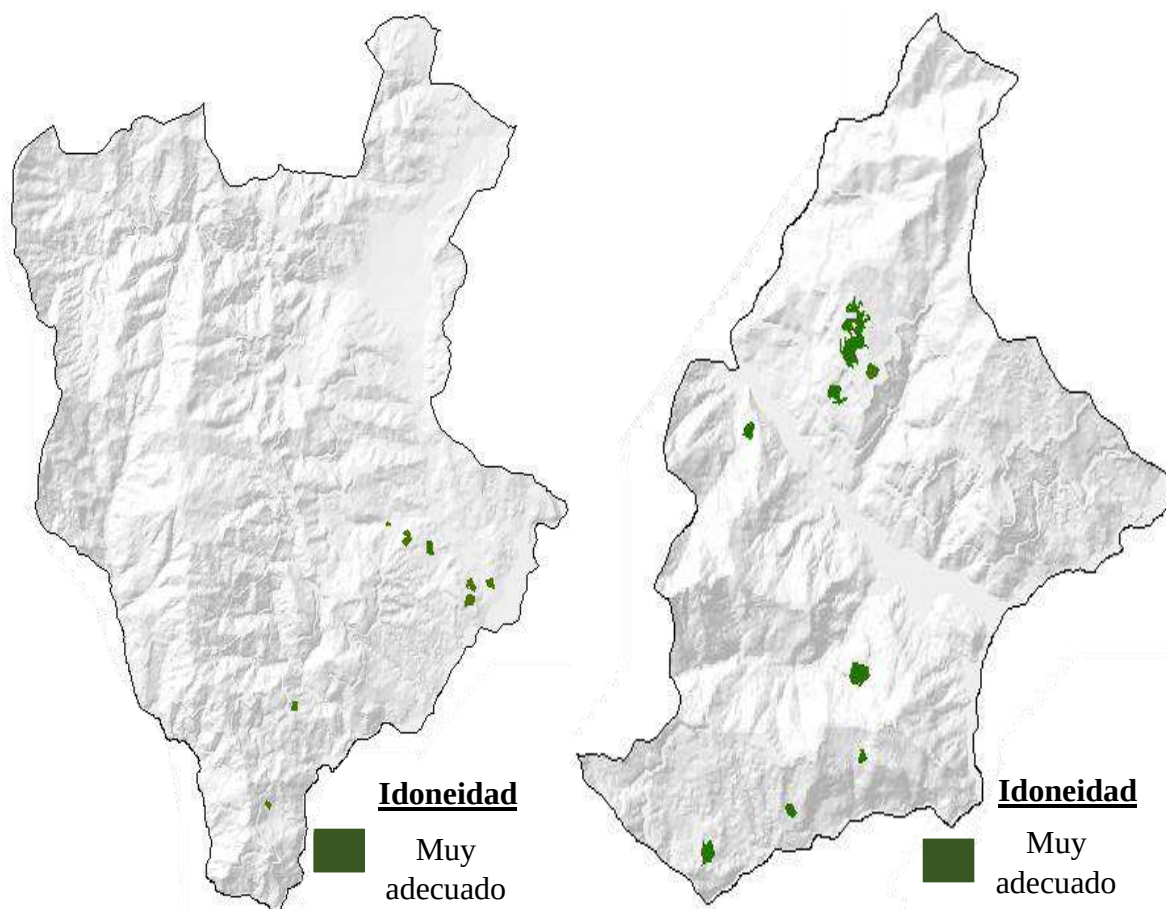
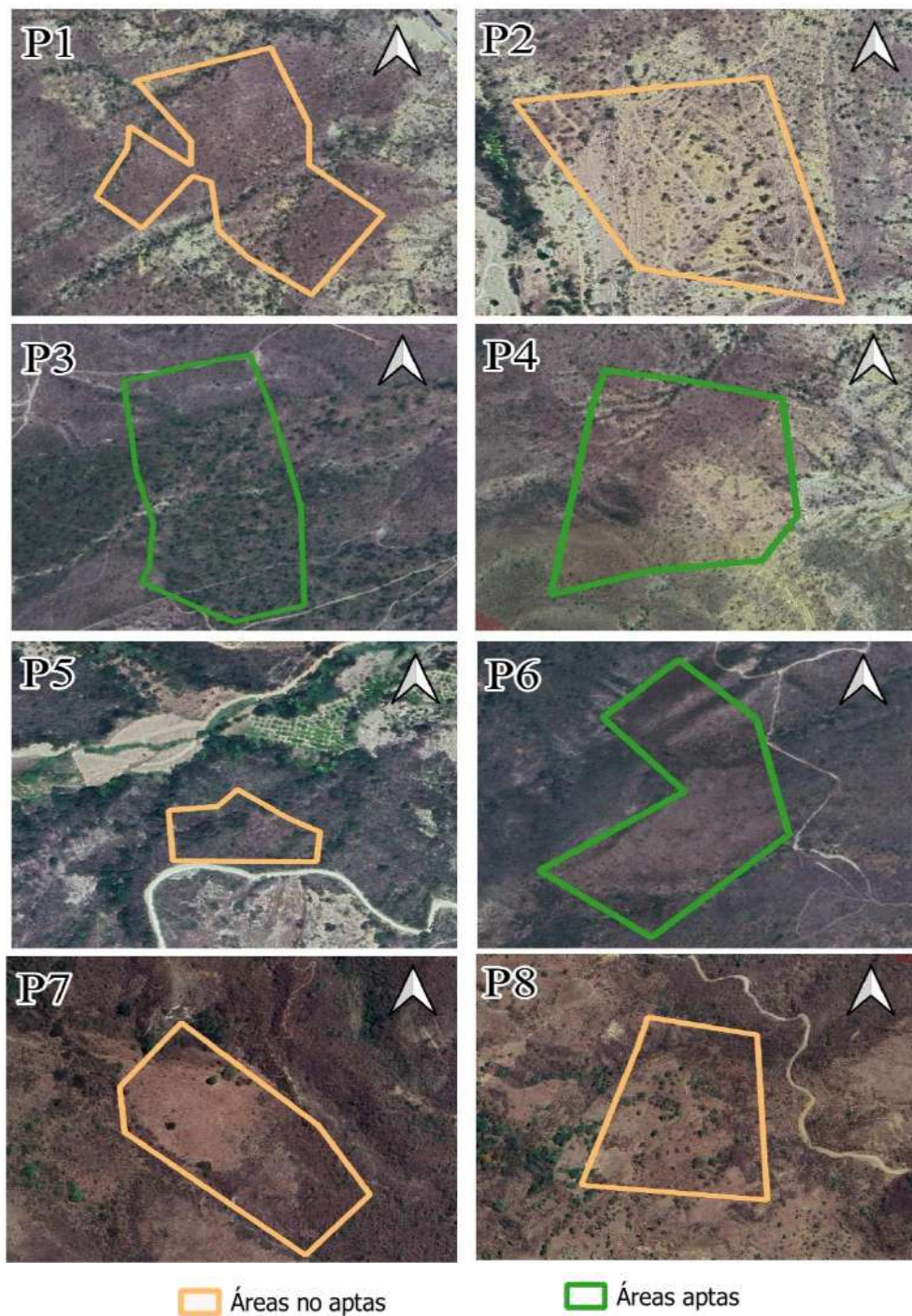


Figura 15.

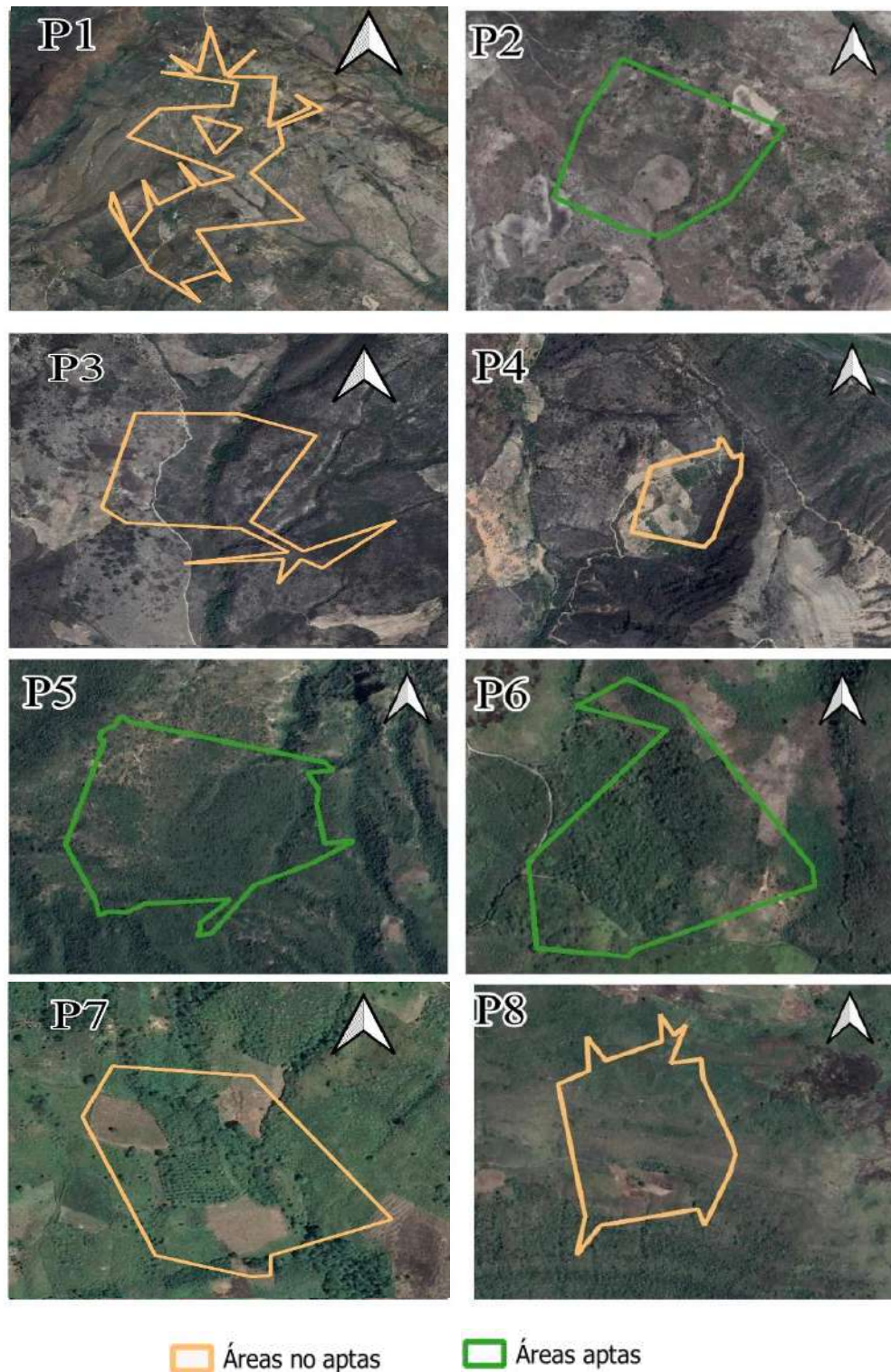
Polígonos aptos y no aptos en el distrito de Jaén



Nota: Visualización cartográfica de los polígonos evaluados.

Figura 16.

Polígonos aptos y no aptos en el distrito de Pucará



Nota: Visualización cartográfica de los polígonos evaluados.

4.4. Validación de las áreas de idoneidad

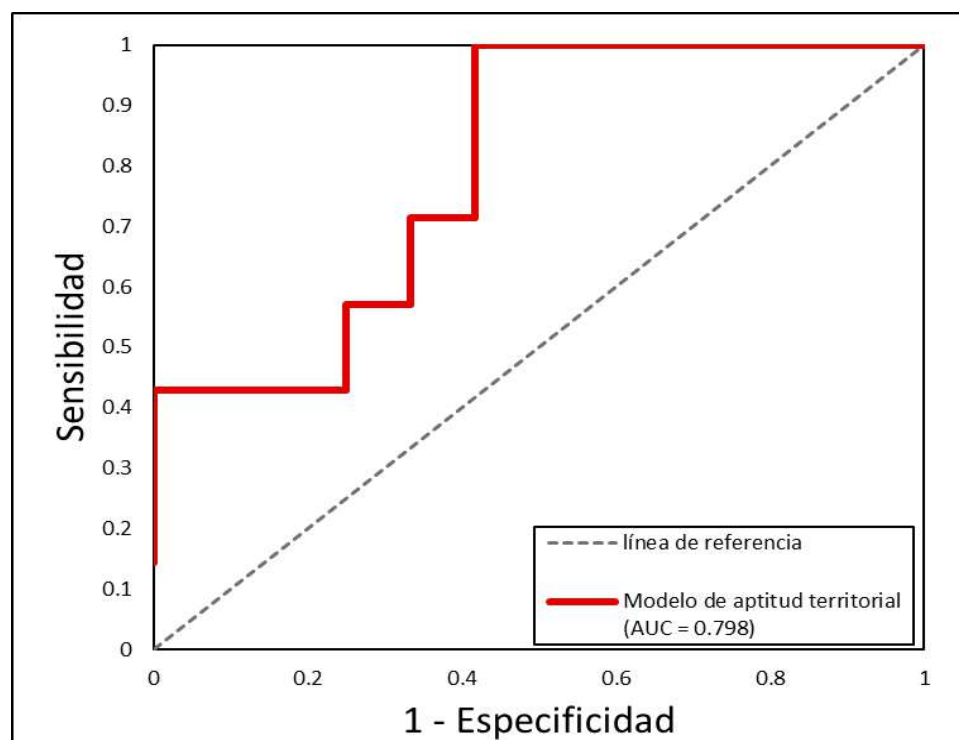
4.4.1. Validación estadística (AUC – ROC)

Se construyó la curva ROC para cada distrito a partir de los 12 puntos de validación por distrito. La Figura 17 muestra la curva ROC obtenida para el modelo del distrito de Jaén, mientras que la Figura 19 corresponde al distrito de Pucará.

El modelo de aptitud territorial para el distrito de Jaén alcanzó un valor de AUC de 0.798, lo que indica una capacidad de discriminación aceptable a buena para diferenciar entre áreas aptas y no aptas. Asimismo, el análisis estadístico mostró un valor de $Z = 2.5$ y un nivel de significancia de $p = 0.014$, evidenciando que el modelo es estadísticamente significativo y presenta un desempeño superior al azar. El error estándar de 0.11 sugiere una variabilidad moderada en la estimación del AUC (Figura 18).

Figura 17.

Curva ROC del modelo de aptitud territorial – distrito Jaén



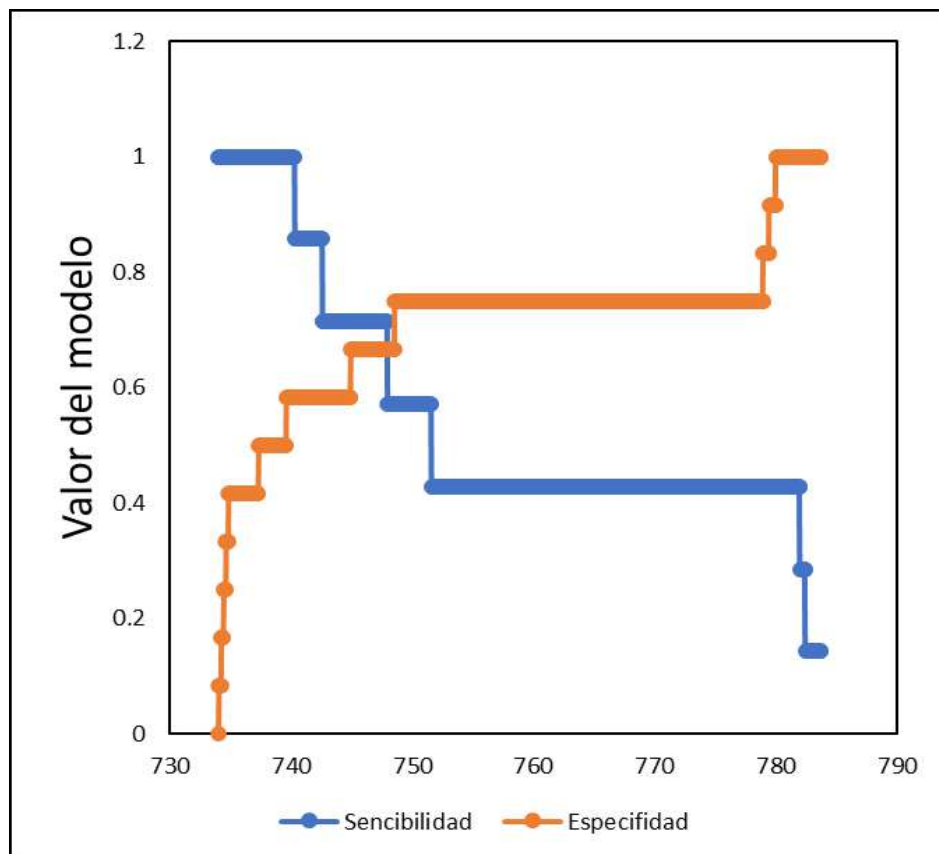
Nota: El valor de $AUC = 0.798$ ($p = 0.014$) indica una capacidad discriminativa aceptable. La curva alejada de la diagonal ($AUC=0.5$), demuestra que el modelo es mejor que el azar.

Determinado el punto de corte óptimo, mediante el índice de Youden, este se ubicó en un umbral de aptitud aproximadamente entre 745 y 750, alcanzando una sensibilidad cercana a 0.75 y una especificidad similar de 0.75, evidenciando un adecuado equilibrio entre la

identificación de áreas aptas y la correcta exclusión de áreas no aptas. Este resultado permite precisar la clasificación del modelo, reduciendo los falsos positivos y los falsos negativos (Figura 18).

Figura 18.

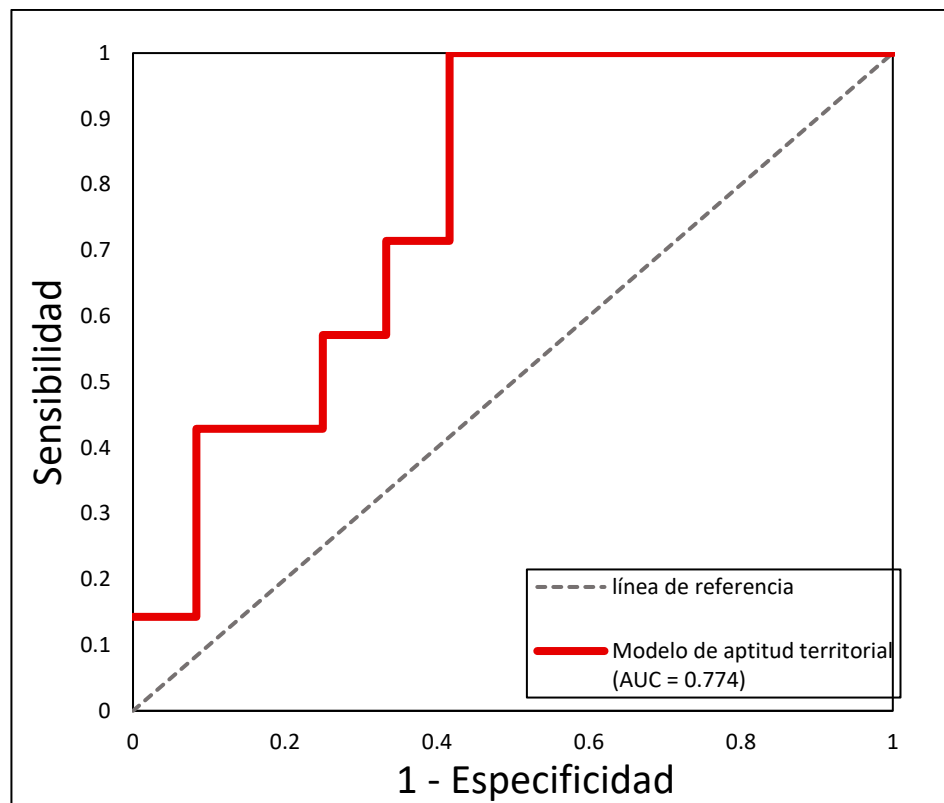
Curva de corte (sensibilidad y especificidad vs. umbral) – distrito Jaén



El modelo de aptitud territorial para Pucará obtuvo un valor de AUC de 0.774, indicando una capacidad discriminativa aceptable que diferencia entre las áreas aptas y no aptas. De igual manera, el análisis estadístico presentó un valor de $Z = 2.28$ y un nivel de significancia de $p = 0.029$, dejando en evidencia que el modelo es estadísticamente significativo y tiene un desempeño superior al azar. El error estándar de 0.119 sugiere una variabilidad moderada en la estimación del AUC (Figura 19).

Figura 19.

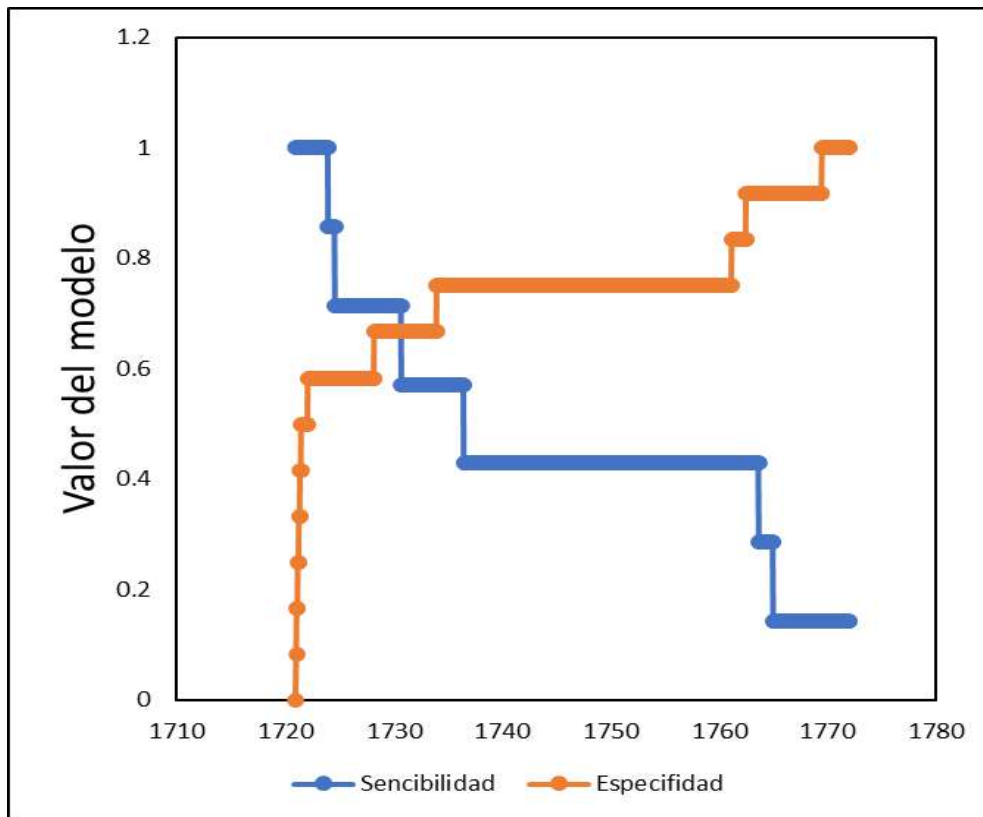
Curva ROC del modelo de aptitud territorial – distrito Pucará



El punto de corte óptimo, determinado mediante el índice de Youden, se ubicó en un umbral de aptitud aproximado entre 1730 y 1735, con una sensibilidad cercana a 0.70 y una especificidad entre 0.65 y 0.70. Este resultado refleja un adecuado equilibrio entre la identificación de áreas aptas y la reducción de falsos positivos, lo que optimiza la clasificación del modelo (Figura 20).

Figura 20.

Curva de corte (sensibilidad y especificidad vs. umbral) – distrito Pucará



Estos resultados confirman que la metodología AHP – SIG implementada posee una precisión de moderada a buena, siendo viable para la planificación territorial de infraestructuras de disposición final de residuos sólidos en ambos distritos.

4.4.2. Verificación en campo

Debido a que la identificación de áreas potenciales se realizó mediante un análisis multicriterio aplicado a la totalidad del ámbito de estudio, la verificación de campo no tuvo como finalidad caracterizar individualmente todos los polígonos inicialmente identificados, sino comprobar in situ las condiciones de las alternativas que, luego de superar los criterios de aptitud, superficie requerida, compacidad y accesibilidad, fueron priorizadas para cada distrito. En Jaén se verificó el polígono A3, ubicado en el sector Mochenta, mientras que en Pucará se verificó el polígono A2, ubicado en el sector San Isidro de la Vega. Los resultados se presentan:

A) Polígono A3 del distrito de Jaén

Ubicado cerca de la carretera Jaén – Chamaya, en las proximidades de la localidad de Mochenta, a unos 30 minutos de la ciudad de Jaén. La verificación in situ (Figura 21)

confirmó un suelo de textura areno-arcilloso, pendiente accesible (estimada entre 10 y 15 %), sin cursos de agua superficiales cercanos y cobertura vegetal dominada por pastos naturales. Las condiciones generales hacen viable técnicamente la instalación de un relleno sanitario.

Figura 21.

Área óptima para ubicar un relleno sanitario en el distrito de Jaén (polígono A3)



Sin embargo, la aplicación de la ficha de verificación multicriterio (Tabla 19) arrojó un Puntaje Ponderado Total (PPT) de 180 puntos, lo que clasifica el área como “poco aceptable (regular)” según la escala establecida (Tabla 10). Este resultado difiere de la clasificación obtenida mediante el modelo AHP, que consideró el polígono A3 como “muy adecuado” (S3). La discrepancia se explica principalmente por la evaluación más rigurosa de la accesibilidad (acceso en mal estado) y la pendiente (calificada como “bueno” en lugar de “excelente”) en la ficha de campo, así como por la inclusión del criterio de movimientos en masa (calificado como “bajo peligro” pero no nulo). Estos hallazgos subrayan la importancia de complementar el análisis SIG con verificación territorial más detallada (evaluación geotectónica, topográfica):

Tabla 19.
Verificación de los criterios de exclusión y restricción del polígono A3 – distrito Jaén

Criterios	Puntaje del indicador			Importancia del criterio (IC)	Puntaje asignado (PA)	Puntaje ponderado total
	Excelente (5)	Bueno (3)	Malo (1)			
Pendiente del terreno (%)	<10%	>10 y <25%	>25%	2	3	6
Distancia a peligros geológicos (Km)	>1 Km	>0.5 Km y <1 Km	<0.5 Km	5	5	25
1 Neotectónica (Km)	>1 Km	>0.5 Km y <1 Km	<0.5 Km	5	3	15
Distancia a red hidrográfica (Km)	>1 Km	>0.5 Km y <1 Km	<0.5 Km	4	5	20
Distancia a ACP (Km)	>1 Km	>0.5 Km y <1 Km	<0.5 Km	5	5	25
Uso y cobertura vegetal	Suelo desnudo, sin cultivos	Pastos cultivados	Bosques	5	3	15

1

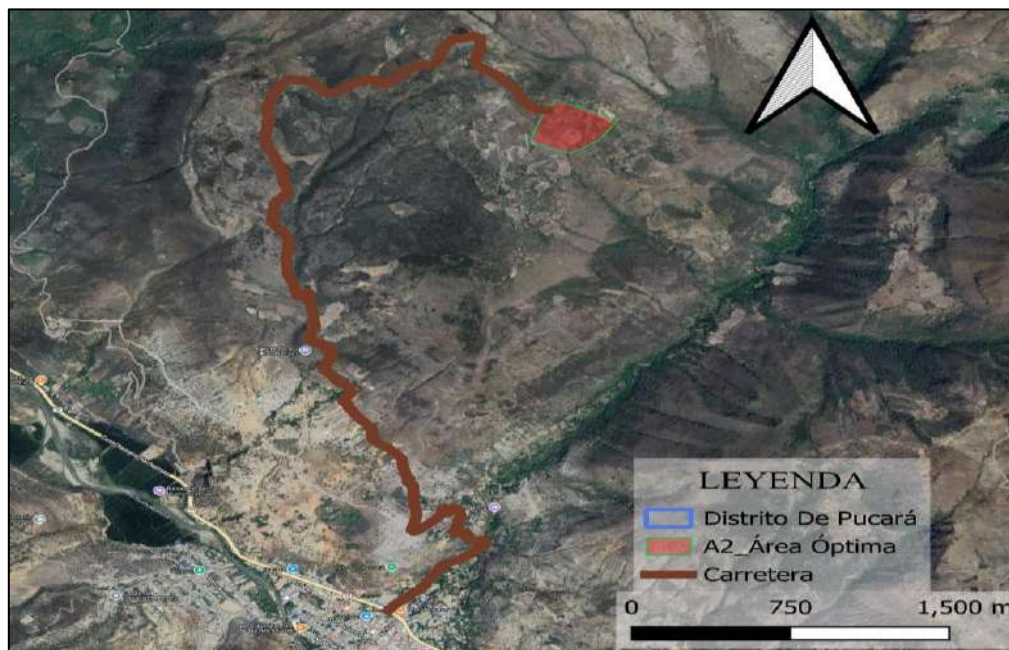
Distancia a carreteras (Km)	>1 Km	>0.5 Km y <1 Km	<0.5 Km	4	5	20
Distancia a centros poblados (Km)	>1 Km	>0.5 Km y <1 Km	<0.5 Km	5	5	25
Concesiones mineras (Km)	>1 Km	>0.5 Km y <1 Km	<0.5 Km	5	5	25
Accesibilidad	Acceso en buen estado	Acceso en mal estado	Dificultad de acceso	4	1	4
Total						180

B) Polígono A2 del distrito de Pucará

El polígono se sitúa a unos 20 minutos desde la ciudad de Pucará y a 2 horas desde la ciudad de Jaén; en la vía hacia San Isidro de la Vega – Pucará. Este sitio mostró un suelo arcilloso, pendiente ligeramente mayor, accesibilidad regular y vegetación de presentes en el suelo eran en su mayoría cactáceas no mayores a 2 m de altura, así como *Acacia macracantha* en estado de crecimiento. El área es apta y viable (Figura 22).

Figura 22.

Área óptima para ubicar un relleno sanitario en el distrito de Pucará (polígono A2)



El PPT del área potencial de Pucará (Tabla 20) fue de 208 puntos, lo que clasifica el área como “aceptable (moderada)”. Esta calificación coincide parcialmente con el modelo AHP, que identificó el polígono A2 como apto. La viabilidad del sitio es aceptable, pero se recomienda mejorar la vía de acceso y realizar un estudio geotécnico detallado:

Tabla 20.
Verificación de los criterios de exclusión y restricción del polígono A2 – distrito Pucará

Criterios	Puntaje del indicador			Importancia del criterio (IC)	Puntaje asignado (PA)	Puntaje ponderado total
	Excelente (5)	Bueno (3)	Malo (1)			
Pendiente del terreno (%)	<10%	>10 y <25%	>25%	2	3	6
Distancia a peligros geológicos (Km)	>1 Km	>0.5 Km y <1 Km	<0.5 Km	5	5	25
Movimientos de masa	bajo peligro	medio peligro	alto peligro	5	5	25
Distancia a red hidrográfica (Km)	>1 Km	>0.5 Km y <1 Km	<0.5 Km	4	5	20
Restos arqueológicos (Km)	zonas arqueológicas en un radio >1.5 Km	zonas arqueológicas en un radio >0.5 y <1.5 Km	zonas arqueológicas en un radio >0.5 Km	5	5	25

Uso y cobertura vegetal	suelo desnudo, sin cultivos	pastos cultivados	bosques	5	5	25
Distancia a carreteras (Km)	>1 Km	>0.5 Km y <1 Km	<0.5 Km	4	5	20
Distancia a centros poblados (Km)	>1 Km	>0.5 Km y <1 Km	<0.5 Km	5	5	25
Concesiones mineras (Km)	>1 Km	>0.5 Km y <1 Km	<0.5 Km	5	5	25
Accesibilidad	acceso en buen estado	acceso en mal estado	sin acceso	4	3	12
Total						208

C) Caracterización del suelo

En Jaén (A3), la calicata (Figura 23) reveló un suelo de color pardo – grisáceo, con presencia moderada de raíces finas en los primeros centímetros (actividad biológica superficial). A partir de los 30 cm de profundidad se observaron gravas y fragmentos de roca de bordes lisos y redondeados, indicando un horizonte más pedregoso y de mejor drenaje.

Figura 23.

Perfil de la calicata en el polígono A3 – distrito Jaén



Los ensayos de campo mostraron que en el ensayo de caída de la bola (Figura 24a) se formó una bola aproximadamente de 3 cm; no se fragmentó al dejarla caer desde una altura de 1 m, indicando cohesión alta. En el ensayo del cordón (Figura 24b), se formó un cordón de aproximadamente 3 cm que se fragmentó al alcanzar los 5 cm, indicando plasticidad baja a media. Posteriormente, el ensayo de la cinta (Figura 24c): se logró moldear una cinta de unos 2 cm antes de romperse, confirmando cohesión moderada.

9

Figura 24.

Ensayo de textura de suelo del polígono A3 – Jaén

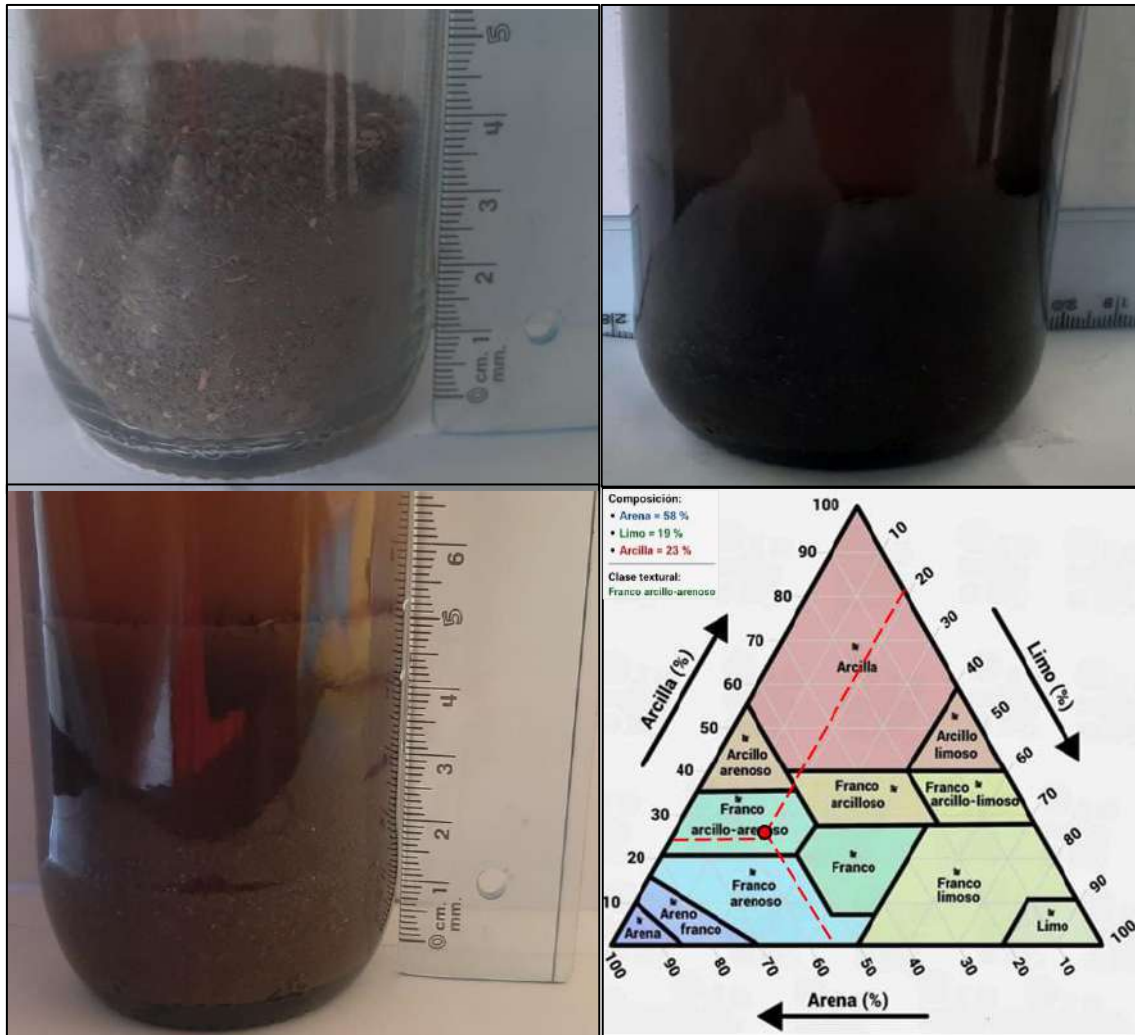


Nota: (a) caída de la bola, (b) ensayo del cordón, (c) ensayo de la cinta

En el ensayo de sedimentación (Figura 25) se observa un suelo areno – arcilloso con gravas y plasticidad baja a media; se obtuvo una composición del 58% de arena, 19% de limo y 23% de arcilla.

Figura 25.

Ensayo de sedimentación para la muestra del polígono A3 (Jaén) tras 24 h.



La realización de una calicata en Pucará fue particularmente pertinente porque se trata de un territorio fisiográficamente más accidentado y con mayores restricciones de pendiente, por lo que en Pucará (A2), la calicata (Figura 26) mostró un suelo de color pardo oscuro, con estructura homogénea y compacta. Predominaron las partículas finas, con escasa presencia de fragmentos gruesos.

Figura 26.

Perfil de la calicata en el polígono A2 – distrito Pucará



Los ensayos de campo mostraron que en el ensayo de caída de la bola (Figura 27a) se formó una bola aproximadamente de 3 cm; no se fragmentó al dejarla caer desde una altura de 1 m, indicando cohesión alta. En el ensayo del cordón (Figura 27b), se formó un cordón de más de 5 cm sin desmoronarse, evidenciando plasticidad alta. Asimismo, en el Ensayo de la cinta (Figura 27c), se logró una cinta de 4 cm de longitud antes de romperse, confirmando alta cohesión y contenido significativo de arcilla. No se realizó ensayo del frasco por falta de muestra.

Figura 27.

Ensayo de textura del suelo del polígono A2 – Pucará



Nota: (a) caída de la bola, (b) ensayo del cordón, (c) ensayo de la cinta.

La variabilidad textural entre ambos polígonos tiene implicancias directas para el diseño del relleno sanitario. En Jaén (A3), la mayor proporción de arenas y gravas favorece el drenaje, reduciendo el riesgo de anegamiento, pero exige un sistema de impermeabilización más robusto para evitar la migración de lixiviados. En Pucará (A2), la alta plasticidad y baja permeabilidad del suelo arcilloso son favorables para la retención de contaminantes, no obstante, se debe garantizar una adecuada compactación y evitar la formación de grietas por desecación.

V. DISCUSIÓN

La integración del Proceso Analítico Jerárquico (AHP) y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) demostró ser una estrategia metodológica adecuada para la identificación de áreas potenciales para ubicar un relleno sanitario en los distritos de Jaén y Pucará, respondiendo directamente al objetivo general de la investigación. Eso coincide con lo expuesto por Belalcázar, (2019), quien indica que la evaluación multicriterio facilita la simplificación de la realidad territorial en variables clave que permiten la toma de decisiones más objetivas. Asimismo, Karakuş et al., (2020), quienes destacan la necesidad de considerar simultáneamente factores como geología, hidrología, uso del suelo, distancia a centros poblados y accesibilidad en la selección de sitios para rellenos sanitarios. Estos enfoques respaldan la coherencia del método aplicado.

Los criterios empleados en la presente investigación son comparables a los aplicados por Silva et al., (2022), quienes utilizaron criterios como los peligros geológicos, la cobertura vegetal, la proximidad a zonas urbanas y áreas de conservación, lo que refuerza la consistencia metodológica entre ambos estudios. De igual manera, se guarda concordancia a lo aplicado por Estacio et al., (2021), quienes emplearon criterios físicos, ambientales y socioeconómicos mediante PCM, pero difiriendo de la validación estadística mediante la curva AUC – ROC, lo que limita la cuantificación objetiva en la precisión del modelo, factor que si se consideró en la presente investigación. Esta diferencia constituye un avance metodológico con respecto a estudios previos desarrollados en el contexto peruano, evaluando de manera más precisa y discriminativa la selección de las zonas adecuadas e inadecuadas, adoptando una estructura siguiendo la jerarquía de tres niveles (objetivo, criterio y subcriterio) expuesta y replicada con éxito en investigaciones de planificación territorial, tales como (Saaty, 1980; Zabaleta, 2022; Vergara et al., 2024; Rivera et al., 2025).

La evaluación y ponderación AHP reflejó que el criterio físico es el de mayor ponderación (53%), seguido del criterio socioeconómico (32%) y, por último, el criterio ambiental (15%). Esta jerarquización es coherente con la lógica de selección de sitios: una vez superados los filtros de exclusión ambientales (distancias mínimas a ríos, áreas protegidas, etc.), la estabilidad geotécnica y la accesibilidad se convierten en los factores prioritarios para garantizar la seguridad y viabilidad económica del relleno sanitario. En la misma línea, (Zabaleta, 2022) reportó una ponderación similar de los criterios: físico

(49%), socioeconómico (33%) y ambiental (18%), lo que valida la consistencia de nuestros resultados. El empleo del método AHP superó la limitación al permitir una jerarquización más precisa y fundamentada, tal como lo aplicado por Karakuş et al., (2020), quienes también emplearon AHP en combinación con otros métodos multicriterio y considerando siete criterios. No obstante, en la presente investigación se emplearon nueve subcriterios diferenciados por distrito y adaptados expresamente a la normativa peruana vigente (MINAM, 2021), lo que aporta mayor especificidad territorial al modelo.

En cuanto a la distribución de las áreas, se evidenció en ambos distritos que una proporción reducida del territorio está clasificada como muy adecuada: 10.65% en Jaén (59.05 Km²) y 4.06% en Pucará (8.94 Km²). Estos resultados concuerdan con lo estipulado por Belalcázar, (2019) y Espejo (2017), quienes indican que en los contextos territoriales evaluados con SIG, las zonas de aptitud representan una fracción mínima del área total, destacando la relevancia de aplicar herramientas de análisis espacial para que estas sean identificadas con mejor precisión. La proporción de áreas muy adecuadas de Pucará en contraste con Jaén se explica debido a la existencia de pendientes pronunciadas y movimientos en masa, lo que reduce considerablemente la viabilidad de disponer de áreas adecuadas en dicho distrito.

Con respecto a la selección de los polígonos óptimos, la depuración progresiva basada en el coeficiente de compacidad (K_c) y el área mínima requerida (≥ 11.29 ha en Jaén y ≥ 0.88 ha en Pucará) permitió identificar como mejores alternativas los polígonos A1, A3, A4 y A6 en Jaén, y A2, A5 y A6 en Pucará. Dicha metodología resulta comparable a la aplicada por Silva et al., (2022), quienes identificaron doce áreas con clasificación altamente adecuada en los distritos de Chachapoyas y Huancas, pero seleccionaron tres como óptimas tras cumplir con la superficie mínima requerida (≥ 3.2 ha) y tener una forma consistente. Sin embargo, se coincide en que el uso del K_c es primordial como criterio de priorización geométrica con valores cercanos a 1.0, puesto que optimiza la operación del relleno y minimiza costos de impermeabilización. El método de selección secuencial empleado en la presente investigación defiende la objetividad del proceso y reduce el sesgo en la elección del sitio final, al integrar criterios de forma, tamaño y aptitud territorial de manera simultánea.

La validación analítica mediante la curva AUC – ROC obtenidos para los distritos de Jaén (0.798) y Pucará (0.774) se ubican dentro del rango aceptable (0.7 - 0.8) según lo

propuesto por Mandrekar, (2010), indicando que el modelo discrimina adecuadamente entre las zonas adecuadas e inadecuadas. De igual manera, los valores obtenidos del AUC son comparables a los reportados por Zabaleta (2022) en la Mancomunidad del Alto Utcubamba con un valor de 0.81 y el obtenido por Vergara et al. (2024) en Rodríguez de Mendoza con un valor de 0.76, afianzando el enfoque aplicado en la región de Cajamarca. Por otro lado, la verificación in situ según MINAM, (2017), demostró que el área de Jaén consiguió una ponderación de 180 puntos con una clasificación de “poco aceptable”, mientras que Pucará consiguió una ponderación de 208 puntos con una clasificación de “moderadamente aceptable”, resultados que difieren a lo obtenido por el método AHP. En la misma línea, Ludeña & Minaya, (2023), encontraron resultados que difirieron de los obtenidos del método AHP y del método establecido por el MINAM, lo que refuerza la presente investigación.

No obstante, la validación AUC – ROC se realizó con un número limitado de puntos de control (12 por distrito), lo que constituye una limitación del estudio. Según Mandrekar (2010), si bien un $AUC > 0,7$ es aceptable, un mayor número de puntos de campo aumentaría la robustez del modelo. Por tanto, los resultados deben interpretarse como una validación preliminar, y se recomienda ampliar el muestreo en futuras investigaciones.

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

- El análisis de los subcriterios permitió identificar zonas de exclusión y áreas potenciales para un relleno sanitario en Jaén y Pucará. La pendiente es la principal restricción en Pucará (94.34 % inadecuado) frente a Jaén (54.96 %); los peligros geológicos son menos restrictivos en Jaén (64.51 % muy adecuado) que en Pucará (46.52 %). La red hidrográfica limita ≈ 50 % en ambos distritos, mientras que ACP y restos arqueológicos no constituyeron restricciones espaciales significativas en la mayor parte del área evaluada (>89 % muy adecuado). La cobertura vegetal favorece más a Pucará (77.32 % muy adecuado) que a Jaén (46.63 %). La accesibilidad vial es más ventajosa en Jaén (39.32 % muy adecuado) y el catastro minero restringe más a Pucará (22.16 % inadecuado) que a Jaén (5.33 %). Así se cumple el primer objetivo.
- Mediante el método AHP se determinó que el criterio físico es el de mayor importancia (53 %), seguido del socioeconómico (32 %) y ambiental (15 %). Los subcriterios más influyentes fueron: pendiente (F1) con 53 %, uso y cobertura vegetal (A3) con 54 % y distancia a carreteras (E1) con 63 %. El modelo de idoneidad final clasificó el territorio, identificando áreas muy adecuadas (S3) en Jaén (59.05 Km²; 10.65 %) y Pucará (8.94 Km²; 4.06 %). Se obtuvo mediante multiplicación de matrices (como se muestra en los anexos) y los subcriterios más influyentes fueron F1, A3 y E1.
- Se determinó que el área mínima estimada es de 11.29 ha para Jaén y 0.88 ha para Pucará con una proyección de 20 años de vida útil. El análisis de compacidad (Kc) permitió priorizar los polígonos óptimos con forma regular ($Kc < 1.75$): en Jaén, los polígonos A1 ($Kc = 1.59$), A3 ($Kc = 1.17$), A4 ($Kc = 1.13$) y A6 ($Kc = 1.36$); en Pucará, los polígonos A2 ($Kc = 1.09$), A5 ($Kc = 1.36$) y A6 ($Kc = 1.34$). Estos resultados cumplen el objetivo de dimensionar el área necesaria y seleccionar técnicamente los polígonos con mayor potencial para estudios posteriores, por su geometría compacta.
- La validación del modelo mediante curvas AUC – ROC mostró una capacidad aceptable, con valores de AUC de 0.798 para Jaén y 0.774 para Pucará, ambos dentro

del rango aceptable (0.7 – 0.8), y niveles de significancia de $p = 0.014$ para Jaén y $p = 0.029$ para Pucará; lo que confirma que el modelo discrimina mejor que el azar a un nivel de confianza del 95%. Sin embargo, la verificación in situ mediante ficha de ponderación (Tablas 19 y 20) clasificó los polígonos A3 de Jaén como poco aceptable (PPT = 180) y A2 de Pucará como moderadamente aceptable (PPT = 208). Esta discrepancia evidencia que el modelo AHP – SIG es una herramienta de identificación preliminar, pero no sustituye los estudios de detalle (geotécnicos, hidrogeológicos y topográficos) necesarios para declarar la viabilidad definitiva de un sitio. Por lo tanto, los polígonos seleccionados deben considerarse como áreas preliminares y de interés para estudios complementarios, no como sitios óptimos confirmados.

6.2. Recomendaciones

- Se recomienda completar el levantamiento topográfico convencional con tecnología de drones (UAV) para una mejor precisión de la información geoespacial de alta resolución, permitiendo mejorar la identificación y reclasificación de cobertura vegetal, optimizando y mejorando la precisión del análisis espacial.
- Se recomienda ajustar los pesos de los criterios mediante consulta a un panel de expertos en identificación de sitios para rellenos sanitarios (geólogos, ingenieros ambientales y planificadores territoriales), utilizando técnicas como el consenso de expertos o el método Delphi. Esto permitirá reducir la subjetividad y adaptar el modelo a diferentes contextos geográficos.
- Se recomienda no suavizar los polígonos originales generados por el modelo de idoneidad, antes de calcular el K_c , por el motivo de que altera la geometría real derivada de las restricciones territoriales. Posteriormente, si se requiere una mejora cartográfica para la presentación de mapas, puede aplicarse un suavizado controlado y documentado, sin modificar los valores de K_c originales. Asimismo, se recomienda priorizar los polígonos con $K_c < 1.75$ (forma compacta).
- Se recomienda la verificación de los puntos de control en los polígonos seleccionados mediante levantamiento topográfico con GPS diferencial, asegurando que las elevaciones tengan un error menor a 3 m. Además, incluir en futuros trabajos la participación de especialistas en residuos sólidos, geólogos y mecánica de suelos en la ponderación AHP, y ampliar el número de puntos de validación AUC – ROC

(mínimo 30 por distrito) para mejorar la robustez estadística. Por último, realizar estudios hidrogeológicos y geotécnicos de detalle (permeabilidad, capacidad portante, nivel freático, estabilidad de taludes) en los polígonos priorizados, antes de cualquier decisión de inversión o elaboración de expediente técnico.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Belalcázar, I. (2019). Identificación de áreas óptimas para la localización de un relleno sanitario en las subregiones Norte y Oriente del Valle del Cauca. *Entorno Geográfico*, (18), 46-78. <https://doi.org/10.25100/eg.v0i18.8626>
- Berumen, S., & Redondo, F. (2007). La utilidad de los métodos de decisión multicriterio (como el AHP) en un entorno de competitividad creciente. *Cuadernos de Administración*, 20(34), 65-87. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.14355824>
- Borja, L., Beltrão, N., Gemaque, A., & Amador, P. (2019). Processo Analítico Hierárquico (AHP) em ambiente SIG: Temáticas e aplicações voltadas à tomada de decisão utilizando critérios espaciais. *Interações (Campo Grande)*, 407-420. <https://doi.org/10.20435/inter.v20i2.1856>
- CEPLAN (Observatorio Nacional de Prospectiva). (2025). Incremento de los residuos sólidos. Disponible en: https://observatorio.ceplan.gob.pe/ficha/ts_2_amb
- Ciancaglini, N. (2018). Guía para la determinación de textura de suelos por método organoléptico. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.
- Espejo, A. (2017). Localización óptima de un relleno sanitario empleando Sistemas de Información Geográfica en el distrito de Chachapoyas, región Amazonas, 2017 [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Toribio Rodríguez Mendoza de Amazonas]. <https://doi.org/10.25127/ucni.v1i3.429>
- Estacio, J., Tinoco, O., Díaz, J., & Moore, R. (2021). Sistemas de Información Geográfica y Localización de un relleno sanitario en Cerro de Pasco. *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas*, 24(48), 217-227. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v24i48.21774>

- FAO. (s. f.). Textura del suelo. Textura del suelo. Recuperado https://www.fao.org/fishery/static/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s06.htm
- Huanca, A. (1999). Análisis morfométrico de la cuenca hidrográfica del río Lucre. *Espacio y Desarrollo*, (11).
- Instituto Nacional de Estadística e Informática [INEI], G. L. A. (2024). Indicadores de Gestión Municipal—2024 (p. 236). INEI. <https://www.gob.pe/institucion/inei/informes-publicaciones/6419443-peru-indicadores-de-gestion-municipal-2024>
- Jaramillo, J. (2002). Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales (p. 303). <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/guia-diseno-construccion-operacion-rellenos-sanitarios-manuales>.
- Karakuş, C., Demiroğlu, D., Çoban, A., & Ulutaş, A. (2020). Evaluation of GIS-based multi-criteria decision-making methods for sanitary landfill site selection: The case of Sivas city, Turkey. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 22(1), 254-272. <https://doi.org/10.1007/s10163-019-00935-0>
- Lasko, T., Bhagwat, J., Zou, K., & Ohno, L. (2005). The use of receiver operating characteristic curves in biomedical informatics. *Journal of Biomedical Informatics*, 38(5), 404-415. <https://doi.org/10.1016/j.jbi.2005.02.008>
- Ludeña, N., & Minaya, W. (2023). Localización de áreas óptimas para la construcción de un relleno sanitario en el distrito de Huanta -Ayacucho-Perú [Tesis de Licenciatura, Universidad San Ignacio de Loyola]. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/USIL_fb28dea8c7a27cf5afffa09b776f67d6

Mandrekar, J. (2010). Receiver operating characteristic curve in diagnostic test assessment. *Journal of Thoracic Oncology*, 5(9), 1315-1316.
<https://doi.org/10.1097/JTO.0b013e3181ec173d>

Ministerio del Ambiente. (2021). Guía para la identificación de zonas potenciales para infraestructura de disposición final de residuos sólidos municipales.
<https://www.gob.pe/institucion/minam/normas-legales/2143417-165-2021-minam>

Ministerio del Ambiente [MINAM]. (2017, diciembre 21). Decreto Supremo N° 014-2017-MINAM. Diario Oficial El Peruano, 32.
<https://www.gob.pe/institucion/minam/normas-legales/3695-014-2017-minam>.

MINAM (Ministerio del Ambiente). (2022). Dossier Cajamarca. Disponible en:
https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/sinia/archivos/public/docs/dossier_cajamarca_dic22_0.pdf

MINAM (Ministerio del Ambiente). (2024). Más de 148 500 toneladas de residuos sólidos municipales son valorizados en el país. Nota de prensa. Disponible en:
<https://www.gob.pe/institucion/minam/noticias/955458-mas-de-148-500-toneladas-de-residuos-solidos-municipales-son-valorizados-en-el-pais>

Nantes, E. (2019). El método Analytic Hierarchy Process para la toma de decisiones, repaso de la metodología y aplicaciones. *Investigación Operativa*, 27(46), 54-73.
10.13140/RG.2.2.29822.54086

Nicolini, E. (2022). The circularity of MSW in rrban landscapes: An evaluation method for a sustainable system implementation. *Sustainability*, 14(12), 7358.
<https://doi.org/10.3390/su14127358>

Olaya, V. (2020). Sistemas de Informacion Geografica. IDE - Servicio de Catálogo del Centro Universitario de Mérida. <https://volaya.github.io/libro-sig/>.

- ONU (Ed.). (2024). Beyond an age of waste: Turning rubbish into a resource. UNEP.
<https://www.unep.org/es/resources/perspectiva-mundial-de-la-gestion-de-residuos-2024>
- Rivera, C., Valqui, S., García, L., Ocaña, C., Auquiñivin, E., Chapa, S., Cieza, D., Vergara, C., & Vergara, A. (2025). Geospatial landslide risk mapping using AHP and GIS: A case study of the Utcubamba River Basin, Peru. *Applied Sciences*, 15(17), 9423. <https://doi.org/10.3390/app15179423>
- Saaty, R. (1980). The analytic hierarchy process—What it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, 9(3-5), 161-176. [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8)
- Saldaña, C., & Nájera, O. (2019). Identificación de sitios con potencial para la disposición final de residuos sólidos urbanos en el municipio de Tepic, Nayarí, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 35(esp02), 69-77. <https://doi.org/10.20937/RICA.2019.35.esp02.07>
- Sánchez, C., Valiente, Y., & Méndez, X. (2023). Generación y disposición final de residuos sólidos municipales en la región Cajamarca, Perú. *Revista Arbitrada Interdisciplinaria Koinonía*, 8(2), 871-884. <https://doi.org/10.35381/r.k.v8i2.2986>
- Silva, J., Salas, R., Rojas, N., Gómez, D., Terrones, R., Iliquín, D., Barboza, E., Oliva, M., & Barrera, M. (2022). Analytic Hierarchy Process (AHP) for a landfill site selection in Chachapoyas and Huancas (NW Peru): Modeling in a GIS-RS environment. *Advances in Civil Engineering*, 2022(1), 9733322. <https://doi.org/10.1155/2022/9733322>
- Turab, S., Hafeez, S., Ali, Z., Ahmad, Z., Moeen, M., Saleem, I., Wu, J., Chen, Z., & Xu, Y. (2021). An assessment of air quality within Facilities of Municipal Solid Waste

Management (MSWM) sites in Lahore, Pakistan. *Processes*, 9(9), 1604.

<https://doi.org/10.3390/pr9091604>

Vásquez, J., Chávez, Y., Chávez, A., Vasquez, R., Alarcón, L., & Chávez, H. (2024).

Áreas potenciales para la instalación de un relleno sanitario aplicando evaluación multicriterio en el distrito de Chota, Cajamarca. *REVISTA NOR@NDINA*, 7(1), 43-59. <https://doi.org/10.37518/2663-6360X2024v7n1p43>

Vergara, A., Valqui, V., Cieza, D., Munoz, L., Ocaña, C., Cubas, J., & Auquiñivin, E.

(2024). Integration of the AHP method and GIS techniques for mapping areas susceptible to forest fires in the Southern Amazon Region (Peru). *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 19(3), 769-778. <https://doi.org/10.18280/ijdne.190307>

World Bank Group [WBG]. (2018). What a waste 2.0: A global snapshot of Solid Waste

Management (SWM) to 2050. Washington, DC: World Bank. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>

Zabaleta, J. (2022). Análisis de idoneidad territorial para establecer un relleno sanitario,

a través de AHP y SIG en la mancomunidad del alto Utcubamba, Amazonas—2022 [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Toribio Rodríguez Mendoza de Amazonas]. <https://hdl.handle.net/20.500.14077/2973>

AGRADECIMIENTOS

A Dios, infinitas gracias por brindarnos salud, vida y la fortaleza necesaria para cumplir con éxito este proyecto de tesis, guiándonos en cada paso de este camino.

A nuestros padres, por su paciencia incondicional, su cariño, su esfuerzo diario y su motivación constante. Su dedicación y su fuerza implacable nos brindaron las facilidades necesarias para alcanzar esta importante meta. Este logro también es suyo.

Expresamos nuestro sincero agradecimiento a nuestras asesoras, la Mg. Candy Lisbeth Ocaña Zúñiga y la Mg. Annick Estefany Huaccha Castillo, por sus valiosas enseñanzas, por brindarnos sus conocimientos con dedicación y por su acompañamiento constante en el desarrollo de este estudio.

De manera especial, extendemos nuestro más profundo agradecimiento al Ingeniero Wilmer Jesús More Carranza, por su orientación en todo el proceso de tesis, por sus consejos acertados, por resolver nuestras dudas, por acompañarnos en las visitas de campo y, sobre todo, por motivarnos a no rendirnos. Sin su guía, este logro no habría sido posible.

Agradecemos al grupo de investigación para el desarrollo de mujeres en ciencia (GIDEMCI) de la Universidad Nacional de Jaén, por su valioso respaldo y su compromiso con la promoción de la investigación, contribuyendo al desarrollo de este estudio

Asimismo, agradecemos al Laboratorio de Ingeniería Forestal y Ambiental y al Laboratorio de Silvicultura de la Universidad Nacional de Jaén por proporcionarnos las herramientas y equipos necesarios para el desarrollo de nuestra investigación.

Finalmente, nuestro agradecimiento sincero a todas aquellas personas que, de una u otra manera, contribuyeron a lo largo de este proceso. A cada uno de ustedes, gracias de corazón por haber sido parte de este recorrido, que hoy llega a su fin con el logro de un objetivo largamente esperado.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo principalmente a Dios, por darme salud, vida y la fortaleza necesaria para no rendirme y seguir adelante con mis objetivos.

A mis queridos padres, Digna y José, por ser la razón y el motor de mi formación académica y profesional. Gracias por su amor incondicional y por estar presentes en cada uno de estos momentos.

A mis hermanos, Wilmer, Yomar, Kiomy y Teresita, por brindarme su apoyo incondicional, compartir sus conocimientos y, sobre todo, por no dejarme sola en este proceso. Gracias por su paciencia.

A mis abuelos y tíos, por ser parte de este gran logro, por su comprensión y motivación en cada etapa de mi vida.

Rosa Analy More Carranza

6

Dedico este trabajo principalmente a Dios, por brindarme la vida, la fortaleza y la sabiduría necesarias para culminar esta etapa importante de mi formación profesional.

A mis padres Poquioma M. Jaime y Dávila F. Yuly, quienes me brindaron su apoyo incondicional, esfuerzo y sacrificio constante, siendo los pilares más fundamentales en cada uno de mis logros.

A mi hermano Yeison Poquioma y amigos, que me motivaron y aconsejaron no rendirme y ceder por difícil que sea el camino.

Por último, pero no menos importante, a Nicol Fernández, quien se convirtió en un soporte y me motivó en esta etapa de mi vida.

Jordi Poquioma Dávila

ANEXOS

Figura 28.

Solicitud del Laboratorio de Cómputo para el uso del software ArcGIS

CARTA N° 001-2025-MCPD

SEÑOR(A) : Dr. Luis Arturo Gil Ramírez

Responsable del Departamento de la Escuela Profesional de Ingeniería Forestal y Ambiental

ASUNTO : Solicito la sala del Laboratorio de Cómputo y Análisis Geoespacial para la elaboración de mapas

FECHA : Jaén, 19 de agosto 2025

Me dirijo a usted para saludarlo cordialmente; y a la vez, solicitar el uso del Laboratorio de Cómputo y Análisis Geoespacial, debido a que cuentan con la licencia del software ArcGIS y tienen instalado el QGIS, siendo indispensable para elaboración de mapas que permitan el desarrollo de nuestro primer objetivo requerido en la escrita del informe final de nuestro proyecto de tesis de pregrado, titulado: "PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO (AHP) Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) PARA LA IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS DE RELLENO SANITARIO EN JAÉN Y PUCARÁ", aprobado mediante resolución N° 600 – 2025 - UNJ/FI. Esta solicitud tiene como finalidad fortalecer el componente cartográfico de dicha investigación, empleando herramientas geoespaciales disponibles en el laboratorio que usted dirige.

Agradeciendo la atención que brinde al presente, aprovecho la oportunidad para reiterarle las muestras de mi especial consideración y estima.

Atentamente,

More Carranza Rosa Analy
Cód. universitario: 2020210089
DNI N.º 71606461

Poquioma Dávila Jordi
cód. universitario: 2020130157
DNI N.º 73750670

Figura 29.**Solicitud del equipo GPS del Laboratorio de Ingeniería Forestal y Ambiental****CARTA N° 002-2026-MCPD**

SEÑOR : Dr. Luis Arturo Gil Ramírez
Responsable del Departamento Académico de Ingeniería Forestal y Ambiental

ASUNTO : Solicito equipo GPS del Laboratorio de Ingeniería Forestal y Ambiental

FECHA : 24 de marzo de 2026

Me dirijo a usted para saludarlo cordialmente; y a la vez, solicitar el uso del equipo GPS del Laboratorio de Ingeniería Forestal y Ambiental, durante el período de fechas del 27 de marzo al 10 de abril del 2026, debido a que viene siendo indispensable para el desarrollo de nuestro último objetivo requerido en la escrita del informe final de nuestro proyecto de tesis de pregrado, titulado: "PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO (AHP) Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) PARA LA IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS DE RELLENO SANITARIO EN JAÉN Y PUCARÁ", aprobado mediante resolución N° 600 – 2025 - UNJ/FI.

Esta solicitud tiene como finalidad fortalecer componente cartográfico de dicha investigación, recabando información de manera presencial en las áreas dadas como resultado de los objetivos anteriores.

Agradeciendo la atención que brinde al presente, aprovecho la oportunidad para reiterarle las muestras de mi especial consideración y estima.

Atentamente,

More Carranza Rosa Analy
Cód. universitario: 2020210089
DNI N.º 71606461

Poquioma Dávila Jordi
cód. universitario: 2020130157
DNI N.º 73750670

Figura 30.

Descarga de cuadros de empalme del Instituto Geográfico Nacional – IGN

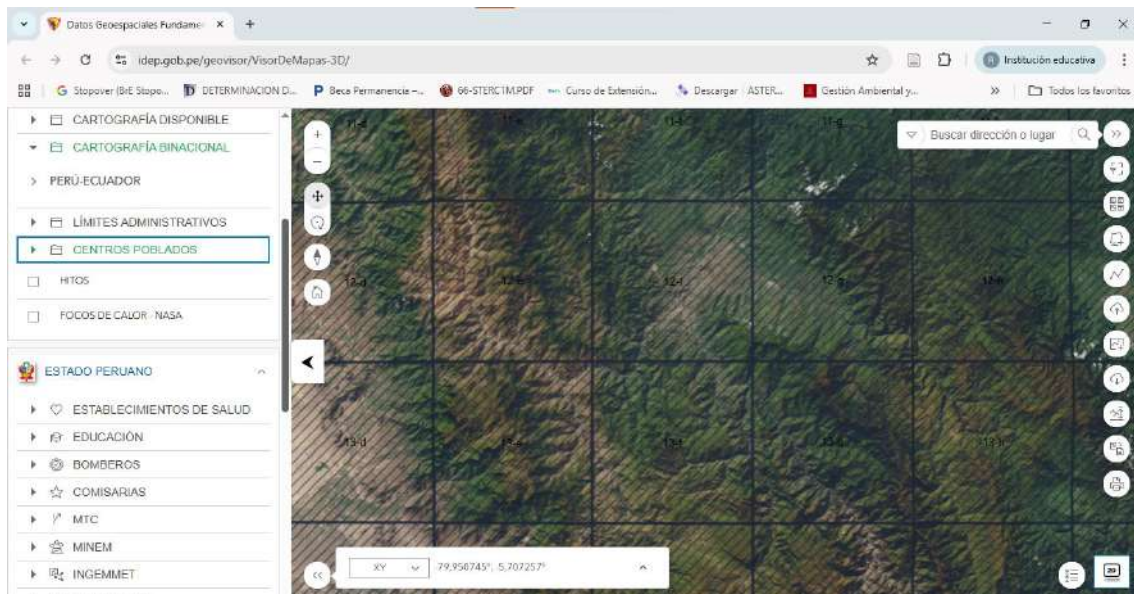


Figura 31.

Descarga de peligros geológicos y otras capas de la plataforma SIGRID del CENEPRED

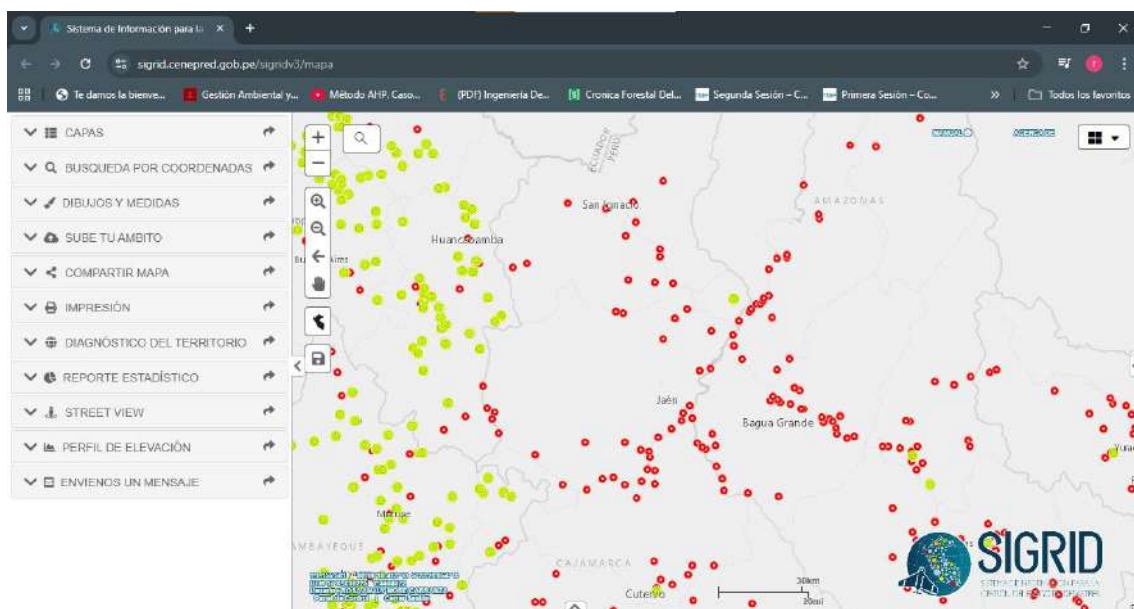


Figura 32.
Procedimiento para el subcriterio F1 en Jaén

Reclasificar

Ráster de entrada
Slope_DEM_Ja1

Campo Reclass
Value

Reclasificación

Antiguos valores	Nuevos valores
0 - 5.204178	1
5.204178 - 13.010445	2
13.010445 - 19.081986	3
19.081986 - 24.575285	4
24.575285 - 29.779463	5
29.779463 - 35.272762	6
35.272762 - 41.633424	7
41.633424 - 50.017933	8

Cargar... Guardar... Invertir valores

Ráster de salida
C:\Users\LENOVO\Documents\ArcGIS\Default.gdb\Value

☐ Cambiar los valores ausentes por NoData (opcional)

Figura 33.
Procedimiento para el subcriterio F1 en Pucará

Reclasificar

Ráster de entrada
Slope_Pucara1

Campo Reclass
Value

Reclasificación

Antiguos valores	Nuevos valores
0 - 5.621103	1
5.621103 - 14.333813	2
14.333813 - 20.517026	3
20.517026 - 25.857074	4
25.857074 - 30.916067	5
30.916067 - 35.97506	6
35.97506 - 41.596163	7
41.596163 - 49.465707	8

Cargar... Guardar... Invertir valores

Ráster de salida
C:\proyecto_Args\PUCARA\F1

☐ Cambiar los valores ausentes por NoData (opcional)

Figura 34.

Distancia Euclidiana E1 en Jaén.

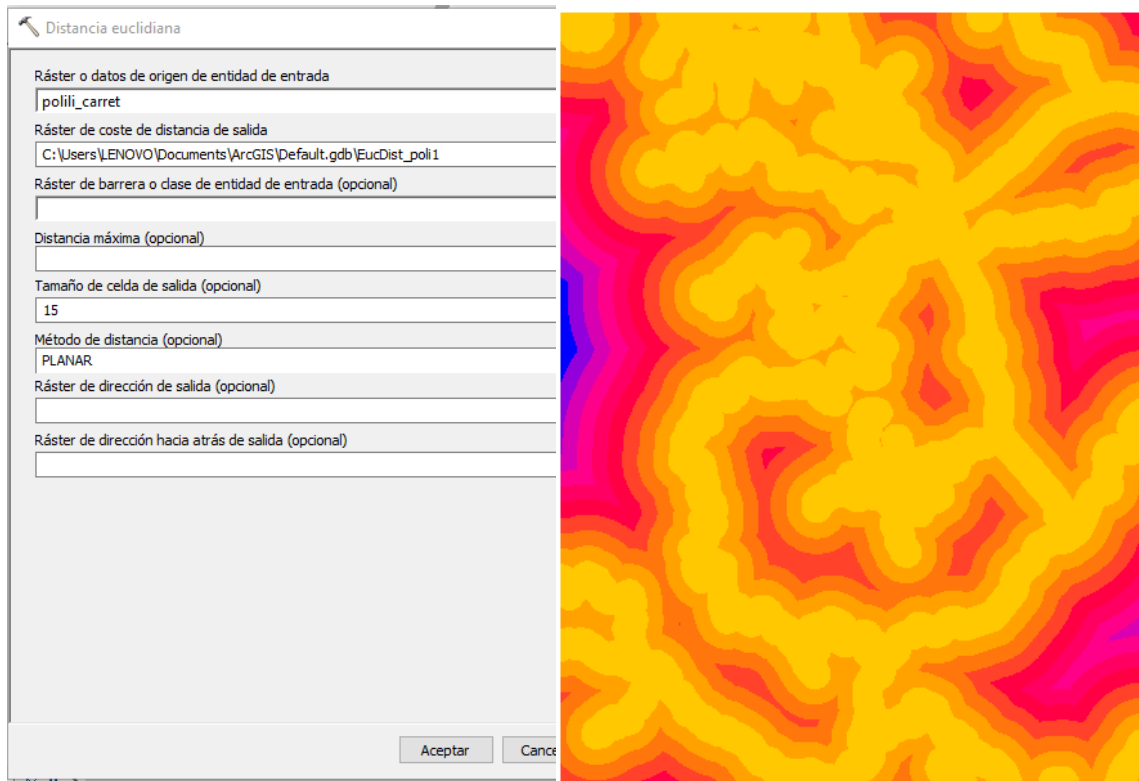


Figura 35.

Distancia euclidiana A2 (red hidrográfica) en Pucará.

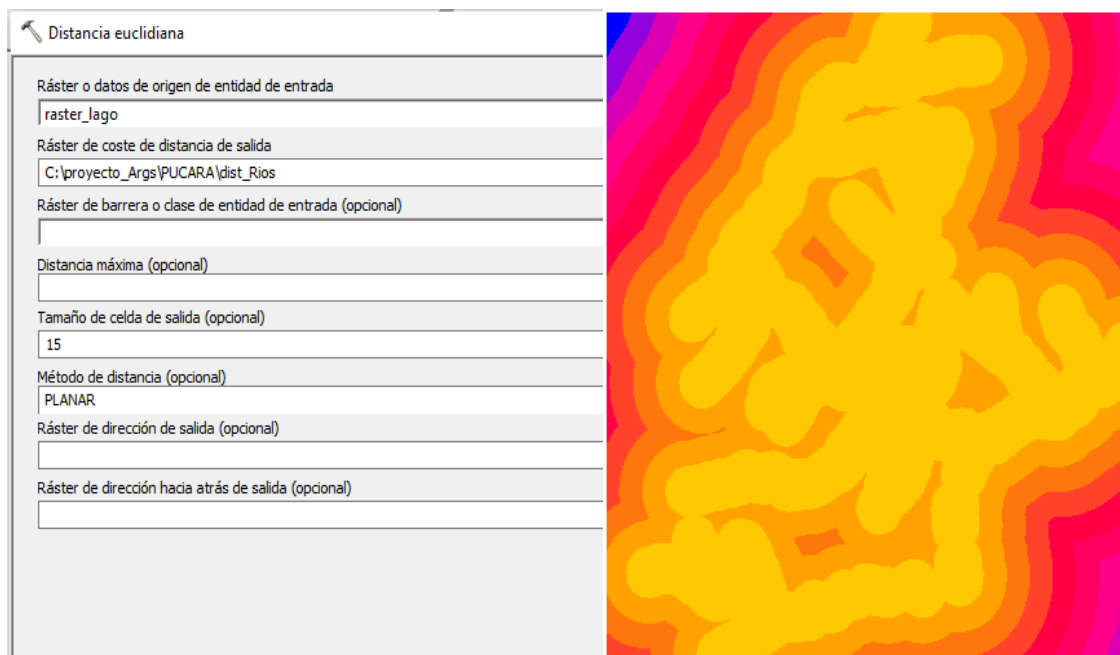


Figura 36.

Distancia euclidiana E2 Jaén

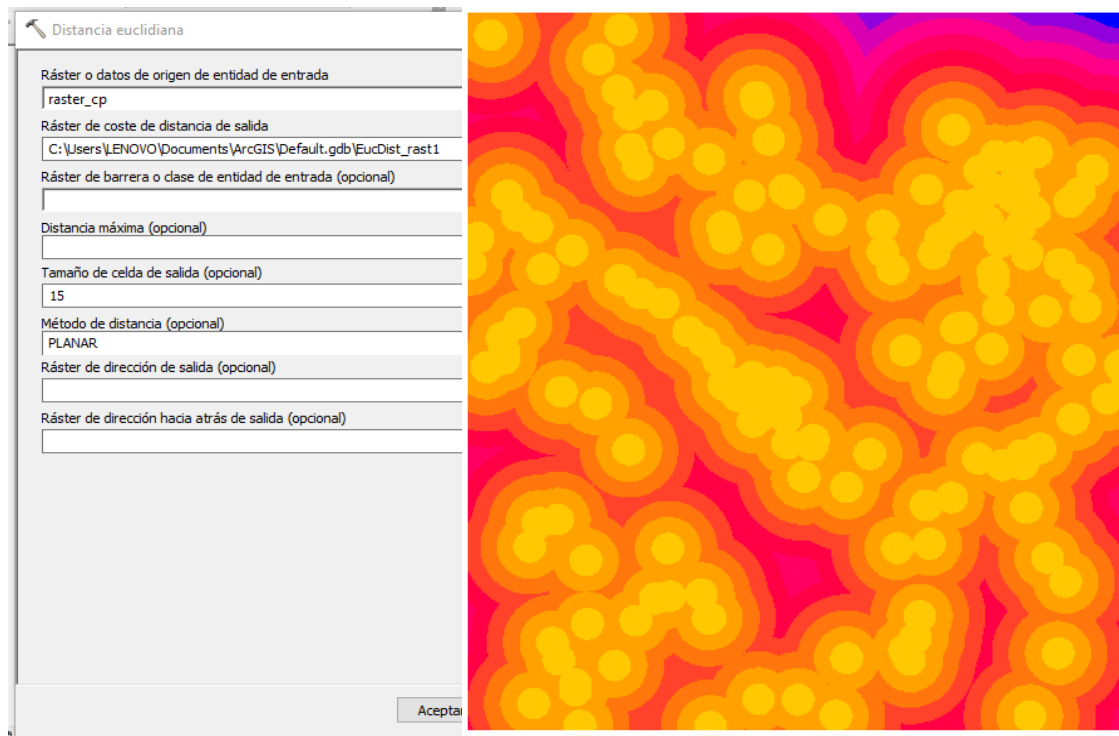


Figura 37.

Distancia euclidiana E3 Pucará

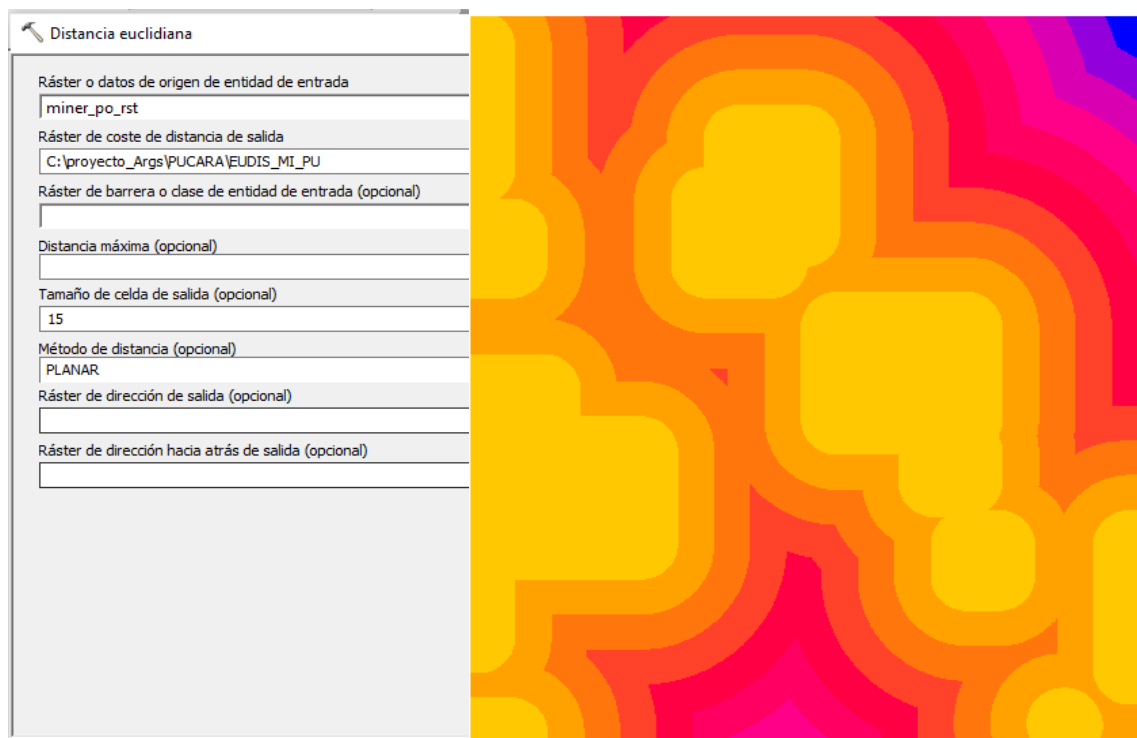


Tabla 21.

Matriz de comparación por pares de los subcriterios físicos

Subcriterios	F1	F2	F3
Físicos			
F1	1	3	2
F2	1/3	1	1/3
F3	1/2	3	1
Suma	1.83	7.00	3.33

Tabla 22.

Matriz normalizada y vector de prioridades (subcriterios físicos)

Subcriterios	F1	F2	F3	Ponderación	Vector final	Cociente
Físicos						
F1	0.55	0.43	0.60	0.53	1.62	3.08
F2	0.18	0.14	0.10	0.14	0.43	3.02
F3	0.27	0.43	0.30	0.33	1.02	3.06
amax						3.05

Tabla 23.

Consistencia de los juicios para los subcriterios físicos

Ítem	Valor
Índice de consistencia	0.026909276
Ratio de consistencia	0.046395303

Tabla 24.
Matriz de comparación por pares de los subcriterios ambientales

Subcriterios Ambientales	A1	A2	A3
A1	1	1/3	1/5
A2	3	1	1/2
A3	5	2	1
Suma	9	3.33	1.7

Tabla 25.
Matriz normalizada y vector de prioridades (subcriterios ambientales)

Subcriterios Físicos	A1	A2	A3	Ponderación	Vector final	Cociente
A1	0.11	0.10	0.12	0.11	0.328888889	3.001192843
A2	0.33	0.30	0.29	0.31	0.928540305	3.003523608
A3	0.56	0.60	0.59	0.58	1.747494553	3.006371814
amax						3.003696088

Tabla 26.
Consistencia de los juicios para los subcriterios ambientales

Ítem	Valor
Índice de consistencia	0.001848044
Ratio de consistencia	0.003186283

Tabla 27.

Matriz de comparación por pares de los subcriterios socioeconómicos

Subcriterio	E1	E2	E3
Socioeconómico			
E1	1	5	3
E2	1/5	1	1/3
E3	1/3	3	1
Suma	1.53	9	4.33

Tabla 28.

Matriz normalizada y vector de prioridades (subcriterios socioeconómicos)

Subcriterios	E1	E2	E3	Ponderación	Vector final	Cociente
Físicos						
E1	0.65	0.56	0.69	0.63	1.945621206	3.071973401
E2	0.13	0.11	0.08	0.11	0.31965812	3.011201867
E3	0.22	0.33	0.23	0.26	0.790082167	3.032968775
amax						3.071973401

Tabla 29.

Consistencia de los juicios para los subcriterios socioeconómicos

Ítem	Valor
Índice de consistencia	0.01935734
Ratio de consistencia	0.033374725

Tabla 30.

Matriz de comparación por pares de los criterios principales (F, A, E)

Criterios	F	A	E
F	1	2	1/3
A	1/2	1	1/3
E	3	3	1
Suma	4.50	6.00	1.67

Tabla 31.

Matriz normalizada y vector de prioridades de los criterios

Subcriterios Físicos	F	A	E	Ponderación	Vector final	Cociente
F	0.22	0.33	0.2	0.25	0.766666667	3.044117647
A	0.11	0.17	0.2	0.16	0.481481481	3.023255814
E	0.66	0.50	0.6	0.59	1.822222222	3.094339623
amax						3.053904361

Tabla 32.

Consistencia de los juicios para los criterios principales

Ítem	Valor
Índice de consistencia	0.026952181
Ratio de consistencia	0.046469277

Tabla 33.

Multiplicación de matrices de subcriterios con sus respectivos pesos por la matriz de los pesos de los criterios para obtener los pesos globales de los criterios.

Pesos de subcriterios			X	Pesos de criterios
0.52467532	0.16378066	0.63334572		0.25185185
0.14155844	0.2972583	0.10615632		0.15925926
0.33376623	0.53896104	0.26049796		0.58888889

Tabla 34.

Pesos obtenidos de la multiplicación de la tabla 33

PESOS GENERALES	FISI	0.5311943
	AMB	0.14550717
	SOCIEC	0.32329853

Figura 38.

Búsqueda de los reportes anuales de RSM en la página del SIGERSOL



Tabla 35.
Comparación de métodos de proyección de RSM (Jaén)

Año	RSM (t/año)	Método aritmético	Método interés simple	Método geométrico
2019	24,544.38			
2020	24,760.77	216.39	1.008816275	1.008816275
2021	27,676.17	2915.4	1.117742703	1.117742703
2022	26,801.89	-874.28	0.968410369	0.968410369
2023	26,966.57	164.68	1.006144343	1.006144343
2024	27,176.98	210.41	1.007802624	1.007802624
Tasa de crecimiento		526.52	0.02	1.021783263
2024		27,176.98	27,217.66	27,336.69382
2026			28,360.99	
2046			40,716.88	

Figura 39.

Cálculo del área requerida para el relleno sanitario – distrito Jaén

$$RSM_{total} = 34,538.94 \frac{t}{año} \times 20 \text{ año} = 690,778.70 t$$

$$V_{comp} = \frac{690,778.70 t}{0.70 t/m^3} = 986,826.71 m^3$$

$$V_{cob} = 986,826.71 m^3 \times 1.20 = 1,184,192.05 m^3$$

$$V_{seguridad} = 1,184,192.05 m^3 \times 1.10 = 1,302,611.26 m^3$$

$$V_{relleno} = 1,302,611.26 m^3$$

$$A_{disp} = \frac{1,302,611.26 m^3}{15 m} = 86,840.75 m^2$$

$$A_{terreno} = 86,840.75 m^2 \times 1.3 = 112,892.98 m^2$$

$$A_{total} = \frac{112,892.98 m^2}{10,000 m^2} = 11.29 ha$$

Tabla 36.

Comparación de métodos de proyección de RSM (Pucará).

Año	RSM (t/año)	Método		
		aritmético	interés simple	geométrico
2019	1,240.57			
2020	1,214.42	-26.15	-0.02107902	0.97892098
2021	1,432.47	218.05	0.179550732	1.17955073
2022	1,185.29	-247.18	-0.172555097	0.8274449
2023	1,186.48	1.19	0.001003974	1.00100397
2024	1,187.07	0.59	0.000497269	1.00049727
Tasa de crecimiento		-10.7	0.00	0.99748357
2024		1,187.07	1,224.96	1,225.03933
2026			1,181.10	
2046			1,121.65	

Figura 40.

Cálculo del área requerida para el relleno sanitario – distrito Pucará

$$RSM_{total} = 1,151.37 \frac{t}{año} \times 20 \text{ año} = 23,027.48 t$$

$$V_{comp} = \frac{23,027.48 t}{0.45 t/m^3} = 51,172.19 m^3$$

$$V_{cob} = 51,172.19 m^3 \times 1.20 = 61,406.63 m^3$$

$$V_{seguridad} = 61,406.63 m^3 \times 1.10 = 67,547.29 m^3$$

$$V_{relleno} = 67,547.29 m^3$$

$$A_{disp} = \frac{67,547.29 m^3}{10 m} = 6,754.73 m^2$$

$$A_{terreno} = 6,754.73 m^2 \times 1.3 = 8,781.15 m^2$$

$$A_{total} = \frac{8,781.15 m^2}{10,000 m^2} = 0.88 ha$$

Figura 41.

Cálculo del avance diario de la celda de disposición final para Jaén, año 2026

$$RSM_{diario} = \frac{28,360.99 t/año}{300 días/año} = 94.54 t/día$$

$$V_{RS} = \frac{94.54 t/día}{0.70 t/m^3} = 135.05 m^3/día$$

$$V_{cobertura} = 135.05 \frac{m^3}{día} \times 1.20 = 162.06 \frac{m^3}{día}$$

$$V_{celda} = 162.06 \frac{m^3}{día}$$

$$A_{celda} = \frac{162.06 m^3/día}{0.6 m} = 270.10 m^2/día$$

$$A_{diario} = \frac{270.10 m^2/día}{12 m} = 22.51 m/día$$

Tabla 37.

Dimensionamiento de la celda diaria Jaén y Pucará

Distrito	Tipo de relleno	Año	$RSM_{año}$ (t/año)	RSM_{diario} (t/día)	V_{rs_diario} (t/día)	Volumen de celda (m³/día)	Área de celda (m²/día)	Avance diario (m/día)
Jaén	mecanizado	2026	28,360.99	94.536622	135.05232	162	270.10463	22.50872
Jaén	mecanizado	2046	40,716.88	145.47078	207.8154	249	415.6308	34.6359
Pucará	manual	2026	1,181.10	3.9369855	8.7488566	10.498628	10.498628	2.624657
Pucará	manual	2046	1,121.65	3.7435087	8.3189082	9.9826899	9.9826899	2.4956725

Tabla 38.
Coefficiente de compacidad (Kc) de los polígonos S3 (Jaén)

Polígono	Área (ha)	Área (Km ²)	Perímetro (Km ²)	kc	Código	kc		
						1-1.75	1.75-2	≥2
P1	13.12	0.13	2.06	1.59	A01	I		
P2	9.73	0.10	1.32	1.19	A02	I		
P3	14.47	0.14	1.58	1.17	A03	I		
P4	15.68	0.16	1.59	1.13	A04	I		
P5	1.05	0.01	0.44	1.20	A05	I		
P6	14.90	0.15	1.87	1.36	A06	I		
P7	4.71	0.05	0.90	1.16	A07	I		
P8	7.84	0.08	1.15	1.15	A08	I		

Tabla 39.
Coefficiente de compacidad (Kc) de los polígonos S3 (Pucará)

Polígonos	Área (ha)	Área (Km ²)	Perímetro (Km ²)	kc	Código	kc		
						1-1.75	1.75-2	≥2
P1	62.12	0.62	11.28	4.01	A01			III
P2	9.11	0.09	1.18	1.09	A02	I		
P3	13.14	0.13	2.65	2.05	A03			III
P4	9.30	0.09	1.28	1.18	A04	I		
P5	25.50	0.25	2.45	1.36	A05	I		
P6	5.04	0.05	1.08	1.34	A06	I		
P7	6.94	0.07	1.24	1.32	A07	I		
P8	16.67	0.17	2.16	1.48	A08	I		

Tabla 40.

Puntos para el cálculo del AUC – ROC (Jaén)

Puntos	Predicción	Realidad
P1	783.73	780
P2	782.45	779.45
p3	782	779
P4	751.56	748.55
P5	747.94	744.9
P6	742.59	739.6
P7	740.29	737.3
P8		734.8
P9		734.6
P10		734.4
P11		734.2
P12		734

Tabla 41.

Cálculo de la tabla 40

Ítem	Valor
Mínimo	734
Max	783.73
Diferencia	49.73
N.º aleatorios (cajas)	1000
ancho de caja	0.05

Figura 42.

Puntos de corte Jaén

739.569536	739.619264	7	6	7	6	0	6	1	0.5	0.5	1	0.5	0.41666667	0.5	0.5
739.619264	739.668992	7	5	7	5	0	7	1	0.58333333	0.41666667	1	0.41666667	0.41666667	0.41666667	0.58333333
739.668992	739.71872	7	5	7	5	0	7	1	0.58333333	0.41666667	1	0.41666667	0.41666667	0.41666667	0.58333333
739.71872	739.768448	7	5	7	5	0	7	1	0.58333333	0.41666667	1	0.41666667	0.41666667	0.41666667	0.58333333
739.768448	739.818176	7	5	7	5	0	7	1	0.58333333	0.41666667	1	0.41666667	0.41666667	0.41666667	0.58333333
739.818176	739.867904	7	5	7	5	0	7	1	0.58333333	0.41666667	1	0.41666667	0.41666667	0.41666667	0.58333333
739.867904	739.917632	7	5	7	5	0	7	1	0.58333333	0.41666667	1	0.41666667	0.41666667	0.41666667	0.58333333
739.917632	739.96736	7	5	7	5	0	7	1	0.58333333	0.41666667	1	0.41666667	0.41666667	0.41666667	0.58333333
739.96736	740.017088	7	5	7	5	0	7	1	0.58333333	0.41666667	1	0.41666667	0.41666667	0.41666667	0.58333333
740.017088	740.066816	7	5	7	5	0	7	1	0.58333333	0.41666667	1	0.41666667	0.41666667	0.41666667	0.58333333
740.066816	740.116544	7	5	7	5	0	7	1	0.58333333	0.41666667	1	0.41666667	0.41666667	0.41666667	0.58333333
740.116544	740.166272	7	5	7	5	0	7	1	0.58333333	0.41666667	1	0.41666667	0.41666667	0.41666667	0.58333333
740.166272	740.216	7	5	7	5	0	7	1	0.58333333	0.41666667	1	0.41666667	0.41666667	0.41666667	0.58333333
740.216	740.265728	7	5	7	5	0	7	1	0.58333333	0.41666667	1	0.41666667	0.41666667	0.41666667	0.58333333
740.265728	740.315456	7	5	7	5	0	7	1	0.58333333	0.41666667	1	0.35714286	0.41666667	0.41666667	0.58333333
740.315456	740.365184	6	5	6	5	1	7	0.85714286	0.58333333	0.41666667	0.85714286	0.35714286	0.35714286	0.44047619	0.44047619

Tabla 42.

Puntos para el cálculo del AUC – ROC (Pucará)

Puntos	Predicción	Realidad
P1	1772	1769.5
P2	1765.00	1762.50
p3	1763.64	1761.15
P4	1736.5	1734
P5	1730.7	1728.2
P6	1724.6	1722.1
P7	1724	1721.5
P8		1721.4
P9		1721.3
P10		1721.2
P11		1721.1
P12		1721

Tabla 43.
Cálculo de la tabla 42

Ítem	Valor
Mínimo	1721
Max	1772
Diferencia	51
N.º aleatorios (cajas)	1000
ancho de caja	0.05

Figura 43.
Puntos de corte Pucará

1722.122	1722.173	7	5	7	5	0	7	1	0.5833333	0.4166667	1	0.4166667	0.4166667	0.4166667	0.5833333
1722.173	1722.224	7	5	7	5	0	7	1	0.5833333	0.4166667	1	0.4166667	0.4166667	0.4166667	0.5833333
1722.224	1722.275	7	5	7	5	0	7	1	0.5833333	0.4166667	1	0.4166667	0.4166667	0.4166667	0.5833333
1722.275	1722.326	7	5	7	5	0	7	1	0.5833333	0.4166667	1	0.4166667	0.4166667	0.4166667	0.5833333
1722.326	1722.377	7	5	7	5	0	7	1	0.5833333	0.4166667	1	0.4166667	0.4166667	0.4166667	0.5833333
1722.377	1722.428	7	5	7	5	0	7	1	0.5833333	0.4166667	1	0.4166667	0.4166667	0.4166667	0.5833333
1722.428	1722.479	7	5	7	5	0	7	1	0.5833333	0.4166667	1	0.4166667	0.4166667	0.4166667	0.5833333
1722.479	1722.53	7	5	7	5	0	7	1	0.5833333	0.4166667	1	0.4166667	0.4166667	0.4166667	0.5833333
1722.53	1722.581	7	5	7	5	0	7	1	0.5833333	0.4166667	1	0.4166667	0.4166667	0.4166667	0.5833333
1722.581	1722.632	7	5	7	5	0	7	1	0.5833333	0.4166667	1	0.4166667	0.4166667	0.4166667	0.5833333
1722.632	1722.683	7	5	7	5	0	7	1	0.5833333	0.4166667	1	0.4166667	0.4166667	0.4166667	0.5833333
1722.683	1722.734	7	5	7	5	0	7	1	0.5833333	0.4166667	1	0.4166667	0.4166667	0.4166667	0.5833333
1722.734	1722.785	7	5	7	5	0	7	1	0.5833333	0.4166667	1	0.4166667	0.4166667	0.4166667	0.5833333
1722.785	1722.836	7	5	7	5	0	7	1	0.5833333	0.4166667	1	0.4166667	0.4166667	0.4166667	0.5833333
1722.836	1722.887	7	5	7	5	0	7	1	0.5833333	0.4166667	1	0.4166667	0.4166667	0.4166667	0.5833333
1722.887	1722.938	7	5	7	5	0	7	1	0.5833333	0.4166667	1	0.4166667	0.4166667	0.4166667	0.5833333
1722.938	1722.989	7	5	7	5	0	7	1	0.5833333	0.4166667	1	0.4166667	0.4166667	0.4166667	0.5833333
1722.989	1723.04	7	5	7	5	0	7	1	0.5833333	0.4166667	1	0.4166667	0.4166667	0.4166667	0.5833333
1723.04	1723.091	7	5	7	5	0	7	1	0.5833333	0.4166667	1	0.4166667	0.4166667	0.4166667	0.5833333
1723.091	1723.142	7	5	7	5	0	7	1	0.5833333	0.4166667	1	0.4166667	0.4166667	0.4166667	0.5833333
1723.142	1723.193	7	5	7	5	0	7	1	0.5833333	0.4166667	1	0.4166667	0.4166667	0.4166667	0.5833333
1723.193	1723.244	7	5	7	5	0	7	1	0.5833333	0.4166667	1	0.4166667	0.4166667	0.4166667	0.5833333
1723.244	1723.295	7	5	7	5	0	7	1	0.5833333	0.4166667	1	0.4166667	0.4166667	0.4166667	0.5833333

Tabla 44.
Coordenadas UTM (WGS84, zona 17S) y cotas (m.s.n.m.) de los puntos topográficos obtenidos mediante SIG – Jaén

Puntos topográficos obtenidos mediante SIG (Jaén)			
Puntos	Cota	Este	Norte
P1	783.73	745423.38	9357555.61
P2	782.45	745446.08	9357353.79
p3	782	745455.32	9357110.54
P4	751.56	745653.99	9357614.91
P5	747.94	745622.91	9357021.79

P6	742.59	745746.24	9357278.87
P7	740.29	745752.21	9357058.20

Tabla 45.

Coordenadas UTM (WGS84, zona 17S) y cotas (m.s.n.m.) de los puntos topográficos obtenidos mediante SIG – Pucará

Puntos topográficos obtenidos mediante SIG (Pucará)			
Puntos	Cota	Este	Norte
P1	1772	707839.07	9335619.72
P2	1765	707910.61	9335744.8
p3	1763.65	707786.59	9335456.99
P4	1736.5	707919.08	9335388.43
P5	1730.7	708106.30	9335453.43
P6	1724.6	707986.20	9335374.22
P7	1724	708202.82	9335599.21

Tabla 46.

Coordenadas UTM (WGS84, zona 17S) y cotas (m.s.n.m.) de los puntos topográficos obtenidos mediante SIG – Jaén"

Puntos topográficos levantados en campo (Jaén)			
Puntos	Cota	Este	Norte
P1	780	745423.38	9357555.61
P2	779.45	745446.08	9357353.79
p3	779	745455.32	9357110.54
P4	748.55	745653.99	9357614.91
P5	744.9	745622.91	9357021.79
P6	739.6	745746.24	9357278.87
P7	737.3	745752.21	9357058.20
P8	734.8	745594.64	9357599.65
P9	734.6	745682.77	9357510.07
P10	734.4	745749.66	9357152.51
P11	734.2	745687.56	9357039.99
P12	734	745714.19	9357395.62

Tabla 47.

Coordenadas UTM (WGS84, zona 17S) y cotas (m.s.n.m.) de los puntos topográficos obtenidos mediante SIG – Pucará"

Puntos topográficos levantados en campo (Pucará)			
Puntos	Cota	Este	Norte
P1	1769.5	707839.07	9335619.72
P2	1762.50	707910.61	9335744.80
p3	1761.15	707786.59	9335456.99
P4	1734	707919.08	9335388.43
P5	1728.2	708106.30	9335453.43
P6	1722.1	707986.20	9335374.22
P7	1721.5	708202.82	9335599.21
P8	1721.4	707888.85	9335404.07
P9	1721.3	708127.86	9335636.56
P10	1721.2	708138.84	9335502.57
P11	1721.1	707952.64	9335381.32
P12	1721	708046.25	9335413.82

Tabla 48.

Coordenadas UTM de los polígonos seleccionados

		Polígono y distrito	
Zona	17 M	A3 Jaén	A2 Pucará
Coordenadas UTM	ESTE (X)	745629.52	707932.42
	NORTE (Y)	9357214.04	9335680.97

Figura 44.

Materiales empleados en la visita in situ



Figura 45.

Equipo de trabajo investigando en campo

**Figura 46.**

Verificación in situ en el polígono A3 - Jaén



Figura 47.

Verificación de los criterios y puntuación A3 - Jaén

FICHA DE VERIFICACIÓN				
Distrito	Jaén - Sector Mochanta		Código	A3
Responsables	More Carranza Rosa Andy Pavón Dávila Jordi		Fecha	05-04-26
Coordenadas UTM	ESTE (X)	745575	Zona	17 M
	NORTE (Y)	9357402	Altitud (msnm)	768
Criterios	Condiciones (5 - 3 - 1)	Fuente de verificación	Puntaje	Observación
Pendiente del terreno (%)	☐ <10 % ☒ 10-25 % ☐ >25 %	SIS (ArcGIS)	3	Una pendiente de 10-15 %.
Distancia a peligros geológicos (Km)	☒ >1 km ☐ 500 m-1 km ☐ <500 m	ArcGIS	5	Sin presencia de peligros geológicos en la zona
Neotectónica (Km)	☐ >1 km ☒ 500 m-1 km ☐ <500 m	ArcGIS	3	
Distancia a la red hidrográfica (Km)	☒ >1 km ☐ 500 m-1 km ☐ <500 m	ArcGIS y Observación directa	5	No presenta cursos de agua cercanos
Distancia a ACP (Km)	☒ >1 km ☐ 500 m-1 km ☐ <500 m	ArcGIS	5	La ACP más cercana es "Gatos de Agua" a 16.8 Km aproximado
Uso y cobertura vegetal	☐ Suelo desnudo ☒ Pastos cultivados ☐ Bosque	Observación directa	3	Presencia de pastos naturales y cultivados
Distancia a carreteras (Km)	☒ >1 km ☐ 500 m-1 km ☐ <500 m	ArcGIS y observación directa	5	Distancia a carretera Jaén-Chamaya a 1.10 Km
Distancia a centros poblados (Km)	☒ >1 km ☐ 500 m-1 km ☐ <500 m	ArcGIS y Observación directa	5	Sector Mochanta a 3.24 Km
Concesiones mineras (Km)	☒ >1 km ☐ 500 m-1 km ☐ <500 m	ArcGIS	5	Concesión minera "Nortada Linda" a 8.52 Km aprox
Accesibilidad	☐ Buena ☐ Regular ☒ Difícil	Observación directa	1	Pista demasiado pedregosa y angosta pre.

Figura 48.

Cobertura vegetal presente en el polígono A3 - Jaén



Figura 49.

Verificación in situ en el polígono A2 - Pucará



Figura 50.
Verificación de los criterios y puntuación - A2 Pucará

FICHA DE VERIFICACIÓN					
Distrito		Pucará	Código A2		
Responsables		Marc Carranza Rosa Anale Bosquima Dávila Jardi	Fecha 11/04/2020		
Coordenadas UTM		ESTE (X) 108042	Zona 17 H		
		NORTE (Y) 9335534	Altitud (msnm) 1454		
Criterios	Condiciones (5 - 3 - 1)	Fuente de verificación	Puntaje	Observación	
Pendiente del terreno (%)	☐ <10 % ☒ 10-25 % ☐ >25 %	SIB (ArcGIS)	3	Pendiente ubicada entre los 10-15%	
Distancia a peligros geológicos (Km)	☒ >1 km ☐ 500 m-1 km ☐ <500 m	ArcGIS	5	Peligro geológico más cercano a 2.9 Km	
Movimientos de masa	☒ Bajo peligro ☐ Medio peligro ☐ Alto peligro	ArcGIS	5	Poca presencia de suelos con riesgo de movimiento	
Distancia a la red hidrográfica (Km)	☒ >1 km ☐ 500 m-1 km ☐ <500 m	ArcGIS y observación directa	5	No hay presencia de aguas superficiales cerca Río Huancabamba a 5.48 Km	
Distancia a restos arqueológicos (Km)	☒ >2.5 km ☐ 1 Km-2.5 km ☐ <1 Km	ArcGIS	5	Sin presencia en el distrito "Paisaje Cultural Arqueológico Petroglíficos de Corral Pampa" (Colasay) a 5.29 Km	
Uso y cobertura vegetal	☒ Suelo desnudo ☐ Pastos cultivados ☐ Bosque	Observación directa	5	Suelo desnudo, con presencia de pocas plantas en crecimiento (Acacia)	
Distancia a carreteras (Km)	☒ >1 km ☐ 500 m-1 km ☐ <500 m	ArcGIS y Observación directa	5	Carretera hacia CP 1.12 Km (carretera principal Pucará) a 6.67 Km	
Distancia a centros poblados (Km)	☒ >1 km ☐ 500 m-1 km ☐ <500 m	ArcGIS y Observación directa	5	CP El Huacho ubicada a 1.4 Km aproximadamente	
Concesiones mineras (Km)	☒ >1 km ☐ 500 m-1 km ☐ <500 m	ArcGIS	5	Concesión minera "Quismache 5 2022" a 3.58 Km aprox.	
Accesibilidad	☐ Buena ☒ Regular ☐ Difícil	Observación directa	3	El acceso es bueno, aunque empinado y poco pedregoso, ancho en algunas partes	

Figura 51.

Cobertura vegetal presente en el polígono A2 - Pucará



Figura 52.

Relleno sanitario actual de Jaén ubicado en un área inadecuada



Nota: Como se aprecia en la figura, el relleno existente se encuentra a una distancia menor a los 0.5 Km de un cuerpo de agua, incumpliendo la normativa (categoría S1 – inadecuado). Esto justifica la necesidad de identificar nuevas áreas preliminarmente aptas.