



## **Aplicación de SIG y Técnicas Multicriterio para la selección de sitio de relleno sanitario en Planadas, Tolima**

Angela del Pilar Buitrago Monroy  
Yuber Andrés Torres Rojas

Trabajo de grado presentado para optar al título de Especialista en Sistemas de Información Geográfica

Asesor: José Mauricio Meneses Hernández, Especialista (Esp) en Sistemas de Información Geográfica

Asesores de recursos académicos: Elvia Lucía Sánchez García (asesora de integridad académica)

Universidad de Manizales  
Seleccione Facultad UManizales  
Especialización en Sistemas de Información Geográfica  
Manizales, Caldas, Colombia  
2025

<b>Cita</b>	(Buitrago M. & Torres R., 2025)
<b>Referencia</b> <b>Estilo APA 7 (2020)</b>	Buitrago Monroy, A.P.& Torres Rojas, Y.A. (2025). <i>Aplicación de SIG y Técnicas Multicriterio para la selección de sitio de relleno sanitario en Planadas, Tolima</i> [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Manizales. RIDUM: Repositorio Institucional Universidad de Manizales.



Especialización en Sistemas de Información Geográfica , XXX

Grupo de Investigación y Desarrollo en Informática y Telecomunicaciones

Línea de Investigación Territorios Inteligentes y Sostenibles.

**Declaración de inteligencia artificial:** el o los autores de este trabajo de grado declaran que han utilizado herramientas de inteligencia artificial (IA), tales como [mencionar herramientas utilizadas, por ejemplo, ChatGPT, Grammarly, Turnitin, Copilot, Gemini, entre otras], de manera ética y responsable, tal como se establece en el Acuerdo UManizales 002 (julio 26 de 2023) sobre propiedad intelectual e IA. Estas herramientas son empleadas como apoyo en la redacción, revisión gramatical y generación de ideas, pero en ningún caso sustituyen el análisis crítico, la argumentación académica ni la originalidad del trabajo. Asimismo, cualquier contenido generado con asistencia de IA está citado y referenciado adecuadamente, garantizando la integridad académica y el cumplimiento de los principios éticos de la investigación.

**Biblioteca y Centro de Recursos:** <https://biblioteca.umanizales.edu.co/>

**Repositorio Institucional:** <http://ridum.umanizales.edu.co/>

**Universidad de Manizales:** [www.umanizales.edu.co](http://www.umanizales.edu.co)

**Revistas:** <http://revistasum.umanizales.edu.co/>

**Fondo Editorial:** <https://editorialum.umanizales.edu.co/>

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Manizales ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

### **Dedicatoria**

Dedicamos este trabajo a nuestros padres, quienes con su esfuerzo, valores y ejemplo nos enseñaron la importancia de la disciplina y el esfuerzo.

### **Agradecimientos**

Agradecemos a Dios por estar con nosotros y guiarnos en cada paso del proceso de este trabajo.

A nuestras familias, por la paciencia, comprensión y apoyo incondicional que necesitábamos para alcanzar este logro.

A la Universidad de Manizales, sus profesores y compañeros de especialización por su inmensa colaboración, la cual ha enriquecido nuestra formación profesional en forma de conocimiento, consejo y experiencias.

Finalmente, gracias a la Alcaldía de Planadas, Tolima, por su apoyo al proporcionar la información requerida para llevar a cabo este estudio, considerado vital por razones de gestión ambiental y bienestar comunitario.

**Tabla de contenido**

Resumen ..... 11

Abstract ..... 12

Introducción ..... 13

1 Planteamiento del problema ..... 15

    1.1 Antecedentes ..... 16

2 Justificación..... 19

3 Objetivos ..... 22

    3.1 Objetivo general ..... 22

    3.2 Objetivos específicos..... 22

4 Hipótesis..... 23

    4.1 Hipótesis de trabajo ..... 23

        4.1.1 Hipótesis nula..... 23

            4.1.1.1 Hipótesis alterna..... 23

                4.1.1.1.1 Variables..... 23

5 Marco teórico ..... 25

    5.1 Relleno Sanitario ..... 25

    5.2 Gestión Integral de Residuos Sólidos – GIRS ..... 25

    5.3 Análisis Jerárquico de Procesos. .... 26

    5.4 Sistemas de Información Geográfica – SIG ..... 26

    5.5 Referente Normativo ..... 27

6. Metodología ..... 30

    6.1 Fases del proceso metodológico..... 30

    6.2 Definición de criterios y subcriterios según el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) ..... 32

        6.2.1 Matrices de Comparación por Pares MCP para cada categoría de subcriterios ..... 35

---

6.2.2 Cálculo de los Pesos (Vector de Prioridades) .....	36
6.2.3 Criterios y subcriterios .....	37
6.2.4 Cálculo de áreas para la localización del relleno sanitario .....	39
6.3 Metodología para la Identificación de Zonas Óptimas .....	43
6.3.1 Preparación de insumos: .....	43
6.3.2 Generación de criterios espaciales .....	43
6.3.3 Integración y ponderación multicriterio.....	45
6.3.4 Refinamiento y delimitación de zonas aptas.....	47
7 Resultados .....	48
8 Discusión.....	78
9 Conclusiones .....	84
10 Recomendaciones.....	86
Referencias .....	87
Anexos.....	92
Anexo 1. Geodatabase de resultados.....	92
Anexo 2. Modelo de ModelBuilder.....	93

**Lista de tablas**

**Tabla 1** Marco técnico - normativo y su aplicabilidad en Planadas, Tolima .....28

**Tabla 2** Matriz de Comparación por Pares (MCP) de los criterios .....35

**Tabla 3** Matriz de Comparación por Pares (MCP) subcriterios Ambientales .....35

**Tabla 4** Matriz de Comparación por Pares (MCP) subcriterios Físicos.....35

**Tabla 5** Matriz de Comparación por Pares (MCP) subcriterios Socioeconómicos .....35

**Tabla 6** Matriz de Comparación por Pares (MCP) subcriterios Técnicos.....35

**Tabla 7** Vector de Prioridad para los Subcriterios .....36

**Tabla 8** Sistematización de Criterios y subcriterios .....38

**Tabla 9** Censos de población.....39

**Tabla 10** Proyección de residuos para la zona urbana del municipio de Planadas .....42

**Tabla 11** Relación Subcriterios con las herramientas SIG aplicadas y la normativa de referencia .....44

**Tabla 12** Vector de Prioridad ajustado - Subcriterios .....46

**Tabla 13** Cálculo de Áreas para el Criterio Socioeconómico - Centros poblados .....49

**Tabla 14** Cálculo de Áreas para el Criterio ambiental – Fuentes Hídricas .....50

**Tabla 15** Cálculo de Áreas para el Criterio socioeconómico – Vías de acceso .....51

**Tabla 16** Cálculo de Áreas para el Criterio físico Pendientes .....53

**Tabla 17** Cálculo de Áreas para el Criterio Físico – Suelos.....54

**Tabla 18** Cálculo de Áreas para el Criterio físico – Geología.....55

**Tabla 19** Cálculo de Áreas para el Criterio ambiental – Zonas de resguardo formalizado.....56

**Tabla 20** Cálculo de Áreas para el Criterio ambiental – Áreas Protegidas .....57

**Tabla 21** Resumen de Zonas aptas y de exclusión .....59

**Tabla 22** Listado de zonas y área de cada una. ....61

**Tabla 23** Predios relacionados Zona apta 1 .....62

---

<b>Tabla 24</b> Predios relacionados Zona apta 2.....	63
<b>Tabla 25</b> Predios relacionados Zona apta 3.....	64
<b>Tabla 26</b> Predios relacionados Zona apta 4.....	65
<b>Tabla 27</b> Predios relacionados Zona apta 5.....	66
<b>Tabla 28</b> Predios relacionados Zona apta 6.....	67
<b>Tabla 29</b> Predios relacionados Zona apta 7.....	68
<b>Tabla 30</b> Predios relacionados Zona apta 8.....	69
<b>Tabla 31</b> Predios relacionados Zona apta 9.....	70
<b>Tabla 32</b> Predios relacionados Zona apta 10.....	71
<b>Tabla 33</b> Predios relacionados Zona apta 11.....	72
<b>Tabla 34</b> Predios relacionados Zona apta 12.....	73
<b>Tabla 35</b> Predios relacionados Zona apta 13.....	75

**Lista de figuras**

**Figura 1** Ubicación de la Zona de Estudio, municipio de Planadas, Tolima ..... 19

**Figura 2** Fases del proceso metodológico ..... 31

**Figura 3** Valores de Preferencia según Escala de Saaty ..... 33

**Figura 4** Estructura Jerárquica para la ubicación de zonas aptas para la construcción del relleno sanitario del municipio de Planadas, Tolima. .... 34

**Figura 5** Cabecera municipal y Centro Poblado Gaitania – Planadas, Tolima ..... 40

**Figura 6** Expresión de la calculadora ráster ..... 47

**Figura 7** Mapa de Distancia a Centros Urbanos..... 49

**Figura 8** Mapa de Distancia a Cuerpos de Agua..... 50

**Figura 9** Mapa de Distancia a vías de acceso..... 51

**Figura 10** Mapa de Pendientes ..... 52

**Figura 11** Mapa de zonas de exclusión por uso del suelo ..... 53

**Figura 12** Mapa de fallas Geológicas..... 55

**Figura 13** Mapa de zonas de resguardo Formalizado..... 56

**Figura 14** Mapa Parques Nacionales Naturales ..... 57

**Figura 15** Mapa Ponderación de resultados ..... 58

**Figura 16** Mapa de zonas Aptas..... 59

**Figura 17** Mapa de Zonas Optimas de Localización de Relleno Sanitario ..... 61

**Figura 18** Zona Apta 1 ..... 63

**Figura 19** Zona Apta 2 ..... 64

**Figura 20** Zona apta 3 ..... 65

**Figura 21** Zona Apta 4 ..... 66

**Figura 22** Zona Apta 5 ..... 67

**Figura 23** Zona Apta 6 ..... 68

---

<b>Figura 24</b> Zona Apta 7 .....	69
<b>Figura 25</b> Zona Apta 8 .....	70
<b>Figura 26</b> Zona apta 9 .....	71
<b>Figura 27</b> Zona Apta 10 .....	72
<b>Figura 28</b> Zona Apta 11 .....	73
<b>Figura 29</b> Zona apta 12 .....	74
<b>Figura 30</b> Zona Apta 13 .....	76

### Siglas, acrónimos y abreviaturas

<b>AHP</b>	<i>Analytic Hierarchy Process</i> (Proceso de Análisis Jerárquico).
<b>APA</b>	<i>American Psychological Association</i> (Norma de citación y referencias).
<b>ArcGIS Pro</b>	<i>Arc Geographic Information System Professional</i> (Software de análisis espacial de Esri).
<b>Cardique</b>	Corporación Autónoma Regional del Canal del Dique.
<b>CICA</b>	Consulta de Información Catastral Automatizada.
<b>CORTOLIMA</b>	Corporación Autónoma Regional del Tolima.
<b>DEM</b>	Modelo Digital de Elevación
<b>EMC</b>	Evaluación multicriterio
<b>GIRS</b>	Gestión Integral de Residuos Sólidos.
<b>ha</b>	hectárea.
<b>ICONTEC</b>	Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.
<b>IGAC</b>	Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
<b>MCDA</b> <b>MCDM</b>	<i>/ Multi-Criteria Decision Analysis / Making</i> (Análisis de Decisión Multicriterio).
<b>MDT</b>	Modelo Digital del Terreno.
<b>NTC</b>	Norma Técnica Colombiana.
<b>PDET</b>	Programa de Desarrollo con Enfoque Territorial
<b>PBOT</b>	Plan Básico de Ordenamiento Territorial.
<b>PGIRS</b>	Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos.
<b>PNN</b>	Parques Nacionales Naturales
<b>RAS 2000</b>	Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (Título F: disposición final de residuos sólidos).
<b>RC</b>	Razón de Consistencia (AHP).
<b>SIG</b>	Sistemas de Información Geográfica.
<b>UManizales</b>	Universidad de Manizales.

## Resumen

La disposición final de residuos sólidos constituye uno de los principales desafíos de la gestión ambiental en diversos municipios de Colombia, donde las condiciones geográficas, sociales y normativas limitan la localización de infraestructuras adecuadas. El objetivo de esta investigación fue identificar áreas óptimas para la localización de un relleno sanitario en el municipio de Planadas, Tolima, aplicando técnicas multicriterio apoyadas en Sistemas de Información Geográfica (SIG).

La metodología incluyó tres fases: preparación y estandarización de insumos cartográficos y normativos; construcción de criterios ambientales, sociales, técnicos y legales en formato ráster, complementados con variables poligonales; y ponderación mediante el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) y superposición en ambiente SIG. Se integraron nueve criterios espaciales y tres complementarios, garantizando la trazabilidad metodológica y la coherencia normativa.

Los resultados identificaron trece zonas aptas, con áreas entre 23,5 y 145 hectáreas (ha), que representan en conjunto 742 ha. Entre los factores más restrictivos se deben mencionar el uso del suelo (17,55% de idoneidad) y la pendiente (15%), mientras que la distancia a centros poblados (94,71%) y los resguardos indígenas (92,91%) presentaron baja incidencia restrictiva. La consistencia de la matriz AHP ( $RC = -0,000253$ ) confirmó la validez del modelo.

A través de la presente investigación se ha concluido que el empleo de técnicas multicriterio en SIG permite un proceso de selección robusto y transparente, integrando variables ambientales, sociales y técnicas. De igual manera, el trabajo realizado aporta insumos estratégicos para la planificación territorial sostenible y constituye una herramienta replicable en otros municipios con características similares.

*Palabras clave:* relleno sanitario, gestión integral de residuos sólidos, sistemas de información geográfica, análisis multicriterio, planeación territorial sostenible, localización de infraestructuras ambientales.

## Abstract

The final disposal of solid waste constitutes one of the main challenges of environmental management in various municipalities in Colombia, where geographic, social, and regulatory conditions limit the location of adequate infrastructure. The objective of this research was to identify optimal areas for the location of a sanitary landfill in the municipality of Planadas, Tolima, applying multi-criteria techniques supported by Geographic Information Systems (GIS).

The methodology included three phases: preparation and standardization of cartographic and regulatory inputs; construction of environmental, social, technical, and legal criteria in raster format, complemented by polygonal variables; and weighting using the Hierarchical Analysis Process (AHP) and overlaying them in a GIS environment. Nine spatial and three complementary criteria were integrated, ensuring methodological traceability and regulatory consistency.

The results identified thirteen suitable areas, with areas ranging from 23.5 to 145 hectares (ha), representing a total of 742 ha. Among the most restrictive factors are land use (17.55% suitability) and slope (15%), while distance to population centers (94.71%) and indigenous reservations (92.91%) had a low restrictive incidence. The consistency of the AHP matrix ( $RC = 0.000253$ ) confirmed the model's validity.

This research concludes that the use of multi-criteria techniques in GIS allows for a robust and transparent selection process, integrating environmental, social, and technical variables. Likewise, the work conducted provides strategic input for sustainable territorial planning and constitutes a replicable tool in other municipalities with similar characteristics.

*Keywords:* sanitary landfill, integrated solid waste management, geographic information systems, multi-criteria analysis, sustainable territorial planning, environmental infrastructure siting.

## Introducción

La gestión de residuos sólidos es un problema creciente en muchos municipios, particularmente en aquellas infraestructuras ambientales inadecuadas. La disposición inapropiada y los problemas técnicos y socioeconómicos genera impactos negativos sobre los ecosistemas, la salud pública y el bienestar urbano (Asefa et al., 2021). Para abordar estos retos, la combinación de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y métodos multivariados como el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) se ha consolidado como una herramienta eficaz para el análisis y la toma de decisiones espaciales (Asefa et al., 2021; Chabuk et al., 2016). La ventaja de esta integración radica en su capacidad para gestionar datos espaciales complejos, aplicar juicios técnicos contrastados mediante comparación por parejas y derivar mapas de idoneidad territoriales de forma objetiva y replicable (Asefa et al., 2021; Soyaslan, 2025).

A nivel nacional, la Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos (CONPES 3874 de 2016), junto con el Reglamento Técnico RAS 2000, define los requisitos y normas para obtener la disposición final ambientalmente segura. No obstante, muchas comunidades rurales pequeñas y medianas luchan por alcanzar estos objetivos y necesitan modelos metodológicos de enlace que consideren las realidades locales, así como las normas técnicas y regulatorias.

En el caso del municipio de Planadas, ubicado en el departamento del Tolima, la ausencia de un relleno sanitario municipal ha incrementado el costo de los servicios, ya que los residuos deben ser transportados fuera del municipio hasta Ibagué, subiendo los costos operativos de los servicios prestados, lo cual hace que el costo para los usuarios también aumente. De igual forma, se han identificado sitios informales de acumulación de residuos, los cuales representan riesgos para la salud pública y el medio ambiente.

Para tal fin, esta investigación sobre ubicaciones óptimas para para la instalación de un relleno sanitario municipal ha adoptado un Enfoque de Evaluación Multicriterio (MCE), el cual integra Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Análisis Jerárquico de Procesos (AHP). Así mismo, este enfoque metodológico considera criterios ambientales, físicos, técnicos y socioeconómicos para ser evaluados, que se califican en base a AHP (Saaty, 1980), facilitando el

rigor, así como la profundidad del enfoque en la asignación de peso para cada factor. La herramienta ArcGIS Pro ayuda en la creación de capas temáticas como pendientes, distancias euclidianas, cobertura del suelo y zonas de exclusión sobre las cuales se aplica una superposición ponderada.

## 1 Planteamiento del problema

El aumento de la población y de las tasas de generación de residuos sólidos ha intensificado la presión sobre los recursos naturales, permitiendo que se produzcan impactos directos sobre las matrices ambientales - agua, aire y suelo - que son el resultado del mal manejo y de la finalización incorrecta. En consecuencia, el sistema normativo colombiano ha aportado alternativas metodológicas que exigen a los municipios una gestión de residuos sólidos de manera integral y final en infraestructuras técnicamente viables, que responden a los sistemas de relleno sanitario. Sin embargo, la localización de este tipo de infraestructuras continúa siendo un desafío complejo puesto que requiere la integración de todos los criterios técnicos, ambientales, sociales y normativos para garantizar que la ubicación seleccionada cumpla con los criterios de sostenibilidad y reduzca al mínimo el impacto.

En este marco, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se constituyen en la herramienta básica para afrontar el dilema del problema de localización, ya que posibilitan la integración del análisis espacial de infecciones de múltiples variables y restricciones. Junto con las metodologías multicriterio, como la Evaluación Multicriterio (EMC) o el Análisis Jerárquico de Procesos (AHP), los SIG permiten el empleo de la ponderación de criterios heterogéneos — distancia a espacios poblados, pendientes, accesibilidad a viales, áreas de reserva de protección ambiental y geológica, etc.— y el diseño de escenarios objetivos para la toma de decisiones territoriales (Muñoz, 2016). De esta forma, se produce un proceso mediante el cual se priorizan áreas potenciales y se amortiguan los riesgos derivados de la selección de sitios.

En la actualidad, el municipio de Planadas, Tolima, presenta una situación de déficit importante en infraestructura para la disposición final de residuos sólidos no aprovechables, lo que causa riesgos ambientales y sanitarios, complicando la adecuada gestión integral de residuos y precarizando la calidad de vida de la población. De este modo, se requería de ir mostrando, a través de un enfoque técnico que se basaba en SIG, las áreas idóneas para la instalación de un relleno sanitario que resultara en la adecuación a la normativa existente y que pudiera garantizar, a su vez, conseguido la gestión ambiental, social y económica.

A raíz de ello, se ha formulado la correspondiente pregunta de investigación central de la siguiente manera:

¿Cómo podrían los Sistemas de Información Geográfica (SIG), a través de metodologías multicriterio, apoyar la identificación de zonas óptimas para la localización de un relleno sanitario en el municipio de Planadas, Tolima?

### **1.1 Antecedentes**

En el ámbito internacional, se han desarrollado múltiples investigaciones que aplican Sistemas de Información Geográfica (SIG) y métodos multicriterio para la localización de sitios de disposición final de residuos sólidos. En Grecia, Kontos, Komilis y Halvadakis (2003) utilizaron un modelo de Análisis Jerárquico de Proceso (AHP) integrado a un SIG juntamente con los criterios topográficos, ambientales y sociales, convirtiéndose en una de las primeras investigaciones en incorporar modelos espaciales de decisión en relación con la gestión de residuos.

Después de ellos, se han publicado otras investigaciones en el estudio de la selección de lugares de disposición en el territorio mediante el uso de una combinación de AHP y SIG, como la que realizaron Şener, Şener y Karagüzel (2011) en Turquía, integrando diversas variables como la pendiente, la proximidad a los cuerpos de agua, la red vial y el uso del suelo. Este trabajo también demostró que la evaluación multicriterio puede prevenir conflictos socioambientales y mejorar la eficiencia territorial.

En naciones como Irán e India en donde los problemas de disposición final son de gran importancia en razón del elevado crecimiento poblacional, la investigación ha ido evolucionando hacia metodologías híbridas que conjugan la lógica difusa con algoritmos de decisión espacial. Por ejemplo, Moeinaddini et al. (2010) desarrollaron en Irán un modelo que conjuga lógica difusa y SIG para poder administrar la incertidumbre en la valoración de los criterios ambientales y de este modo obtener resultados más acordes a la realidad del territorio. Por su parte, Sumathi, Natesan, y Sarkar, (2008) han propuesto la aplicación de un modelo SIG-AHP en la ciudad de Chennai, India, para demostrar que la combinación de criterios físicos y socioeconómicos permite atenuar impactos de las comunidades más vulnerables.

Con respecto a América Latina, en la región se han empezado a replicar estas investigaciones en años recientes. Este es el caso de México, donde Jiménez Reyes (2019) aplicó un modelo multicriterio en un SIG para la localización de rellenos en el estado de Michoacán. En Brasil, Santos et al. (2020) emplearon Técnicas de Superposición Ponderada (Weighted Overlay) en el SIG, destacando la utilidad de estas herramientas para la planificación regional y la gestión de residuos. Los antecedentes internacionales más vinculantes muestran que no solo los SIG optimizan el análisis espacial, sino que también permiten hacer de manera más transparente la toma de decisiones sustentadas en criterios objetivos.

La disposición final de los residuos sólidos en Colombia ha sido abordada desde diversos ángulos, pero en muchos municipios aún existen prácticas inadecuadas como el botadero a cielo abierto. Las investigaciones recientes demuestran que el interés por la incorporación de los SIG y las técnicas multicriterio para dar solución a la problemática ha aumentado. Bello Florián y Vásquez Borcia (2023) han empleado el método AHP a partir de un entorno SIG con el fin de determinar áreas óptimas para rellenos sanitarios en Boyacá, englobando variables ambientales y socioeconómicas, replicando los resultados a nivel municipal. Chusden Delgado (2022) ha trabajado con ArcGIS para elaborar un modelo de la aptitud territorial en Cundinamarca aplicando criterios de pendiente, proximidad a fuentes hídricas y distancia a zonas urbanas, haciendo especial énfasis en la normatividad ambiental (Resolución 1096 de 2000; Decreto 2981 de 2013).

Para mencionar otros ejemplos a nivel departamental, en el caso de Antioquia se han realizado investigaciones apoyadas por la Universidad Nacional (2019) que han utilizado modelos multicriterio participativos, integrando parte técnica y social; así como también investigaciones en Santander y Valle del Cauca que implementan estudios de áreas potenciales con QGIS y ArcGIS, para resaltar que el uso de plataformas libres como QGIS democratiza la aplicación de métodos y técnicas de análisis espacial. En el departamento del Tolima, Caicedo Calderón y Ladino García (2024) llevaron a cabo un estudio con QGIS, con los objetivos de identificar áreas propicias para la localización de rellenos sanitarios según criterios técnicos y ambientales, lo cual constituye un referente metodológico próximo y directamente relacionado con esta investigación.

---

Con respecto al municipio de Planadas, lugar donde se ha desarrollado el presente trabajo, la problemática de la gestión de residuos sólidos ha sido visibilizada en el contexto del Plan Básico de Ordenamiento Territorial (PBOT) 2021-2035, el cual presenta la necesidad de identificar y consolidar un sitio adecuado de disposición final. Sin embargo, no se han identificado investigaciones previas que integren de manera formal un modelo multicriterio apoyado en SIG para esta zona específica. Esta carencia de estudios técnicos a escala municipal impide la toma de decisiones, provocando una dependencia de análisis generalizados a escala departamental, sin considerar las especificidades de Planadas, como pueden ser su topografía montañosa, la presencia de ecosistemas estratégicos y la dispersión de las poblaciones rurales.

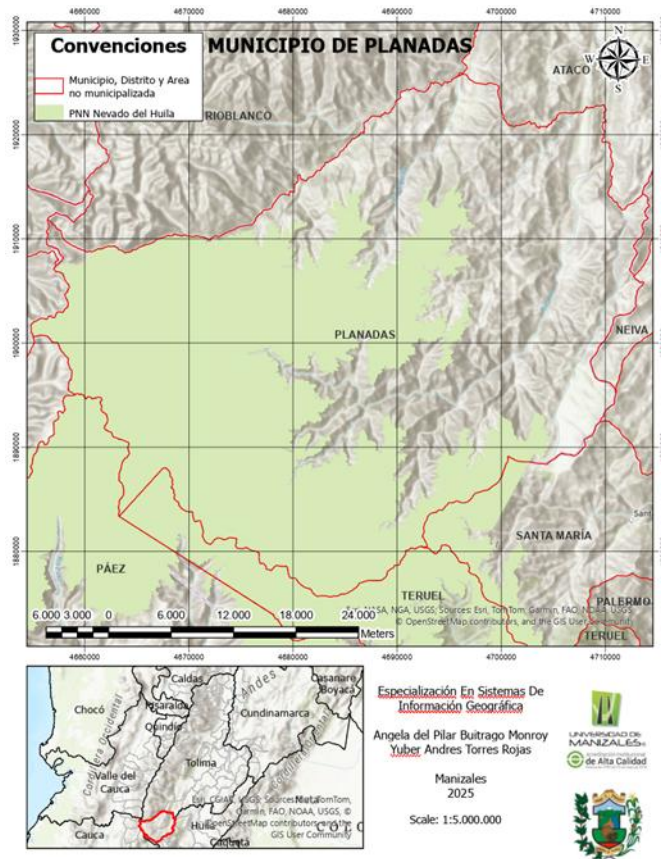
A pesar de que en Colombia y la región se encuentran avances metodológicos, se presentan limitaciones en la cantidad de estudios locales de los municipios de mediana escala como Planadas, Tolima, puesto que muchas de las investigaciones hayan estado ubicadas en las áreas metropolitanas o en departamentos con una mayor capacidad técnica, mientras que en las regiones más alejadas se ha evidenciado un vacío en la aplicación del SIG y de las técnicas multicriterio.

## 2 Justificación

El municipio de Planadas presenta serias limitaciones desde la perspectiva de la gestión de residuos sólidos (GRS), ya que no posee un relleno sanitario técnico. Esto ha llevado a malas prácticas de disposición que provocan efectos ambientales tales como contaminación de aguas superficiales y subterráneas, deterioro del suelo, degradación de ecosistemas frágiles y riesgos para la salud que enfrenta la población. El Plan Básico Territorial del término extendido (2021–2035) incluye requisitos para identificar un sitio adecuado para la disposición final, respetando la legislación y leyes ambientales, con una clara necesidad de instrumentos técnicos que guíen esta selección (Municipio de Planadas, 2021).

### Figura 1

*Ubicación de la Zona de Estudio, municipio de Planadas, Tolima*



*Nota.* Fuente Cartografía base IGAC y mapa base topográfico de ESRI

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) constituyen una herramienta que permite integrar, analizar y modelar variables espaciales heterogéneas, las cuales inciden en la selección de

un sitio óptimo. A diferencia de los métodos convencionales, los SIG permiten manejar bases de datos georreferenciadas, evaluar de forma simultánea factores restrictivos y de aptitud - uso del suelo, pendientes, accesibilidad vial, hidrografía, cobertura vegetal, proximidad a centros poblados y áreas de protección ambiental - aplicar técnicas multicriterio tales como el Análisis Jerárquico de Procesos (AHP) para ponderar criterios y generar horizontes de comparación y generar cartografía temática de aptitud territorial que apoye la toma de decisiones (Yesilnacar & Cetin, 2008; Jha et al., 2011).

Internacionalmente, la relevancia del enfoque SIG en combinación con AHP para la localización de rellenos sanitarios fue demostrada al revisar estudios que se han realizado en Turquía, donde Sener et al., (2011), utilizaron este modelo en varias subcuencas en la cuenca de Gorganroud y Talar. Así mismo, Fernández et al., (2005), aplicaron el modelo SWAT en algunas de las cuencas prioritarias, incluyendo el embalse de Eğirdir. En el continente africano, se encuentra el trabajo de Sisay et al., (2025), quienes combinaron nueve criterios temáticos en un SIG y AHP para identificar áreas favorables, así como en Nigeria, con la investigación de Olayinka et al., (2018), con respecto a las variables ambientales, sociales y regulatorias consideradas al determinar zonas adecuadas. A nivel mundial, Asefa et al., (2021) también demostraron su efectividad en entornos con restricciones espaciales y ambientales. Y en Colombia, trabajos como el de Muñoz (2016) y el de Torres & Patiño (2020) indican que los SIG sirven para dar cuenta acerca de la selección de escenarios de localización en condiciones geográficas y normativas complejas. No obstante, ya queda una brecha técnica en la aplicación de estos métodos en municipios que tienen prioridad en Programas de Desarrollo con Enfoque Territorial - PDET como Planadas, donde la información cartográfica es escasa y son necesarios modelos ajustados a la normativa local y a la realidad territorial.

La importancia de esta investigación incluye su concienciación que surge sobre un problema ambiental, así como el establecimiento de un modelo técnico de análisis espacial a través del uso de herramientas SIG y AHP, adaptado a la realidad geográfica, ambiental y social del municipio, permitiendo una selección objetiva y bien fundamentada para el sitio final de disposición de residuos sólidos en Planadas y, además, proporciona una contribución metodológica

que puede ser utilizada en otros municipios con problemas ambientales similares en relación con la planificación de infraestructura ambiental.

El proyecto tiene en cuenta cuatro dimensiones principales:

- **Técnica:** incorpora técnicas multicriterio y el análisis espacial a la definición de las zonas óptimas, de tal forma que el lugar donde se decida disponer los residuos se ajuste a los parámetros de idoneidad establecidos según los aspectos topográficos, geológicos, hidrológicos y de la accesibilidad.
- **Geoespacial:** integra datos de cartografía básica – Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), imágenes satelitales, insumos ambientales (IDEAM, ANLA) y normas de planificación y ordenamiento territorial (PBOT 2021-2035) en un entorno SIG, que además permite modelar escenarios y reducir la subjetividad en la decisión.
- **Científica:** Acrecentamiento del conocimiento respecto a metodologías que se pueden replicar de localización de infraestructuras ambientales en escenarios donde hay información limitada.
- **Territorial y de Política Pública:** Responde directamente a lo solicitado por el PBOT (arts. 84 y 86, que requieren la definición de un sitio óptimo donde disponer los residuos y aporta a la consecución de las metas de ODS 6 y ODS 11).

Por lo tanto, esta investigación proporciona una alternativa para enfrentar los desafíos actuales de gestión de residuos en este municipio, que utiliza herramientas geoinformáticas sólidamente fundamentadas y basadas en información objetiva con una perspectiva territorial integrada.

La delimitación de áreas prioritarias para ubicar un relleno sanitario en Planadas proporcionará tanto una necesidad de infraestructura destacada como una resiliencia socio ambiental para el municipio, atendida por el crecimiento poblacional y las demandas de sostenibilidad.

### **3 Objetivos**

#### **3.1 Objetivo general**

Identificar el lugar óptimo para la instalación de la infraestructura de transferencia o disposición final de residuos sólidos no aprovechables, que cumpla con los requerimientos de la normativa actual y garantice el menor impacto ambiental para el municipio de Planadas, Tolima mediante análisis multicriterio y el uso de herramientas SIG.

#### **3.2 Objetivos específicos**

Definir los criterios de selección para la determinación de sitios potenciales que se adapten a las condiciones del municipio de Planadas, Tolima.

Implementar la metodología multicriterio, con las herramientas geoinformáticas disponibles de forma que se logre un modelo espacial.

Contrastar diferentes resultados de los análisis multicriterio variados por diferentes metodologías.

Brindar al municipio de Planadas, Tolima, los elementos necesarios para el estudio de factibilidad a realizar sobre las posibles localizaciones que puedan existir para la infraestructura de transferencia o disposición final de residuos sólidos.

## 4 Hipótesis

### 4.1 Hipótesis de trabajo

La aplicación de técnicas multicriterio integradas con los Sistemas de Información Geográfica (SIG), en particular el Análisis Jerárquico de Procesos (AHP), permite identificar zonas óptimas para la localización de un relleno sanitario en el municipio de Planadas, Tolima.

#### 4.1.1 Hipótesis nula

No existe una relación significativa entre la aplicación de SIG-AHP y una mejor identificación de zonas óptimas para un relleno sanitario en Planadas; es decir, la selección no difiere significativamente de la obtenida por métodos heurísticos o convencionales.

##### 4.1.1.1 Hipótesis alterna.

La integración de SIG con técnicas multicriterio (AHP) permite una identificación significativamente más precisa y técnicamente fundamentada de zonas aptas para un relleno sanitario en Planadas, mejorando la eficiencia, pertinencia técnica y objetividad en comparación con enfoques sin soporte geoespacial.

##### 4.1.1.1.1 Variables.

**Variable independiente:** Aplicación de técnicas multicriterio en un entorno SIG (uso de AHP en ModelBuilder de ArcGIS Pro).

**Variables dependientes:** Identificación de zonas óptimas para la localización del relleno sanitario (áreas resultantes clasificadas como aptas).

##### Variables de control:

- **Ambientales:** proximidad a cuerpos de agua, áreas protegidas, resguardos indígenas.
- **Físicas:** pendiente, geología, suelos.

- **Socioeconómicas:** distancia a centros poblados, accesibilidad vial, base catastral.
- **Técnicas:** disponibilidad de terreno, proyección de residuos sólidos a 30 años, proximidad a aeropuertos.

## **5 Marco teórico**

### **5.1 Relleno Sanitario**

El relleno sanitario es la técnica más utilizada para la disposición final de residuos sólidos, orientada a minimizar los impactos ambientales y sanitarios. Consiste en el confinamiento de residuos en celdas compactadas que están cubiertas con material impermeable, lo que resulta en una disminución de la infiltración de lixiviados y ayuda a preservar el agua subterránea (Tchobanoglous et al., 2013). A diferencia de los vertederos abiertos, ese tipo de infraestructura involucra soluciones técnicas como impermeabilización basal, sistemas de drenaje de lixiviados y monitoreo ambiental.

De acuerdo con Olayinka et al. (2018), la aplicación de sistemas para la captura y uso de biogás (metano) generado en vertederos sanitarios resulta ser una forma de transformar un problema ambiental en una fuente de energía renovable, con beneficios no solo en la reducción de gases de efecto invernadero sino también en el retorno económico. Sin embargo, autores como Wilson et al. (2012) señalan que en los países en desarrollo las operaciones de los vertederos están limitadas no solo por restricciones técnicas sino también económicas, lo que pone en riesgo la sostenibilidad y los estándares ambientales.

Desde la política pública en Colombia se han promovido los rellenos sanitarios como infraestructura principal de disposición final, pese a que en los sitios donde se localizan se generan crecientes tensiones sociales, debido a los vectores, olores fuertes, la afectación paisajística y la aceptación comunitaria (Pacheco & Rodríguez, 2019).

### **5.2 Gestión Integral de Residuos Sólidos – GIRS**

En Colombia, la Gestión Integral de Residuos Sólidos (GIRS) se define en el Decreto 1713 de 2002 como un conjunto de operaciones cuyo propósito es permitir que los residuos tengan el destino ambiental más adecuado de acuerdo con sus propiedades, volumen, origen y posibilidades de reutilización. Esta metodología abarca jerárquicamente la prevención, la separación en la fuente,

el transporte, la reutilización y la disposición final, siguiendo criterios de política pública y planificación territorial (Ojeda Pinzón & Báez Camacho, 2023).

Según la Asociación Internacional de Residuos Sólidos, para que la GIRS se arraigue como un sistema exitoso, la infraestructura debe complementarse con la interconexión entre la educación ambiental, con la Economía Circular, y marcos regulatorios bien definidos (ISWA, 2015). Además, como ha indicado Medina (2024), en las tierras rurales donde la población está dispersa y la tecnología es escasa, en algún momento la planificación para la disposición final debería considerarse aún más relevante, ya que la ubicación inadecuada de un vertedero puede poner en peligro fuentes de agua, áreas de cultivo o ecosistemas estratégicos. Esto lleva a que la selección del sitio deba integrarse en metodologías multicriterio que respeten la variedad del territorio.

### **5.3 Análisis Jerárquico de Procesos.**

El Análisis Jerárquico de Procesos (AHP) es una de las metodologías más utilizadas en la determinación de los pesos de criterios y subcriterios en la Toma de Decisiones Multicriterio (Saaty, 1980). Muñoz (2016) argumenta que tal enfoque permite una clasificación clara y jerarquización de elementos ambientales, sociales, técnicos y económicos, y es particularmente adecuado para entornos altamente regulados como el contexto estatal colombiano.

La investigación internacional lo ha verificado como un método útil para la localización de rellenos sanitarios. Kontos, Komilis y Halvadakis (2005) usaron el AHP en Grecia para combinar pendientes, accesibilidad y restricciones ambientales. Yesilnacar y Cetin (2008) en Turquía, Jha et al. (2011) en India, mostraron que el método permite combinar variables de diferente naturaleza y obtener resultados reproducibles para la planificación del uso del suelo.

### **5.4 Sistemas de Información Geográfica – SIG**

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) representan una herramienta importante para la inclusión de variables espaciales en los estudios de localización. Con estas herramientas se pueden manejar las bases de datos, georreferenciarlas, realizar análisis de restricciones ambientales, calcular distancias euclidianas y reclasificar para pendientes y uso del suelo. Según Chabuk et al. (2016), incluso en áreas con un fondo cartográfico pobre, los SIG pueden usarse para

desarrollar modelos multicriterio útiles. De manera similar, Tavares et al. (2018) destacan la necesidad de considerar diferentes opciones de ponderación para mantener la solidez de los resultados. Estos sistemas permiten la utilización de restricciones de exclusión – distancias a asentamientos, áreas protegidas y cuerpos de agua – como también calcular distancias reguladas, análisis de pendientes o desarrollar mapas temáticos de aptitud del suelo (Kontos et al., 2005; Gómez-Delgado & Barredo, 2005).

En América Latina y Colombia se han desarrollado trabajos que refuerzan la pertinencia de esta metodología. Alba-Patiño, Martínez-Hernández y Mota (2021) han señalado que la selección de sitios de gestión de residuos sólidos aplicada con SIG no solo es posible, sino que contribuye a la integración de tales análisis dentro de los Planes de Ordenamiento Territorial / Planes de Ordenamiento Territorial de Cuencas (POT/PBOT). En el Valle del Cauca, Torres y Patiño (2020) demostraron que las regulaciones nacionales (RAS 2000, Decreto 838 de 2005) deben ser operacionalizadas en espacios espaciales locales. Medina (2024) señala que, en municipios rurales, así como en zonas enfocadas en Programas de Desarrollo con Enfoque Territorial – PDET, como es el caso de Planadas, Tolima, existe una necesidad crítica para la implementación de tales metodologías debido a que hay menos datos geográficos y las condiciones locales dictan que se diseñen modelos adaptativos.

En Planadas, los SIG permiten la integración de cartografía de diferentes fuentes (IGAC, IDEAM, ANLA, PBOT 2021-2035), la construcción de un modelo multicriterio que se adapte a las regulaciones nacionales y la obtención de mapas de aptitud que puedan replicarse para la planificación territorial a nivel municipal.

## **5.5 Referente Normativo**

El referente normativo que regula la localización de rellenos sanitarios en Colombia ha evolucionado desde el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables (Decreto 2811 de 1974), al establecer las bases para la protección ambiental, hasta el Decreto Único Reglamentario (DUR) 1077 de 2015, que compila y actualiza la normativa sectorial vigente. En este proceso, disposiciones intermedias como el Decreto 605 de 1996, el Decreto 1713 de 2002 y el Decreto 838 de 2005 tuvieron un papel clave en el establecimiento de criterios técnicos, ambientales y de gestión

integral requeridos para ubicar y operar sitios de disposición final de residuos sólidos. Aunque los decretos están actualmente comprendidos en el DUR, es necesario hacer referencia a estos para apreciar el desarrollo y refuerzo de las regulaciones concernientes a la gestión de residuos.

A continuación, se presenta tabla comparativa que sintetiza los principales lineamientos técnicos y normativos, junto con su aplicabilidad directa en el contexto del municipio.

**Tabla 1**

*Marco técnico - normativo y su aplicabilidad en Planadas, Tolima*

<b>Norma</b>	<b>Contenido principal</b>	<b>Aplicabilidad en Planadas</b>	<b>Fuente</b>
Decreto 2811 de 1974 – Código Nacional de Recursos Naturales Renovables	Establece principios generales de manejo y protección de recursos naturales; incluye la gestión de residuos, basuras y desechos.	Marco histórico que fundamenta la obligación de proteger el ambiente frente a la disposición de residuos. Orienta la política pública ambiental del país.	Gobierno de Colombia (1974)
Ley 99 de 1993	Crea el Ministerio de Ambiente y organiza el SINA. Introduce el principio de prevención y establece competencias ambientales.	Aplica en el licenciamiento ambiental de infraestructuras como rellenos sanitarios. Define competencias de las CAR y la ANLA.	Congreso de Colombia (1993)
Decreto 605 de 1996	Fija criterios técnicos para la localización, diseño y operación de rellenos sanitarios.	Sirve como base para establecer distancias mínimas a cuerpos de agua, poblados y otras restricciones técnicas.	MinAmbiente (1996)
Decreto 1713 de 2002	Regula la Gestión Integral de Residuos Sólidos (GIRS). Define obligaciones de municipios y prestadores de servicios públicos.	Aplica en la planificación municipal a través del PGIRS y en la obligación de contar con sitio de disposición final.	MinAmbiente (2002)
Decreto 838 de 2005 (modifica y complementa al 1713/2002)	Precisa condiciones técnicas y responsabilidades para la recolección, transporte y disposición final de residuos. Refuerza la obligación de PGIRS.	Establece lineamientos que deben cumplirse en la gestión integral, particularmente en la localización y operación del relleno sanitario. Actualmente compilado en el DUR 1077/2015.	MinAmbiente (2005)
Decreto Único Reglamentario 1077 de 2015	Compila y actualiza la normatividad sectorial, incluyendo disposiciones sobre disposición final de residuos sólidos.	Marco normativo vigente que rige la localización y diseño del relleno sanitario en el municipio. Sustituye y consolida los decretos previos (605/1996, 1713/2002, 838/2005).	MinVivienda (2015)
Resolución 1096 de 2000	Establece estándares de calidad ambiental para	Exige monitoreo de agua, control de lixiviados y	MinAmbiente (2000)

<b>Norma</b>	<b>Contenido principal</b>	<b>Aplicabilidad en Planadas</b>	<b>Fuente</b>
Resolución 754 de 2014	disposición de residuos sólidos. Define la metodología para la formulación y seguimiento de los PGIRS.	emisiones en la futura operación del relleno. Aplica directamente en Planadas, ya que el PBOT establece la obligación de definir un sitio de disposición final.	MinVivienda (2014)
Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS 2000, Título F	Establece requisitos técnicos para la localización de rellenos: distancias mínimas, pendientes máximas, protección de aguas, etc.	Es la guía técnica aplicada en el presente estudio para definir criterios y subcriterios de exclusión/aptitud.	MinVivienda (2000)
Norma Técnica Colombiana (NTC) 1916	Requisitos de diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios. Incluye impermeabilización, manejo de lixiviados y gases.	Aplica en fases posteriores de diseño del relleno sanitario en Planadas.	ICONTEC (2016)
NTC 5890	Métodos de ensayo para caracterización de residuos sólidos.	Útil en fases futuras de caracterización de residuos de Planadas, para definir composición y tratamientos adecuados.	ICONTEC (2014)

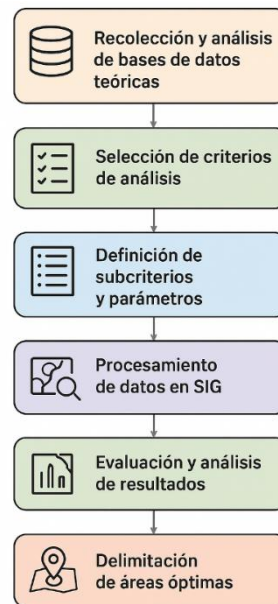
## 6. Metodología

La investigación fue llevada a cabo en el marco de un enfoque *cuantitativo* y aplicado en vista de que se encaminaba hacia la consecución de resultados de utilidad para la localización de un sitio de disposición final para residuos sólidos en el municipio de Planadas, Tolima, lo cual dio la posibilidad realizar el análisis, la correlación y la síntesis de variables espaciales y normativas mediante las técnicas multicriterio ayudadas por las herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

El estudio tuvo un diseño de tipo *descriptivo* ya que se definieron, midieron y analizaron variables ambientales, geográficas, socioeconómicas y técnicas que intervinieron en la elección del mejor lugar de estudio. Según Hernández Sampieri, Fernández y Baptista (2014) los estudios descriptivos se utilizan para especificar propiedades y características de los fenómenos observables. Para la caracterización de la presente investigación, los fenómenos observables pertenecen a un territorio en particular, en este caso, las pendientes, la red hídrica, las fallas geológicas, los espacios de protección ambiental, la infraestructura vial y la proyección de generación de residuos.

### 6.1 Fases del proceso metodológico

El proceso metodológico ha sido diseñado a través de seis fases de carácter secuencial formuladas y llevadas a cabo en combinación con los objetivos específicos marcados por el estudio y fundamentadas en el uso de herramientas de sistemas de información geográfica (SIG) y técnicas multicriterio, así:

**Figura 2**
*Fases del proceso metodológico*


- **Fase 1 - Recogida y Análisis de bases de datos teóricas:** Se realizó una revisión bibliográfica y normativa del Marco Teórico que permitió identificar los criterios y subcriterios que se consideran relevantes en la localización física de los sitios de disposición, teniendo en cuenta referentes como el Decreto 838 de 2005 o la Resolución 754 de 2014, así como experiencias investigativas en la elaboración del planeamiento territorial y la gestión de residuos sólidos. Este insumo permitió la construcción de una matriz inicial de las variables ambientales, sociales, físicas y técnicas.
- **Fase 2 - Selección de los criterios de análisis:** A partir del material revisado se definieron los criterios de idoneidad y de exclusión. Se tomaron en consideración los siguientes: *pendientes del terreno, red hidrográfica, fallas, proximidad a centros poblados, áreas de protección y accesibilidad vial.*
- **Fase 3 - Definición de subcriterios y parámetros:** Cada uno de los criterios fue desglosado en subcriterios y se definieron rangos o umbrales de idoneidad de acuerdo a la normativa y a la literatura técnica. Por mencionar un ejemplo, para el criterio de “pendiente” se definieron umbrales de idoneidad (<15%, 15–25%, >25%) a partir de las restricciones de estabilidad y constructibilidad.

- **Fase 4 - Procesamiento de datos en SIG:** Los datos fueron organizados en una geodatabase en ArcGIS pro y normalizados espacialmente, reclasificados y estandarizados por escalas. Posteriormente, se aplicaron herramientas de análisis multicriterio, tales como *ponderaciones por comparación pareada* (Saaty, 1980) y *combinación lineal ponderada* (Weighted Overlay) con el propósito de integrar la información espacial y generar las contribuciones a los mapas de aptitud.
- **Fase 5 - Evaluación y análisis de resultados:** Los mapas de aptitud se validaron en comparación con criterios normativos y en relación con el Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) del municipio. También se detectaron las incompatibilidades territoriales y se realizó el análisis por superposición con las coberturas de uso del suelo y los predios rurales.
- **Fase 6 - Delimitación de áreas óptimas:** Se delimitaron las áreas con mayor viabilidad técnica y ambiental para ubicar el relleno sanitario. Las anteriores fueron jerarquizadas y presentadas como insumo para la toma de decisiones en la planificación territorial y gestión de la adecuada gestión de residuos sólidos del municipio de Planadas, Tolima.

## 6.2 Definición de criterios y subcriterios según el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP)

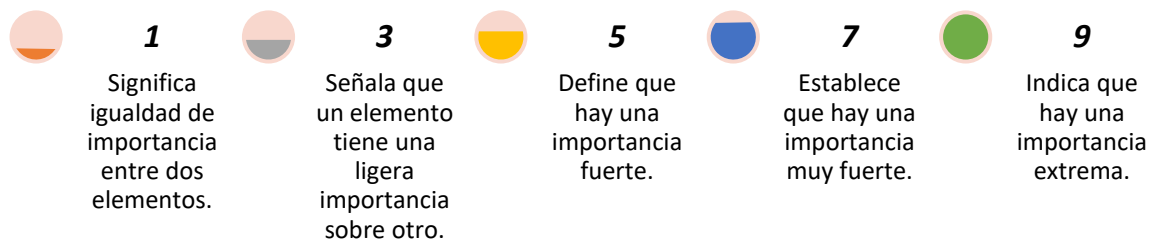
La evaluación multicriterio (EMC) tratada en este trabajo tiene como base el proceso de análisis jerárquico (AHP, por su acrónimo en inglés), el cual fue desarrollado por Thomas L. Saaty en la década 1970 como una técnica de soporte para la toma de decisiones complejas (Saaty, 1980). Esta técnica basa su lógica en la descomposición de un problema en niveles de una jerarquía que permiten estructurar y analizar de una forma ordenada los elementos que juegan un papel en una decisión. Dicha jerarquía incluye el objetivo general, los criterios principales, los subcriterios y por último las alternativas de solución.

En el presente trabajo, el AHP fue aplicada con el propósito de determinar las mejores áreas para la posible localización de un relleno sanitario en el municipio de Planadas, Tolima. La figura

3 muestra la jerarquía construida, mostrando los criterios ambientales, técnicos, sociales y económicos, así como sus respectivos subcriterios de acuerdo con la normatividad y la literatura.

En una fase posterior, se confeccionaron las Matrices de Comparación por Pares (MCP), tanto de criterios como de subcriterios. Esta técnica ha permitido formalizar la importancia de cada uno de ellos en función del objetivo general, a partir de un sistema de ponderación que sea coherente. Para construirlas, se empleó la *escala de Saaty*, la cual ofrece unos valores de preferencia entre 1 y 9, así:

**Figura 3**  
*Valores de Preferencia según Escala de Saaty*

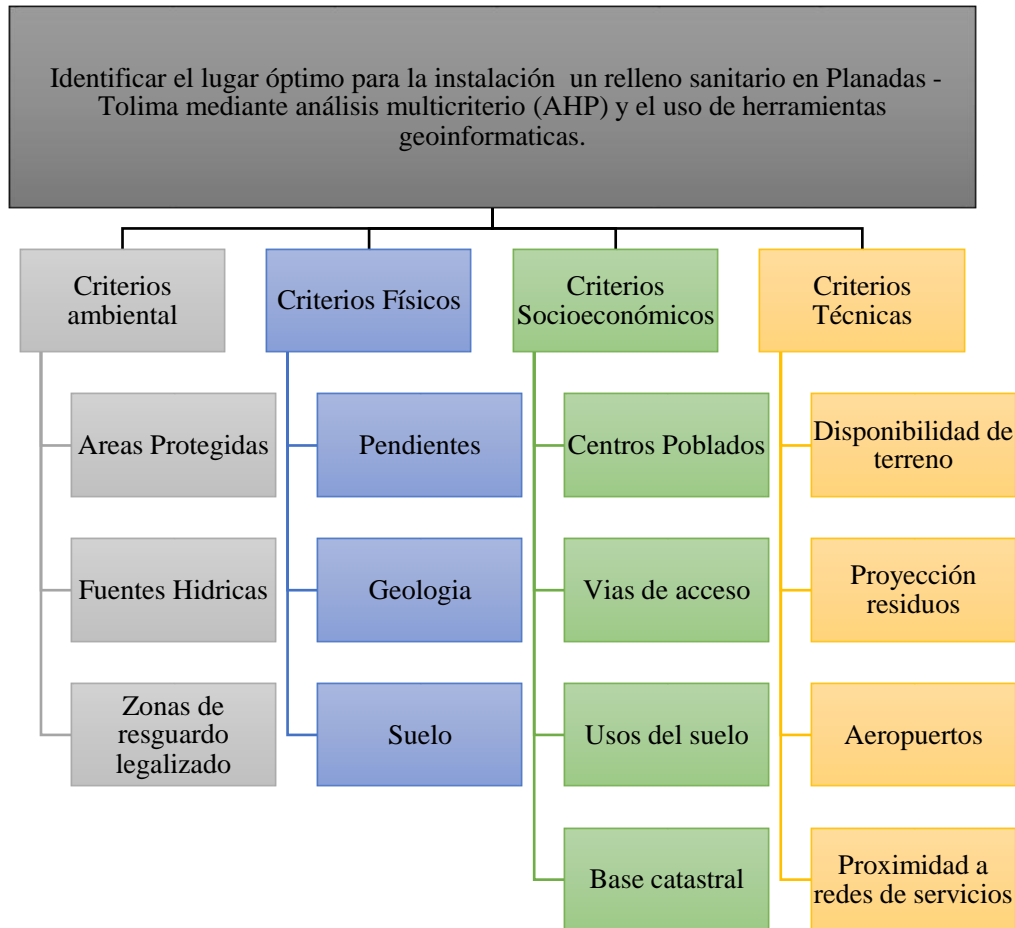


Dicha escala se presenta en la Figura 3, utilizada para establecer las matrices de comparación que dieron lugar a la Tabla 2 la cual, a su vez, fue procesada para obtener los pesos normalizados, así como para verificar la consistencia de los juicios emitidos y asegurar que los resultados eran fiables y coherentes.

Es significativo puntualizar que los subcriterios de exclusión - regiones de protección del medio natural, rondas hidrográficas, fallas geológicas activas, zonas de amenaza alta - no se incorporaron a las matrices de comparación, ya que están tipificados normativamente por su carácter restrictivo. Estas condiciones sirven como condicionantes absolutos, por lo que no son necesarios de ponderar dentro del análisis multicriterio y se incorporan previamente como filtros de descarte en la delimitación espacial.

**Figura 4**

*Estructura Jerárquica para la ubicación de zonas aptas para la construcción del relleno sanitario del municipio de Planadas, Tolima.*



La idea clave del AHP es que cada celda  $(i, j)$  de la matriz represente “cuántas veces más importante” (o menos) es el subcriterio  $i$  respecto al subcriterio  $j$ . La Matriz de Comparación por Pares (MCP) de los criterios, para su construcción cada celda  $(i, j)$  se calcula como  $\frac{pesoi}{pesoj}$ , así:

- Un valor mayor que 1 indica que la fila  $i$  es más importante que la columna  $j$ .
- Un valor menor que 1 indica lo contrario.
- La diagonal principal siempre es 1 (cada subcriterio vs. sí mismo).

**Tabla 2**

*Matriz de Comparación por Pares (MCP) de los criterios*

<b>Criterio</b>	<b>Ambientales</b>	<b>Físicos</b>	<b>Socioeconómicos</b>	<b>Técnicos</b>
<b>Ambientales</b>	1.00	1.20	1.20	1.50
<b>Físicos</b>	0.83	1.00	1.00	1.25
<b>Socioeconómicos</b>	0.83	1.00	1.00	1.25
<b>Técnicos</b>	0.67	0.80	0.80	1.00

**6.2.1 Matrices de Comparación por Pares MCP para cada categoría de subcriterios**

La Matriz de Comparación por Pares (MCP) (filas vs. columnas) se llena con  $\frac{\text{proporción}_i}{\text{proporción}_j}$

**Tabla 3**

*Matriz de Comparación por Pares (MCP) subcriterios Ambientales*

<b>Ambientales</b>	<b>Áreas Protegidas</b>	<b>Fuentes Hídricas</b>	<b>Resguardo Legalizado</b>
<b>Áreas Protegidas</b>	1.00	0.60	1.50
<b>Fuentes Hídricas</b>	1.67	1.00	2.50
<b>Resguardo Legalizado</b>	0.67	0.40	1.00

**Tabla 4**

*Matriz de Comparación por Pares (MCP) subcriterios Físicos*

<b>Físicos</b>	<b>Pendiente</b>	<b>Geología</b>	<b>Suelos</b>
<b>Pendiente</b>	1.00	1.33	1.33
<b>Geología</b>	0.75	1.00	1.00
<b>Suelos</b>	0.75	1.00	1.00

**Tabla 5**

*Matriz de Comparación por Pares (MCP) subcriterios Socioeconómicos*

<b>Socioeconómicos</b>	<b>Dist. poblados</b>	<b>Vías Acceso</b>	<b>Usos Suelo</b>	<b>Base Cat.</b>
<b>Dist. a centros poblados</b>	1.00	1.20	1.20	1.50
<b>Vías de acceso</b>	0.83	1.00	1.00	1.25
<b>Usos del suelo</b>	0.83	1.00	1.00	1.25
<b>Base catastral</b>	0.67	0.80	0.80	1.00

**Tabla 6**

*Matriz de Comparación por Pares (MCP) subcriterios Técnicos*

<b>Técnicos</b>	<b>Redes</b>	<b>Residuos</b>	<b>Disponib.</b>	<b>Aerop.</b>
<b>Prox. redes de servicios</b>	1.00	1.20	1.20	1.50

<b>Técnicos</b>	<b>Redes</b>	<b>Residuos</b>	<b>Disponib.</b>	<b>Aerop.</b>
<b>Proyección de residuos (30 años)</b>	0.83	1.00	1.00	1.25
<b>Disponibilidad de terreno</b>	0.83	1.00	1.00	1.25
<b>Aeropuertos (distancia)</b>	0.67	0.80	0.80	1.00

**6.2.2 Cálculo de los Pesos (Vector de Prioridades)**

**Tabla 7**

*Vector de Prioridad para los Subcriterios*

<b>Subcriterio</b>	<b>Peso final</b>
<b>Ambientales (Total 0.30)</b>	
Áreas protegidas	0.09
Fuentes hídricas	0.15
Zonas de resguardo legalizado	0.06
<b>Físicos (Total 0.25)</b>	
Pendiente	0.10
Geología	0.075
Suelos	0.075
<b>Socioeconómicos (Total 0.25)</b>	
Distancia a centros poblados	0.075
Vías de acceso	0.0625
Usos del suelo	0.0625
Base catastral	0.05
<b>Técnicos (Total 0.20)</b>	
Proximidad a redes de servicios	0.06
Proyección de residuos (30 años)	0.05
Disponibilidad de terreno	0.05
Aeropuertos	0.04

El resultado obtenido en el vector de prioridad muestra la ponderación o peso que va a tener cada uno de los subcriterios, los cuales se convierten en las variables geográficas que se emplearán en la herramienta de superposición ponderada.

Después de obtener la ponderación de cada una de las variables, es necesario realizar una evaluación de los resultados obtenidos; dentro de la metodología AHP, Saaty (1980) propone el cálculo de la *razón de consistencia* (RC), el cual determina si los resultados obtenidos en el vector de prioridad son adecuados o si se deben hacer ajustes en la matriz de comparación por pares, para optimizar los resultados. Según la metodología AHP, el RC debe ser inferior a 0,1 para matrices mayores de 5x5; si el resultado es mayor, deben ser reconsiderados y modificados los valores de la

matriz de comparación por pares (Toskano Hurtado, 2005). Dicho calculo este dado por la siguiente formula.

$$RC = \frac{IC}{IA}$$

Donde:

IC: Índice de consistencia

IA: Índice de Consistencia aleatoria

$$IC = \frac{nmax - n}{n - 1}$$

Donde:

n: dimensión de la matriz (alternativas)

nmax: es la multiplicación de la matriz por pares con calificación numérica por el promedio

$$IA = \frac{1,98 (n - 2)}{n}$$

Entonces se tiene:

$$IC = \frac{3.99925 - 4}{4 - 1} = -0.00025 \qquad IA = \frac{1,98 (4 - 2)}{4} = 0.99$$

$$RC = \frac{-0.00025}{0.99} = -0.000253$$

Para este caso el RC obtenido fue  $-0.000253$ ; considerando que es una matriz de tamaño 4x4, esto significa que la matriz es altamente consistente.

### 6.2.3 Criterios y subcriterios

Con el fin de garantizar el cumplimiento normativo, los criterios y subcriterios fueron sistematizados en la Tabla 8.

**Tabla 8**  
*Sistematización de Criterios y subcriterios*

<b>Categoría</b>	<b>Subcriterio / Aspecto</b>	<b>Restricciones / Condiciones</b>
<b>Socioeconómico</b>	Distancia al casco urbano	Mínimo <b>1.000 m</b> desde el límite del casco urbano; puede ser mayor según el estudio de impacto ambiental.
<b>Técnico</b>	Distancia a aeropuertos (aviones a turbina)	Mínimo <b>3.000 m</b> de distancia al aeropuerto.
<b>Técnico</b>	Distancia a aeropuertos (aviones a pistón)	Mínimo <b>1.500 m</b> de distancia al aeropuerto.
<b>Ambiental</b>	Distancia a cuerpos de agua superficiales	Mínimo <b>500 m</b> a partir de la orilla o base de diques; en corrientes superficiales, se mide desde el centro del cauce.
<b>Físico-Geológico</b>	Zonas de fallas geológicas activas	Prohibido ubicar relleno sanitario dentro de los <b>60 m</b> de la zona de falla, salvo que un estudio demuestre que la unidad conservará su integridad estructural incluso ante un desplazamiento de la falla y se garantice la protección de la vida humana y del ambiente.
<b>Ambiental</b>	Pozo de agua potable / manantiales / fuentes hídricas subterráneas	Debe ubicarse a más de <b>500 m</b> de pozos (operando o en abandono), manantiales y cualquier fuente subterránea o superficial de abastecimiento hídrico.
<b>Ambiental</b>	Protección de aguas subterráneas	Mínimo <b>5 m</b> entre el fondo del relleno y la tabla de agua freática (verificar en condiciones de nivel máximo). En rellenos de alta complejidad, se requiere un estudio que demuestre la no contaminación de aguas.
<b>Geológico - Geotécnico</b>	Áreas propensas a fallas / zonas inestables	No ubicar el sitio en zonas de falla activas, salvo que se demuestre la integridad estructural a 60 m de la falla.

En el caso de áreas con especial protección, como Parques Nacionales Naturales (PNN) y resguardos indígenas, se adoptó un criterio de exclusión absoluta. Para los PNN se estableció un perímetro de seguridad de 5 km, el cual se fijó como referencia técnica dentro del presente estudio,

en concordancia con lo que posteriormente deberá definirse en el proceso de licenciamiento ambiental por parte de la autoridad competente.

**6.2.4 Cálculo de áreas para la localización del relleno sanitario**

Para el cálculo de áreas se tuvieron en cuenta los siguientes datos del DANE en las proyecciones de población.

**Tabla 9**  
*Censos de población*

CENSO	POBLACIÓN
1985	26770
1993	28855
2005	25442
2018	25649

Fuente: Censos 1973- 2018 DANE

La proyección de la población se efectúa con del área de estudio desde el año 2025 a 2055 se empleó el método geométrico el cual se encuentra dado por la fórmula

$$Pf = Puc(1 + r)^{Tf-Tuc}$$

Donde:

*r*: Tasa de crecimiento anual en forma decimal.

*Pf*: Población correspondiente al año para el que se quiere realizar la proyección (habitantes).

*Puc*: Población correspondiente a la proyección del DANE (habitantes).

*Pci*: Población correspondiente al censo inicial con información (habitantes).

*Tuc*: Año correspondiente al último año proyectado por el DANE.

*Tf*: Año al cual se quiere proyectar la información.

La tasa de crecimiento anual se calcula basado en la fórmula:

$$r = \left( \frac{Puc}{Pci} \right)^{1/(Tuc-Tci)} - 1$$

Luego de realizado el procedimiento descrito anteriormente, se procede al cálculo de los residuos generados, el cual se determina mediante la siguiente fórmula:

$$Rga = Paño * Ppc * 365 \text{ dias}$$

Donde:

*Rga*: Residuos generados año Paño: Población año

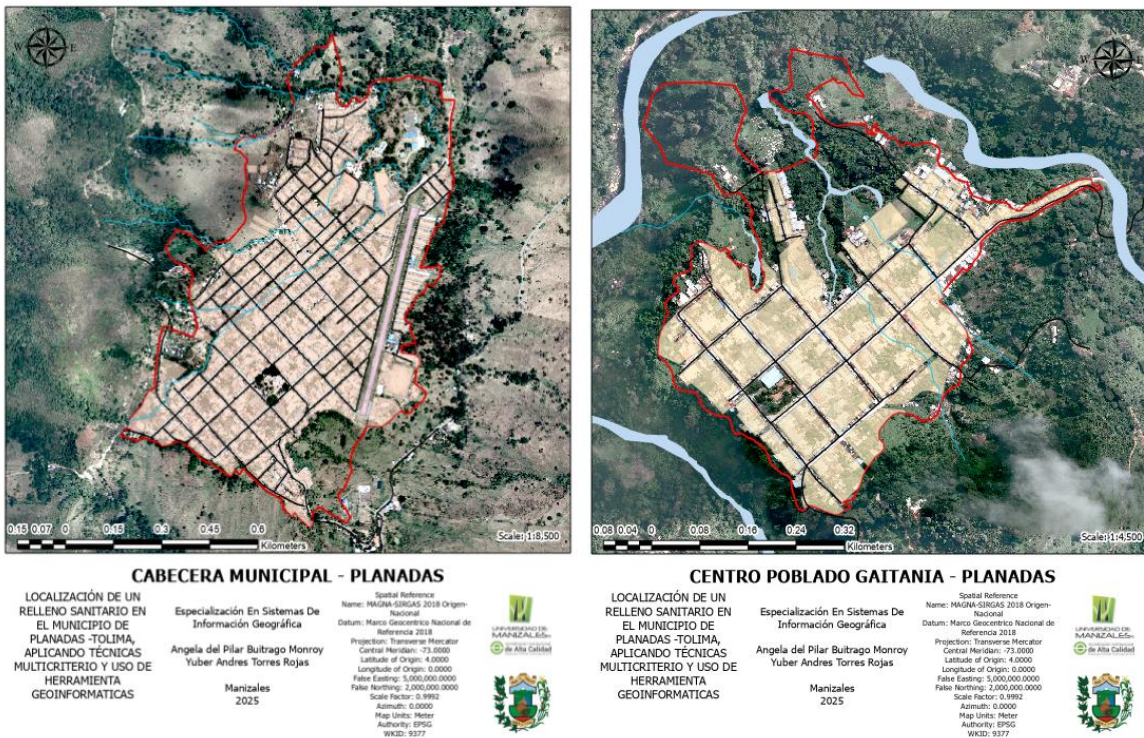
*Ppc*: Producción per cápita

Es importante aclarar que la producción per cápita de residuos sólidos municipales fue tomada del Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS 2000, específicamente del Título F, Sección 1.4.1.1. En este apartado se establece que, en ausencia de un estudio de campo, la producción per cápita de residuos sólidos municipales se estima en 0,33 kg/hab/día en zonas urbanas y para zonas rurales 0,13 kg/hab/día (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000).

Según las proyecciones del DANE con base en el censo de 2018, la población urbana corresponde al 27.9% y Rural 71,1%.

**Figura 5**

*Cabecera municipal y Centro Poblado Gaitania – Planadas, Tolima*



Para el cálculo del volumen de los residuos, se tomó como referencia la densidad de residuos sólidos comprimidos en relleno sanitario, cuyo valor sugerido es de 0,8 kg/m<sup>3</sup> (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000).

$$Vaño = Rga * Dr$$

Donde:

*Vaño*: Volumen al año

*Dr*: Densidad de residuos sólidos comprimidos

Por último, para determinar el área necesaria para el establecimiento del relleno sanitario, se utilizó el volumen acumulado año a año, por la altura de celda recomendada en la literatura, que corresponde a 2,5 m.

$$Área = Vaño * Ac$$

**Tabla 10**

*Proyección de residuos para la zona urbana del municipio de Planadas*

No	AÑO	POBLACION	PPC Kg	CANTIDAD DE RESIDUOS GENERADOS		VOLUMEN	AREA m2	AREA ha
				Diaria Kg	Año Kg			
0	2025	880.6	0.33	291	97641	78113	195282	19.53
1	2026	879.1	0.33	291	97797	78238	195595	19.56
2	2027	877.6	0.33	292	97954	78363	195908	19.59
3	2028	876.1	0.33	292	98112	78490	196224	19.62
4	2029	874.7	0.33	292	98270	78616	196541	19.65
5	2030	873.2	0.34	293	98429	78744	196859	19.69
6	2031	871.7	0.34	293	98589	78871	197179	19.72
7	2032	870.3	0.34	294	98750	79000	197500	19.75
8	2033	868.9	0.34	294	98911	79129	197822	19.78
9	2034	867.4	0.34	295	99073	79259	198146	19.81
10	2035	866.0	0.34	295	99236	79389	198472	19.85
11	2036	864.6	0.34	296	99400	79520	198799	19.88
12	2037	863.1	0.34	296	99564	79651	199128	19.91
13	2038	861.7	0.34	297	99729	79783	199458	19.95
14	2039	860.3	0.35	297	99895	79916	199789	19.98
15	2040	858.9	0.35	298	100061	80049	200122	20.01
16	2041	857.5	0.35	298	100228	80183	200457	20.05
17	2042	856.1	0.35	299	100396	80317	200793	20.08
18	2043	854.8	0.35	299	100565	80452	201130	20.11
19	2044	853.4	0.35	300	100735	80588	201469	20.15
20	2045	852.0	0.35	300	100905	80724	201810	20.18
21	2046	850.6	0.35	301	101076	80861	202152	20.22
22	2047	849.3	0.35	301	101248	80998	202496	20.25
23	2048	847.9	0.36	302	101420	81136	202841	20.28
24	2049	846.6	0.36	302	101594	81275	203187	20.32
25	2050	845.3	0.36	303	101768	81414	203536	20.35
26	2051	843.9	0.36	303	101943	81554	203886	20.39
27	2052	842.6	0.36	304	102118	81695	204237	20.42
28	2053	841.3	0.36	304	102295	81836	204590	20.46
29	2054	840.0	0.36	305	102472	81978	204944	20.49
30	2055	838.7	0.36	306	102650	82120	205300	20.53

Se consideran exclusivamente las zonas urbanas, ya que en las zonas rurales no existen planes de recolección de residuos debido a que el municipio carece de un PEGIRS. Además, la infraestructura vial rural presenta deficiencias que impiden el traslado adecuado de los residuos

hacia un sitio de disposición, lo que conlleva a que estos sean gestionados mediante métodos como el enterramiento o la incineración, procedimientos que resultan inadecuados.

### **6.3 Metodología para la Identificación de Zonas Óptimas**

Se desarrolló el modelo de análisis espacial en el ambiente de programación gráfica *ModelBuilder* de *ArcGIS Pro*, el cual apoya una integración secuencial de múltiples herramientas de geoprocésamiento con el producto del proceso anterior como input para el siguiente. Esta metodología permitió estructurar un flujo de trabajo replicable y transparente para la localización de zonas potencialmente aptas para la instalación del relleno sanitario.

Para su elaboración se incorporaron las capas cartográficas correspondientes al área de estudio, incluyendo drenajes permanentes y temporales, red vial, perímetro urbano y coberturas de suelo. Sobre estos insumos se aplicaron procesos de fusión de entidades, cálculo de distancias euclidianas, análisis de pendientes derivadas del modelo digital de elevación (DEM), reclasificación de valores de aptitud y conversiones entre formatos vectoriales y ráster.

#### **6.3.1 Preparación de insumos:**

En la primera etapa, se estandarizan las fuentes cartográficas con el objetivo de garantizar compatibilidad espacial y coherencia en el análisis. Se realizaron tres operaciones clave:

- La conversión a formato ráster de entidades vectoriales críticas (resguardos indígenas, perímetro urbano, pistas de aterrizaje, áreas protegidas, suelos aptos y fallas geológicas).
- El recorte de la información al área de estudio, delimitada con base en el perímetro municipal y sus zonas de influencia.
- La definición de zonas de restricción mediante la generación de *buffers* en torno a áreas no aptas (Parque Nacional Natural Nevado del Huila, resguardos indígenas, aeródromos y perímetro urbano), en cumplimiento del RAS 2000 – Título F y la Resolución 754 de 2014.

#### **6.3.2 Generación de criterios espaciales**

Posteriormente, se construyeron variables en formato ráster que representan los criterios de evaluación definidos:

- **Distancia euclidiana (Euclidean Distance):** calculada a vías principales (accesibilidad), cuerpos de agua y drenajes (protección hídrica) y centros poblados (cumplimiento de distancias mínimas reglamentarias).
- **Análisis de pendiente (Slope):** a partir del DEM, reclasificado en intervalos de aptitud ( $\leq 25\%$ ,  $>25.01\%$ ), donde las pendientes altas fueron categorizadas como no aptas.
- **Suelos:** se reclasificaron texturas y capacidades de uso para identificar zonas con aptitud moderada a alta para soportar infraestructura de disposición final.

Cada una de estas capas fue reclasificada en rangos de aptitud (0 = no apto; 1 = apto) según los parámetros normativos y técnicos definidos en la literatura y la regulación nacional.

**Tabla 11**

*Relación Subcriterios con las herramientas SIG aplicadas y la normativa de referencia*

<b>Criterio / Subcriterio</b>	<b>Herramienta SIG aplicada</b>	<b>Normativa de referencia</b>
<b>Distancia a casco urbano</b>	Euclidean Distance + Buffer ( $\geq 1.000$ m)	Decreto 1077 de 2015; RAS 2000, Título F
<b>Distancia a aeropuertos (turbina / pistón)</b>	Euclidean Distance + Buffer ( $\geq 3.000$ m / $\geq 1.500$ m)	Decreto 1784 de 2017; Aeronáutica Civil
<b>Cuerpos de agua superficiales</b>	Euclidean Distance + Buffer ( $\geq 500$ m desde cauce)	Resolución 754 de 2014; RAS 2000, Título F
<b>Falla geológica activa</b>	Buffer de 60 m + Reclasificación binaria (apto / no apto)	Decreto 1077 de 2015; RAS 2000, Título F
<b>Pozos de agua / manantiales</b>	Buffer de 500 m	Resolución 1541 de 2013; Resolución 754 de 2014
<b>Protección de aguas subterráneas</b>	Análisis geotécnico ( $\geq 5$ m hasta nivel freático; restricción total en SIG)	RAS 2000, Título F
<b>Pendiente del terreno</b>	Herramienta Slope (MDE) + Reclasificación ( $\leq 12\%$ , $13-25\%$ , $>25\%$ )	Kontos et al. (2005); Gómez-Delgado & Barredo (2005)
<b>Uso del suelo</b>	Reclasificación de coberturas (0 = no apto; 1 = moderado; 2 = apto)	PBOT Planadas (2021); Decreto 1077 de 2015
<b>Áreas protegidas (PNN)</b>	Clip + Erase (exclusión directa, $\geq 5$ km buffer en este estudio)	Ley 99 de 1993; Resolución 938 de 2019; ANLA
<b>Resguardos indígenas</b>	Buffer ( $\geq 2$ km) + Exclusión	Constitución Política de Colombia, art. 330; Decreto 2164 de 1995

### 6.3.3 Integración y ponderación multicriterio

Las capas resultantes se integraron mediante un proceso de ponderación jerárquica (AHP) previamente definido. Para ello se utilizó la herramienta *Raster Calculator*, asignando valores de importancia relativa a cada criterio. El resultado fue un raster ponderado de aptitud, el cual refleja la idoneidad espacial de cada celda dentro del área de estudio. En la figura se puede ver la expresión calculada.

Debido a que algunas capas contempladas en el vector de prioridades de criterios y subcriterios no contaban con representación espacial en formato ráster, fue necesario realizar un ajuste en la distribución de los pesos. En este sentido, se efectuó una asociación de variables con características afines y se redistribuyeron las ponderaciones para garantizar la coherencia metodológica del modelo. Como resultado, la expresión de la calculadora ráster integra un total ponderado de 0,85, correspondiente a los subcriterios con información espacial disponible (distancia a centros poblados, cuerpos de agua, vías de acceso, pendiente, geología, suelos aptos, áreas protegidas, resguardos indígenas y aeropuertos).

El 0,15 restante corresponde a variables que no pudieron ser modeladas en formato ráster; base catastral, proyección de residuos a treinta (30) años y disponibilidad de terreno, las cuales fueron aplicadas en la fase de cruce poligonal, actuando como filtros adicionales sobre los polígonos aptos. Esta estrategia permitió mantener la coherencia del modelo multicriterio, evitando la exclusión de aspectos relevantes para la viabilidad del proyecto.

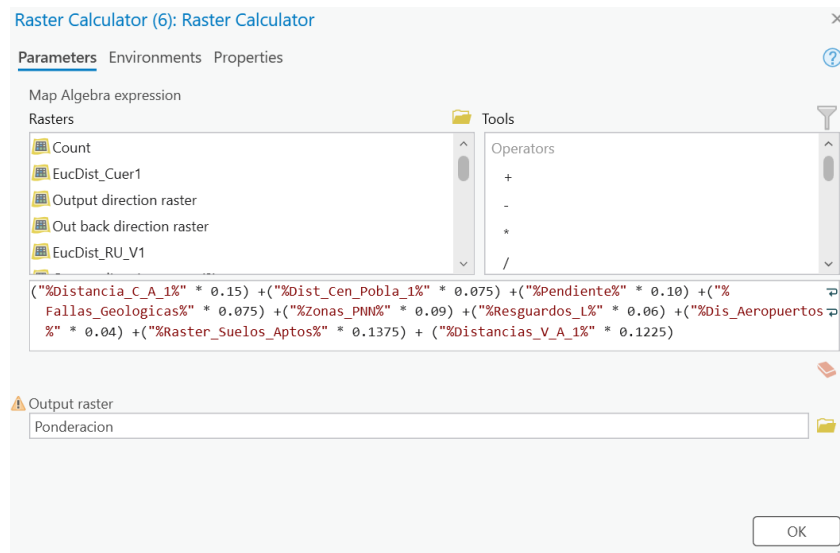
**Tabla 12**

*Vector de Prioridad ajustado - Subcriterios*

<b>Criterio</b>	<b>Subcriterio</b>	<b>Peso final</b>
<b>Ambientales (0.30)</b>	Áreas protegidas	0.09
	Fuentes hídricas	0.15
	Zonas de resguardo legalizado	0.06
<b>Físicos (0.25)</b>	Pendiente	0.10
	Geología	0.075
	Uso del suelo / Suelos (consolidado)	0.1375
<b>Socioeconómicos (0.25)</b>	Distancia a centros poblados	0.075
	Vías de acceso / Red de servicios (consolidado)	0.1225
	Base catastral	0.05
<b>Técnicos (0.20)</b>	Proyección de residuos (30 años)	0.05
	Disponibilidad de terreno	0.05
	Aeropuertos	0.04

## Figura 6

### Expresión de la calculadora ráster



#### 6.3.4 Refinamiento y delimitación de zonas aptas

Se aplicó *reclassify* en rangos de aptitud (0 = no apto; 1 = apto) teniendo en cuenta que los valores aptos corresponden a 0.85; así mismo, se aplicó *Boundary Clean* y *Raster to Polygon* para vectorizar las áreas continuas de aptitud. Los polígonos se depuraron con el criterio de área mínima establecida ( $\geq 23.5$  ha), correspondiente a la superficie requerida para garantizar capacidad operativa durante un horizonte de planeación de treinta (30) años.

El producto final correspondió a un conjunto de zonas óptimas espacialmente delimitadas, constituyendo la base para la etapa de evaluación de capacidad instalada y análisis de viabilidad técnica.

Con el fin de garantizar la trazabilidad y transparencia metodológica, en el **Anexo 2** se incluye la representación completa del modelo desarrollado en el entorno ModelBuilder de ArcGIS Pro, en formato PDF, en el cual se muestra la secuencia de herramientas de geoprocésamiento implementadas, así como la lógica de integración entre criterios y subcriterios aplicados en el análisis multicriterio. La inclusión de este esquema permite evidenciar la reproducibilidad del proceso y sirve como referencia técnica para futuros estudios o validaciones.

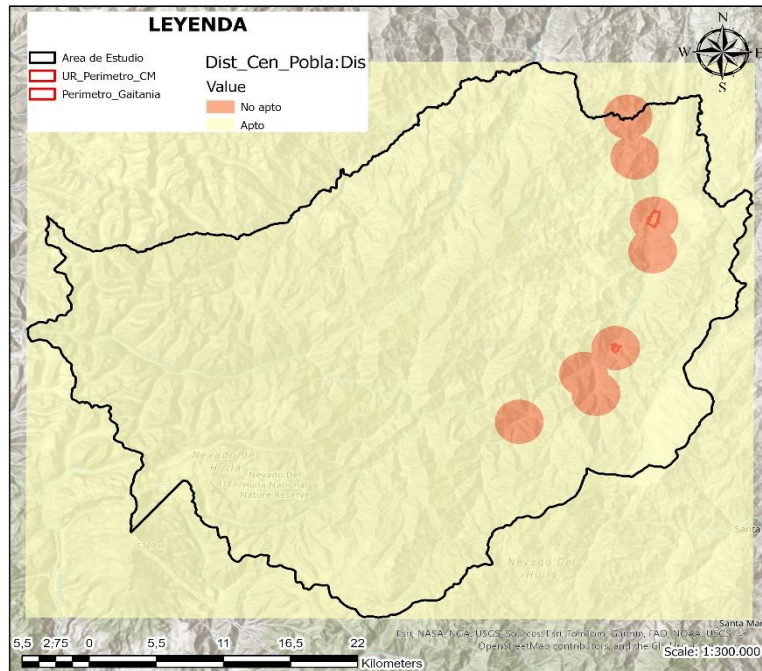
## 7 Resultados

Se establecieron los criterios ambientales, sociales, técnicos y normativos a considerar en la localización del relleno sanitario: *distancia a centros poblados, cuerpos de agua y vías de acceso; pendiente del terreno; usos del suelo; presencia de fallas geológicas; y exclusión de áreas de especial protección* como resguardos indígenas y parques nacionales naturales. Estos criterios permitieron construir un marco de referencia sólido para orientar el análisis espacial posterior.

Mediante el uso de técnicas de análisis multicriterio en entorno SIG se construyeron capas temáticas que representan las restricciones y aptitudes del territorio. Estas fueron integradas en el modelo de análisis, a partir de ello se elaboraron los mapas de idoneidad y exclusión que se describen a continuación:

**Distancia a centros poblados:** El cálculo de la distancia a los centros poblados cubrió la cabecera municipal de Planadas, los distritos de Gaitania y Bilbao, y otros centros rurales encontrados en el PBOT. El área óptima se definió como aquella ubicada a más de 2000 m de los asentamientos humanos. Evaluación característica: los resultados muestran que el 94.71% del área (1,661.21 km<sup>2</sup>) es adecuada, y solo el 5.29% (92.71 km<sup>2</sup>) se considera inadecuada (Tabla 13; Figura 7).

**Figura 7**  
*Mapa de Distancia a Centros Urbanos*



**CENTROS POBLADOS**

LOCALIZACIÓN DE UN RELLENO SANITARIO EN EL MUNICIPIO DE PLANADAS -TOLIMA, APLICANDO TÉCNICAS MULTICRITERIO Y USO DE HERRAMIENTA GEOINFORMATICAS

Especialización En Sistemas De Información Geográfica  
Angela del Pilar Buitrago Monroy  
Yuber Andres Torres Rojas  
Manizales  
2025

Spatial Reference  
Name: MAGNA-SIRGAS 2018 Origen-Nacional  
Datum: Marco Geocentrico Nacional de Referencia 2018  
Projection: Transverse Mercator  
Central Meridian: -73,0000  
Latitude of Origin: 0,0000  
False Easting: 5,000,000,0000  
False Northing: 2,000,000,0000  
Scale Factor: 0,9992  
Azimuth: 0,0000  
Map Units: Meter  
Authority: EPSG  
WKID: 9377



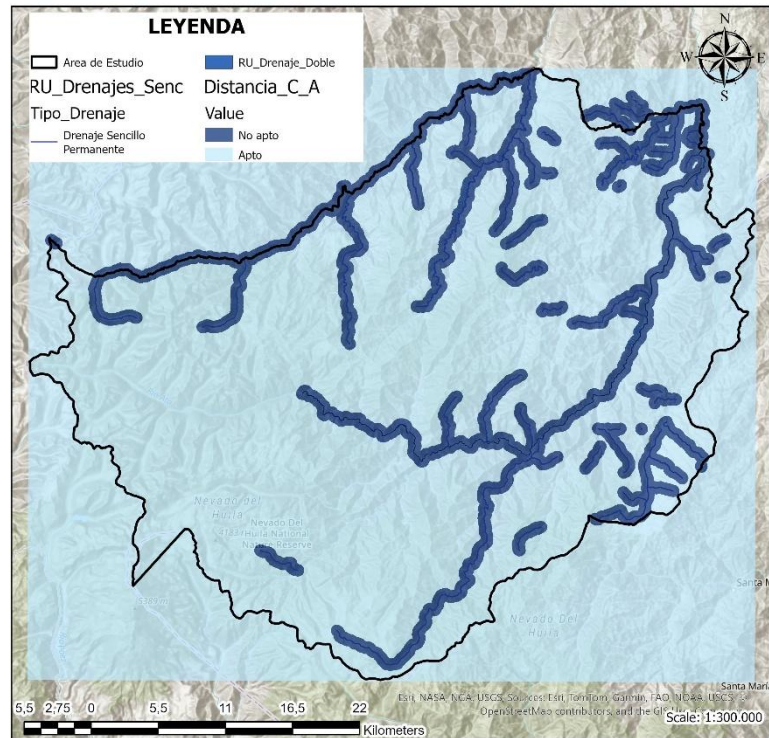
**Tabla 13**  
*Cálculo de Áreas para el Criterio Socioeconómico - Centros poblados*

Centros Poblados		
	Área	Porcentaje
<b>No apto</b>	92717135.97	5.29%
<b>Apto</b>	1661216485.33	94.71%
<b>Total</b>	1753933621.30	100%

**Distancia a cuerpos de agua:** Hay un patrón extenso de drenajes simples y dobles en el área de estudio. La zona inadecuada se consideró como aquella a menos de 500 m de los cuerpos de agua. Los resultados indicaron que el 78.62% (1,379.02 km<sup>2</sup>) y el 21.38% (374.90 km<sup>2</sup>) del

territorio podrían categorizarse como tierras adecuadas e inadecuadas, respectivamente (Tabla 14; Figura 8).

**Figura 8**  
*Mapa de Distancia a Cuerpos de Agua*



**CUERPOS DE AGUA**

LOCALIZACIÓN DE UN RELLENO SANITARIO EN EL MUNICIPIO DE PLANADAS -TOLIMA, APLICANDO TÉCNICAS MULTICRITERIO Y USO DE HERRAMIENTA GEOINFORMATICAS

Especialización En Sistemas De Información Geográfica  
Angela del Pilar Buitrago Monroy  
Yuber Andres Torres Rojas

Manizales  
2025

Spatial Reference  
Name: MAGNA-SIRGAS 2018 Origen-Nacional  
Datum: Marco Geocentrico Nacional de Referencia 2018  
Projection: Transverse Mercator  
Central Meridian: -73,0000  
Latitude of Origin: 4,0000  
Longitude of Origin: 0,0000  
False Easting: 5,000,000,0000  
False Northing: 2,000,000,0000  
Scale Factor: 0,9992  
Azimuth: 0,0000  
Map Units: Meter  
Authority: EPSG  
WKID: 9377



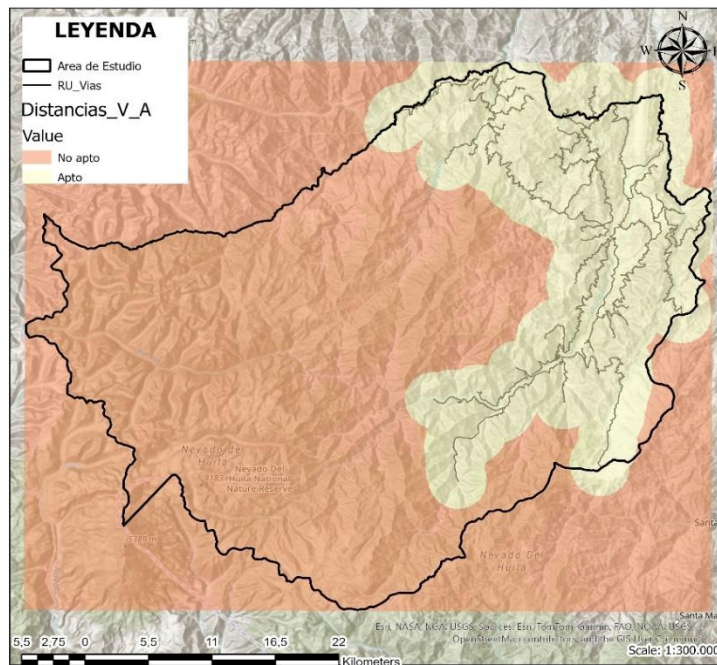
**Tabla 14**  
*Cálculo de Áreas para el Criterio ambiental – Fuentes Hídricas*

Cuerpos de agua		
	Área	Porcentaje
<b>No apto</b>	374906735.5	21.38%
<b>Apto</b>	1379026885.82	78.62%
<b>Total</b>	1753933621.30	100%

**Distancia a vías de acceso:** Las vías son una variable importante para el establecimiento de este tipo de infraestructura, se examinaron las carreteras secundarias, terciarias y caminos que conectan el área urbana con los distritos y aldeas circundantes. Las mejores áreas se encontraron a menos de 2000 m de las carreteras. El análisis de la idoneidad del terreno resultó en que el 40.93% (717.86 km<sup>2</sup>) del área es adecuada y el 59.07% (1,036.07 km<sup>2</sup>) es inadecuada (Tabla 15; Figura 9).

**Figura 9**

*Mapa de Distancia a vías de acceso*



**VIAS DE ACCESO**

LOCALIZACIÓN DE UN RELLENO SANITARIO EN EL MUNICIPIO DE PLANADAS -TOLIMA, APLICANDO TÉCNICAS MULTICRITERIO Y USO DE HERRAMIENTAS GEOINFORMÁTICAS

Especialización En Sistemas De Información Geográfica

Angela del Pilar Buitrago Monroy  
Yuber Andres Torres Rojas

Manizales  
2025

Spatial Reference  
Name: MAGNA-SIRGAS 2018 Origen Nacional  
Datum: Marco Geocéntrico Nacional de Referencia 2018  
Projection: Transverse Mercator  
Central Meridian: -73,0000  
Latitude of Origin: 4,0000  
Longitude of Origin: 0,0000  
False Easting: 5,000,000,0000  
False Northing: 2,000,000,0000  
Scale Factor: 0,9992  
Azimuth: 0,0000  
Map Units: Meter  
Authority: EPSG  
WKID: 9377



**Tabla 15**

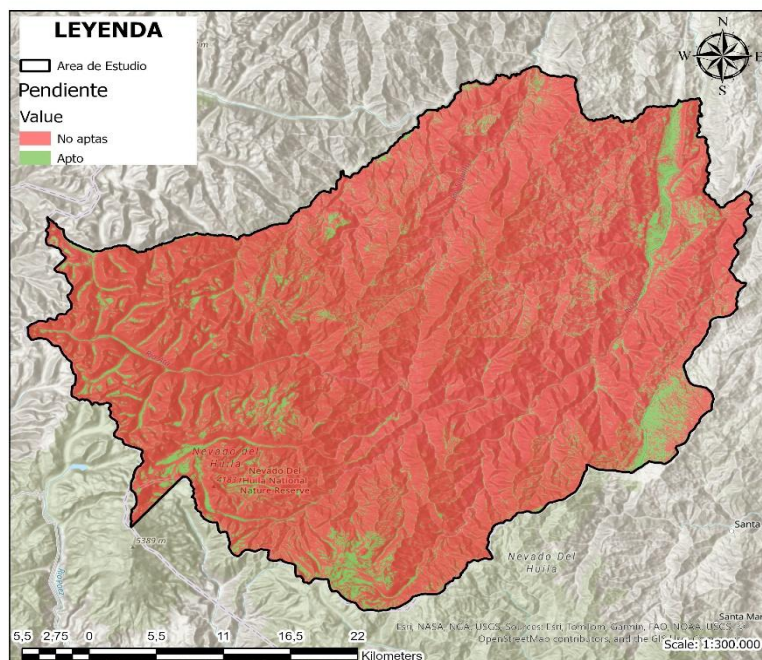
*Cálculo de Áreas para el Criterio socioeconómico – Vías de acceso*

Vías de acceso		
	Área	Porcentaje
<b>No apto</b>	1036071306.71	59.07%
<b>Apto</b>	717862314.6	40.93%
<b>Total</b>	1753933621.30	100%

**Pendientes:** La topografía del terreno es crucial para elegir sitios para rellenos sanitarios, ya que aquellos con pendientes extremadamente pronunciadas harán que sea costoso excavar, modificar y estabilizar el terreno. Con base en este análisis, se determinó que los rangos de pendientes (3% a 25%) son altamente adecuados, proporcionando las condiciones más favorables para implementar y operar el proyecto de manera segura.

Los resultados indicaron que el 86.52% de la superficie (1,517,554,661.67 m<sup>2</sup>) no es adecuada debido a la pendiente, fuera del rango, y solo el 13.47% (236,328,931.89 m<sup>2</sup>) es adecuado. La Figura 10 representa la distribución espacial de las pendientes en el municipio de Planadas, mostrando un alto gradiente de áreas con pendientes pronunciadas.

**Figura 10**  
*Mapa de Pendientes*



**PENDIENTES**

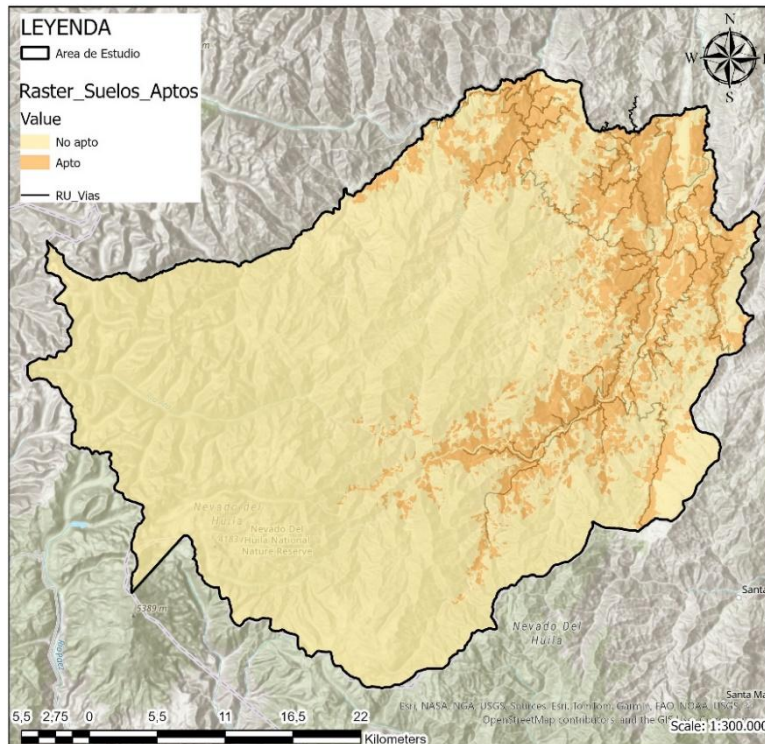
<p>LOCALIZACIÓN DE UN RELLENO SANITARIO EN EL MUNICIPIO DE PLANADAS -TOLIMA, APLICANDO TÉCNICAS MULTICRITERIO Y USO DE HERRAMIENTA GEOINFORMATICAS</p>	<p>Especialización En Sistemas De Información Geográfica</p> <p>Angela del Pilar Buitrago Monroy Yuber Andres Torres Rojas</p> <p>Manizales 2025</p>	<p>Spatial Reference Name: MAGNA-SIRGAS 2018 Origen- Nacional Datum: Marco Geocentrico Nacional de Referencia 2018 Projection: Transverse Mercator Central Meridian: -73,0000 Longitude of Origin: 0,0000 False Easting: 5,000,000,0000 False Northing: 2,000,000,0000 Scale Factor: 0,9992 Azimuth: 0,0000 Mag Units: Meter Authority: EPSG WKID: 9377</p>	
--	--	---	--

**Tabla 16**  
*Cálculo de Áreas para el Criterio físico Pendientes*

Pendiente		
	Área	Porcentaje
<b>No apto</b>	1517554661.67	86.52%
<b>Apto</b>	236328931.89	13.47%
<b>Total</b>	1753883593.57	100%

**Usos del suelo:** En el análisis de usos del suelo se identificaron zonas de exclusión con base en criterios ambientales y de seguridad. Las áreas temáticamente inadecuadas fueron aquellas etiquetadas como de alta amenaza debido a la tala rasa, para el suministro de agua y la protección ambiental. Los hallazgos indicaron que el 82.45% de la tierra (1,446.15 km<sup>2</sup>) es inadecuada y solo

**Figura 11**  
*Mapa de zonas de exclusión por uso del suelo*



**USOS DEL SUELOS**

LOCALIZACIÓN DE UN RELLENO SANITARIO EN EL MUNICIPIO DE PLANADAS -TOLIMA, APLICANDO TÉCNICAS MULTICRITERIO Y USO DE HERRAMIENTA GEOINFORMATICAS

Especialización En Sistemas De Información Geográfica  
Angela del Pilar Buitrago Monroy  
Yuber Andres Torres Rojas

Manizales  
2025

Spatial Reference  
Name: MAGNA-SIRGAS 2018 Origen-Nacional  
Datum: Marco Geocentrico Nacional de Referencia 2018  
Projection: Transverse Mercator  
Central Meridian: -73,0000  
Latitude of Origin: 4,0000  
Longitude of Origin: 0,0000  
False Easting: 5,000,000,0000  
False Northing: 2,000,000,0000  
Scale Factor: 0,9992  
Azimuth: 0,0000  
Map Units: Meter  
Authority: EPSG  
WKID: 9377



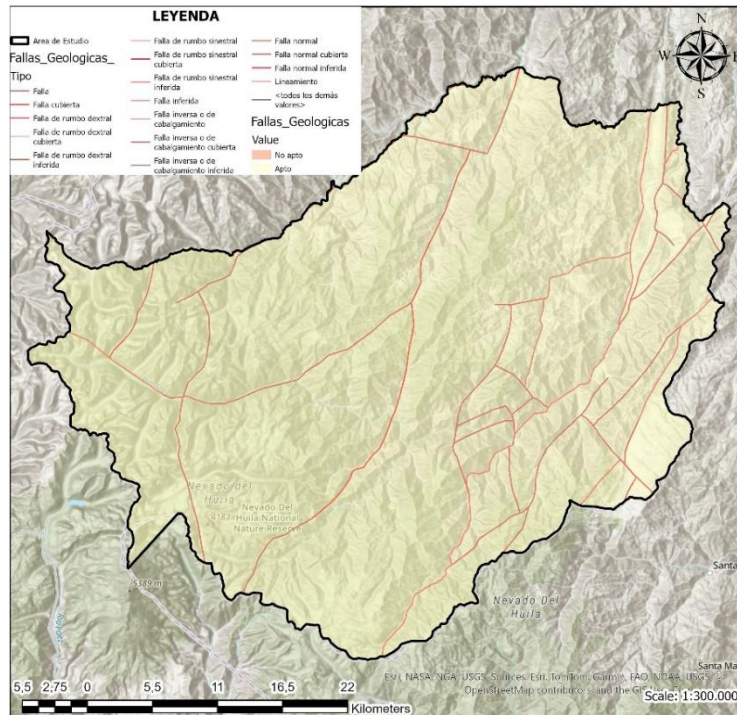
**Tabla 17**

*Cálculo de Áreas para el Criterio Físico – Suelos*

<b>Suelos Aptos</b>		
	Área	Porcentaje
<b>No apto</b>	1446158647.37	82.45%
<b>Apto</b>	307779044.6	17.55%
<b>Total</b>	1753937691.98	100%

**Geología:** En el análisis geológico se consideraron las fallas existentes en el municipio de Planadas, estableciendo un área de influencia de sesenta (60) metros a cada lado de la traza con el fin de mitigar los riesgos asociados a la actividad sísmica y a la inestabilidad del terreno. Los resultados muestran que, del área total de estudio (1.753,93 km<sup>2</sup>), el 97,43 % (1.708,92 km<sup>2</sup>) se clasificó como apto para la localización del relleno sanitario, mientras que únicamente el 2,57 % (45,01 km<sup>2</sup>) fue catalogado como no apto por encontrarse dentro del rango de influencia de fallas geológicas (Tabla 18; Figura 12). Esto evidencia que la mayor parte del territorio municipal no presenta restricciones geológicas significativas para el emplazamiento de la infraestructura.

**Figura 12**  
*Mapa de fallas Geológicas*



**FALLAS GEOLÓGICAS**

LOCALIZACIÓN DE UN  
RELLENO SANITARIO EN  
EL MUNICIPIO DE  
PLANADAS -TOLIMA,  
APLICANDO TÉCNICAS  
MULTICRITERIO Y USO DE  
HERRAMIENTA  
GEOINFORMÁTICAS

Especialización En Sistemas De  
Información Geográfica  
Angela del Pilar Buitrago Monroy  
Yuber Andres Torres Rojas

Manizales  
2025

Spatial Reference  
Name: MAGNA-SIRGAS 2018 Origen-  
Nacional  
Datum: Marco Geocéntrico Nacional de  
Referencia 2018  
Projection: Transverse Mercator  
Central Meridian: -73,0000  
Latitude of Origin: 4,00000  
Longitude of Origin: 0,00000  
False Easting: 5,000,000,0000  
False Northing: 2,000,000,0000  
Scale Factor: 0,9992  
Azimuth: 0,00000  
Map Units: Meter  
Authority: EPSG  
WKID: 9377

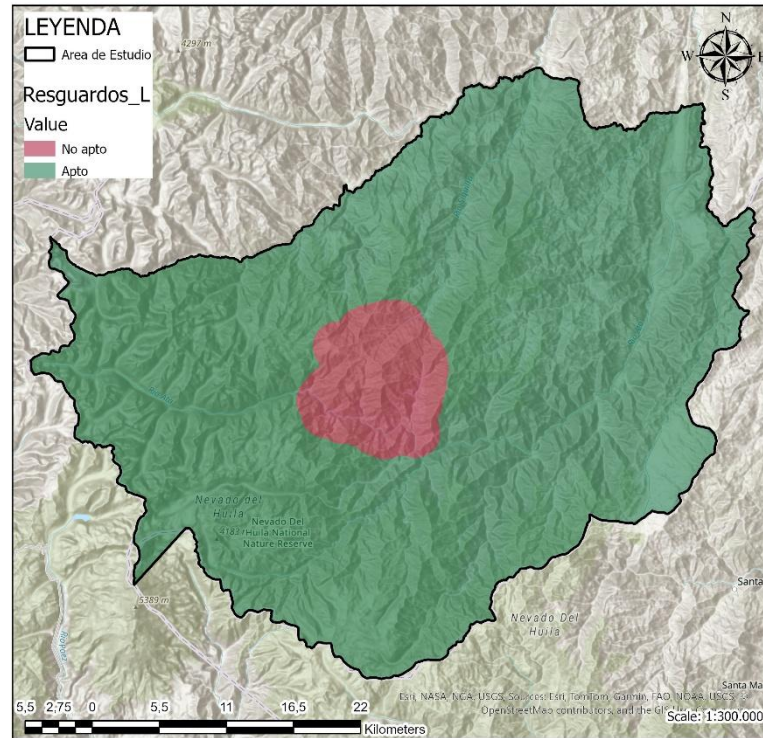


**Tabla 18**  
*Cálculo de Áreas para el Criterio físico – Geología*

Falla geológica		
	Área	Porcentaje
<b>No apto</b>	45010177.76	2.57%
<b>Apto</b>	1708923443.54	97.43%
<b>Total</b>	1753933621.30	100%

**Zonas de Resguardo Formalizado:** Se realizó una franja de exclusión de 2 km alrededor de las reservas indígenas formalizadas. Los hallazgos indican que el 92.91% del territorio (1,629.59 km<sup>2</sup>) es adecuado, y que solo el 7.09% (124.36 km<sup>2</sup>) está representado por zonas de exclusión (Tabla 19; Figura 13).

**Figura 13**  
*Mapa de zonas de resguardo Formalizado*



**RESGUARDO FORMALIZADO**

LOCALIZACIÓN DE UN RELLENO SANITARIO EN EL MUNICIPIO DE PLANADAS -TOLIMA, APLICANDO TÉCNICAS MULTICRITERIO Y USO DE HERRAMIENTA GEOINFORMATICAS

Especialización En Sistemas De Información Geográfica

Angela del Pilar Buitrago Monroy  
 Yuber Andres Torres Rojas

Manizales  
 2025

Spatial Reference  
 Name: MAGNA-SIRGAS 2018 Origen-Nacional  
 Datum: Marco Geocentrico Nacional de Referencia 2018  
 Projection: Transverse Mercator  
 Central Meridian: -73,0000  
 Latitude of Origin: 4,0000  
 Longitude of Origin: 0,0000  
 False Easting: 5,000,000,0000  
 False Northing: 2,000,000,0000  
 Scale Factor: 0,9992  
 Azimuth: 0,0000  
 Map Units: Meter  
 Authority: EPSG  
 WKID: 9377

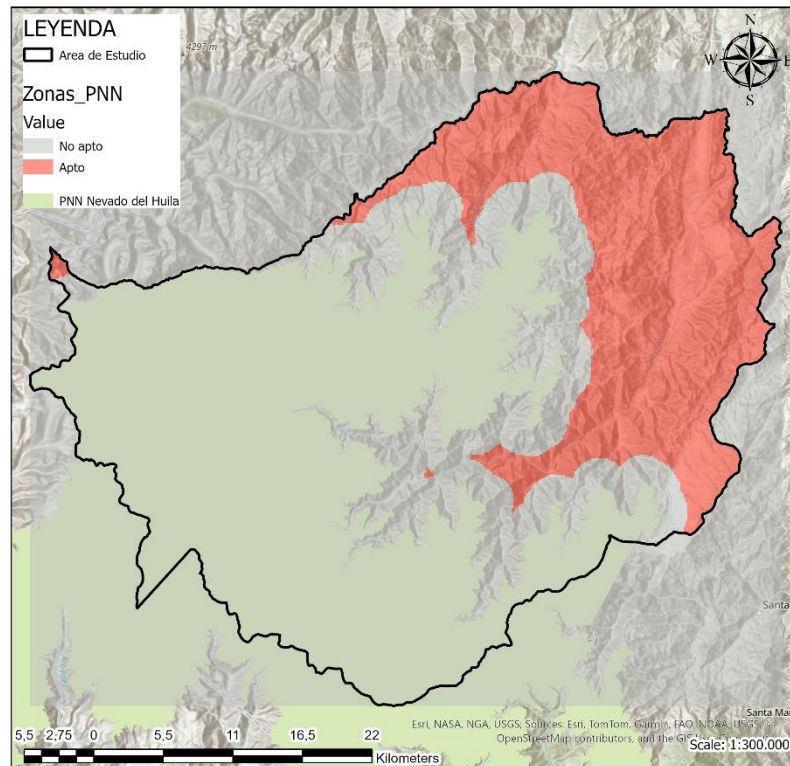


**Tabla 19**  
*Cálculo de Áreas para el Criterio ambiental – Zonas de resguardo formalizado*

Resguardos formalizados		
	Área	Porcentaje
<b>No apto</b>	124369588.81	7.09%
<b>Apto</b>	1629594456	92.91%
<b>Total</b>	1753964044.66	100%

**Áreas Protegidas – PNN:** Se impuso una zona de exclusión de 2 km alrededor del parque nacional natural Nevado del Huila. Según los resultados, el área que es útil para la disposición de edificios es solo el 27.77% del área total (487.15 km<sup>2</sup>), mientras que el área que no es adecuada para la disposición de edificios es de 1,266.77 km<sup>2</sup> o el 72.23% (Tabla 20; Figura 12).

**Figura 14**  
*Mapa Parques Nacionales Naturales*



**PARQUES NACIONALES NATURALES**

LOCALIZACIÓN DE UN  
RELLENO SANITARIO EN  
EL MUNICIPIO DE  
PLANADAS -TOLIMA,  
APLICANDO TÉCNICAS  
MULTICRITERIO Y USO DE  
HERRAMIENTA  
GEOINFORMATICAS

Especialización En Sistemas De  
Información Geográfica  
Angela del Pilar Buitrago Monroy  
Yuber Andres Torres Rojas  
Manizales  
2025

Spatial Reference  
Name: MAGNA-SIRGAS 2018 Origen-  
Nacional  
Datum: Marco Geocéntrico Nacional de  
Referencia 2018  
Projection: Transverse Mercator  
Central Meridian: -73,0000  
Latitude of Origin: 4,0000  
Longitude of Origin: 0,0000  
False Easting: 5,000,000,0000  
False Northing: 2,000,000,0000  
Scale Factor: 0,9992  
Azimuth: 0,0000  
Map Units: Meter  
Authority: EPSG  
WKID: 9377



**Tabla 20**  
*Cálculo de Áreas para el Criterio ambiental – Áreas Protegidas*

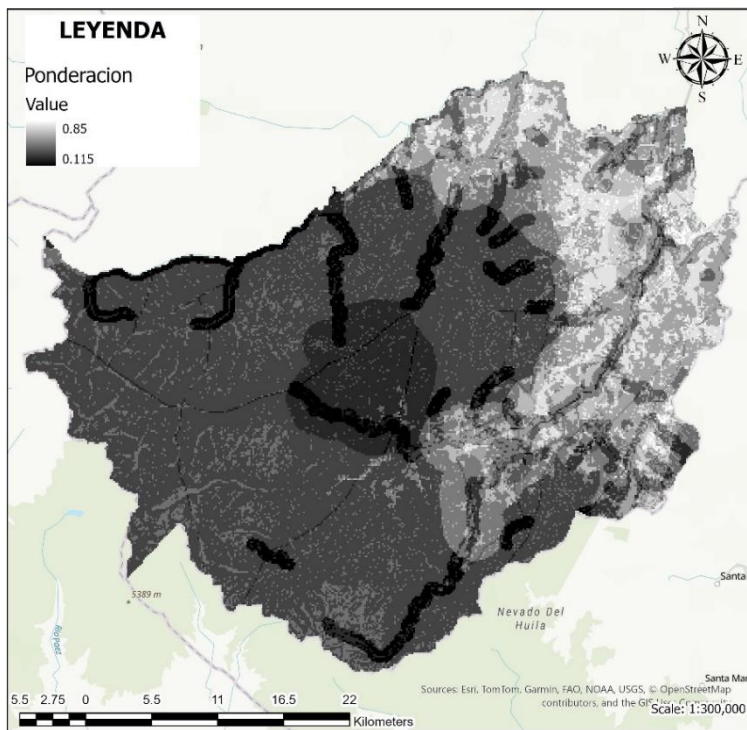
	PNN	
	Área	Porcentaje
<b>No apto</b>	1266778721.25	72.23%
<b>Apto</b>	487154900.1	27.77%
<b>Total</b>	1753933621.30	100%

En resumen, la ponderación de criterios y subcriterios mediante la adopción de la técnica AHP permitió la generación de una clara jerarquía de clasificación de importancia relativa, siendo las variables independientes ambientales y físicas del lugar del vertedero las más importantes

(atributos), mientras que los atributos sociales y técnicos ocuparon el segundo nivel. Esta clasificación formó la base para el siguiente análisis espacial, donde esas ponderaciones se incorporaron dentro de la herramienta de superposición ponderada del SIG.

Así, los valores del vector de prioridad se representaron en capas temáticas transformadas (normalizadas y reclasificadas) e integradas para crear mapas de idoneidad territorial. Los resultados cartográficos expresan la interacción de las limitaciones regulatorias y ambientales, las restricciones físicas y los entornos socioeconómicos y técnicos, y hacen posible identificar zonas adecuadas y óptimas basadas en los requisitos impuestos.

**Figura 15**  
*Mapa Ponderación de resultados*



**PONDERACIÓN**

LOCALIZACIÓN DE UN RELLENO SANITARIO EN EL MUNICIPIO DE PLANADAS -TOLIMA, APLICANDO TÉCNICAS MULTICRITERIO Y USO DE HERRAMIENTA GEOINFORMÁTICAS

Especialización En Sistemas De Información Geográfica

Angela del Pilar Buitrago Monroy  
Yuber Andres Torres Rojas

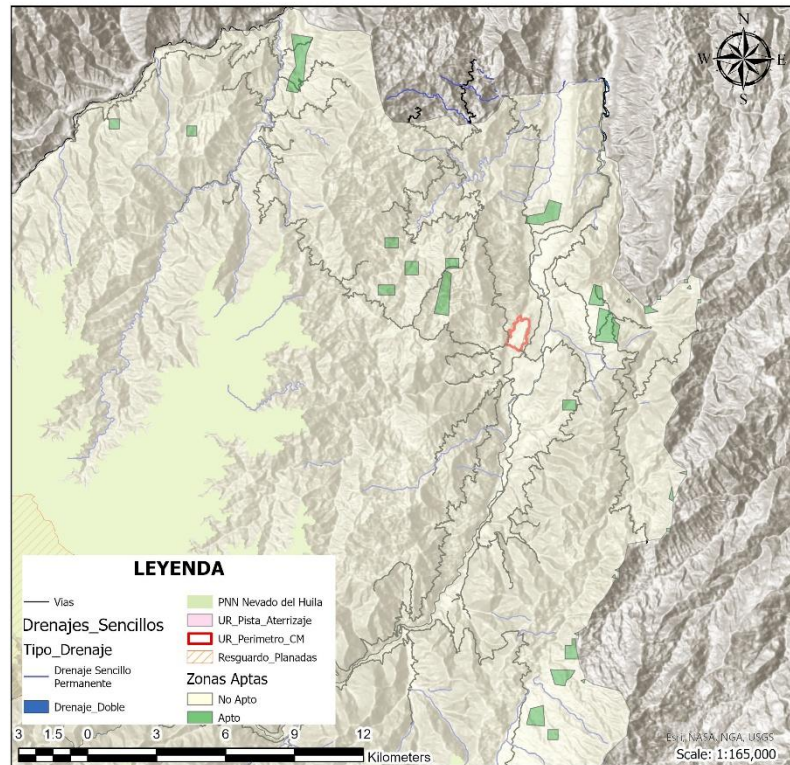
Manizales  
2025

Spatial Reference  
Name: MAGNA-SIRGAS 2018 Origen-Nacional  
Datum: Marco Geocentrico Nacional de Referencia 2018  
Projection: Transverse Mercator  
Central Meridian: -73.0000  
Latitude of Origin: 4.0000  
Longitude of Origin: 0.0000  
False Easting: 5,000,000.0000  
False Northing: 2,000,000.0000  
Scale Factor: 0.9992  
Azimuth: 0.0000  
Map Units: Meter  
Authority: EPSG  
WKID: 9377



En la Figura 16 se muestran las zonas aptas que cumplieron con los criterios anteriormente expuestos, generando un total de 29 polígonos. A estos polígonos se les aplicó una clasificación de áreas para determinar aquellas zonas óptimas en las que se podría llevar a cabo el proyecto.

**Figura 16**  
*Mapa de zonas Aptas*



**ZONAS APTAS**

<p>LOCALIZACIÓN DE UN RELLENO SANITARIO EN EL MUNICIPIO DE PLANADAS -TOLIMA, APLICANDO TÉCNICAS MULTICRITERIO Y USO DE HERRAMIENTA GEOINFORMÁTICAS</p>	<p>Especialización En Sistemas De Información Geográfica</p> <p>Angela del Pilar Buitrago Monroy Yuber Andres Torres Rojas</p> <p>Manizales 2025</p>	<p>Spatial Reference Name: MAGNA-SIRGAS 2018 Origen: Nacional Datum: Marco Geocentrico Nacional de Referencia 2018 Projection: Transverse Mercator Central Meridian: -73.0000 Latitude of Origin: 4.0000 Longitude of Origin: 0.0000 False Easting: 5,000,000.0000 False Northing: 2,000,000.0000 Scale Factor: 0.9992 Azimuth: 0.0000 Map Units: Meter Authority: EPSG WKID: 9377</p>	
--	--	--	--

**Tabla 21**  
*Resumen de Zonas aptas y de exclusión*

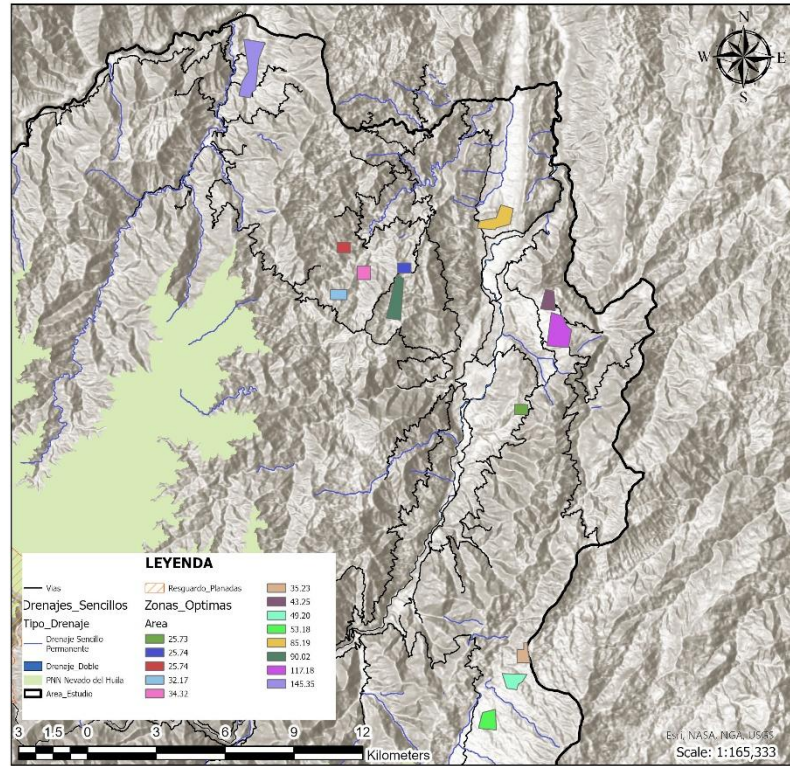
Categoría de Área	No. de polígonos	Área mínima (ha)	Área máxima (ha)	Área total (ha)
Pequeños (<20 ha)	16	1.37325	19.309337	95.994902
Medianos (20–100 ha)	11	25.734342	90.015829	499.771511
Grandes (100–300 ha)	2	25.737292	117.184646	262.533188
<b>Total Aptos</b>	<b>29</b>	–	–	<b>858.299601</b>
<b>No Apto</b>	<b>1</b>	–	–	<b>174417.167</b>

Tal como se muestra en la Tabla 21, la mayor proporción corresponde a polígonos de tamaño *pequeño* (<20 ha), con dieciséis (16) registros que en conjunto representan 95.99 ha. Aunque son numerosos, estos polígonos presentan una extensión limitada, lo que restringe su viabilidad para proyectos de disposición final de largo plazo. La categoría de *medianos* (20–100 ha) agrupa once (11) polígonos que suman un total de 499.77 ha, constituyendo la categoría más representativa en términos de área total. Por su parte, únicamente dos polígonos se clasificaron como *grandes* (100–300 ha), con un área acumulada de 262.53 ha, lo cual evidencia la escasez de superficies amplias y continuas que cumplan con los criterios de aptitud definidos.

En total, las áreas *aptas* abarcan aproximadamente 858.30 ha, frente a 174,417.17 ha clasificadas como no *aptas*. Este contraste confirma que, aunque existen alternativas viables, la disponibilidad espacial efectiva es reducida en relación con la extensión total del municipio, por lo que la selección final debe centrarse en aquellas zonas que superen los requerimientos mínimos de superficie y garanticen las condiciones técnicas, ambientales y sociales necesarias para el emplazamiento de un relleno sanitario sostenible.

Del análisis de las áreas calculadas y, considerando la capacidad proyectada del relleno sanitario para un periodo de treinta (30) años, se identificaron como *óptimas* aquellas zonas cuya extensión superaba las 23,5 ha. Bajo este criterio se delimitaron trece (13) polígonos aptos, con áreas que oscilan entre 25,73 ha y 145,34 ha, tal como se observa en la Figura 17. Estas zonas constituyen las alternativas más viables para la localización del relleno sanitario en el municipio de Planadas, al integrar los factores ambientales, sociales, físicos y técnicos definidos en el proceso multicriterio.

**Figura 17**  
*Mapa de Zonas Optimas de Localización de Relleno Sanitario*



**ZONAS APTAS**

LOCALIZACIÓN DE UN  
 RELLENO SANITARIO EN  
 EL MUNICIPIO DE  
 PLANADAS -TOLIMA,  
 APLICANDO TÉCNICAS  
 MULTICRITERIO Y USO DE  
 HERRAMIENTA  
 GEOINFORMÁTICAS

Especialización En Sistemas De  
 Información Geográfica  
 Angela del Pilar Buitrago Monroy  
 Yuber Andres Torres Rojas

Manizales  
 2025

Spatial Reference  
 Name: MAGNA-SIRGAS 2018 Origen-  
 Nacional  
 Datum: Marco Geocentrico Nacional de  
 Referencia 2018  
 Projection: Transverse Mercator  
 Central Meridian: -73.00000  
 Latitude of Origin: 4.00000  
 Longitude of Origin: 0.00000  
 False Easting: 5,000,000.00000  
 False Northing: 2,000,000.00000  
 Scale Factor: 0.9992  
 Azimuth: 0.00000  
 Map Units: Meter  
 Authority: EPSG  
 WKID: 9377



**Tabla 22**  
*Listado de zonas y área de cada una.*

ZONA	ÁREA (Ha)	PREDIOS DE INCIDENCIA
<b>Zona 1</b>	25.73	5
<b>Zona 2</b>	25.74	16
<b>Zona 3</b>	25.74	10
<b>Zona 4</b>	32.17	6
<b>Zona 5</b>	34.32	13
<b>Zona 6</b>	35.23	7
<b>Zona 7</b>	43.25	9
<b>Zona 8</b>	49.2	3
<b>Zona 9</b>	53.18	5
<b>Zona 10</b>	85.19	6

ZONA	ÁREA (Ha)	PREDIOS DE INCIDENCIA
Zona 11	90.02	16
Zona 12	117.18	35
Zona 13	145.35	56

Para cada una de las 13 zonas identificadas como aptas, se presentan a continuación los predios sobre los cuales estas áreas tienen incidencia directa, listados con sus respectivos números prediales. Además, se incluye la cartografía detallada de cada polígono, con el fin de facilitar la verificación espacial del territorio involucrado.

**Tabla 23**

*Predios relacionados Zona apta 1*

Número predial Zona 1
735550001000000000200880000000
735550001000000000800660000000
735550001000000000200790000000
735550001000000000200800000000
735550001000000000211630000000

**Figura 18**  
Zona Apta 1



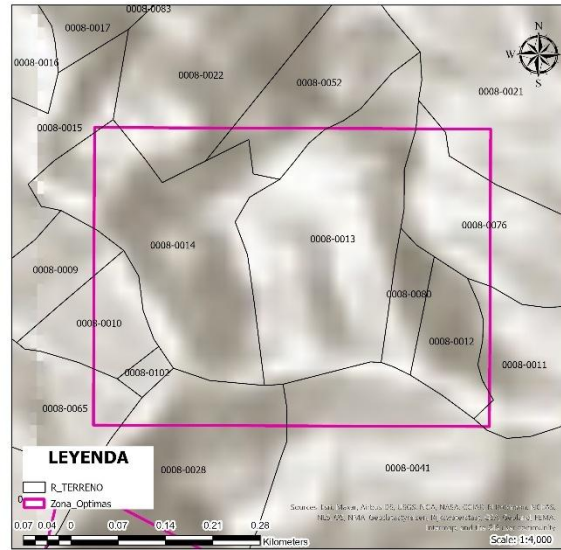
**ZONA APTA 1**

<p>LOCALIZACIÓN DE UN RELLENO SANITARIO EN EL MUNICIPIO DE PLANADAS-TOLIMA, APLICANDO TÉCNICAS MULTICRITERIO Y USO DE HERRAMIENTA GEOINFORMÁTICAS</p>	<p>Especialización En Sistemas De Información Geográfica</p> <p>Angela del Pilar Butrago Monroy Yuber Andres Torres Rojas</p> <p>Manizales 2025</p>	<p>Spatial Reference Name: MICHU-CASAPU 2018 Origin-National Datum: Plano Geocéntrico Nacional de Referencia 2018 Projection: Transverse Mercator Spher: Spheroid Latitude of Origin: 4.0000 Longitude of Origin: 0.0000 False Easting: 5,000,000.0000 False Northing: 2,000,000.0000 Scale Factor: 0.9993 Datum Shift: 0.0000 Map Units: Meter Authority: EPSG WKT: 9577</p>	
---	---	---	--

**Tabla 24**  
Predios relacionados Zona apta 2

Número predial Zona 2
735550002000000080022000000000
735550002000000080052000000000
735550002000000080013000000000
735550002000000080014000000000
735550002000000080076000000000
735550002000000080009000000000
735550002000000080012000000000
735550002000000080010000000000
735550002000000080011000000000
735550002000000080021000000000
735550002000000080015000000000
735550002000000080041000000000
735550002000000080028000000000
735550002000000080065000000000
735550002000000080080000000000
735550002000000080102000000000

**Figura 19**  
*Zona Apta 2*



**ZONA APTA 2**

LOCALIZACIÓN DE UN RELLENO SANITARIO EN EL MUNICIPIO DE PLANADAS-TOLIMA, APLICANDO TÉCNICAS MULTICRITERIO Y USO DE HERRAMIENTA GEOINFORMÁTICAS

Especialización En Sistemas De Información Geográfica

Angela del Pilar Buitrago Monroy  
Yuber Andres Torres Rojas

Manizales  
2025

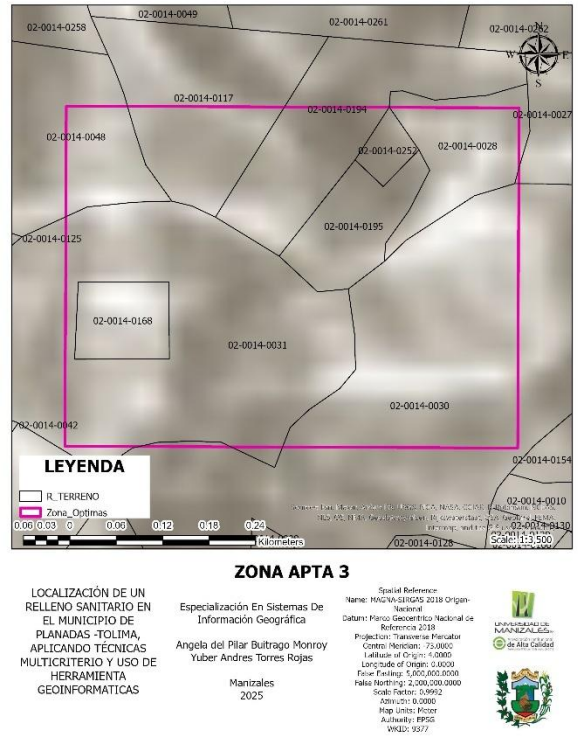
Special Reference:  
Name: WGS84/UTM/2018 Origin: National  
Datum: World Geodetic System 1984 Reference 2018  
Projection: Transverse Mercator  
Contour Interval: 75.0000  
Latitude of Origin: 4.0000  
Longitude of Origin: 0.0000  
False Easting: 500,000.0000  
False Northing: 2,000,000.0000  
Scale Factor: 0.9992  
Datum: WGS84  
Map Units: Meter  
Authority: EPSG  
WKID: 9917

UNIVERSIDAD PANAMERICANA DE ALTA CALIDAD

**Tabla 25**  
*Predios relacionados Zona apta 3*

Número predial Zona 3
735550002000000140168000000000
735550002000000140028000000000
735550002000000140195000000000
735550002000000140030000000000
735550002000000140048000000000
735550002000000140117000000000
735550002000000140194000000000
735550002000000140027000000000
735550002000000140031000000000
735550002000000140252000000000

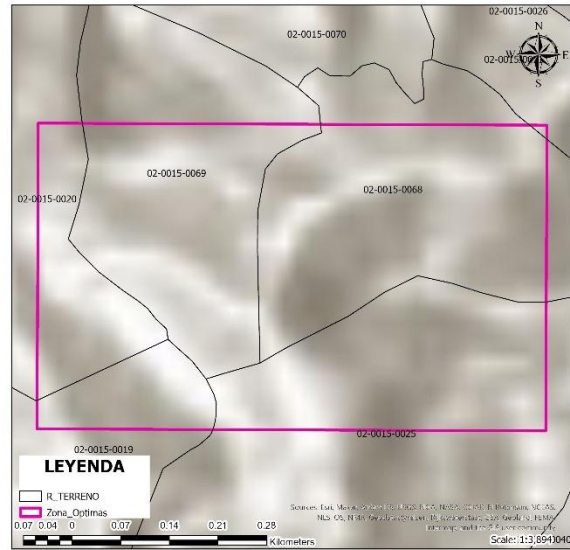
**Figura 20**  
*Zona apta 3*



**Tabla 26**  
*Predios relacionados Zona apta 4*

Número predial Zona 4
735550002000000150025000000000
735550002000000150069000000000
735550002000000150068000000000
735550002000000150071000000000
735550002000000150020000000000
735550002000000150019000000000

**Figura 21**  
*Zona Apta 4*



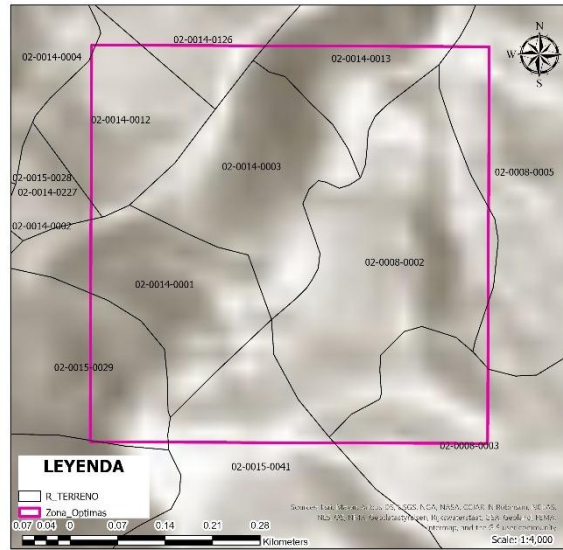
**ZONA APTA 4**

<p>LOCALIZACIÓN DE UN RELLENO SANITARIO EN EL MUNICIPIO DE PLANADAS-TOLIMA, APLICANDO TÉCNICAS MULTICRITERIO Y USO DE HERRAMIENTA GEOINFORMÁTICAS</p>	<p>Especialización En Sistemas De Información Geográfica</p> <p>Angela del Pilar Bultrago Monroy Yuber Andres Torres Rojas</p> <p>Manizales 2025</p>	<p>Special Reference: Name: WGS84/CRS: 2018 Origin: National Datum: Plano Geodésico Nacional de Referencia 2018 Projection: Transverse Mercator Contour Interval: 75.0000 Latitude of Origin: 4.0000 Longitude of Origin: 0.0000 False Easting: 5,000,000.0000 False Northing: 2,000,000.0000 Scale Factor: 0.9992 Datum: 0.0000 Map Units: Meter Authority: EPSG WKID: 9977</p>	
---	--	--	--

**Tabla 27**  
*Predios relacionados Zona apta 5*

Número predial Zona 5
735550002000000140227000000000
735550002000000140013000000000
735550002000000140004000000000
735550002000000080002000000000
735550002000000140003000000000
735550002000000140126000000000
735550002000000140012000000000
735550002000000080003000000000
735550002000000140001000000000
735550002000000150029000000000
735550002000000150031000000000
735550002000000150041000000000
735550002000000080005000000000

**Figura 22**  
*Zona Apta 5*



**ZONA APTA 5**

LOCALIZACIÓN DE UN  
RELLENO SANITARIO EN  
EL MUNICIPIO DE  
PLANADAS-TOLIMA,  
APLICANDO TÉCNICAS  
MULTICRITERIO Y USO DE  
HERRAMIENTA  
GEOINFORMÁTICAS

Especialización En Sistemas De  
Información Geográfica

Angela del Pilar Bultrago Monroy  
Yuber Andres Torres Rojas

Manizales  
2025

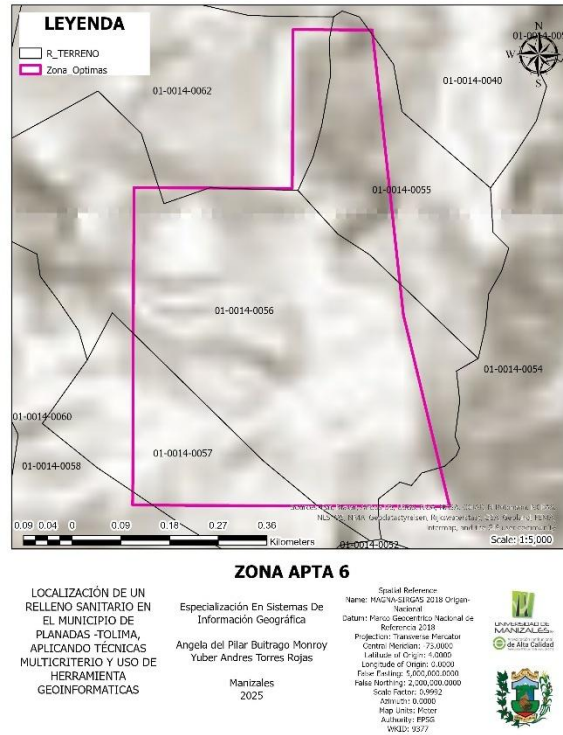
Special Reference:  
Name: WACRS0182018 Origin:  
National  
Datum: Plano Geodésico Nacional de  
Referencia 2018  
Projection: Transverse Mercator  
Contour Interval: 75.0000  
Latitude of Origin: 4.0000  
Longitude of Origin: 0.0000  
False Easting: 5,000,000.0000  
False Northing: 2,000,000.0000  
Scale Factor: 0.9992  
Azimuth: 0.0000  
Units: Meter  
Authority: EPSG  
WKT: PROJCS



**Tabla 28**  
*Predios relacionados Zona apta 6*

Número predial Zona 6
735550001000000140054000000000
735550001000000140057000000000
735550001000000140058000000000
735550001000000140056000000000
73555000100000014004000000000
735550001000000140055000000000
73555000100000014006200000000

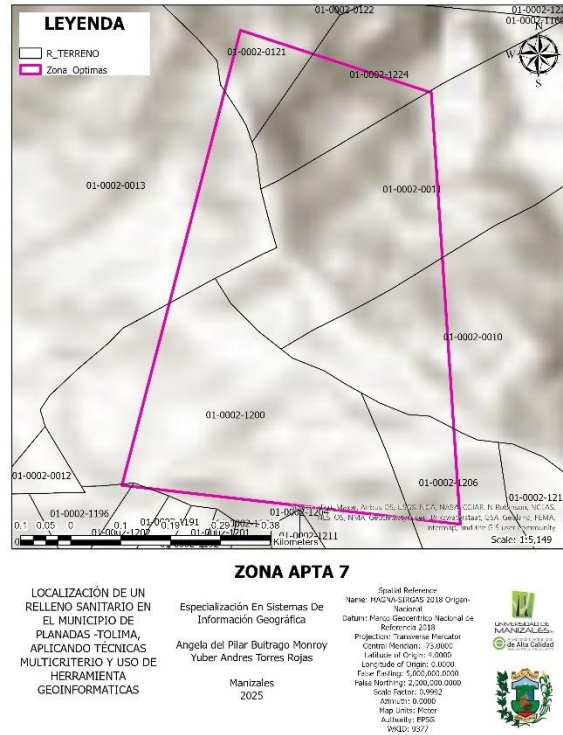
**Figura 23**  
*Zona Apta 6*



**Tabla 29**  
*Predios relacionados Zona apta 7*

Número predial Zona 7
735550001000000021224000000000
735550001000000021206000000000
735550001000000021200000000000
735550001000000020011000000000
735550001000000020013000000000
735550001000000020010000000000
735550001000000021202000000000
735550001000000021196000000000
735550001000000020121000000000

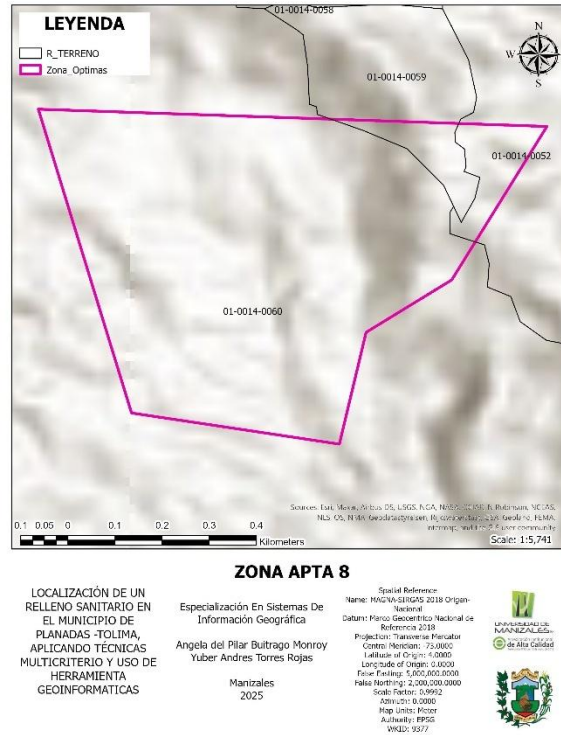
**Figura 24**  
*Zona Apta 7*



**Tabla 30**  
*Predios relacionados Zona apta 8*

Número predial Zona 8
735550001000000140060000000000
735550001000000140052000000000
735550001000000140059000000000

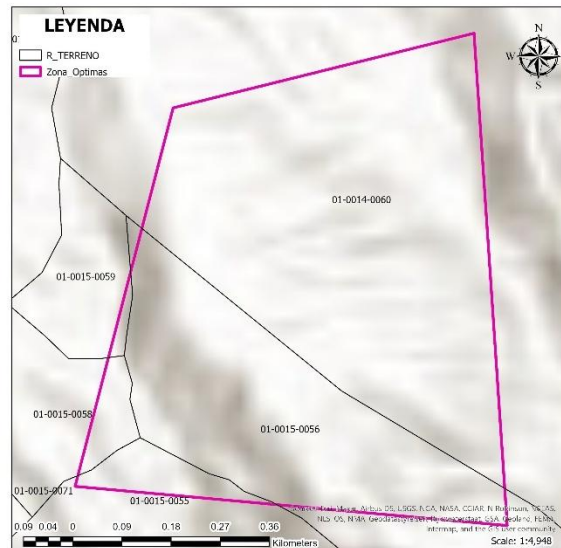
**Figura 25**  
*Zona Apta 8*



**Tabla 31**  
*Predios relacionados Zona apta 9*

Número predial Zona 9
735550001000000150055000000000
735550001000000150056000000000
735550001000000140060000000000
735550001000000150058000000000
735550001000000150059000000000

**Figura 26**  
Zona apta 9



**ZONA APTA 9**

LOCALIZACIÓN DE UN RELLENO SANITARIO EN EL MUNICIPIO DE PLANADAS -TOLIMA, APLICANDO TÉCNICAS MULTICRITERIO Y USO DE HERRAMIENTA GEOINFORMÁTICAS

Especialización En Sistemas De Información Geográfica

Angela del Pilar Buitrago Monroy  
Yuber Andres Torres Rojas

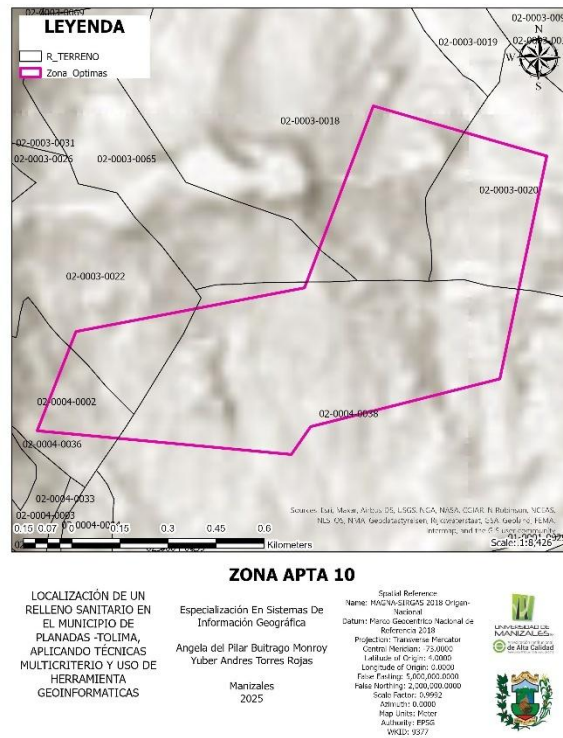
Manizales  
2025

Spatial Reference  
Name: MAGNA-SIG20 2018 Origin-Nacional  
Datum: Plano Geocéntrico Nacional de Referencia 2018  
Projection: Transverse Mercator  
Contour Interval: 75.0000  
Latitude of Origin: 4.0000  
False Easting: 5,000,000.0000  
False Northing: 2,000,000.0000  
Scale Factor: 0.9992  
Azimuth: 0.0000  
Map Units: Metro  
Authority: EPSG  
WKID: 9577

**Tabla 32**  
Predios relacionados Zona apta 10

Número predial Zona 10
735550002000000040038000000000
735550002000000030018000000000
735550002000000030065000000000
735550002000000030020000000000
735550002000000030022000000000
735550002000000040002000000000

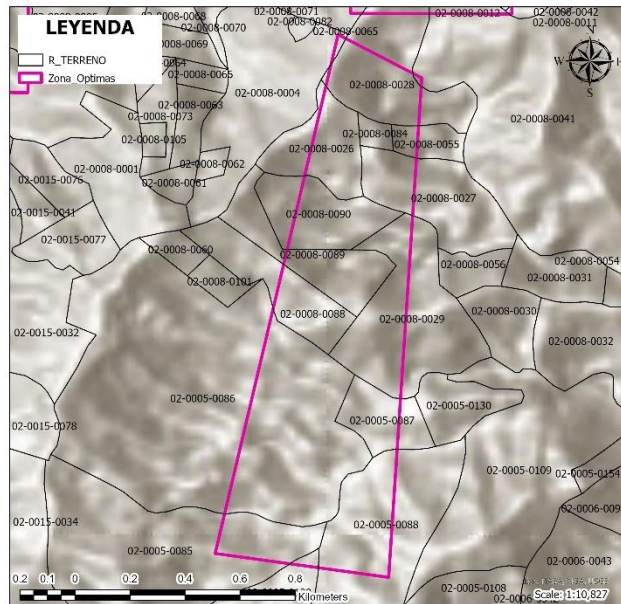
**Figura 27**  
*Zona Apta 10*



**Tabla 33**  
*Predios relacionados Zona apta 11*

Número predial Zona 11
735550002000000080029000000000
735550002000000080055000000000
735550002000000080084000000000
735550002000000080041000000000
735550002000000080028000000000
735550002000000080026000000000
735550002000000080027000000000
735550002000000080004000000000
735550002000000050129000000000
735550002000000050085000000000
735550002000000050088000000000
735550002000000050087000000000
735550002000000050086000000000
735550002000000080088000000000
735550002000000080089000000000
735550002000000080090000000000

**Figura 28**  
*Zona Apta 11*



**ZONA APTA 11**

LOCALIZACIÓN DE UN RELLENO SANITARIO EN EL MUNICIPIO DE PLANADAS -TOLIMA, APLICANDO TÉCNICAS MULTICRITERIO Y USO DE HERRAMIENTA GEOINFORMÁTICAS

Especialización En Sistemas De Información Geográfica  
Angela del Pilar Bultrago Monroy  
Yuber Andres Torres Rojas  
Manizales  
2025

Spatial Reference  
Name: IAGODM-ORIGAS 2018 Origen Nacional  
Datum: Marco Geocentrico Nacional de Referencia 2018  
Projection: Transverse Mercator  
Central Meridian: -73.0000  
Latitude of Origin: 4.0000  
Longitude of Origin: 0.0000  
False Easting: 5,000,000.0000  
False Northing: 0.000,000.0000  
Scale Factor: 0.9992  
Azimuth: 0.0000  
Map Units: Meter  
Authority: EPSG  
WKT: 'EPSG:31472'

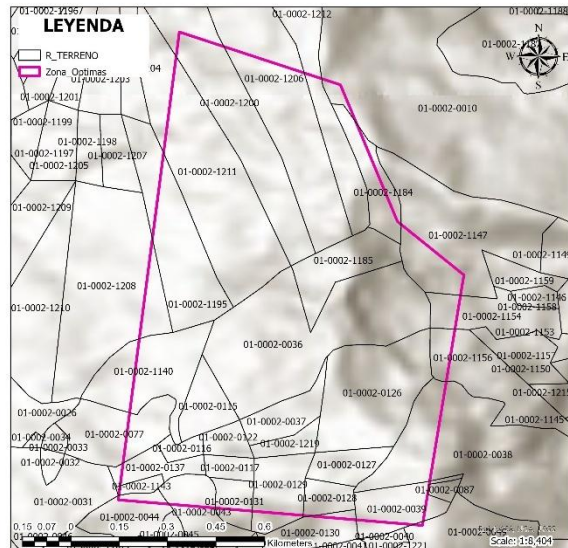


**Tabla 34**  
*Predios relacionados Zona apta 12*

Número predial Zona 12
7355500010000002121200000000
7355500010000002120600000000
7355500010000002120000000000
7355500010000002121100000000
7355500010000002119500000000
7355500010000002003900000000
7355500010000002004300000000
7355500010000002004400000000
7355500010000002012600000000
7355500010000002001000000000
7355500010000002003600000000
7355500010000002007700000000
7355500010000002003800000000
7355500010000002120800000000

Número predial Zona 12	
73555000100000002118400000000	
73555000100000002118500000000	
73555000100000002114000000000	
73555000100000002011500000000	
73555000100000002012700000000	
73555000100000002012800000000	
73555000100000002013000000000	
73555000100000002012900000000	
73555000100000002013100000000	
73555000100000002012200000000	
73555000100000002011700000000	
73555000100000002011600000000	
73555000100000002013700000000	
73555000100000002114300000000	
73555000100000002008700000000	
73555000100000002121900000000	
73555000100000002115600000000	
73555000100000002114700000000	
73555000100000002115400000000	
73555000100000002004900000000	
73555000100000002003700000000	

**Figura 29**  
Zona apta 12



**ZONA APTA 12**

LOCALIZACIÓN DE UN RELLENO SANITARIO EN EL MUNICIPIO DE PLANADAS-TOLIMA, APLICANDO TÉCNICAS MULTICRITERIO Y USO DE HERRAMIENTAS GEOINFORMÁTICAS

Especialización En Sistemas De Información Geográfica  
 Ángela del Pilar Buitrago Monroy  
 Yuber Andres Torres Rojas  
 Manizales 2025

Spatial Reference  
 Name: NAD83-UTM-18Q-10  
 Datum: North American Datum of 1983  
 Projection: Transverse Mercator  
 Contour Interval: 10000  
 Units: Meter  
 Authority: EPSG  
 WKID: 3147

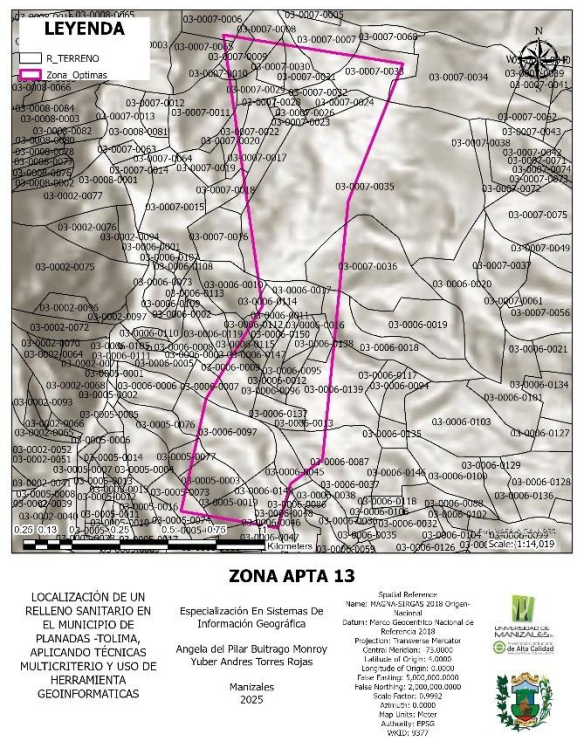
**Tabla 35**

*Predios relacionados Zona apta 13*

<b>Número predial Zona 13</b>
735550003000000070006000000000
735550003000000070008000000000
735550003000000070007000000000
735550003000000070034000000000
735550003000000070009000000000
735550003000000070031000000000
735550003000000070033000000000
735550003000000070030000000000
735550003000000070010000000000
735550003000000070029000000000
735550003000000070011000000000
735550003000000070032000000000
735550003000000070024000000000
735550003000000070035000000000
735550003000000070023000000000
735550003000000070022000000000
735550003000000070017000000000
735550003000000070020000000000
735550003000000070018000000000
735550003000000060010000000000
735550003000000060017000000000
735550003000000060018000000000
735550003000000060147000000000
735550003000000060012000000000
735550003000000060139000000000
735550003000000060016000000000
735550003000000060009000000000
735550003000000060007000000000
735550003000000050003000000000
735550003000000050073000000000
735550003000000060097000000000
735550003000000060045000000000
735550003000000070065000000000
735550003000000050019000000000
735550003000000060048000000000
735550003000000070026000000000
735550003000000060143000000000
735550003000000070036000000000
735550003000000060047000000000
735550003000000050063000000000

Número predial Zona 13
735550003000000050076000000000
735550003000000050077000000000
735550003000000060013000000000
735550003000000060095000000000
735550003000000060096000000000
735550003000000060137000000000
735550003000000060138000000000
735550003000000060114000000000
735550003000000060115000000000
735550003000000070028000000000
735550003000000070027000000000
735550003000000060046000000000
735550003000000060112000000000
735550003000000060150000000000
735550003000000060011000000000
735550003000000060087000000000

**Figura 30**  
Zona Apta 13



---

La presentación de los predios relacionados con cada una de las trece (13) zonas viables, así como su representación cartográfica detallada, constituye un insumo básico para la administración del proceso de localización del relleno sanitario. El trabajo aquí presentado no solo garantiza la trazabilidad jurídica y espacial de las zonas señaladas, sino que complementa la transparencia tecnicista del proceso de análisis, en la medida en que proporciona información auténtica sobre los territorios potencialmente involucrados en fases posteriores del proyecto.

La identificación de los predios podría permitir avanzar en procesos de consulta con las comunidades, realizar análisis de impactos socioeconómicos y la verificación de condiciones de viabilidad técnica, ambiental y jurídica. En consecuencia, los predios aquí presentados trascienden el ámbito meramente descriptivo del espacio y se consolidan como la plataforma básica para entrelazar decisiones informadas y responsables, coherentes en su objetivación con los términos de planificación territorial y sostenibilidad prescritos dentro de su jurisdicción para el municipio de Planadas, Tolima.

## 8 Discusión

Los resultados mostraron que, a pesar de que una parte significativa del territorio del municipio parece cumplir con los criterios de exclusión simples, hay una disponibilidad real bastante reducida de áreas para la instalación de un relleno sanitario, teniendo en cuenta los criterios ambientales, sociales y técnicos.

Con respecto al subcriterio de *distancia a los centros urbanos*, el 94,71% del territorio municipal fue clasificado como *adecuado*. Esto muestra que no hay restricciones importantes por ubicación para el relleno sanitario de Planadas en cuanto a la proximidad de centros urbanos y asentamientos rurales. El resultado concuerda con la observación de Tavares et al. (2018), quienes afirman que, en comunidades de baja densidad poblacional, el papel de la variable de distancia a los asentamientos humanos es menos restrictivo que otras condiciones. No obstante, la literatura advierte que las percepciones de riesgo y los potenciales conflictos sociales pueden obstaculizar la aceptabilidad comunitaria, incluso en zonas técnicamente apropiadas (Chabuk et al., 2016). En consecuencia, el distanciamiento físico de la ciudad, aunque no sea neoconservador, es lo que se necesita como medida de prevención para la aceptación social.

Para los *cuerpos de agua*, los porcentajes de áreas adecuadas e inadecuadas fueron 78,62% y 21,38%, respectivamente. Esta respuesta subraya la necesidad de crear zonas de amortiguamiento para evitar la contaminación por lixiviados establecida en la legislación de Colombia (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2013). En los nuevos estudios, como los realizados por Eghtesadifard et al. (2020), una de las limitaciones clave corresponde a la fuente de agua, validando así este resultado. Además, el análisis en Planadas se realizó utilizando distancias lineales, por lo que sería de interés incluir parámetros hidrogeológicos en futuros estudios para proporcionar mejores estimaciones de la vulnerabilidad de los acuíferos y los flujos subterráneos.

El subcriterio de *acceso* indicó que el 40,93% del terreno era *adecuado* y el 59,07% restante se consideró como *inadecuado*. La accesibilidad es importante puesto que tiene un impacto directo en los costos de transporte y en el funcionamiento del relleno sanitario. Para Mussa et al. (2017),

la infraestructura física de las carreteras en geografía montañosa suele ser una de las principales restricciones, como ocurre en el caso de Planadas. Por lo tanto, aunque hay áreas ambientalmente viables, la viabilidad final requerirá la consideración de un análisis de costo/beneficio que incluya inversiones en infraestructura vial.

En cuanto a las *pendientes*, apenas el 13,47% del área se consideró *apropiada* (del 3% al 25%). Tales pendientes bajas son ventajosas ya que permiten excavar, compactar y facilitar el escurrimiento superficial, mitigando así los peligros de acumulación de lixiviados (Kontos et al., 2005; Gómez-Delgado & Barredo, 2005). Por otro lado, las pendientes pronunciadas aumentan la dificultad de construcción y la probabilidad de erosión y movimientos de masa. En Planadas, este criterio de validación surge como necesario para un análisis metodológico de la topografía con variables geológicas y de riesgo para la viabilidad técnica ambiental de las áreas propuestas.

La *zonificación* fue la variable más limitante: el 82,45% del área fue identificada como de cobertura *inadecuada* y el 17,55% de cobertura *adecuada*. Así, el hallazgo indica que las restricciones regulatorias y ambientales son las principales barreras en la asignación de sitios para rellenos sanitarios, lo cual es consistente con los resultados de Rodríguez-Merino et al. (2020). En Planadas, las exclusiones responden predominantemente a zonas de protección hídrica y áreas con alta probabilidad de remoción en masa.

El factor *geológico*, en contraste, presentó una exclusión relativamente baja (2,57% del área territorial). Sin embargo, se recomienda una investigación geotécnica exhaustiva en fases posteriores para descartar fallas menores no mapeadas que puedan afectar las condiciones intactas del suelo.

Finalmente, los límites relacionados con *tierras indígenas* representaron el 7,09% del territorio. Esto es de alta importancia cultural y social a pesar de la pequeña restricción espacial, ya que cualquier impacto dentro de esas áreas causaría conflicto entre la gobernanza e infringiría derechos colectivos. Las tierras de Morfina Hon. fueron excluidas por el Parque Nacional Natural Nevado del Huila con un 72,23%, que fue el principal confinamiento. Este resultado es consistente

con lo sugerido por Chabuk et al. (2016), quienes señalan que la presencia de áreas protegidas representa una restricción importante, especialmente en contextos de alta biodiversidad.

La *determinación de los pesos* a partir del Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) permitió definir las prioridades relativas entre los criterios que se consideraron en la localización del relleno sanitario. El vector de prioridades puso de manifiesto que los factores ambientales eran los *decisivos* (0,30), coherente con la necesidad de preservar recursos estratégicos como los cuerpos de agua, las áreas protegidas y *los* resguardos indígenas. Este énfasis está en consonancia con lo reportado en el ámbito internacional (Tavares et al., 2018; Chabuk et al., 2016), donde las variables ambientales constituyen la principal fuente de restricciones para los proyectos de disposición final de residuos.

Los *criterios físicos* presentaron un peso *intermedio* (0,25), destacando la pendiente (0,10) por ser la que afecta directamente a la estabilidad estructural y a la viabilidad técnica del relleno. La consideración del subcriterio uso del suelo/suelos con un peso ponderado de 0,1375 permitió integrar de manera consolidada la información que se tenía, compensando la falta de datos del Plan Básico de Ordenamiento Territorial - PBOT. Este ajuste metodológico refuerza la idea de que los análisis multicriterio tienen que adaptarse a las condiciones del entorno local de disponibilidad de información, sin perder rigor en la asignación de prioridades.

Con respecto a los *factores socioeconómicos*, la ponderación global (0.25) hace referencia a la obligación de la que se presenta el lugar a evaluar y que se basa en la evitación de conflictos sociales en su operación, como la operación del proyecto. La unificación de las vías de acceso y la red de servicios que se proyectaron como subcriterios y que se consolidaron en un único indicador (0.1225), relevó la importancia de la conectividad como limitante técnica en territorios con geografía complicada como ocurre en Planadas, apuntando a lo anteriormente planteado por Mussa et al. (2017) quien argumentan que la infraestructura vial es un aspecto determinante en la operación y sostenibilidad de los sistemas.

Por último, los *criterios técnicos* presentaron una ponderación global de 0.20, destacando la proyección de residuos a treinta (30) años y la sobremedida del terreno (0.05 cada uno), por lo

que su peso era menor que la de los factores ambientales, aunque su consideración debe ir unida para que el sitio propuesto cumpla con la capacidad para el relleno sanitario a largo plazo.

En términos generales, los resultados obtenidos en el presente estudio indican que la ubicación del relleno sanitario en el municipio de Planadas, Tolima, está condicionada a la superposición de factores ambientales, sociales y técnicos. Algunos como la distancia humana desde los centroides poblados y la proximidad a reservas indígenas proporcionan una gran disponibilidad del uso del suelo, mientras que otros como la presencia de parques nacionales y las carreteras son altamente limitantes. Esta interacción indica que la decisión no debe basarse en un solo criterio, sino en un análisis multicriterio con un equilibrio entre viabilidad técnica, regulación y sostenibilidad ambiental. En ese sentido, la planificación territorial debería avanzar hacia la ubicación de áreas en las que la viabilidad espacial se encuentre con el consentimiento social y el valor económico, impulsando el establecimiento de una solución sostenible

La delimitación de trece (13) zonas con áreas superiores a 23,5 ha constituye un insumo clave para el proceso de planificación, al ofrecer un conjunto de alternativas viables para la localización del relleno sanitario. Estas áreas representan en conjunto aproximadamente 742 ha, garantizando disponibilidad territorial suficiente para un horizonte de operación de treinta (30) años.

Se observa que los polígonos identificados presentan un rango de extensión diverso: desde superficies intermedias de alrededor de veinticinco (25) ha, hasta polígonos de gran tamaño que superan las ciento cuarenta y cinco (145) ha. Esta variabilidad es relevante, dado que las zonas más pequeñas pueden ser aprovechadas en escenarios de menor afectación social y paisajística, mientras que las áreas más amplias ofrecen mayores ventajas operativas, incluyendo la posibilidad de ampliación futura, la incorporación de instalaciones complementarias y una gestión más eficiente de los residuos sólidos.

La identificación de los predios vinculados a las trece (13) zonas aptas es una fase esencial en el paso del análisis espacial general a la especificación de una escala de trabajo y de gestión del territorio. Efectivamente, si bien los resultados de idoneidad se centran en la aptitud física,

ambiental y normativa, el cruce con la información catastral permite ver el impacto directo del relleno sanitario en predios específicos. Éste es un aspecto importante en tanto que implica la conexión del análisis técnico y los procesos sociales, jurídicos y de gobernanza que deben concretarse en fases posteriores.

De acuerdo con lo manifestado por Sener et al. (2011) y Rodríguez-Merino et al. (2020), la incorporación de la información predial sirve para promover la transparencia y la trazabilidad en la selección de sitios para rellenos sanitarios, ya que permite identificar a actores potencialmente involucrados y anticipar escenarios de concertación. En el caso de Planadas, el listado de predios y su cartografía constituyen materiales de trabajo previos a la consulta comunitaria y a la evaluación socioeconómica más precisa, en línea con lo que se ha observado en los estudios llevados a cabo en Nigeria (Olayinka et al., 2018) e India (Jha et al., 2011), donde la aceptación social se reconoce como un elemento tan determinante como aquellos que se refieren a las condiciones técnicas.

De esta manera, este compromiso de detalle propiciará que la planificación local contemple mecanismos de compensación, compra y negociación predial, con lo cual la ejecución del relleno sanitario estará acorde a criterios de equidad y de respeto a los derechos de propietarios y comunidades. Así pues, el cruce con la base catastral, además de ser un requisito técnico, robustecerá la viabilidad social y jurídica del proyecto o propuesta, no sólo de cara a la normativa colombiana, sino que podría variar en función del tipo de normativas y recomendaciones internacionales de gestión integral de residuos sólidos.

En resumen, la discusión de resultados hace ver que la ubicación de un relleno sanitario en Planadas, Tolima, no puede entenderse únicamente desde la perspectiva técnica y normativa sino desde un proceso integral donde el factor técnico converja con el ambiental, social, económico y jurídico. La identificación mediante la matriz ponderada de las trece zonas con aptitud mínima, junto con el análisis predial elaborado da como resultado una toma de contacto con la información respecto a las oportunidades y restricciones del territorio y, a la vez, hace ver la necesidad de articular los resultados espaciales con procesos de concertación y participación social para que el proceso de decisión sea sostenible y legitime la decisión que sea finalmente tomada. En

consecuencia, los resultados discutidos sientan las bases para formular conclusiones sólidas y derivar recomendaciones que orienten tanto la gestión local como la futura investigación en escenarios similares.

## 9 Conclusiones

El análisis de criterios y subcriterios que se ha tenido en cuenta para definir la ubicación del relleno sanitario en el municipio de Planadas, Tolima, permitió identificar las restricciones y oportunidades del territorio. Los factores limitantes, como la distancia a centros poblados (94.71% de idoneidad) y la presencia de resguardos indígenas (92.91% de idoneidad), presentaron bajas restricciones de estas alternativas. En oposición, los criterios de uso del suelo (17.55% de idoneidad), acceso vial (40.93% de idoneidad), la influencia del Parque Nacional Natural Nevado del Huila (27.77% de idoneidad) y las pendientes (15% de idoneidad) muestran más restricciones que reducen en gran medida las áreas aptas. Características similares también se encuentran en los cuerpos de agua (78.62% de idoneidad) y fallas (97.43% de idoneidad), hecho que llama la atención considerando la prevención de riesgos ambientales y geotécnicos en la etapa de planificación.

Los resultados muestran que los polígonos seleccionados están distribuidos en trece (13) regiones, las cuales cumplen al mismo tiempo con criterios ambientales, sociales, técnicos e institucionales, proporcionando viabilidad territorial a un horizonte operativo de treinta (30) años. Los sitios seleccionados varían en tamaño de veinticinco (25) a ciento cuarenta y cinco (145) hectáreas- ha, proporcionando posibilidades alternativas según el tamaño del área que ocupan. Las superficies amplias generan mayores presiones sobre los factores sociales y ambientales tales como el paisaje, aunque representan ventajas para ampliaciones futuras y mayor capacidad de carga a largo plazo. Por otro lado, las zonas de áreas pequeñas generan menores impactos en el territorio y el entorno sociocultural del municipio.

El valor de la razón de consistencia ( $RC = -0,000253$ ) confirmó que la matriz de comparación fue altamente coherente, justificando la validez de los pesos calculados y la robustez del análisis multicriterio. El vector mostró que los elementos ambientales (0.30) son más significativos, validando la importancia de estas restricciones para ubicar vertederos sanitarios según las regulaciones colombianas. También se consideraron factores físicos (0.25), socioeconómicos (0.25) y técnicos (0.20) para compensar los datos faltantes a nivel municipal, ilustrando la necesidad de ajustar estos modelos al contexto local.

---

Un aporte significativo del estudio fue el cruce de resultados con la base catastral de datos, lo que permitió identificar los predios sobre los que tienen incidencia directa cada una de las trece (13) zonas aptas. La importancia de este insumo es que mejora la trazabilidad legal y social del proceso, de modo que otros procesos de gestión territorial, procesos de negociación comunitaria o definición de mecanismos para compensación o negociación de tierras puedan lograrse. Así, el análisis se expande más allá de lo técnico, vinculando con las dimensiones de gobernanza y participación social y haciendo otras implementaciones más democráticas y transparentes.

Metodológicamente, el estudio validó la premisa de que los conceptos de SIG y multicriterio combinados resultaron ser una herramienta valiosa para la ubicación de instalaciones de disposición de residuos sólidos en municipios sensibles al medio ambiente y con carencia de información, como Planadas, Tolima. Además, el modelo propuesto puede servir como referencia replicable en otros municipios de Colombia donde no existe disponibilidad cartográfica y las soluciones técnicas sostenibles se consideran estratégicas.

## 10 Recomendaciones

A partir del trabajo realizado, se sugiere la realización de visitas de rectificación técnica a las trece (13) zonas propuestas como sitios potenciales para verificar los aspectos sociales, ambientales y la calidad del suelo a partir del análisis SIG. Este monitoreo debería ir acompañado de estudios geotécnicos, hidrogeológicos y socioeconómicos que prueben que la construcción en cuestión es viable.

Los modelos deben construirse teniendo en cuenta variables como la dinámica poblacional, la economía y la migración, para que puedan utilizarse en la actualización de los escenarios de planificación desarrollados para períodos de tiempo superiores a treinta (30) años considerados en este trabajo. Además, se requieren investigaciones detalladas de acuíferos y de vulnerabilidad de las aguas subterráneas para complementar el análisis utilizando distancias lineales a cuerpos de agua, con el fin de describir con mayor precisión el riesgo de lixiviados.

Es necesario abordar la percepción social y la aceptación de la comunidad para que esta ayude a reforzar los mecanismos de participación pública y contribuya al aumento de la aceptabilidad del proyecto.

Implementar y probar la metodología de la modelo multicriterio propuesta para Planadas, Tolima, en otras localidades con condiciones geográficas comparables y regulación de uso - permitiendo ciertos ajustes en lo que respecta a algunos datos espaciales. Esto mejoraría la herramienta, permitiría interpretarla en contexto y establecerla como un marco de referencia regional para la ubicación de infraestructuras ambientales.

### Referencias

- Alba-Patiño, J., Martínez-Hernández, A., & Mota, D. (2021). Aplicación de SIG y técnicas multicriterio en la localización de rellenos sanitarios en Colombia. *Revista Colombiana de Geografía*, 30(2), 45–62.
- Asefa, B., & Mindahun, W. (2021). Landfill site selection using GIS-based multicriteria decision analysis: A case of Debre Markos Town, Ethiopia. *Journal of Environment and Earth Science*, 9(2), 1–8. <https://doi.org/10.7176/JEES/10-8-03>
- Bedoya, L. (2023). Aprovechamiento energético de biogás en rellenos sanitarios colombianos. *Ingeniería y Región*, 21(1), 89–104.
- Bello Florián, H., & Vásquez Borcia, E. (2023). Aplicación del método AHP para la localización de rellenos sanitarios mediante SIG en Colombia. *Revista de Geografía y Ordenamiento Territorial*, 16(2), 45–62.
- Caicedo Calderón, J., & Ladino García, A. (2024). Modelación multicriterio en QGIS para la localización de rellenos sanitarios en el Tolima. *Revista Colombiana de Geomática*, 12(1), 77–95.
- Chabuk, A., Al-Ansari, N., Hussain, H., Knutsson, S., & Pusch, R. (2016). Landfill site selection using GIS and AHP: A case study in Iraq. *Waste Management & Research*, 34(5), 427–437. <https://doi.org/10.1177/0734242X16633776>
- Chusden Delgado, M. (2022). Determinación de áreas aptas para disposición final de residuos sólidos mediante análisis multicriterio en ArcGIS. *Revista Ingeniería y Desarrollo*, 40(3), 113–128.
- Congreso de Colombia. (1993). *Ley 99 de 1993. Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el sector público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones*. Diario Oficial No. 41.146.
- Eghthesadifard, M., Afkhami, P., & Afsordegan, A. (2020). Landfill site selection using a hybrid model of fuzzy logic and multi-criteria decision analysis (MCDA). *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(1), 1–17. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7992-4>
- Flores, J. (2022). Gestión ambiental y disposición final de residuos sólidos urbanos. *Revista Ingeniería Ambiental*, 19(2), 45–60. \*

- Garay, J., & Jiménez, F. (2024). Los sistemas de información geográfica en la planificación ambiental. *Revista Colombiana de Tecnología Ambiental*, 14(1), 33–52.
- Gobierno de Colombia. (1974). *Decreto 2811 de 1974. Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente*. Diario Oficial No. 34.243.
- Gómez-Delgado, M., & Barredo, J. I. (2005). *Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio*. Pearson Educación.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.ª ed.). McGraw-Hill.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación – ICONTEC. (2015). *NTC 5890. Residuos sólidos. Métodos de ensayo para caracterización*. ICONTEC.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación – ICONTEC. (2021). *NTC 1916. Rellenos sanitarios. Requisitos*. ICONTEC.
- International Solid Waste Association – ISWA. (2015). *Global Waste Management Outlook*. United Nations Environment Programme (UNEP).
- Jha, M. K., Sreekrishnan, T. R., Sharma, C., & Singh, A. (2011). Sustainable municipal solid waste management in low-income countries. *Waste Management*, 31(6), 1147–1153. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.11.013>
- Jiménez Reyes, R. (2019). Propuesta para la ubicación de un relleno sanitario mediante el uso de herramientas de SIG en el municipio de Zitácuaro, Michoacán [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de México]. Facultad de Planeación Urbana y Regional.
- Kontos, T. D., Komilis, D. P., & Halvadakis, C. P. (2005). Siting MSW landfills on Lesvos Island with a GIS-based methodology. *Waste Management & Research*, 23(2), 119–131. <https://doi.org/10.1177/0734242X0302100307>
- Leal Rubiano, J. (2021). *Gestión ambiental y disposición final de residuos sólidos urbanos*. Bogotá: Ecoe Ediciones.
- Medina, F. (2024). SIG y multicriterio en municipios rurales colombianos: retos y oportunidades. *Revista de Estudios Ambientales*, 15(1), 65–80.
- Medina, J. A. (2024). Planificación de la disposición final de residuos sólidos en municipios rurales: un enfoque adaptativo con SIG. *Revista Colombiana de Geografía*, 33(1), 55–72. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v33n1.105432>

- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2013). *Resolución 1541 de 2013, por la cual se establecen disposiciones relacionadas con el uso de aguas superficiales y subterráneas*. Diario Oficial de Colombia.
- Ministerio de Ambiente. (1996). *Decreto 605 de 1996. Por el cual se reglamenta parcialmente el Título F del RAS sobre rellenos sanitarios*. Diario Oficial No. 42.792.
- Ministerio de Ambiente. (2000). *Resolución 1096 de 2000. Por la cual se establecen estándares de calidad ambiental para disposición de residuos sólidos en rellenos sanitarios*. Diario Oficial No. 44.149.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2000). *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS 2000. Título F: Disposición final de residuos sólidos*.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2014). *Resolución 754 de 2014. Por la cual se adopta la metodología para la formulación, implementación, evaluación, seguimiento, control y actualización de los Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos – PGIRS*.
- Moeinaddini, M., Khorasani, N., Danehkar, A., Darvishsefat, A. A., & Zienalyan, M. (2010). Siting MSW landfill using weighted linear combination and analytical hierarchy process (AHP) methodology in GIS environment: case study of Karaj, Iran. *Journal of Environmental Management*, 91(12), 2347-2356.
- Municipio de Planadas. (2021). *Plan Básico de Ordenamiento Territorial 2021–2035*. Alcaldía de Planadas.
- Muñoz, B., & Romana, M. G. (2016). Aplicación de métodos de decisión multicriterio discretos al análisis de alternativas en estudios informativos de infraestructuras de transporte. *Pensamiento Matemático*, 6(2), 27–46.
- Muñoz, J. (2016). Aplicación del AHP en la planificación territorial de rellenos sanitarios en Colombia. *Revista Ingeniería y Desarrollo*, 34(2), 101–118.
- Ojeda Pinzón, C., & Báez Camacho, A. (2023). *Gestión integral de residuos sólidos en Colombia: retos normativos y técnicos*. Universidad del Rosario.
- Olayinka, O. O., Abiodun, O. I., & Funmi, F. (2018). GIS-based multicriteria analysis for landfill site selection in Lagos, Nigeria. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(9), 530. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6922-2>
- Rivas, J. (2023). Accesibilidad y transporte en la localización de infraestructuras ambientales. *Revista Latinoamericana de Ingeniería*, 12(1), 55–73.

- Rodríguez-Merino, A., Vargas-Sanabria, D., & Araya, F. (2020). Integración de análisis multicriterio y SIG para la selección de sitios de disposición final de residuos sólidos en Costa Rica. *Revista Tecnología en Marcha*, 33(2), 79–94. <https://doi.org/10.18845/tm.v33i2.5026>
- Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process*. McGraw-Hill.
- Salgado García, M., Pérez, H., & Torres, F. (2020). Población y gestión ambiental en municipios rurales. *Revista Sociedad y Territorio*, 10(2), 201–220.
- Santos, R., Oliveira, P., & Silva, L. (2020). Aplicación de técnicas multicriterio para la localización de rellenos sanitarios con apoyo SIG: revisión y estudio de caso. *Revista Internacional de Ingeniería Ambiental*, 27(3), 145–160.
- Şener, Ş., Şener, E., & Karagüzel, R. (2011). Solid waste disposal site selection with GIS and AHP methodology: A case study in Senirkent–Uluborlu (Isparta, Turkey). *Environmental Monitoring and Assessment*, 173(1–4), 533–554. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1403-x>
- Sisay, G., Gebre, S. L., & Getahun, K. (2025). GIS-based potential landfill site selection using MCDM-AHP modeling of Gondar Town, Ethiopia. *African Geographical Review*, 40(2), 105–124. <https://doi.org/10.1080/19376812.2020.1770105>
- Sumathi, V. R., Natesan, U., & Sarkar, C. (2008). GIS-based approach for optimized siting of municipal solid waste landfill. *Waste Management*, 28(11), 2146–2160. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.09.032>
- Tavares, G., Zsigraiová, Z., Semiao, V., & Carvalho, M. (2018). Optimisation of MSW collection routes for minimum fuel consumption using GIS analysis. *Waste Management*, 28(9), 1532–1540.
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., & Vigil, S. A. (2013). *Integrated solid waste management: Engineering principles and management issues*. McGraw-Hill.
- Torres, A., & Patiño, L. (2020). Localización de rellenos sanitarios mediante análisis multicriterio y SIG: estudio de caso en el suroccidente colombiano. *Ingeniería y Región*, 18(1), 45–60.
- Torres, J., & Patiño, F. (2020). Localización de rellenos sanitarios mediante SIG y AHP: aplicación en el Valle del Cauca. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 19(37), 83–102.

---

Wilson, D. C., Rodic, L., & Velis, C. A. (2012). Comparative analysis of solid waste management in 20 cities. *Waste Management & Research*, 30(3), 237–254. <https://doi.org/10.1177/0734242X12437569>

Yesilnacar, E., & Cetin, H. (2008). An environmental GIS-based decision support system for landfill site selection: A case study from Turkey. *Engineering Geology*, 96(3–4), 214–231.

---

## Anexos

### Anexo 1. Geodatabase de resultados

Se presenta la *geodatabase* (GDB) correspondiente a los resultados obtenidos del análisis multicriterio desarrollado para la identificación del sitio óptimo destinado a la disposición de residuos sólidos no aprovechables en el municipio de Planadas, Tolima. Esta base de datos geográfica incluye capas vectoriales y *raster* derivadas del proceso metodológico aplicado, tales como áreas óptimas identificadas, capas intermedias generadas en el proceso de ponderación, polígonos que delimitan las zonas recomendadas, y atributos específicos relacionados con cada predio involucrado. La estructura de esta GDB permite al usuario explorar, consultar y validar los resultados obtenidos, facilitando así futuras etapas de planificación, gestión y toma de decisiones por parte de las entidades competentes.

---

## **Anexo 2. Modelo de ModelBuilder**

El modelo diseñado en *ModelBuilder* de ArcGIS Pro integra de manera secuencial los criterios considerados para la localización del relleno sanitario en Planadas. A través de procesos como el cálculo de distancias euclidianas, la reclasificación de variables, la estandarización a ráster y la superposición ponderada con pesos derivados del método AHP, se obtuvo el mapa de idoneidad territorial. El esquema mostrado en el diagrama anexo refleja la lógica metodológica y asegura la trazabilidad y replicabilidad del análisis.