



**Propuesta de localización óptima para relleno sanitario de contingencia para
Sopó Cundinamarca**

Cristian Daniel Camacho Hilarión

Cod.11792314342

Daniel Felipe Rodríguez Montiel

Cod.11792316598

Universidad Antonio Nariño

Especialización en Sistemas de Información Geográfica

Facultad de Ingeniería Ambiental y Civil

Bogotá, Colombia

2023

**Propuesta de localización óptima para relleno sanitario de contingencia para
Sopó Cundinamarca**

**Cristian Daniel Camacho Hilarión
Daniel Felipe Rodríguez Montiel**

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Especialista en sistemas de información geográfica

Director (a):

Mauricio Fernando Rocha Salamanca

Geólogo, Máster en Ciencias de la Información con énfasis en Geomática

Universidad Antonio Nariño

Especialización en Sistemas de Información Geográfica

Facultad de Ingeniería Ambiental y Civil

Bogotá, Colombia

2023

NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado

_____, Cumple con

los requisitos para optar

Al título de _____.

Firma del Tutor

Firma Jurado

Firma Jurado

Ciudad, Día Mes Año.

Contenido

	Pág.
1. Resumen	9
2. Abstract	10
3. Introducción	11
4. Antecedentes	12
5. Justificación	17
5.1 Crecimiento poblacional	19
5.2 Capacidad máxima de los rellenos sanitarios de disposición habitual.....	20
5.3 Eficiencia y economía en el transporte de los residuos sólidos	20
5.4 Salud pública	21
5.5 Disposición indiscriminada de residuos en lugares no autorizados	21
6. Objetivo General	21
7. Marco de referencia	22
7.1 Normatividad colombiana	22
7.2 Manejo de residuos sólidos	24
7.3 Relleno sanitario de contingencia	25
7.4 Evaluación multicriterio.....	25
7.5 El proceso de análisis jerárquico (AHP)	26
7.6 Área del estudio.....	27
8. Diseño metodológico	29
8.1 Paso 1: Definición de variables, criterios y ponderaciones.....	30
8.1.1 Variables.....	30
8.1.2 Criterios y ponderaciones	39
8.2 Paso 2: Evaluación multicriterio siguiendo la metodología APH.....	43
8.2.1 Matriz de comparación por pares (MCP)	44
8.2.2 Matriz de comparación por pares normalizada (MCN)- cálculo de pesos	46
8.2.3 Matriz de prioridad o de importancia	47
8.3 Paso 3 Definición de restricciones en la localización de áreas potenciales	48
8.4 Paso 4: ejecución del geoprocesamiento utilizando software SIG.....	56
9. Resultados y discusiones	61
9.1 Análisis de áreas potenciales.....	63
10. Conclusiones	78
11. Recomendaciones	79
12. Referencias Bibliográficas	80

Lista de figuras

	Pág.
FIGURA 1 <i>UBICACIÓN DEL MUNICIPIO DE SOPÓ EN RELACIÓN CON EL MAPA DE COLOMBIA</i>	31
FIGURA 2 <i>ESQUEMA METODOLÓGICO</i>	32
FIGURA 3 <i>MAPA DE DRENAJES SENCILLOS</i>	35
FIGURA 4 <i>MAPA DE DRENAJES DOBLES</i>	36
FIGURA 5 <i>MAPA DE CUERPOS DE AGUA</i>	37
FIGURA 6 <i>GEOPROCESAMIENTO DE LAS PENDIENTES</i>	38
FIGURA 7 <i>MAPA DE PENDIENTES</i>	38
FIGURA 8 <i>MAPA DE VÍAS</i>	39
FIGURA 9 <i>MAPA DE ÁREAS URBANAS</i>	40
FIGURA 10 <i>GEOPROCESAMIENTO DE LA SUPERPOSICIÓN PONDERADA</i>	51
FIGURA 11 <i>PRIMERA ETAPA MODEL BUILDER - EJECUCIÓN DEL MÉTODO DE SUPERPOSICIÓN PONDERADA</i>	58
FIGURA 12 <i>SEGUNDA ETAPA MODEL BUILDER – ELIMINACIÓN DE RESTRICCIONES</i>	59
FIGURA 13 <i>TERCERA ETAPA MODEL BUILDER – INTERSECCIÓN DE RESULTADO</i>	59
FIGURA 14 <i>ÁREAS POTENCIALES DEL MUNICIPIO DE SOPÓ</i>	62
FIGURA 15 <i>ÁREA POTENCIAL NÚMERO 1</i>	65
FIGURA 16 <i>ÁREA POTENCIAL NÚMERO 2</i>	66
FIGURA 17 <i>ÁREA POTENCIAL NÚMERO 3</i>	69
FIGURA 18 <i>ÁREA POTENCIAL NÚMERO 4</i>	71
FIGURA 20 <i>ÁREA POTENCIAL NÚMERO 5</i>	76
FIGURA 21 <i>MAPA DE LOCALIZACIÓN DE UN RELLENO SANITARIO DE EMERGENCIA Y CONTINGENCIA PARA EL MUNICIPIO DE SOPÓ, CUNDINAMARCA</i>	78

Lista de tablas

	Pág.
TABLA 1 <i>VARIABLES RECOPIADAS</i>	34
TABLA 2 <i>TABLA DE PONDERACIONES</i>	41
TABLA 3 <i>CRITERIOS DE DRENAJES SENCILLOS</i>	42
TABLA 4 <i>CRITERIOS DE DRENAJES DOBLES</i>	42
TABLA 5 <i>CRITERIOS DE CUERPOS DE AGUA</i>	43
TABLA 6 <i>CRITERIOS DE VÍAS RURALES</i>	43
TABLA 7 <i>CRITERIOS DE ÁREAS URBANAS</i>	44
TABLA 8 <i>CRITERIOS PENDIENTES</i>	45
TABLA 9 <i>ESCALA FUNDAMENTAL DE PREFERENCIA</i>	46
TABLA 10 <i>MATRIZ DE COMPARACIÓN POR PARES (MCP)</i>	47
TABLA 11 <i>MATRIZ DE COMPARACIÓN POR PARES (MCP) CON CALIFICACIÓN NUMÉRICA</i>	48
TABLA 12 <i>MATRIZ DE COMPARACIÓN POR PARES NORMALIZADA (MCN)- CÁLCULO DE PESOS</i>	49
TABLA 13 <i>MATRIZ DE PRIORIDAD O DE IMPORTANCIA</i>	49
TABLA 14 <i>MATRIZ DE RESTRICCIONES</i>	52
TABLA 15 <i>TABLA RESULTADO ÁREA POTENCIAL 1</i>	65
TABLA 16 <i>TABLA RESULTADO ÁREA POTENCIAL 2</i>	66
TABLA 17 <i>TABLA RESULTADO ÁREA POTENCIAL 3</i>	69
TABLA 18 <i>TABLA RESULTADO ÁREA POTENCIAL 4</i>	72
TABLA 19 <i>TABLA RESULTADO ÁREA POTENCIAL 5</i>	76
TABLA 20 <i>TABLA DE RESULTADOS FINALES</i>	77

Agradecimientos

Queremos tomar un momento para agradecer a todas las personas que han hecho posible la realización de esta tesis. Sin su ayuda y apoyo, este trabajo no habría sido lo que es. A nuestras familias, les agradecemos su apoyo y comprensión. A la universidad, gracias por proporcionar los recursos que necesitaba para llevar a cabo esta investigación.

1. Resumen

Este proyecto de investigación se enfoca en determinar el sitio óptimo para un relleno sanitario de emergencia o contingencia en el municipio de Sopó, como una propuesta para la actualización de su plan básico de ordenamiento territorial. La investigación utiliza un esquema metodológico que comprende la secuencia de 4 pasos, estos consisten en: 1. Definición de variables, criterios y ponderaciones, 2. Evaluación multicriterio siguiendo la metodología AHP, 3. Definición de restricciones en la localización de áreas potenciales y por último la ejecución del geoprocetamiento utilizando software de sistema de información geográfica. Lo anterior, teniendo en cuenta las variables de análisis y criterios definidos en la normatividad vigente en materia a la localización de rellenos sanitarios de contingencia para la actualización de planes de ordenamiento territorial. Como resultado, se obtuvieron áreas potenciales que se evaluaron para definir los predios más idóneos para el municipio de Sopó.

Se concluirá que la planificación sostenible de la disposición de residuos sólidos en Sopó permite la toma de decisiones informadas y el cumplimiento de las regulaciones locales en la gestión de residuos de acuerdo con la normatividad vigente y los planes de ordenamiento territorial.

Palabras clave: Relleno Sanitario, Análisis Jerárquico (AHP), Sistema de Información Geográfica (SIG), Disposición de Residuos

2. Abstract

This research is a study focused on the determination of an optimal site for an emergency or contingency landfill within Sopó, which aim is proposing an update to its fundamental land-use plan of the current politics administration. The research employs a methodological framework comprising a sequenced approach with the following key steps: 1. The definition of pertinent variables, criteria, and their respective weightings; 2. A multi-criteria assessment, utilizing the Analytic Hierarchy Process (AHP) methodology; 3. The establishment of location constraints for potential areas; 4. The execution of geoprocessing procedures using geographic information system software. These steps take into careful consideration the variables and criteria as stipulated in the current regulatory framework governing the placement of contingency landfills, in order to facilitate the enhancement of land-use plans. Consequently, prospective areas have been identified and subjected to an evaluative process to determine the most suitable properties within Sopó. In conclusion, the pursuit of sustainable solid waste disposal planning in Sopó enables the informed decision-making process and ensures adherence to local regulations governing waste management, all in accordance with contemporary standards and land-use plans.

Keywords: Landfill, Analytic Hierarchy Process (AHP), Geographic Information System (GIS), Waste Disposal.

3. Introducción

El presente trabajo de investigación se centra en identificar el sitio óptimo para proponer un relleno sanitario de emergencias o contingencia para la disposición final de residuos sólidos dentro de la jurisdicción del municipio de Sopó. Colombia es un país que dentro de su normatividad vigente exige a los municipios que lo conforman que, dentro del ejercicio de la actualización de sus respectivos planes, planes básicos o esquema de ordenamiento territorial, se plantee la ubicación de un sitio que sea destinado para relleno sanitario de emergencias o contingencia dentro de sus respectivas jurisdicciones. En dado caso, se presente una situación de emergencia o contingencia que se puedan generarse por diferentes motivos como la presencia de amenazas naturales o situaciones sociales como paros, movilizaciones, conflictos armados entre otras, impidiendo en ese momento, la disposición en el lugar habitual de residuos sólidos, convirtiendo este sitio óptimo como la solución a la disposición transitoria de dichos residuos. Es por esto por lo que, nace la necesidad de definir el sitio óptimo que, por medio de análisis geospaciales y mediante el uso de herramientas de geoprosesamientos, se presente una propuesta como solución.

Este trabajo de investigación se centra en ese ejercicio de identificar dicho sitio óptimo en el municipio de Sopó Cundinamarca, atendiendo las directrices de la normatividad vigente en relación a la temática definidas por la Presidencia de la República en el Decreto 838 de 2005 Artículo 5 *Criterios y metodología para la localización de áreas para disposición final de residuos sólidos* y Artículo 6 *Prohibiciones y restricciones en la localización de áreas para disposición final de residuos sólidos* que se puedan aplicar al municipio, teniendo en cuenta que todos los municipios son diferentes y varían de unos a otros. Por medio de una compilación y análisis de variables, ponderaciones y criterios

establecidas como la accesibilidad vial, análisis de pendientes, distancia a áreas urbanas, distancia a cuerpos hídricos, entre otras. Y restricciones como las áreas de conservación y protección ambiental, áreas de amenazas naturales, áreas de clasificación agrológica de los suelos, dirección de los vientos, reglamentación del uso del suelo de acuerdo con el Acuerdo Municipal No. 009 de 2020 de Sopó por medio del cual se aprobó el Plan de Ordenamiento Territorial vigente, y geología, se generan resultados potenciales que se evalúan y se definen en la realidad del territorio municipal.

4. Antecedentes

La gestión adecuada de los residuos sólidos se ha convertido en un desafío ambiental, social y económico en diversas regiones, especialmente en América Latina. La disposición final de estos residuos, particularmente la ubicación de rellenos sanitarios representa una preocupación fundamental debido a sus impactos ambientales y sociales. En este contexto, una serie de investigaciones y estudios han abordado la identificación de áreas óptimas para la ubicación de rellenos sanitarios, considerando criterios técnicos, ambientales, sociales y económicos. Estas investigaciones se han centrado en diversas regiones de América Latina, con el objetivo de mitigar los impactos negativos asociados con este tipo de instalaciones.

El presente trabajo de investigación se suma a esta tendencia, centrándose en el municipio de Sopó, en el departamento de Cundinamarca, Colombia. El municipio de Sopó se enfrenta a la necesidad de definir la ubicación óptima de un relleno sanitario de emergencia o contingencia. Este tipo de instalación se considera fundamental en la gestión de residuos sólidos, ya que permite hacer frente a situaciones de emergencia, como amenazas naturales o situaciones sociales disruptivas, que pueden obstaculizar la

disposición habitual de residuos sólidos. La normatividad vigente en Colombia exige que los municipios contemplen la ubicación de un sitio de contingencia en sus planes de ordenamiento territorial. El presente estudio se propone abordar esta necesidad utilizando herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y técnicas de evaluación multicriterio espacial. Se analizarán criterios y variables relacionados con los componentes ambientales y socioeconómicos, y se establecerá una metodología de análisis jerárquico (AHP) para definir la ubicación idónea del relleno sanitario de contingencia en Sopó.

El estudio de Belalcázar Urbano (2019) se enfoca en la identificación de áreas óptimas para la ubicación de un relleno sanitario en las subregiones Norte y Oriente del Valle del Cauca, con el objetivo de mitigar los impactos ambientales, sociales y económicos que suelen asociarse con este tipo de instalaciones. Las subregiones enfrentan un desafío significativo en la gestión de residuos sólidos, ya que generan una gran cantidad de desechos diarios, carecen de instalaciones adecuadas para su disposición controlada y se ven obligadas a transportar los residuos a largas distancias. Dada esta problemática, el estudio se basa en una metodología que emplea tecnologías de información, revisión de literatura, principios del desarrollo sostenible y datos espaciales detallados para identificar la ubicación más adecuada para un relleno subregional que cumpla con las regulaciones actuales y minimice los impactos negativos en los municipios involucrados. En este contexto, el estudio contribuye a la planificación y gestión eficiente de los residuos sólidos en la región.

Cobos et al. (2017) proporciona una visión detallada sobre la importancia de la disposición final de residuos sólidos, centrándose en la ubicación de rellenos sanitarios, y destaca su relevancia en el contexto de la gestión de desechos y el impacto ambiental. Subraya que los rellenos sanitarios involucran diversas actividades con significativos

impactos ambientales, como la alteración de la cobertura vegetal, el cambio de uso del suelo y la gestión de lixiviados. Además, señala la influencia de factores globales como el crecimiento poblacional y el consumo excesivo de bienes. Los autores también resaltan las problemáticas específicas en América Latina, como la falta de reciclaje y tratamiento de residuos sólidos. Además, manifiestan que la ubicación de rellenos sanitarios en la región suele obedecer a factores políticos y sociales en lugar de consideraciones técnicas y ambientales. La necesidad de una disposición final adecuada de los residuos sólidos se destaca como fundamental para la sostenibilidad territorial, subrayando el papel de los Gobiernos Autónomos Descentralizados (GADs) Municipales en Ecuador en la gestión de estos desechos. La fuente también menciona la posibilidad de establecer rellenos sanitarios mancomunados y destaca su viabilidad en áreas con una población menor, lo que presenta beneficios económicos y ambientales. En última instancia, el estudio propone la utilización de un enfoque de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y análisis multicriterio para identificar ubicaciones adecuadas para rellenos sanitarios mancomunados en la provincia de Azuay, Ecuador.

Estacio Vidal et al. (2021) establece una base sólida al abordar la problemática de la disposición de residuos sólidos en el contexto de las ciudades. Se enfatiza que el aumento de la población y la urbanización han intensificado los desafíos relacionados con la ubicación óptima para la disposición de residuos sólidos, convirtiéndolo en un problema de alta preocupación. Los factores determinantes, incluyendo aspectos ambientales, económicos y sociales, son detallados, lo que resalta la complejidad de este proceso de toma de decisiones. La importancia relativa de estos factores puede variar según la ubicación geográfica, lo que subraya la necesidad de abordar estos desafíos de manera contextual. La

fuerza también destaca ejemplos de estudios previos en América Latina que utilizaron técnicas como el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) y Sistemas de Información Geográfica (GIS) para abordar la localización de rellenos sanitarios, lo que demuestra la aplicabilidad de estas herramientas en la gestión de residuos sólidos. En general, este estudio proporciona una visión integral de los desafíos actuales en la disposición de residuos sólidos y destaca la importancia de abordar estos problemas de manera informada y técnica.

Giménez Vera y Cardozo Carrera (2013) destacan la creciente preocupación ambiental derivada de la producción de residuos sólidos, un problema agudo impulsado por la sociedad de consumo actual. Los distintos tipos de residuos generados por las diversas actividades humanas requieren una gestión y tratamiento específicos para evitar daños ambientales. Se mencionan los criterios de selección de áreas para la disposición final de residuos sólidos en rellenos sanitarios, que incluyen aspectos técnicos, económicos, políticos y sociales, como la ubicación en relación con rutas, centros urbanos, escuelas y cursos de agua. Se destaca la importancia de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para abordar problemas de localización, ya que proporcionan herramientas para el análisis de distancias, características de la demanda y la oferta, y permiten la aplicación de técnicas de evaluación multicriterio para encontrar las ubicaciones óptimas para diversos usos del suelo. El artículo también menciona la utilidad de herramientas como *Localiza*, un software de apoyo a la toma de decisiones espaciales basado en SIG, en la búsqueda de ubicaciones adecuadas para instalaciones sociales. El trabajo en cuestión se enfoca en la búsqueda de una ubicación adecuada para un relleno sanitario en la Metrópolis del Alto Paraná, enfatizando la importancia de esta tarea en la mejora de la calidad de vida de la población y la protección del medio ambiente.

González Díaz (2015) resalta la importancia de la legislación y regulación ambiental en Colombia, especialmente en lo que respecta a la gestión de residuos sólidos. Se mencionan una serie de leyes y decretos, como la Ley 99 de 1993, que establece el Sistema Nacional Ambiental (SINA), la Ley 142 de 1994 sobre Servicios Públicos, y otras regulaciones que han organizado la gestión territorial y ambiental relacionada con la disposición de residuos sólidos. A pesar de estos marcos legales, se señala que en Colombia se ha priorizado la disposición final de residuos en rellenos sanitarios en lugar de enfocarse en el aprovechamiento de residuos. El artículo destaca que la tendencia mundial apunta hacia la reducción de residuos destinados a rellenos sanitarios y un aumento en el reciclaje y el compostaje. Se menciona el problema del Relleno Sanitario Doña Juana, que ha enfrentado problemas ambientales y sociales debido a su exposición de basura sin cubrir adecuadamente. Se argumenta que la geografía y la aplicación de principios de la Geomática y la gestión territorial, respaldados por criterios técnicos, ambientales, sociales y geográficos, pueden ser fundamentales para proponer ubicaciones óptimas para la disposición final de residuos sólidos. Esta fuente subraya cómo los aspectos sociales y espaciales son críticos en la ubicación de instalaciones de disposición de residuos sólidos, lo que hace que sea un desafío complejo que requiere una aproximación interdisciplinaria. La hipótesis principal de la investigación se centra en el uso de la Geomática y la gestión territorial para proponer una ubicación óptima para la disposición final de residuos sólidos en Bogotá, dado el agotamiento de la vida útil del Relleno Sanitario Doña Juana, teniendo en cuenta los efectos socioespaciales y territoriales.

Mena Frau (2010) presenta un estudio que compara dos métodos de evaluación multicriterio (EMC) utilizados en la identificación de sitios adecuados para la ubicación

óptima de un relleno sanitario en la comuna de Parral, Región del Maule, Chile. Los dos métodos analizados son la sumatoria lineal ponderada y la sumatoria lineal ponderada ordenada. El análisis se llevó a cabo utilizando un sistema de información geográfica (SIG) ráster y una base de datos cartográfica de la comuna. El método de las jerarquías analíticas (MJA) se empleó para definir la importancia relativa de cada criterio en la evaluación. Los resultados revelan que existen diferencias significativas entre los modelos generados por cada uno de los métodos, lo que sugiere que la elección del método de EMC puede influir en la toma de decisiones y en la identificación de los sitios más idóneos para la disposición de residuos sólidos. Esta fuente es relevante para el estado del arte, ya que destaca la importancia de seleccionar cuidadosamente el enfoque y los métodos de evaluación multicriterio en la planificación de la ubicación de instalaciones de manejo de residuos.

5. Justificación

La generación de desechos sólidos en zonas urbanas representa un problema ambiental y de sanidad pública tanto para las administraciones locales como para las autoridades ambientales dentro del desarrollo territorial. Como lo muestra Belalcázar Urbano (2019), el problema del tratamiento de la disposición final de los desechos sólidos ha traído consigo la implementación de tecnologías, entre las que se encuentra el relleno sanitario. No obstante, a pesar de que el relleno sanitario es la solución más usada dados sus bajos costos económicos, su capacidad cuenta con un límite que no es previsto por las administraciones territoriales. De acuerdo con el estudio de Antolínez et al. (2018), el crecimiento de la densidad poblacional urbana aumenta la producción de residuos sólidos a pesar de los esfuerzos de las entidades por minimizarlos. González Díaz, J. M. (2015), Antolínez et al. (2018), Belalcázar Urbano (2019) y Estacio Vidal et al. (2021) concuerdan en que la falta

de proyección de las administraciones territoriales de la disposición de desechos junto con el aumento de la producción de estos tiene un alto impacto ambiental, económico y social en la población. Dado que el municipio de Sopó carece de un estudio que aborde esta problemática, puede afirmarse que es pertinente realizar una investigación que aborde una estrategia para evaluar la idoneidad de un sitio óptimo para proponer un relleno sanitario de contingencia para la disposición final de residuos sólidos dentro de la jurisdicción del municipio de Sopó.

Colombia es un país que dentro de su normatividad vigente exige a los municipios que lo conforman que, dentro del ejercicio de la actualización de sus respectivos planes, planes básicos o esquema de ordenamiento territorial, se plantee la ubicación de un sitio que sea destinado para relleno sanitario de contingencia dentro de sus respectivas jurisdicciones. Referenciando el Decreto 1077 de 2015 en su Artículo 4 áreas del sistema de servicios públicos domiciliarios menciona que:

Dentro de esta categoría se localizarán las zonas de utilidad pública para la ubicación de infraestructuras primarias para la provisión de servicios públicos domiciliarios, con la definición de las directrices de ordenamiento para sus áreas de influencia Deberán señalarse las áreas para la realización de actividades referidas al manejo, tratamiento y/o disposición final de residuos sólidos o líquidos, tales como rellenos sanitarios, estaciones de transferencia, plantas incineradoras de residuos, plantas de tratamiento de aguas residuales, y/o estaciones de bombeo necesarias para resolver los requerimientos propios de uno o varios municipios y que se definan de conformidad con la normativa vigente.

Por su parte, en el artículo 2.2.2.1.2.1.3 Etapa de formulación ítem A numeral 2.5 menciona que:

La definición de las áreas potenciales para la localización de la infraestructura para el aprovechamiento, tratamiento y disposición final de residuos sólidos y los equipamientos intermedios

(estaciones de transferencia, centros de acopio y/o centros de aprovechamiento), en caso de que se requiera.

Y así mismo el Decreto 1076 de 2016, en el artículo 2.2.6.1.5.2 Obligaciones de los municipios en el ítem a), menciona:

Identificar y localizar áreas potenciales para la ubicación de infraestructura para el manejo de residuos o desechos peligrosos en los Planes de Ordenamiento Territorial, Planes Básicos de Ordenamiento Territorial y Esquemas de Ordenamiento Territorial según sea el caso.

En dado caso, se presente una situación de emergencia o contingencia que impida transportar estos residuos a su lugar de destino habitual. Estas situaciones pueden ser generados por diferentes motivos como la ocurrencia de amenazas naturales como inundaciones, remociones en masa, avenidas torrenciales, incendios forestales, etc. O situaciones sociales como paros, movilizaciones, conflictos armados entre otras, convirtiendo este sitio óptimo como la solución a la disposición transitoria de dichos residuos. Esta investigación contiene diferentes razones que la justifican.

5.1 Crecimiento poblacional

La adecuada gestión o disposición de los residuos sólidos representan un gran desafío para las diferentes entidades territoriales ya sea de orden territorial como país, departamental o municipal. Para el municipio de Sopó este gran desafío no es la excepción, pues con el aumento población que según DANE en la actualización post COVID-19 de proyecciones de población municipal en el periodo de tiempo del año 2020 al año 2035 Sopó tendría un total de 27.997 habitantes a 41.384 habitantes, es decir, un incremento poblacional de 13.387 habitantes. Este aumento de la población traería consigo la generación de más residuos

sólidos por lo que la disposición de estos residuos requiere de una atención lo más pronto posible.

5.2 Capacidad máxima de los rellenos sanitarios de disposición habitual

Como lo advierte el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2017), muchos de los rellenos sanitarios de Colombia están próximos a finalizar su vida útil. De acuerdo con la Gobernación de Cundinamarca (2018), en el municipio de Sopó dispone de sus residuos sólidos en el relleno sanitario Nuevo Mondoñedo que a su vez recibe residuos de 80 municipios del departamento de Cundinamarca y 15 entidades privadas con una vida útil de 10 años. Es por esto por lo que, como lo muestra Hernández Caballero (2021), se debe disponer de más áreas para este fin dentro de las actualizaciones a los planes básicos de ordenamiento territorial. De esta manera, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2017) afirma que el país sigue avanzando en la gestión integral de residuos sólidos

5.3 Eficiencia y economía en el transporte de los residuos sólidos

Siguiendo a Hernández Caballero (2021) se afirma que dentro de la gestión integral de residuos sólidos que se compone por componentes como generación, almacenamiento, recolección, transporte, tratamiento y disposición final. Es el componente de transporte el más beneficiado al definir un lugar óptimo para relleno sanitario de contingencia teniendo en cuenta la accesibilidad vial por medio de vías pavimentadas y la cercanía de las áreas productoras de residuos sólidos como las áreas urbanas, se reducen los costos de transporte de dichos residuos y se aumentaría la eficiencia de la gestión de los residuos sólidos.

5.4 Salud pública

Un área mal ubicada para disposición de residuos sólidos podría aumentar el riesgo de enfermedades y contaminar el aire y los cuerpos de agua, generando impactos a la salud de los habitantes del municipio, pues al ubicarse cerca a lugares cercanos a áreas urbanas o pobladas según la Organización mundial de la salud (2021), pueden aumentar las enfermedades respiratorias, cánceres específicos entre otras.

5.5 Disposición indiscriminada de residuos en lugares no autorizados

El no tener un sitio definido para la disposición de residuos sólidos dentro de la jurisdicción del municipio de Sopó genera que, en un momento de situación de emergencia por la presencia de un desastre natural o alguna interrupción en la operación en los rellenos existentes, se genere una disposición inadecuada los residuos en áreas no autorizadas o establecidas (Organización mundial de la salud, 2021), generando problemas adicionales.

6. Objetivo General

- Definir mediante un SIG el sitio óptimo de relleno sanitario de contingencia para el municipio de Sopó, como propuesta a la actualización del plan básico de ordenamiento territorial.

Objetivo Específicos

- Definir las variables, criterios, ponderaciones y restricciones que se utilizarán para la identificación de áreas potenciales del relleno sanitario de contingencia.
- Emplear la metodología de análisis jerárquico (AHP) para evaluar la importancia o preferencia de las variables y a la toma de decisiones.

- Desarrollar un modelo de geoprocésamiento en ModelBuilder, para automatizar el proceso de evaluación del sitio óptimo del relleno sanitario de contingencia.

7. Marco de referencia

Para identificar el sitio óptimo para proponer un relleno sanitario de emergencias o contingencia para la disposición final de residuos sólidos dentro de la jurisdicción del municipio de Sopó es necesario aclarar, en primer lugar, la normatividad que rige al ente territorial, el municipio de Sopó, dentro de la ley colombiana. En segundo lugar, es preciso especificar a que se hace referencia en este contexto cuando se habla de disposición final de residuos sólidos. En tercer lugar, es importante entender la categoría de relleno sanitario de emergencia. Por último, resulta necesario definir evaluación multicriterio. De esta manera, se pretende lograr coherencia en la línea investigativa y en los resultados que arroje la misma.

7.1 Normatividad colombiana

En relación con la normatividad colombiana respecto de la disposición de residuos sólidos, la regulación está basada en el Decreto 838 de 2005 que tiene como objeto “promover y facilitar la planificación, construcción y operación de sistemas de disposición final de residuos sólidos, como actividad complementaria del servicio público de aseo, mediante la tecnología de relleno sanitario”. De acuerdo con este decreto, los criterios de selección de la ubicación priorizan su cercanía con la densidad poblacional, las condiciones y la topografía del suelo, la accesibilidad de los vehículos, la distancia de los cuerpos hídricos, la dirección de los vientos y la incidencia sobre el entorno. De la misma manera,

la ley estipula prohibiciones que restringen la ubicación en áreas cercanas a fuentes superficiales, subterráneas, hábitats naturales críticos, fallas geológicas y áreas de conservación. Por otro lado, las restricciones se aplican en áreas cercanas al suelo urbano, aeropuertos, fuentes subterráneas, zonas inestables y zonas de riesgo sísmico alto, con requisitos específicos y medidas de mitigación que deben ser cumplidos rigurosamente. La ubicación y operación de un relleno sanitario debe ser cuidadosamente planificada para garantizar una gestión efectiva de los residuos sólidos y la protección del medio ambiente y la comunidad.

A su vez, posterior al decreto 838 de 2005 hay una resolución del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, y dos decretos presidenciales que hacen los aportes que se presentan a continuación. La Presidencia de la República, por medio del Decreto 1736 de 2015, regula la gestión de residuos peligrosos y promueve la responsabilidad extendida del productor, exigiendo que fabricantes y distribuidores se hagan cargo de la recolección y disposición adecuada de estos residuos, con el fin de minimizar impactos ambientales y riesgos para la salud pública. De la misma manera, la Presidencia de la República de Colombia, mediante el Decreto 1784 de 2017, establece los criterios para la ubicación de nuevos rellenos sanitarios, incorporándolos en los planes de ordenamiento territorial, considerando factores ambientales, la proximidad a aeropuertos, riesgos no mitigables, el perímetro urbano y la previa disposición de residuos, con el objetivo de garantizar ubicaciones seguras y adecuadas. El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, mediante la Resolución 0472 de 2017, establece directrices para la gestión de residuos sólidos, abordando criterios de ubicación de rellenos sanitarios, incluyendo capacidad, accesibilidad, condiciones del suelo, entre otros. Prohíbe su ubicación en áreas

cercanas a fuentes de agua y promueve la gestión ambientalmente responsable de los residuos.

El Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio de Sopó 2020 – 2023, siguiendo el Decreto 838 de 2005 y el Decreto 1784 de 2017, decretados por la Presidencia de la República de Colombia, proporciona pautas y restricciones relacionadas con la disposición de residuos sólidos en Colombia. Destaca la importancia de obtener permisos de la autoridad ambiental competente para la ubicación y operación de rellenos sanitarios. Además, se prohíben prácticas como botaderos a cielo abierto, quemas, incineración y la disposición inadecuada de residuos sólidos. También se menciona la opción de construir plantas de tratamiento de manejo de residuos de carácter regional en lugar de rellenos sanitarios municipales. Estas medidas buscan regular y promover la gestión adecuada de residuos sólidos en el municipio, así como prevenir impactos ambientales y promover la salud pública.

7.2 Manejo de residuos sólidos

En relación con el concepto de manejo de residuos sólidos, Fazenda y Tavares-Russo (2016) y De La Cruz-Cabrera Et al. (2020) coinciden al afirmar que el manejo de residuos sólidos se refiere a las acciones y procesos involucrados en la gestión de desechos que pueden descomponerse fácilmente o no, incluyendo materiales de origen animal, vegetal e inorgánico. Los seres humanos, como principales generadores de residuos, representan una amenaza para el medio ambiente debido al aumento en la producción de productos desechables y la falta de control en la disposición de estos residuos. Por su parte, De La Cruz-Cabrera Et al. (2020) entiende que el manejo adecuado de residuos sólidos implica

minimizar la acumulación en vertederos y promover prácticas de reciclaje y reutilización para reducir los impactos negativos en el medio ambiente y la salud pública.

7.3 Relleno sanitario de contingencia

A su vez, de acuerdo con Herrera, (2014), un relleno sanitario de contingencia se refiere a una instalación destinada a la disposición final de residuos sólidos en situaciones de emergencia o como medida temporal, cuando no se dispone de un relleno sanitario permanente o en funcionamiento. Por lo general, se establece como una solución provisional para la gestión de residuos sólidos en una jurisdicción, especialmente cuando se actualiza el plan de ordenamiento territorial, y la normativa exige contar con un área de manejo de residuos peligrosos o relleno sanitario en un municipio. Estos rellenos de contingencia se sitúan después de un análisis de ubicación óptima y suelen considerar restricciones ambientales, de protección de áreas y regulaciones ecológicas para minimizar el impacto en el entorno.

7.4 Evaluación multicriterio

Cuando se menciona la evaluación multicriterio se entiende que es un enfoque de toma de decisiones que se basa en la comparación y asignación de valores a través de un conjunto de criterios para evaluar y priorizar múltiples alternativas. Lo anterior se apoya en Mena Frau et al. (2010) que entiende que este método se utiliza para abordar problemas complejos en los que se deben considerar varios factores y sus ponderaciones. Según esta investigación, en la evaluación multicriterio, se descompone el problema en elementos esenciales, se realiza una jerarquización de criterios y se efectúa un juicio comparativo entre

pares de criterios y alternativas, lo que conduce a la asignación de valores y pesos relativos a cada criterio. Los valores se comparan utilizando una escala arbitraria que oscila entre 1/9 y 9, donde 1 indica igual importancia entre los elementos. Tanto para Giménez Vera y Cardozo Carrera (2013) como para Cobos et al. (2019) este enfoque ayuda a determinar la importancia relativa de los factores involucrados y a identificar la mejor solución en función de los criterios predefinidos. Se basa en la lógica matemática y se utiliza en diversas aplicaciones, como la selección de sitios para rellenos sanitarios, toma de decisiones ambientales y gestión territorial. La evaluación multicriterio puede involucrar la utilización de software de Sistemas de Información Geográfica (GIS) y la participación de expertos para asignar valores y pesos a los criterios.

7.5 El proceso de análisis jerárquico (AHP)

El Analytic Hierarchy Process (AHP) [proceso análisis jerárquico], es un método desarrollado por el profesor Saaty en la década de 1970 para abordar la toma de decisiones en situaciones en las que se dispone de información limitada o en las que se deben considerar aspectos cualitativos difíciles de valorar. AHP se utiliza en una amplia variedad de campos, incluyendo el ámbito empresarial, económico y operacional.

AHP es un método que ayuda a seleccionar entre diferentes alternativas teniendo en cuenta una serie de criterios o variables, que suelen estar jerarquizados y pueden entrar en conflicto. De acuerdo con Saaty (1980), la jerarquía comienza con un objetivo final en el nivel superior, seguido de criterios y subcriterios en niveles inferiores. La elección adecuada de estos criterios y subcriterios es esencial y deben ser claramente definidos, relevantes y

mutuamente excluyentes. Se recomienda que el número de criterios y subcriterios en cada nivel no sea superior a 7 para evitar complicaciones en las comparaciones.

El método implica comparaciones directas entre criterios del mismo nivel jerárquico y entre las alternativas en relación con los criterios del nivel inferior. Se utilizan matrices de comparación por pares utilizando una Escala Fundamental que va del 1 al 9. Esta escala es esencial en el método, ya que, como lo afirma el autor, el cerebro humano es mejor para comparar dos elementos a la vez que múltiples elementos simultáneamente. Las comparaciones generan matrices de decisión cuadradas que deben cumplir con propiedades como la reciprocidad, homogeneidad y consistencia. La consistencia se verifica mediante el índice de consistencia (CI) y la proporción de consistencia (CR). Si el CR supera ciertos valores establecidos, es necesario revisar las ponderaciones. Una vez que se verifica la consistencia, se obtienen los pesos que representan la importancia relativa de los criterios o las prioridades de las alternativas en relación con un criterio específico. Esto se logra utilizando el método de los autovalores.

7.6 Área del estudio

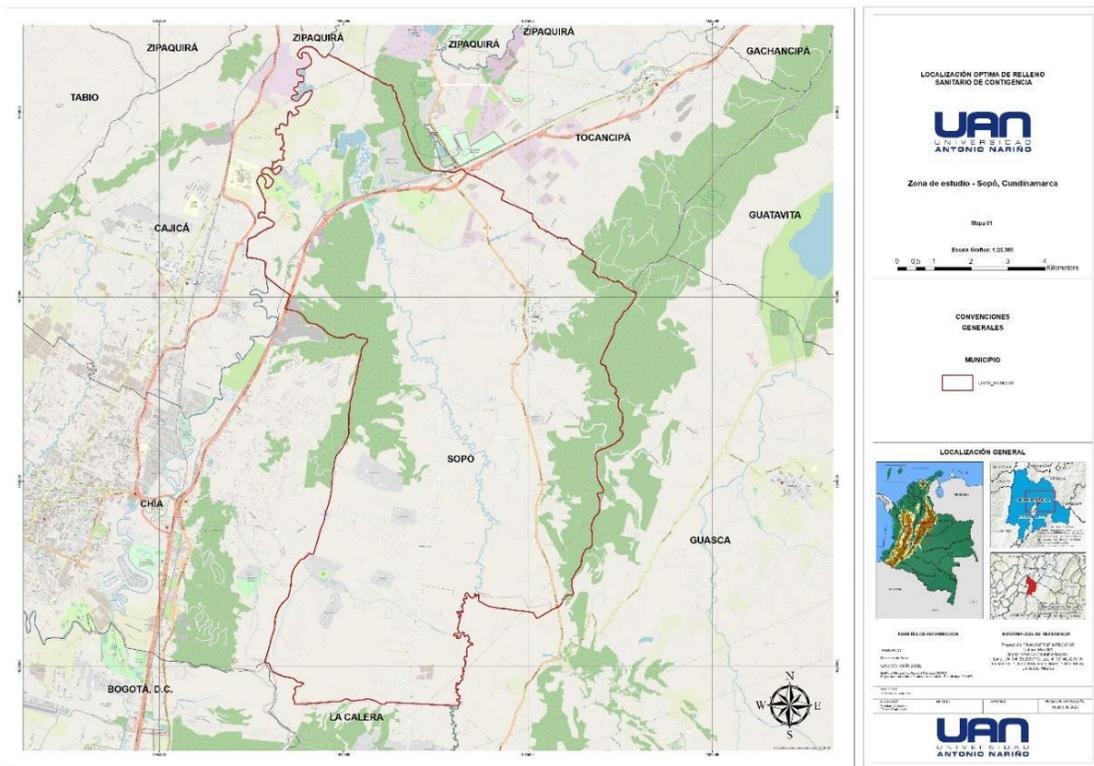
El área de estudio corresponde al municipio de Sopó, departamento de Cundinamarca dentro del país de Colombia, Sopó es un municipio de los 11 municipios que conforman la provincia de sabana centro, se ubica al norte de la ciudad de Bogotá aproximadamente a 30 kilómetros de distancia, un aproximado en tiempo de traslado de 40 minutos en vehículo. Según la oficina de deslindes y conflictos limítrofes del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), este municipio cuenta con un área de 11085,55 hectáreas aproximadamente. Limita con alrededor de 7 municipios, al norte con los

municipios de Zipaquirá y Tocancipá, al oriente limita con el municipio de Guasca, al occidente con los municipios de Chía y Cajicá y al sur con los municipios de Bogotá y La Calera.

Cuenta con alrededor de 14 veredas nombradas como El Chuscal, Centro Alto, Pueblo Viejo, Agua Caliente, La Violeta, Bellavista, La Carolina, La Diana, Gratamira, Aposentos, Meusa, Hato grande, Mercenario y San Gabriel, así lo define la información disponible de la división catastral veredal disponible para el municipio. Sin embargo, en el plan básico de ordenamiento territorial se reconocen 16 veredas de las cuales nuevas son Comuneros y Piedra Herrada. Actualmente el municipio cuenta con 3 áreas urbanas reconocidas que son zona urbana centro, área urbana de Pueblo Viejo y el área urbana de Briceño y 7 centros poblados rurales que son Gratamira, Hato Grande, La Diana, Mercenario, Meusa y Sector Díaz.

Figura 1

Ubicación del municipio de Sopó en relación con el mapa de Colombia



Nota: Elaboración propia

8. Diseño metodológico

En el contexto de la gestión de residuos sólidos y la planeación de disposición final, el objetivo es la identificación de un sitio óptimo de relleno sanitario de contingencia para el municipio de Sopó, como propuesta a la actualización del plan básico de ordenamiento territorial. Este proceso implica una serie de etapas y actividades estratégicas que deben llevarse a cabo de manera eficiente y precisa. A continuación, se presenta el enfoque metodológico que guiará el proceso de localización óptima. A través de un detallado análisis de flujo de procesos y actividades, se expone la metodología que permitirá tomar decisiones informadas y cumplir con los requisitos regulatorios, garantizando la disposición adecuada

de residuos sólidos en situaciones de emergencia o contingencia. El diagrama metodológico en la **Figura 2** servirá como orientación para la ejecución exitosa de este proceso.

Figura 2
Esquema metodológico



Nota: Elaboración propia

8.1 Paso 1: Definición de variables, criterios y ponderaciones

Para poder definir la localización del sitio óptimo de relleno sanitario de contingencia es necesario definir inicialmente cuales son las variables, criterios y ponderaciones que se acogen con la normatividad vigente y que se aplica al área de estudio, que para este caso corresponde al municipio de Sopó.

8.1.1 Variables

Se definieron 6 variables que corresponden a los drenajes sencillos, drenajes dobles, cuerpos de agua, pendientes, vías y las zonas urbanas, a partir de tomar como referencia la

normatividad vigente y otras investigaciones. Cabe mencionar que, dentro de la normatividad consultada, se referencia el decreto 838 de 2005 en el artículo 5 “*Criterios y metodología para la localización de áreas para disposición final de residuos sólidos, mediante la tecnología de relleno sanitario*”, a partir de la interpretación hecha por Sierra (2021) y Gómez (2022). Como resultado, se obtuvieron estas variables a través de la recopilación la información tipo shapefile y geodatabases (GDB) del instituto geográfico Agustín Codazzi por medio de las planchas a escala 1:10.000 209IIC4, 228IA2, 228IA4, 228IB1, 228IB3, 228IC2, 228IC4 y 228ID1 y por medio del municipio de Sopo (ver **Tabla 1**).

Tabla 1
Variables recopiladas

Variable	Fuente	Escala de trabajo
Drenajes sencillos	Los drenajes sencillos corresponden a los definidos por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC)	1:10.000
Drenajes dobles	Los drenajes dobles corresponden a los definidos por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC)	1:10.000
Cuerpos de agua	Pantanos, humedales, lagunas, embalses definidos por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC)	1:10.000
Pendientes	Definidas a partir de las curvas de nivel definidas por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC)	1:10.000
Vías rurales	Las vías rurales corresponden a los definidos por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC)	1:10.000

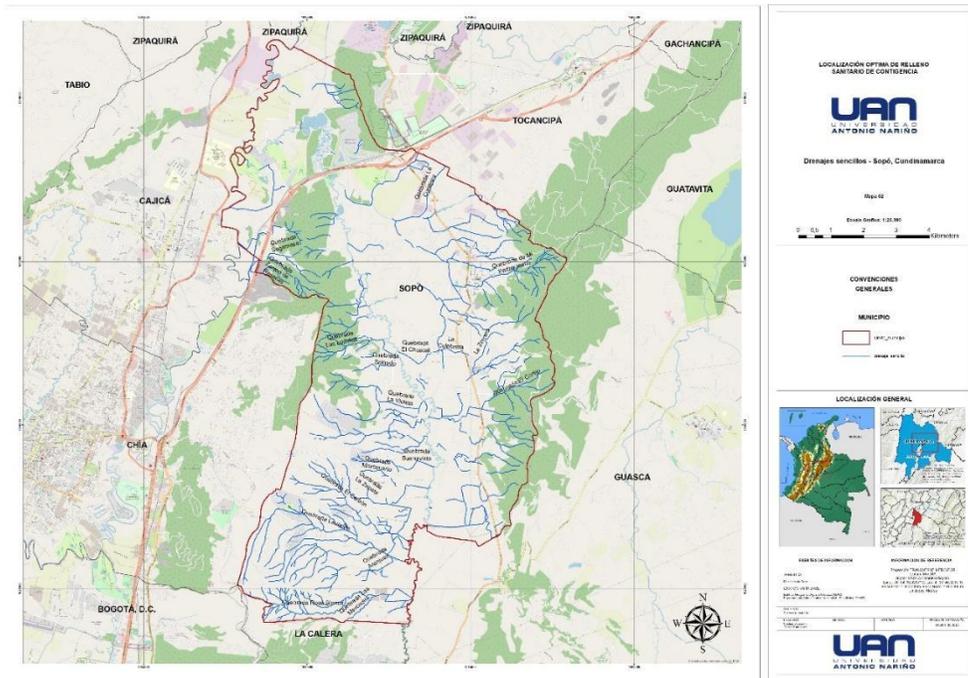
Zonas urbanas	Las áreas urbanas son las que se definen en el decreto municipal 080 de 2010, por el cual se adopta la revisión general del Plan Básico de Ordenamiento Territorial del municipio de Sopó	1:25.000
---------------	---	----------

Nota: Elaboración propia

Drenajes sencillos: Los drenajes sencillos según los metadatos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, se definen como cursos de agua de origen natural de primer o de segundo orden, que presenta un caudal permanente o intermitente. Es decir, se considera un drenaje sencillo permanente a aquellos ríos, arroyos o quebradas que se caracterizan por la presencia de agua con un movimiento de agua definido y los drenajes intermitentes solo aparecen en épocas de lluvia y son los flujos de agua transitorios que se crean por la escorrentía, es por esto por lo que no tienen presencia de agua permanente. Para el municipio de Sopó el IGAC identifica 424 drenajes sencillos (ver **Figura 3**).

Figura 3

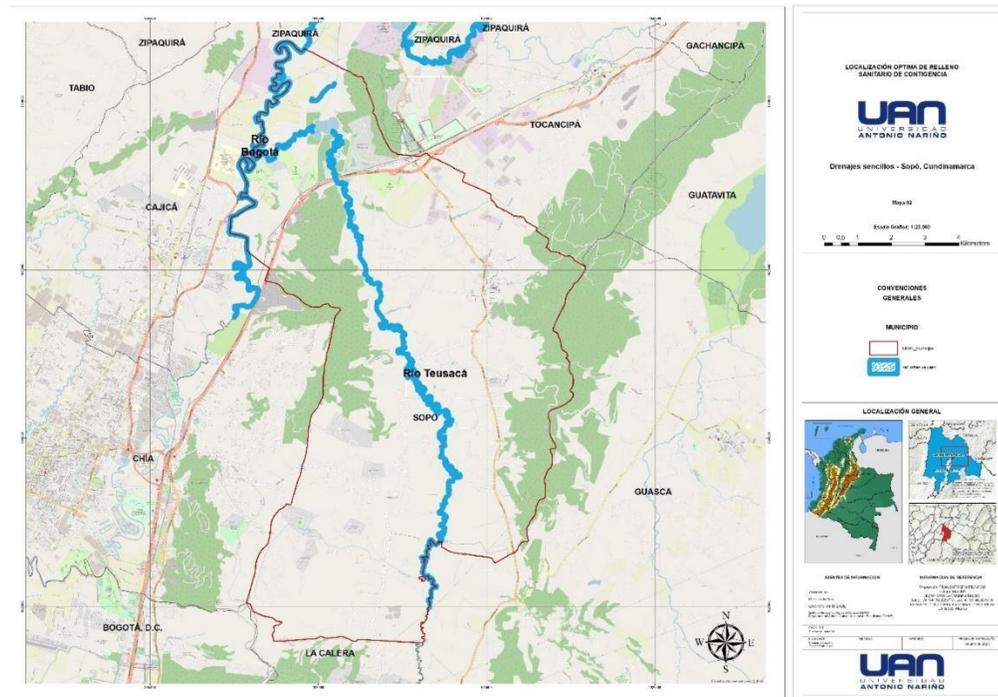
Mapa de drenajes sencillos



Nota: Elaboración Propia

Drenajes Dobles: Los drenajes dobles son aquellos ríos principales que poseen una corriente natural y que fluye continuamente, por lo general estos desembocan al mar. Sopo cuenta únicamente con 2 drenajes dobles que obedecen al eje del río Teusacá y al eje del río Bogotá (ver **Figura 4** Mapa de drenajes dobles).

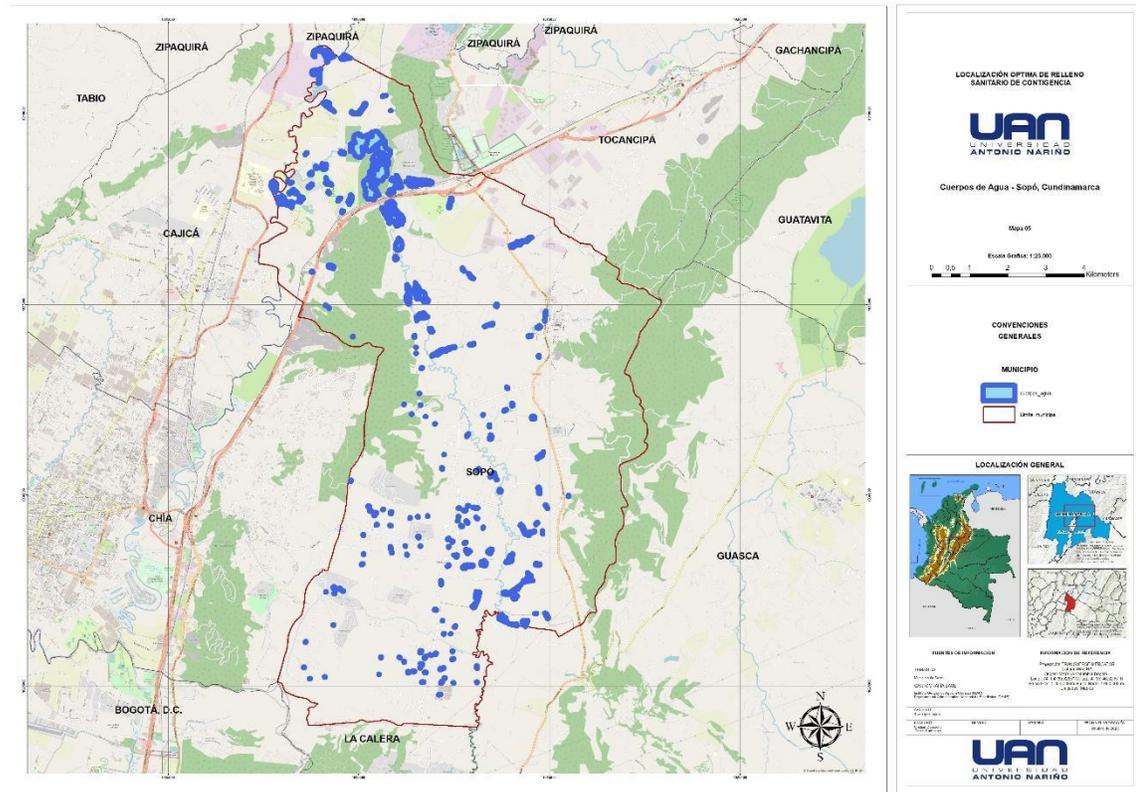
Figura 4
Mapa de drenajes dobles



Nota: Elaboración propia

Cuerpos de agua: Los cuerpos de agua son aquellos ecosistemas lénticos como humedales, lagunas, pantanos, etc. Se identificaron 429 cuerpos de agua dentro de la jurisdicción del municipio de Soopó.

Figura 5
Mapa de cuerpos de agua



Nota: Elaboración propia

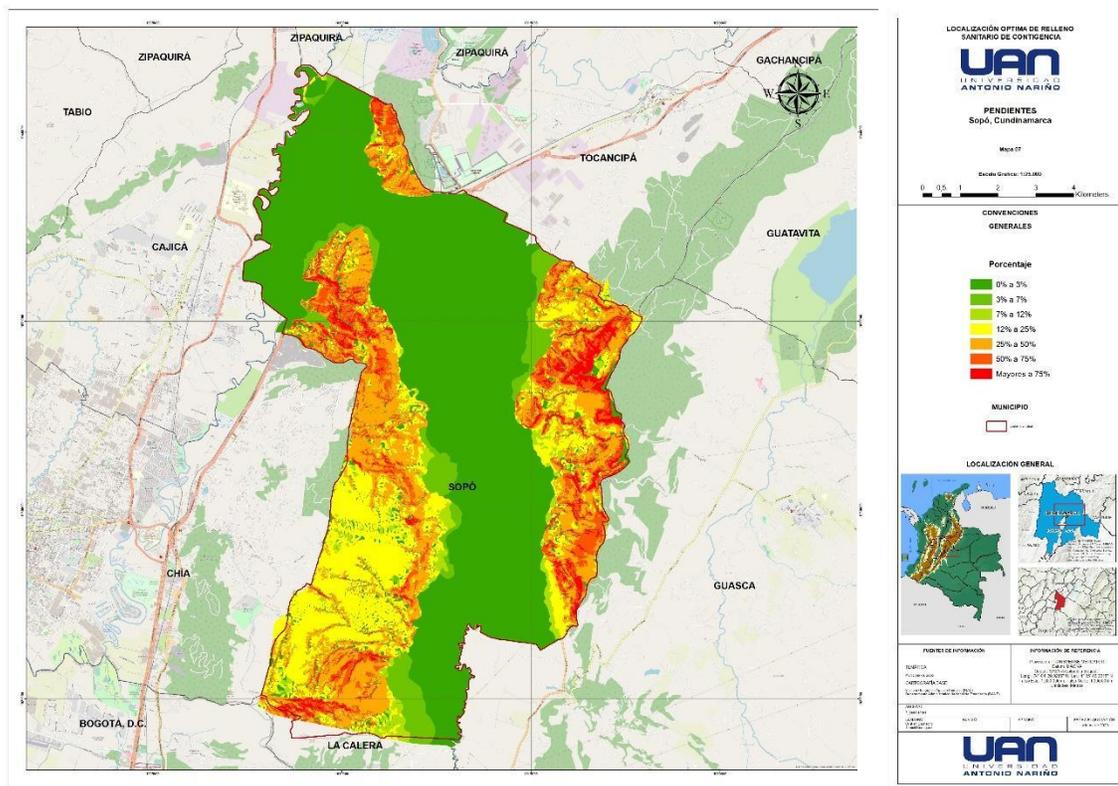
Pendientes: Se definen como la pendiente de ladera que se genera con el ángulo existente entre la superficie del terreno y la horizontal, se expresan en porcentaje o en grados. Para este trabajo de investigación las pendientes se definieron a partir de las curvas de nivel del IGAC, es decir, para obtenerlas se realizó un geoprocesamiento utilizando un flujo de trabajo en modelbuilder con herramientas SIG como tin, tin to raster, slope, reclassify. (ver **Figura 6**)

Figura 6
Geoprocesamiento de las pendientes



Nota: Elaboración propia

Figura 7
Mapa de pendientes

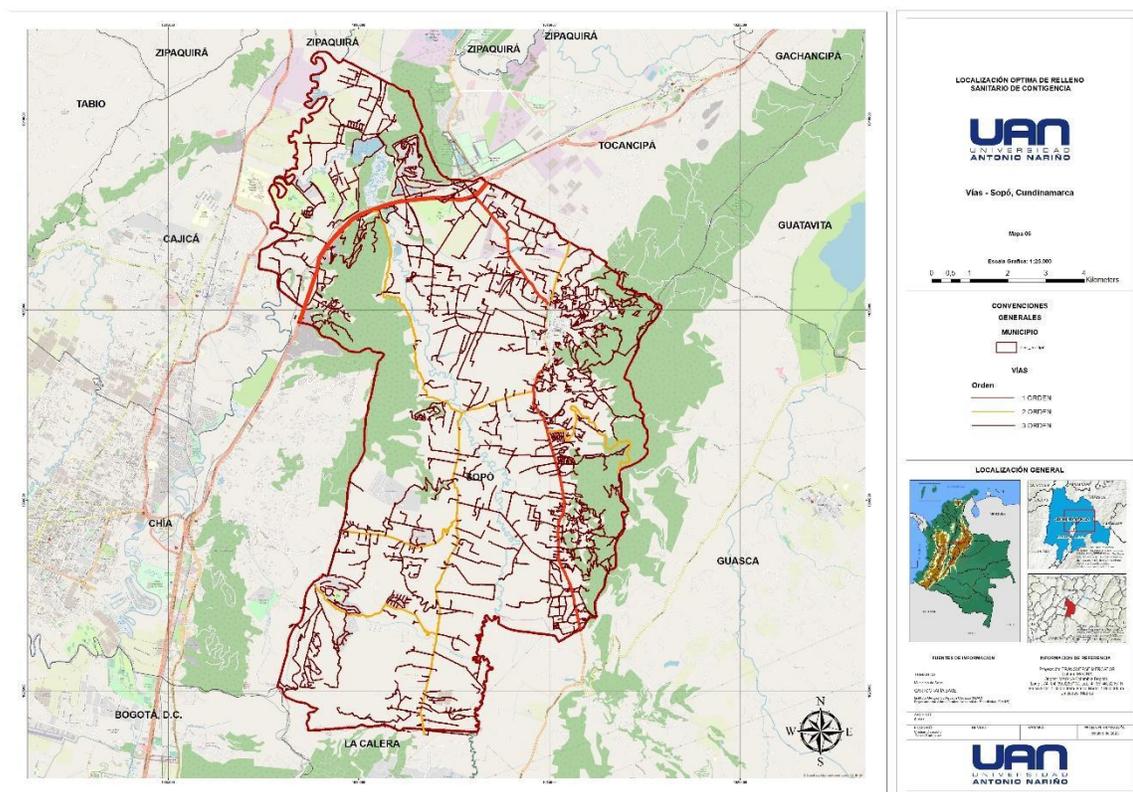


Nota: Elaboración propia

Vías rurales: La red vial está confirmada por vías nacionales de primer orden que conectan todo el país, las vías intermunicipales de segundo orden que conectan las

principales ciudades, con ciudades intermedias y cabeceras municipales y las vías veredales de tercer orden que conectar sus cabeceras municipales con sus respectivas áreas rurales. Sopó cuenta con las vías de primer orden que corresponden a la Autopista que va desde Bogotá a Tunja y la vía que corresponde a la perimetral de oriente de Cundinamarca que conecta los tramos del Salitre a Briceño. Como vías de segundo orden representan las vías que conectan el municipio de La Calera y Chía con el municipio de Sopó. Y las de tercer orden todas las demás. Se hace claridad que para este trabajo de investigación no se incluyen los caminos y senderos. (ver **Figura 8**).

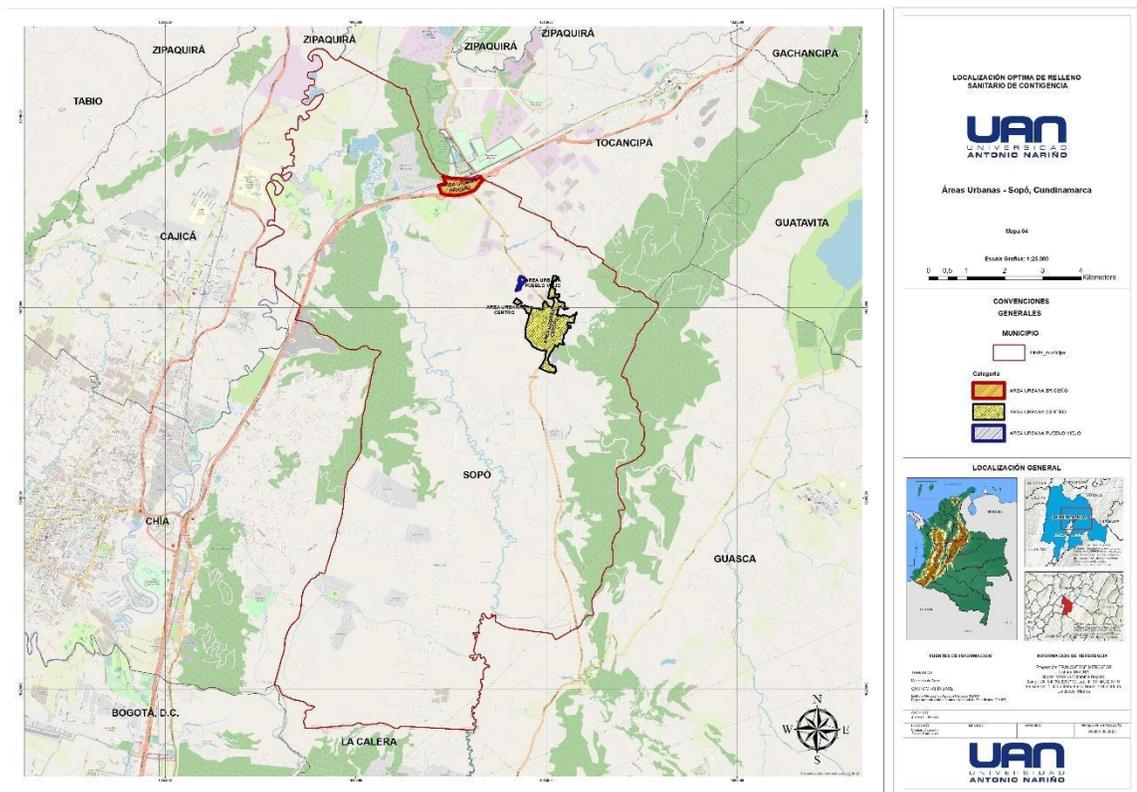
Figura 8
Mapa de vías



Nota: Elaboración propia

Zonas urbanas: Según el Departamento nacional de estadística DANE, define el área urbana como conformación de conjuntos de edificaciones y estructuras contiguas agrupadas en manzanas, las cuales se delimitan por una red vial y cuentan con servicios públicos domiciliarios, áreas dotacionales y de espacio público. Según el PBOT vigente del municipio de Sopó, existen 3 áreas urbanas, la cual, se denominan área urbana Briceño, área urbana Pueblo Viejo y área urbana cabecera municipal (ver **Figura 9**).

Figura 9
Mapa de áreas urbanas



Nota: Elaboración propia

8.1.2 Criterios y ponderaciones

Para cada variable anteriormente expuesta, se define un criterio y este a su vez contiene una valoración o ponderación, que consiste en una clasificación numérica que va del número 1 al 5, en donde, el número menor quiere decir que es una ponderación que no cumple con los requisitos para la localización de relleno sanitario de contingencia y el número mayor que es la ponderación más idónea cumpliendo con todos los requisitos para la localización de relleno sanitario de contingencia (ver tabla de ponderaciones).

Tabla 2

Tabla de ponderaciones

Valoración	Ponderación	Descripción
1	La ponderación 1 No es apropiada	Esta ponderación no cumple con los requisitos para la localización de relleno sanitario de contingencia
2	Poco apropiado	Esta ponderación no cumple con los requisitos para la localización de relleno sanitario de contingencia
3	medianamente apropiado	Esta ponderación cumple con algunos requisitos para la localización de relleno sanitario de contingencia.
4	Apropiado	Esta ponderación cumple con los requisitos para la localización de relleno sanitario de contingencia
5	Idóneo	Esta ponderación es la mejor cumpliendo con los requisitos para la localización de relleno sanitario de contingencia

Nota: Elaboración Propia Basado en la Metodología del Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) de Saaty.

Los criterios están asociados principalmente a la distancia que tendría el relleno sanitario de contingencia en comparación a la hidrografía (drenajes sencillos, drenajes dobles y cuerpos de agua), sistema vial (vías), zonas urbanas y a la topografía del terreno (pendientes).

Para la variable de drenajes sencillos, drenajes dobles y cuerpos de agua se define el criterio de distancia, velando de la protección del recurso hídrico como los ríos, quebradas, arroyos, humedales, lagunas, pantanos, etc. El criterio consiste en que entre más distancia

se ubique el sitio óptimo del relleno sanitario de contingencia en comparación a la hidrografía del municipio mejor, por otro lado, si esta distancia es menor, representaría un área inapropiada para la localización de este (ver Tabla 3, Tabla 4 y Tabla 5).

Tabla 3

Criterios de drenajes sencillos

Drenajes sencillos rurales	
Distancia a drenajes sencillos permanentes e intermitentes	
Criterio-Distancia	Ponderación sugerida
<50 metros	1
50-500 metros	2
500-800 metros	3
800-1000 metros	4
>1000 metros	5
Ponderación realizada a partir de analizar las distancias máximas del perímetro rural respecto a los drenajes sencillos, porque las definidas por el decreto 838 de 2005 no son acordes por el tamaño del municipio, aunque se toma como referencia la ponderación 1 y 2 de este.	

Nota: Elaboración propia

Tabla 4

Criterios de drenajes dobles

Drenajes doble rurales	
Distancia a drenajes dobles	
Distancia	Ponderación sugerida
<50 metros	1
51-499 metros	2
500-999 metros	3
1000-2000 metros	4
>2000 metros	5
Criterios definidos a partir del artículo 5 del decreto 838 de 2005, numeral 9 tabla distancias a cuerpos hídricos	

Nota: Elaboración propia

Tabla 5*Crterios de cuerpos de agua*

Cuerpos de agua	
Distancia a cuerpos de agua	
Distancia	Ponderación sugerida
<50 metros	1
51-499 metros	2
500-999 metros	3
1000-2000 metros	4
>2000 metros	5
Crterios definidos a partir del artículo 5 del decreto 838 de 2005, numeral 9 tabla distancias a cuerpos hídricos	

Nota: Elaboración propia

El criterio de las vías también está definido por la distancia, este consiste en que a menor distancia se ubique el sitio óptimo de relleno sanitario de contingencia en comparación con las vías es mejor, teniendo en cuenta que, esto reduciría costos a la hora de transportar los residuos sólidos porque no se movilizan largas distancias (ver tabla de criterios de vías rurales).

Tabla 6*Crterios de vías rurales*

Vías rurales	
Distancia de la vía de acceso	
Distancia	Ponderación sugerida
0-100m	5
100-300m	4
300-500m	3
500-1000m	2
>1000m	1
Ponderación realizada a partir de analizar las distancias máximas del perímetro rural respecto a las vías, porque las definidas por el decreto 838 de 2005 no cumple por el tamaño del municipio	

Nota: Elaboración propia

Por último, se analiza la distancia de las áreas urbanas en comparación al sitio óptimo de relleno sanitario de contingencia, en donde, el área ideal de dicho sitio se ubicará ni muy cerca y muy lejos, teniendo en cuenta que, si este está ubicado a corta distancia de un área urbana podría generar malestar a los residentes por olores inclusive puede afectar a futuro la salud por enfermedades respiratorias. Y si se ubicara a una larga distancia, repercutiría en los costos de movilización a la hora de transportar los residuos sólidos. Es por esto que el mejor criterio es ni muy cerca, ni muy lejos, como se evidencia en la siguiente tabla de criterios de áreas urbanas.

Tabla 7
Criterios de áreas urbanas

Áreas urbanas	
Cercanía a las áreas urbanas	
Distancia	Ponderación sugerida
<2	1
2-5 km	5
5,1-8Km	4
8,1-10Km	3
>10Km	2
Ponderación realizada a partir de analizar las distancias máximas del perímetro rural respecto a las áreas urbanas, porque las definidas por el decreto 838 de 2005 no cumple por el tamaño del municipio	

Nota: Elaboración propia

Los criterios para las pendientes están asociados al porcentaje de inclinación de la pendiente del terreno, es decir, las áreas ideales para ubicar un sitio óptimo de relleno sanitario de contingencia son aquellas cuyo porcentaje de inclinación es menor, lo que quiere decir que es un terreno plano. Por otro lado, si el porcentaje de la pendiente es mayor quiere decir que son terrenos con una pendiente pronunciada lo que representan una limitante para dicho sitio. Ver tabla de criterios de pendientes

Tabla 8
Crterios pendientes

Pendientes	
0-3%	5
3,1-7%	4
7,1-12%	3
12,1-25%	2
>25%	1
Se toma como base los rangos de pendientes en porcentaje definidos por el IGAC y el artículo 5 del decreto 838 de 2005, numeral 4 tabla pendientes promedio del terreno	

Nota: Elaboración propia

8.2 Paso 2: Evaluación multicriterio siguiendo la metodología APH

Se utiliza el método de análisis jerárquico AHP (Analytic Hierarchy Process), como solución a la definición de la importancia o preferencia de las variables a la hora de efectuar el geoprocesamiento de la superposición ponderada (weighted overlay). De acuerdo con Nantes (2019), esta metodología cuantitativa desarrollada por Thomas Saaty en el año de 1980, permite la toma decisiones multicriterio generando escalas de prioridades que se basan en juicios y se manifiestan a través de comparaciones por pares mediante una escala de preferencia, permitiendo representar la dominancia o preferencia de una alternativa frente a otra en relación. En este caso la definición del sitio óptimo de relleno sanitario de contingencia.

Dicha metodología plantea la tabla de escala fundamental de preferencia o importancia que cumple un papel importante para definir la preferencia entre las variables utilizadas, estableciendo a través de una escala numérica la importancia de las variables respecto a la ubicación del sitio óptimo para relleno sanitario de contingencia, permitiendo

analizar la importancia de cada variable respecto a otra. (ver tabla de criterios de escala fundamental de preferencia).

Tabla 9

Escala fundamental de preferencia

Escala numérica	Escala escrita	Explicación
1	Igual de importante	El criterio A es igual de importante que el criterio B
3	Moderadamente más importante un elemento que el otro	La experiencia y el juicio favorecen ligeramente al criterio A sobre el criterio B
5	Fuertemente más importante un elemento que el otro	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente al criterio A sobre el criterio B
7	Muchos más fuerte la importancia de un elemento que la del otro	El criterio A es mucho más importante que el B
9	Importancia extrema de un elemento frente al otro	La mayoría del criterio A sobre el B está fuera de toda duda.

Nota: Escala fundamental de preferencia tomada de Saaty (1980).

8.2.1 Matriz de comparación por pares (MCP)

Teniendo en cuenta lo anterior, se elaboró la matriz de comparación por pares, donde, se define un nivel de preferencia al comparar cada una de las variables una contra una de todas las combinaciones posibles. Es importante mencionar que, la comparación se realiza con una fracción, en donde, las variables representadas en la columna se evalúan en el numerador y las variables de la fila se evalúan en el denominador, se coloca siempre el número 1 como numerador o como denominador dependiendo de la variable, para indicar que esa variable no es preferida respecto a la otra, por el contrario se coloca 3, 5, 7, 9 para indicar, que grado de importancia tiene la variable analizada respecto a la que no es preferida.

Tabla 10
Matriz de comparación por pares (MCP)

Variables	Drenajes sencillos rurales	Drenajes doble rurales	Cuerpos de agua	Pendientes	vías rurales	Zonas urbanas
Drenajes sencillos rurales	1	1/3	1/3	1/9	1/5	1/5
Drenajes doble rurales	3/1	1	1	1/3	1/3	1/5
Cuerpos de agua	3/1	1	1	1/3	1/3	1/3
Pendientes	9/1	3/1	3/1	1	5/1	3/1
vías rurales	5/1	3/1	3/1	1/5	1	3/1
Zonas urbanas	5/1	5/1	3/1	1/3	1/3	1

Nota: Elaboración propia

2.2 Matriz de comparación por pares (MCP) con calificación numérica

Se elabora la matriz de comparación por pares con calificación numérica y se suman los valores por columnas, esta matriz es la misma que la anterior, solo que esta contiene números enteros y decimales.

Tabla 11*Matriz de comparación por pares (MCP) con calificación numérica*

Variables	Drenajes sencillos rurales	Drenajes doble rurales	Cuerpos de agua	Pendientes	Vías rurales	Zonas urbanas
Drenajes sencillos rurales	1,00	0,33	0,33	0,11	0,20	0,20
Drenajes doble rurales	3,00	1,00	1	0,33	0,33	0,20
Cuerpos de agua	3,00	1	1,00	0,33	0,33	0,33
Pendientes	9,00	3,00	3,00	1,00	5,00	3,00
Vías rurales	5,00	3,00	3,00	0,20	1,00	3,00
Zonas urbanas	5,00	5,00	3,00	0,33	0,33	1,00
Suma total	26,00	12,33	10,33	2,31	7,20	7,73

Nota: Elaboración propia

8.2.2 Matriz de comparación por pares normalizada (MCN)- cálculo de pesos

Esta matriz se genera a partir de la matriz de comparación por pares con calificación numérica, donde los resultados se obtienen al dividir el valor de cada celda por la suma total de la columna. Esta matriz es importante porque de esta se obtiene la matriz de prioridad o de importancia de las variables.

Tabla 12*Matriz de comparación por pares normalizada (MCN)- cálculo de pesos*

Variables	Drenajes sencillos rurales	Drenajes doble rurales	Cuerpos de agua	Pendientes	vías rurales	Zonas urbanas
Drenajes sencillos rurales	0,04	0,03	0,03	0,05	0,03	0,03
Drenajes doble rurales	0,12	0,08	0,10	0,14	0,05	0,03
Cuerpos de agua	0,12	0,08	0,10	0,14	0,05	0,04
Pendientes	0,35	0,24	0,29	0,43	0,69	0,39
vías rurales	0,19	0,24	0,29	0,09	0,14	0,39
Zonas urbanas	0,19	0,41	0,29	0,14	0,05	0,13

Nota: Elaboración propia

8.2.3 Matriz de prioridad o de importancia

Esta matriz se obtiene de promediar los valores de las filas de la matriz de comparación por pares normalizada (MCN) por cada variable. En donde nos indica que la variable más importante corresponde a las pendientes con un 39% y la variable menos importante son los drenajes sencillos.

Tabla 13*Matriz de prioridad o de importancia*

Variables	Porcentaje
Drenajes sencillos rurales	3
Drenajes doble rurales	8
Cuerpos de agua	8
Pendientes	39
Vías rurales	22
Zonas urbanas	20
Total	100

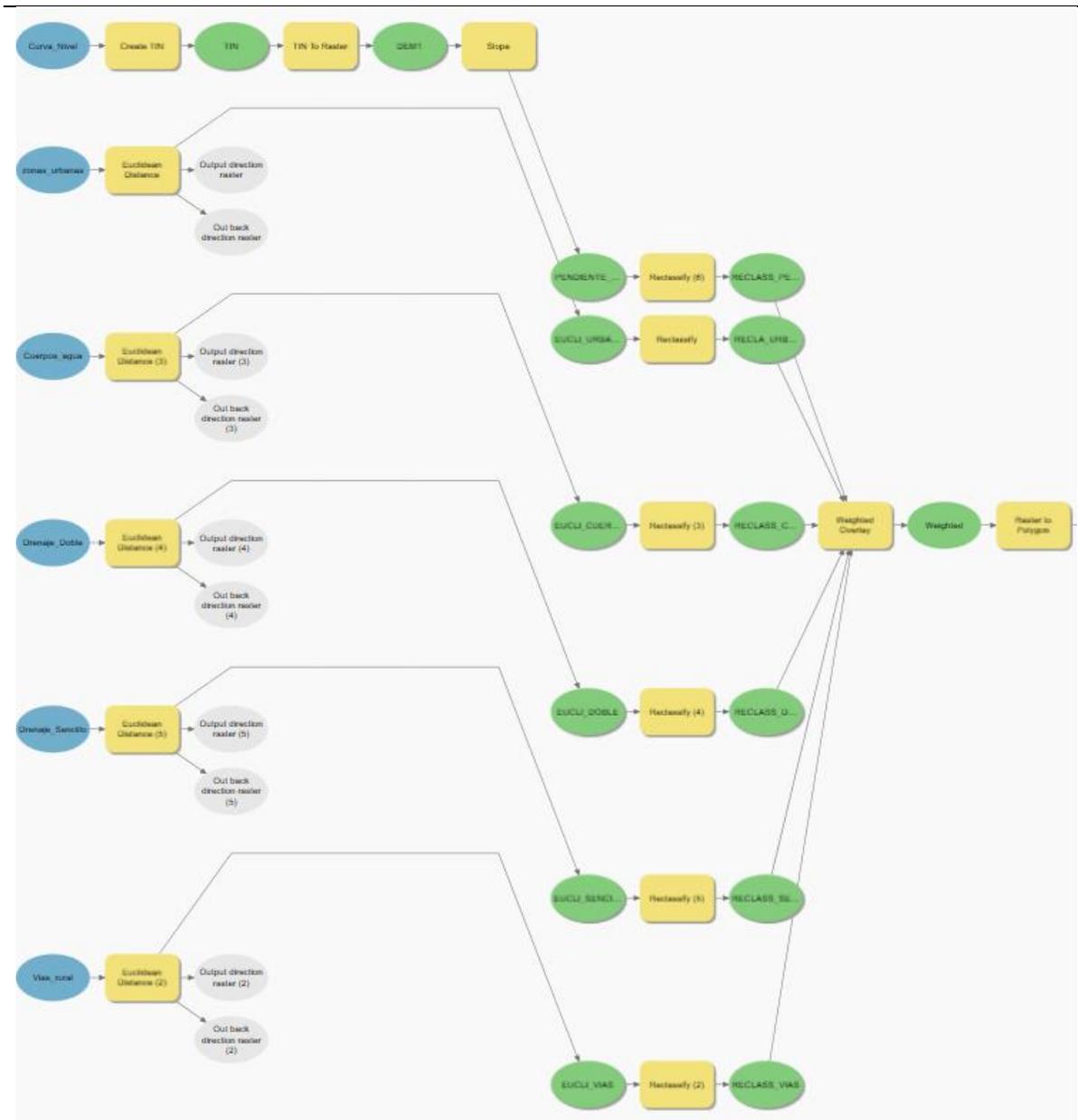
Nota: Elaboración propia

8.3 Paso 3 Definición de restricciones en la localización de áreas potenciales

Dentro de esta investigación se recopilaron variables que son restricciones y que se deben de extraer del resultado de las áreas potenciales para el relleno sanitario de contingencia, obtenidas a partir del geoprocesamiento y la aplicación de la metodología de superposición ponderación (ver Figura 9).

Se definieron 8 restricciones que obedecen a las áreas de conservación y protección ambiental, la clasificación agrológica de los suelos, amenazas por remoción en masa, amenazas por inundación rural, amenaza por avenida torrencial rural, modelo de ocupación del territorio vigente, la dirección de los vientos y la geología. Cada una contiene un criterio que da respuesta al por qué se considera como una restricción, además de documentar las fuentes de la información y la escala de trabajo (ver **Tabla 14**).

Figura 10
Geoprocesamiento de la superposición ponderada

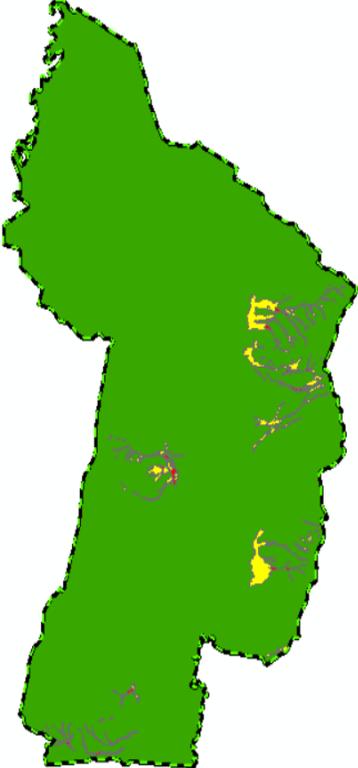


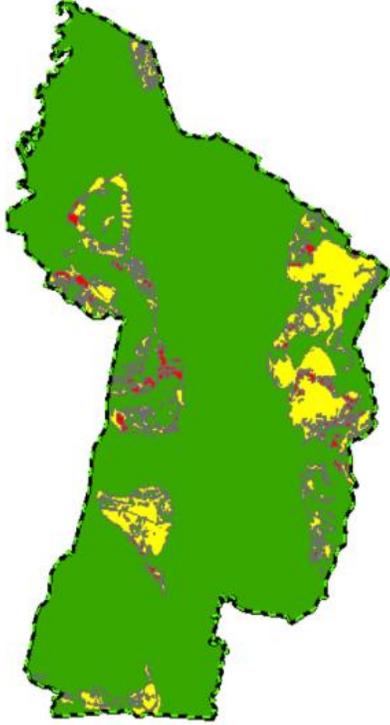
Nota: Elaboración propia

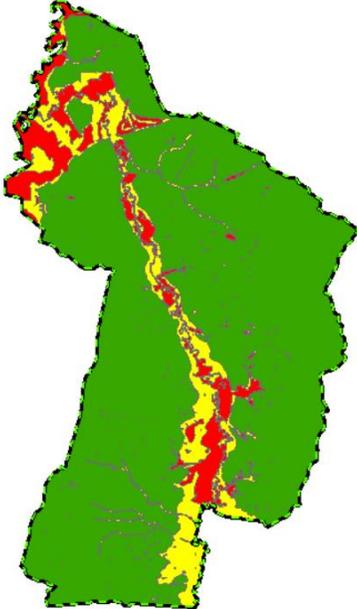
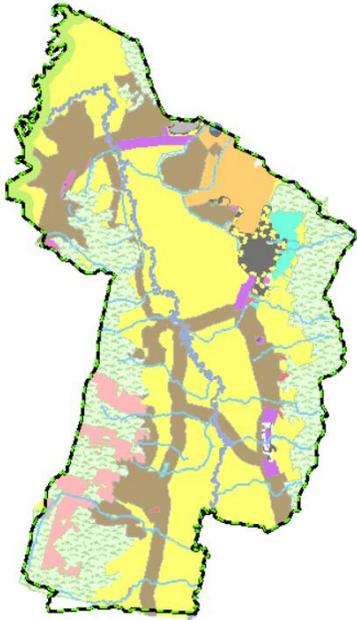
Tabla 14
Matriz de restricciones

Criterio	Restricciones	Fuente	Escala de trabajo
El sitio óptimo para relleno sanitario de contingencia no puede estar dentro de las áreas de conservación y protección	Áreas de conservación y protección ambiental		1:25.000
<p>Fuente: Las definidas por la CAR como determinantes ambientales para la actualización del PBOT, en las que se incluyen las áreas del sistema nacional de áreas protegidas (reserva forestal protectora Pionono), áreas complementarias para la conservación (reserva forestal protectora productora cuenca alta del río Bogotá) resolución 138 de 2014 Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible - MADS, áreas de manejo especial (áreas de protección, restauración, áreas de recreación ecoturística como parque Sopó y áreas de actividad recreacional regional), cuerpos de agua y nacimientos de agua, rondas declaradas(Río Teusacá resolución CAR 2165 de 2016 y 2166 de 2016, Río Bogotá acuerdo CAR 17 de 2009 y quebrada Laureles resolución 0304 de 2017), bosques protectores, franjas de protección hídrica, zonas de recarga de acuíferos. En conclusión, las definidas por el plan de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas - POMCA del Río Bogotá en la categoría 01 áreas de conservación y protección ambiental.</p>			

<p>El sitio óptimo para relleno sanitario de contingencia no puede estar dentro de las clases agrológica 1,2,3,7 y 8, por ser áreas de protección para la agricultura al considerarse a áreas para la seguridad alimentaria del país y por corresponder a áreas con fragmentos rocosos y muy escarpados generalmente con presencia de cobertura boscosa.</p>	<p>Clasificación agrológica de los suelos</p>		<p>1:25.000 POMC A 10.000 IGAC</p>
<p>Fuente: Dentro de la información obtenida, esa zonificación se define a partir del plan de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas - POMCA del Río Bogotá en conjunto con el estudio de suelos de capacidad de uso del suelo para la sabana de Bogotá del IGAC. Debido que el estudio más detallado corresponde al estudio del IGAC por ser escala 1:10.000, pero este no cubre toda la jurisdicción del municipio, por lo que se complementa con la información de clases agrológicas del POMCA a escala 25.000.</p>			

<p>El sitio óptimo para relleno sanitario de contingencia no puede estar en grado de amenaza media y alto por avenida torrenciales</p>	<p>Amenaza por avenida torrencial rural</p>		<p>1:25.000</p>
<p>Fuente: Corresponden a las zonificaciones modeladas para la amenaza de avenida torrencial rural por el municipio de Sopó para el proceso de actualización del plan básico aprobadas por el grupo de gestión del riesgo a través del informe técnico DGOAT No.060 de 2021 de la corporación autónoma regional - CAR</p>			

<p>El sitio óptimo para relleno sanitario de contingencia no puede estar en grado de amenaza media y alto por remoción en masa rural</p>	<p>Amenaza por remoción en masa rural</p>		<p>1:25.000</p>
<p>Fuente: Corresponden a las zonificaciones modeladas para la amenaza por remoción en masa rural por el municipio de Sopó para el proceso de actualización del plan básico aprobadas por el grupo de gestión del riesgo a través del informe técnico DGOAT No.060 de 2021 de la corporación autónoma regional - CAR</p>			

<p>El sitio óptimo para relleno sanitario de contingencia no puede estar en grado de amenaza media y alto por inundación</p>	<p>Amenaza por inundación rural</p>		<p>1:25.000</p>
<p>Fuente: Corresponden a las zonificaciones modeladas para la amenaza de inundación rural por el municipio de Sopó para el proceso de actualización del plan básico aprobadas por el grupo de gestión del riesgo a través del informe técnico DGOAT No.060 de 2021 de la corporación autónoma regional - CAR</p>			
<p>El sitio óptimo para relleno sanitario de contingencia debe articularse con la reglamentación de uso del suelo vigente, de tal manera que el suelo propuesto tenga compatibilidad de uso.</p>	<p>Modelo de ocupación del territorio vigente</p>		<p>1:25.000</p>
<p>Fuente: Corresponde al shapefile de la Reglamentación del uso del suelo definidos en el decreto 080 de 2010</p>			

<p>El sitio óptimo para relleno sanitario de contingencia de relleno sanitario no debe afectar las áreas urbanas por la dirección de los vientos, estos deben tener una dirección hacia lugar donde no haya áreas urbanizadas.</p>	<p>Dirección de los vientos</p>	<p>Fuente: Definidos en el mapa de dirección media anual del viento, promedios multianuales para Colombia por el Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales (IDEAM).</p>	<p>No aplica</p>
<p>El sitio óptimo para relleno sanitario de contingencia no puede contar con presencia de formaciones plana (K2P), formación de labor tierna (K2T), Formación Chía segmento 1 (Qch1) por contener una probabilidad muy alta de contener acuíferos.</p>	<p>Geología</p>		<p>1:25.000</p>
<p>Fuente: Definida por la geología del plan de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas - POMCA del Río Bogotá</p>			

Nota: Elaboración propia

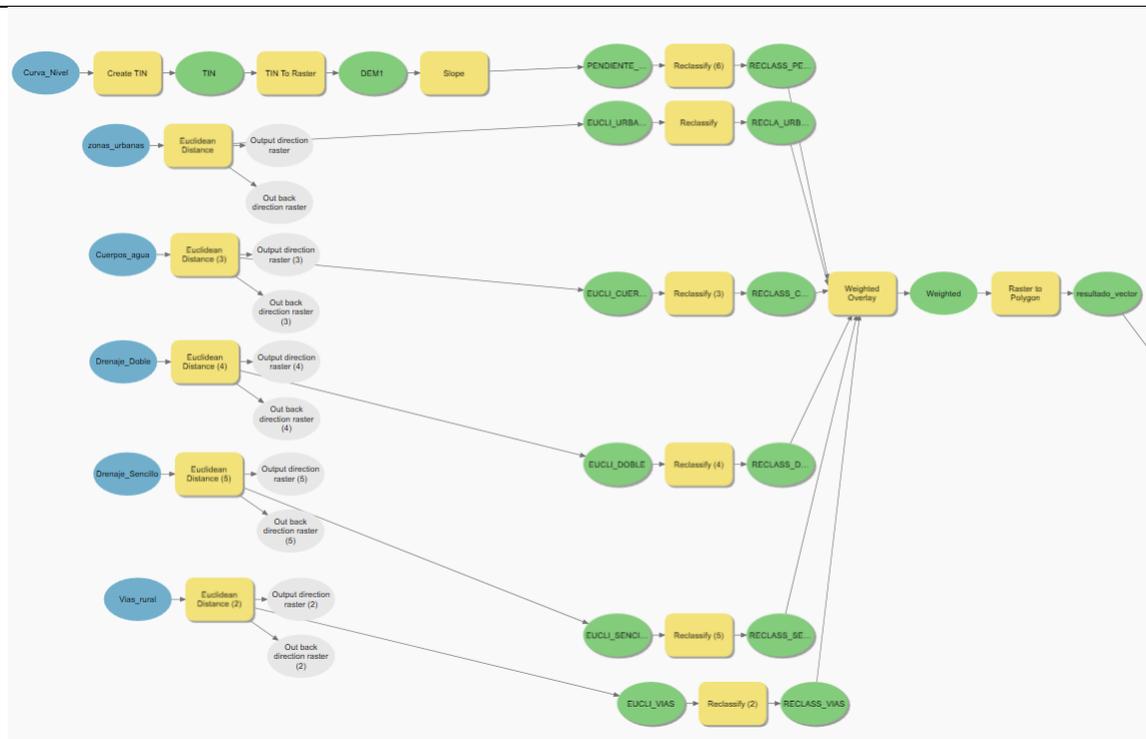
8.4 Paso 4: ejecución del geoprocesamiento utilizando software SIG

La realización de todo el geoprocesamiento para obtener el sitio óptimo para relleno sanitario de contingencia, se realizó mediante un ModelBuilder que es un lenguaje de programación visual que crea una serie de flujos de trabajo de geoprocesamientos dentro del software de ArcGIS Pro.

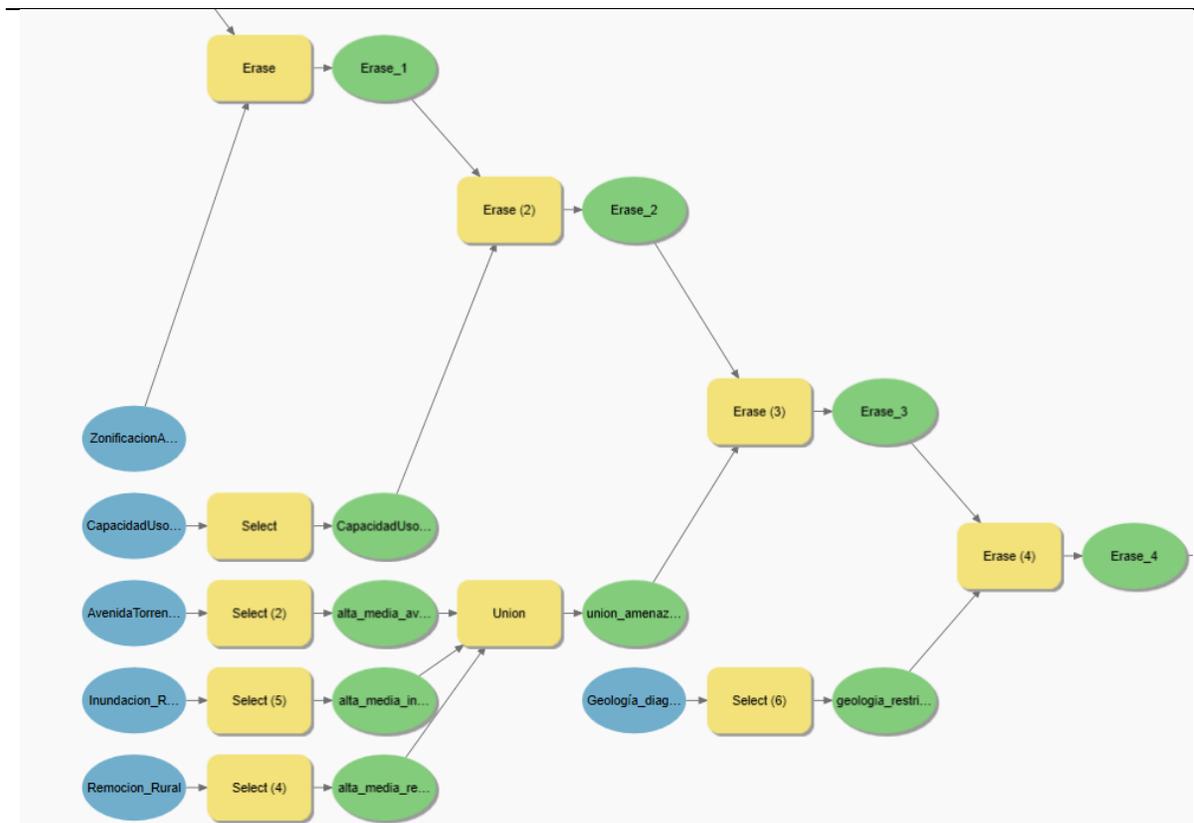
En este ModelBuilder, se organiza con tres etapas diferente, la primera etapa es la que ejecuta el método de superposición ponderada a partir de las variables, criterios y ponderaciones definidos, la segunda etapa, elimina las restricciones definidas del resultado obtenido en el método de superposición ponderada y por último ejecuta la intersección de los resultados obtenidos con los usos compatibles del modelo de ocupación vigente.

Figura 11

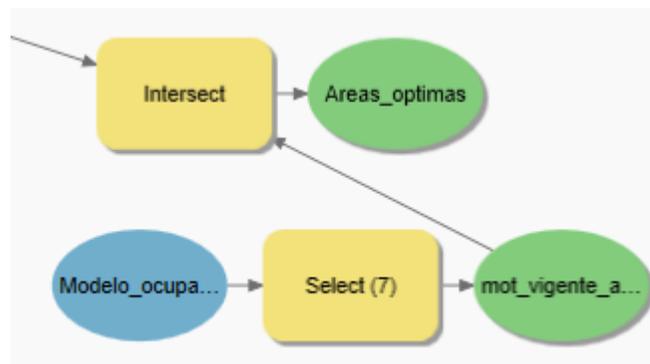
Primera etapa ModelBuilder - ejecución del método de superposición ponderada



Nota: Elaboración propia

Figura 12*Segunda etapa ModelBuilder – eliminación de restricciones*

Nota: Elaboración propia

Figura 13*Tercera etapa ModelBuilder – intersección de resultado*

Nota: Elaboración propia

Dentro de este flujo de trabajo se utilizaron las siguientes herramientas de geoprocésamiento:

- **Distancia euclidiana (Euclidian Distance):** Se utilizó para definir las distancias de los criterios para cada una de las variables.
- **Crear TIN (Create TIN):** Con el uso de esta herramienta se crea la red irregular triangulada (TIN) a partir de las curvas de nivel, que es un insumo para obtener como resultado las pendientes.
- **Pendiente (Slope):** Con la red irregular triangulada, se utiliza esta herramienta para generar las pendientes en formato ráster.
- **Reclasificación (Reclassify):** Esta herramienta permitió reclasificar las distancias obtenidas en las distancias euclidianas y en la pendiente, teniendo en cuenta el criterio para cada una de las variables.
- **Superposición ponderada (Weighted overlay):** Esta herramienta se utilizó para realizar el análisis de superposición ponderada, que es un método para combinar varias variables o capas de datos ráster para obtener una nueva capa ráster con la suma de puntuaciones adecuadas, a partir de una clasificación o criterio de importancia relativa para cada una de las variables utilizadas, que para este caso son la reclasificación de la distancia de las áreas urbanas, drenajes sencillos, drenajes dobles, cuerpos de agua, vías y la recalificación porcentual de las pendientes.
- **Ráster a polígono (Ráster to polygon):** Esta herramienta permite transformar una capa ráster en vector tipo polígono, utilizada para transformar la superposición ponderada a polígono.

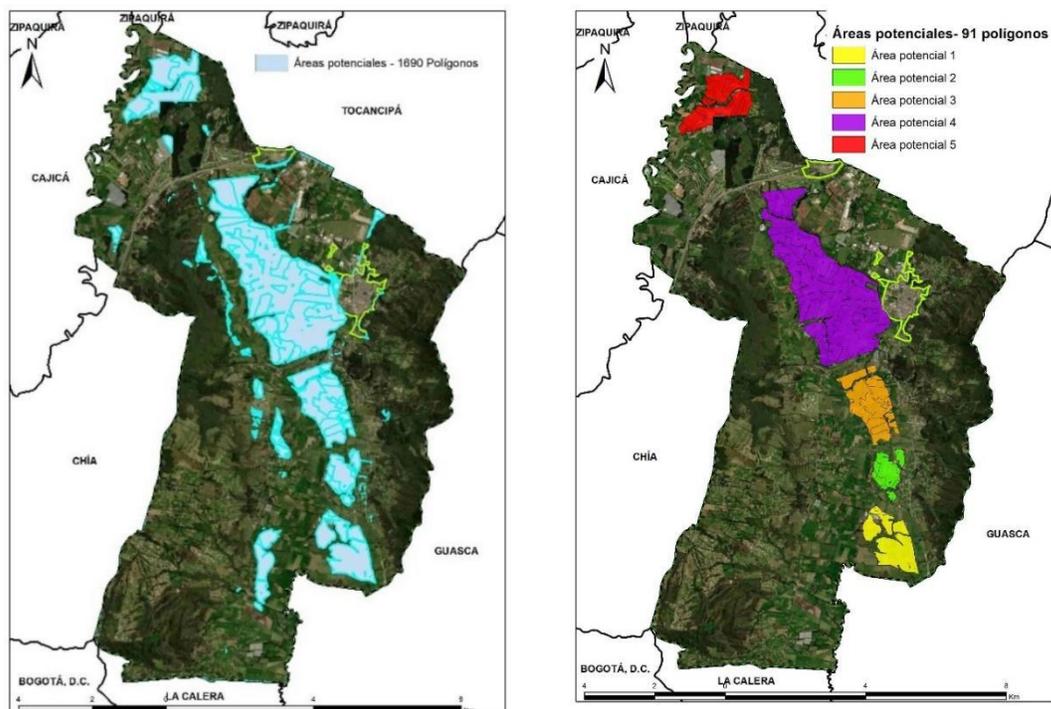
- **Borrar (Erase):** Se utilizo para borrar de la capa resultante de la superposición pondera las restricciones definidas para este trabajo de investigación.
- **Seleccionar (Select):** Permitió seleccionar elementos puntuales de cada capa que es restricción, como por ejemplo la amenaza media y alta de las modelaciones de amenazas, las clases agrológicas 1, 2, 3, 7 y 8, las unidades determinadas para geología etc.
- **Intersecarse (Intersect):** Se utilizo para interceptar las áreas potenciales para el sitio óptimo de relleno sanitario de contingencia con los usos compatibles a este, del modelo de ocupación del territorio vigente del decreto 080 de 2010.

9. Resultados y discusiones

La aplicación del geoprocesamiento en ModelBuilder generó 1690 polígonos de áreas potenciales. Sin embargo, muchos de estos polígonos eran dispersos y de pequeñas dimensiones, por lo que se requirió un proceso de depuración para obtener un resultado más preciso.

En este proceso, se eliminaron los polígonos menores a 1 hectárea y se descartaron aquellos con valoraciones no apropiadas. Como resultado final, se obtuvieron 91 polígonos en 5 áreas potenciales para la ubicación de un relleno sanitario de contingencia en el municipio de Sopó.

Figura 14
Áreas potenciales del municipio de Sopó



Nota: Elaboración propia

Se evaluaron las diferentes áreas potenciales para la ubicación de un relleno sanitario de contingencia en el municipio de Sopó, utilizando la división predial como referencia. A partir de la encuesta a municipios sobre gestión de residuos sólidos domiciliarios elaborado por el Departamento Nacional de Planeación para el año 2019 (CEPAL, 2021), menciona que un colombiano en promedio produce 0,75 kilos de residuos sólidos al día, para Sopó en la actualidad según DANE, existen 27.997 habitantes que generarían 20.998 kilos de residuos sólidos por día. Atendiendo al decreto 1784 de 2017, en el artículo 2.3.2.4.10 “Categorización de rellenos sanitarios”, un relleno sanitario que tiene una capacidad máxima de 50 toneladas/día, es considerado como de categoría 1, es decir, Sopó con los residuos que genera al día aplica para esta categoría. Ahora, la resolución 938 de 2019, en el artículo 1 “elementos para la definición de la potencialidad de áreas disponibles”, en el numeral 4, define que un relleno sanitario de categoría 1 en condiciones de operación tiene una densidad promedio de 0,85 toneladas/m³, con esta información se procede calcular el área mínima del predio que requeriría el sitio óptimo en un día, por medio de la siguiente ecuación.

$$\begin{aligned} \text{Área mínima del predio} &= \frac{\text{Volumen}}{\text{Densidad}} \\ \text{Área mínima del predio} &= \frac{20,99 \text{ toneladas}}{0,85 \frac{\text{toneladas}}{\text{m}^3}} = 24,73\text{m}^3 \\ 24,73/1\text{m}^2/1000\text{m}^3 &= 0,02473\text{ha} = 247,73\text{m}^3 \end{aligned}$$

Si bien, los rellenos sanitarios de contingencia entran en operación dependiendo de una situación de contingencia o emergencia dentro del municipio, es difícil definir por cuanto tiempo este estaría funcionando. Realizando una hipótesis de operación para 1 mes,

se requiere un predio con un área mínima de $7431,9 m^3$, resultado de multiplicar el área mínima del predio por día en 30 días. Así mismo, el DANE para el año 2035 proyecta un aumento poblacional a 41.318 habitantes que generarían alrededor de 31.038 kilos de residuos, lo que quiere decir, que el área mínima del predio aumenta, ver siguiente ecuación

$$\text{Área mínima del predio para 2035} = \frac{31,04 \text{ toneladas}}{0,85 \frac{\text{toneladas}}{m^3}} = 36,52m^3$$

$$36,52m^3 / 1m^2 / 1000m^3 = 0,0365ha = 365,15m^3$$

De acuerdo a lo anterior, los predios que se consideran como sitio óptimo tendrían un área mínima de $7431,9 m^3$ considerando la situación actual y área mínima proyecta para el año 2035 es de $8.280 m^2$, por lo que para esta investigación se considera que los predios más idóneos para proponer un relleno sanitario de contingencia deben tener un rango de área igual o mayor a $8000 m^2$ a $15000m^2$, que equivalen a 0,8 hectáreas y 1,5 hectáreas respectivamente.

9.1 Análisis de áreas potenciales

El área potencial número 1 cuenta con 4 predios de grandes dimensiones, es por esto por lo que no es apta para un sitio óptimo, debido a que no se pueden afectar predios grandes por la poca generación de residuos sólidos que genera el municipio.

Figura 15
Área potencial número 1



Nota: Elaboración propia

Tabla 15
Tabla resultado área potencial 1

Número de predios	Área potencial	Código predial	Área Hectáreas
1	Área potencial 1	257580000000000090096000000000	60,14
2	Área potencial 1	257580000000000090097000000000	25,01
3	Área potencial 1	257580000000000090100000000000	254,49
4	Área potencial 1	257580000000000090101000000000	28,46

Nota: Elaboración propia

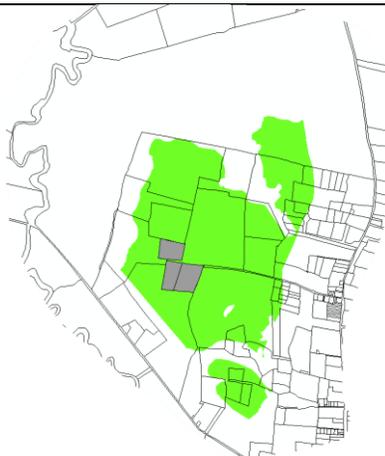
Para el área potencial número 2, se obtuvieron 45 predios, de los cuales 3 cumplen con los rangos de áreas establecidos, y están inmersos totalmente dentro del área potencial,

estos corresponden a 25758000000000090022000000000,

25758000000000090272000000000 y 25758000000000090273000000000.

Figura 16

Área potencial número 2



Nota: Elaboración propia

Tabla 16

Tabla resultado área potencial 2

Número de predios	Área potencial	Código predial	Área Hectáreas
1	Área potencial 2	25758000000000090001000000000	112,35
2	Área potencial 2	25758000000000090004000000000	11,10
3	Área potencial 2	25758000000000090013000000000	0,87
4	Área potencial 2	25758000000000090017000000000	3,94
5	Área potencial 2	25758000000000090019000000000	3,64
6	Área potencial 2	25758000000000090022000000000	1,47
7	Área potencial 2	25758000000000090025000000000	14,12
8	Área potencial 2	25758000000000090028000000000	3,85

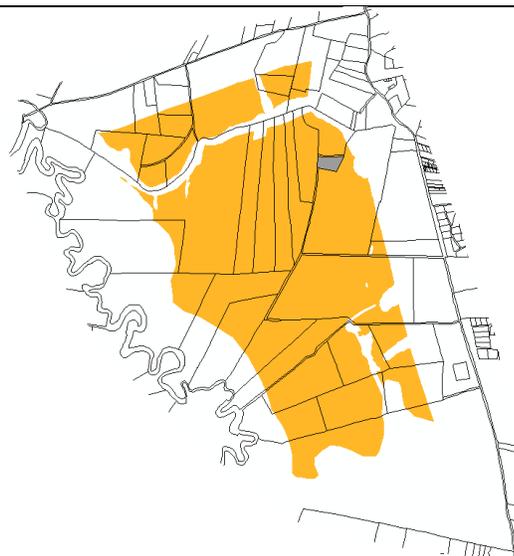
9	Área potencial 2	257580000000000090037000000000	2,21
10	Área potencial 2	257580000000000090038000000000	0,15
11	Área potencial 2	257580000000000090039000000000	0,24
12	Área potencial 2	257580000000000090040000000000	0,08
13	Área potencial 2	257580000000000090047000000000	3,51
14	Área potencial 2	257580000000000090052000000000	1,49
15	Área potencial 2	257580000000000090054000000000	1,07
16	Área potencial 2	257580000000000090055000000000	0,28
17	Área potencial 2	257580000000000090056000000000	4,19
18	Área potencial 2	257580000000000090057000000000	0,42
19	Área potencial 2	257580000000000090059000000000	1,65
20	Área potencial 2	257580000000000090060000000000	0,48
21	Área potencial 2	257580000000000090062000000000	0,36
22	Área potencial 2	257580000000000090090000000000	11,92
23	Área potencial 2	257580000000000090192000000000	0,47
24	Área potencial 2	257580000000000090244000000000	1,26
25	Área potencial 2	257580000000000090271000000000	2,15
26	Área potencial 2	257580000000000090272000000000	0,98
27	Área potencial 2	257580000000000090273000000000	1,08
28	Área potencial 2	257580000000000090274000000000	3,31
29	Área potencial 2	257580000000000090275000000000	6,03
30	Área potencial 2	257580000000000090305000000000	5,82
31	Área potencial 2	257580000000000090306000000000	10,36

32	Área potencial 2	257580000000000090307000000000	2,82
33	Área potencial 2	257580000000000090308000000000	0,58
34	Área potencial 2	257580000000000090332000000000	2,42
35	Área potencial 2	257580000000000090333000000000	7,51
36	Área potencial 2	257580000000000090462000000000	0,08
37	Área potencial 2	257580000000000090463000000000	0,12
38	Área potencial 2	257580000000000090464000000000	0,08
39	Área potencial 2	257580000000000090465000000000	0,07
40	Área potencial 2	257580000000000090475000000000	2,90
41	Área potencial 2	257580000000000090801800000514	0,64
42	Área potencial 2	257580000000000090801800000516	0,38
43	Área potencial 2	257580000000000090801800000517	0,29
44	Área potencial 2	257580000000000090801800000518	0,37
45	Área potencial 2	257580000000000090801800000519	0,48
Predios que aplican			

Nota: Elaboración propia

El área potencial número 3 contiene 38 predios de los cuales un predio aplica como sitio óptimo de relleno sanitario por estar completamente inmersos dentro del área potencia y cumplir con el rango de áreas establecidos.

Figura 17
Área potencial número 3



Nota: Elaboración propia

Tabla 17
Tabla resultado área potencial 3

Número de predios	Área potencial	Código predial	Área Hectáreas
1	Área potencial 3	257580000000000080053000000000	5,13
2	Área potencial 3	257580000000000080054000000000	4,70
3	Área potencial 3	257580000000000080055000000000	1,86
4	Área potencial 3	257580000000000080056000000000	19,31
5	Área potencial 3	257580000000000080057000000000	4,12
6	Área potencial 3	257580000000000080058000000000	22,46

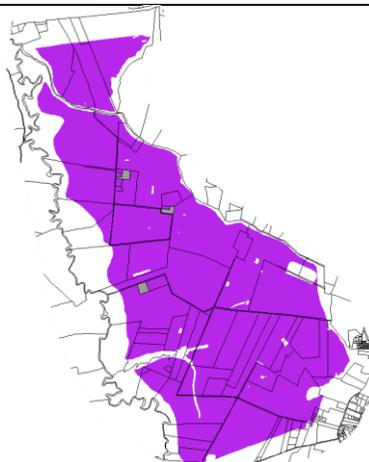
7	Área potencial 3	257580000000000080059000000000	5,07
8	Área potencial 3	257580000000000080060000000000	12,56
9	Área potencial 3	257580000000000080067000000000	25,26
10	Área potencial 3	257580000000000080068000000000	10,34
11	Área potencial 3	257580000000000080069000000000	17,70
12	Área potencial 3	257580000000000080070000000000	16,19
13	Área potencial 3	257580000000000080071000000000	39,01
14	Área potencial 3	257580000000000080075000000000	12,54
15	Área potencial 3	257580000000000080079000000000	7,37
16	Área potencial 3	257580000000000080080000000000	7,42
17	Área potencial 3	257580000000000080082000000000	5,31
18	Área potencial 3	257580000000000080083000000000	6,73
19	Área potencial 3	257580000000000080089000000000	3,27
20	Área potencial 3	257580000000000080177000000000	3,07
21	Área potencial 3	257580000000000080178000000000	2,07
22	Área potencial 3	257580000000000080179000000000	5,08
23	Área potencial 3	257580000000000080181000000000	2,04
24	Área potencial 3	257580000000000080182000000000	5,28
25	Área potencial 3	257580000000000080183000000000	2,86
26	Área potencial 3	257580000000000080184000000000	10,12
27	Área potencial 3	257580000000000080262000000000	0,59
28	Área potencial 3	257580000000000080264000000000	4,83
29	Área potencial 3	257580000000000080270000000000	0,90

30	Área potencial 3	257580000000000090001000000000	112,35
31	Área potencial 3	257580000000000090002000000000	7,53
32	Área potencial 3	257580000000000090226000000000	7,78
33	Área potencial 3	257580000000000090436000000000	8,06
34	Área potencial 3	257580000000000090438000000000	7,28
35	Área potencial 3	257580000000000090439000000000	7,41
36	Área potencial 3	257580000000000090440000000000	7,78
37	Área potencial 3	257580000000000090441000000000	7,40
38	Área potencial 3	257580000000000090442000000000	8,17

Nota: Elaboración propia

Las áreas potenciales número 4, se interceptan 81 predios, pero únicamente 3 cumplen para relleno sanitario de contingencia, estos corresponden a 257580000000000020326000000000, 257580000000000020572000000000, 257580000000000020683000000000.

Figura 18
Área potencial número 4



Nota: Elaboración propia

Tabla 18
Tabla resultado área potencial 4

Número de predios	Área potencial	Código predial	Área Hectáreas
1	Área potencial 4	257580000000000020154000000000	9,35
2	Área potencial 4	257580000000000020155000000000	8,97
3	Área potencial 4	257580000000000020156000000000	30,66
4	Área potencial 4	257580000000000020158000000000	2,03
5	Área potencial 4	257580000000000020159000000000	6,82
6	Área potencial 4	257580000000000020160000000000	1,88
7	Área potencial 4	257580000000000020162000000000	0,47
8	Área potencial 4	257580000000000020166000000000	10,78
9	Área potencial 4	257580000000000020180000000000	0,40
10	Área potencial 4	257580000000000020181000000000	43,84
11	Área potencial 4	257580000000000020182000000000	4,63
12	Área potencial 4	257580000000000020184000000000	37,27
13	Área potencial 4	257580000000000020185000000000	19,45
14	Área potencial 4	257580000000000020187000000000	18,58
15	Área potencial 4	257580000000000020189000000000	29,86
16	Área potencial 4	257580000000000020190000000000	41,98
17	Área potencial 4	257580000000000020192000000000	5,23

18	Área potencial 4	257580000000000020193000000000	76,65
19	Área potencial 4	257580000000000020221000000000	43,49
20	Área potencial 4	257580000000000020252000000000	40,98
21	Área potencial 4	257580000000000020299000000000	3,91
22	Área potencial 4	257580000000000020305000000000	43,11
23	Área potencial 4	257580000000000020306000000000	48,50
24	Área potencial 4	257580000000000020308000000000	1,81
25	Área potencial 4	257580000000000020309000000000	7,28
26	Área potencial 4	257580000000000020326000000000	1,18
27	Área potencial 4	257580000000000020340000000000	9,45
28	Área potencial 4	257580000000000020341000000000	11,32
29	Área potencial 4	257580000000000020342000000000	7,11
30	Área potencial 4	257580000000000020343000000000	6,20
31	Área potencial 4	257580000000000020344000000000	7,46
32	Área potencial 4	257580000000000020378000000000	17,58
33	Área potencial 4	257580000000000020379000000000	31,07
34	Área potencial 4	257580000000000020381000000000	28,06
35	Área potencial 4	257580000000000020408000000000	2,95
36	Área potencial 4	257580000000000020415000000000	0,47
37	Área potencial 4	257580000000000020427000000000	1,21
38	Área potencial 4	257580000000000020472000000000	6,94
39	Área potencial 4	257580000000000020498000000000	10,00
40	Área potencial 4	257580000000000020561000000000	19,81

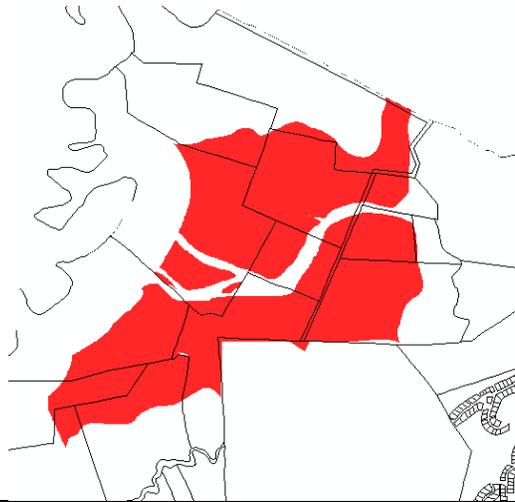
41	Área potencial 4	257580000000000020562000000000	2,42
42	Área potencial 4	257580000000000020572000000000	1,33
43	Área potencial 4	257580000000000020580000000000	0,32
44	Área potencial 4	257580000000000020581000000000	0,34
45	Área potencial 4	257580000000000020592000000000	3,53
46	Área potencial 4	257580000000000020618000000000	17,72
47	Área potencial 4	257580000000000020642000000000	6,45
48	Área potencial 4	257580000000000020643000000000	14,11
49	Área potencial 4	257580000000000020683000000000	0,93
50	Área potencial 4	257580000000000020684000000000	0,33
51	Área potencial 4	257580000000000020689000000000	17,34
52	Área potencial 4	257580000000000020690000000000	0,44
53	Área potencial 4	257580000000000020730000000000	18,09
54	Área potencial 4	257580000000000020732000000000	4,77
55	Área potencial 4	257580000000000020733000000000	12,81
56	Área potencial 4	257580000000000020734000000000	4,89
57	Área potencial 4	257580000000000020738000000000	1,90
58	Área potencial 4	257580000000000020750000000000	0,46
59	Área potencial 4	257580000000000020751000000000	0,39
60	Área potencial 4	257580000000000020753000000000	6,65
61	Área potencial 4	257580000000000020754000000000	11,51
62	Área potencial 4	257580000000000020775000000000	0,80
63	Área potencial 4	257580000000000020780000000000	0,09

64	Área potencial 4	257580000000000020781000000000	0,08
65	Área potencial 4	257580000000000020792000000000	0,69
66	Área potencial 4	257580000000000020794000000000	0,16
67	Área potencial 4	257580000000000020813000000000	25,47
68	Área potencial 4	257580000000000020815000000000	1,20
69	Área potencial 4	257580000000000020816000000000	0,95
70	Área potencial 4	257580000000000020887000000000	11,15
71	Área potencial 4	257580000000000020900000000000	12,55
72	Área potencial 4	257580000000000020901000000000	0,60
73	Área potencial 4	257580000000000020903000000000	13,04
74	Área potencial 4	257580000000000020916000000000	0,44
75	Área potencial 4	257580000000000020920000000000	47,65
76	Área potencial 4	257580000000000030050000000000	18,52
77	Área potencial 4	257580000000000040089000000000	20,94
78	Área potencial 4	257580000000000040132000000000	3,44
79	Área potencial 4	257580000000000040242000000000	53,35
80	Área potencial 4	257580000000000050114000000000	12,86
81	Área potencial 4	257580000000000050591000000000	28,25

Nota: Elaboración propia

En el área potencial número 5 se intercepta con 16 predios, pero ninguno cumple con el área mínima y máxima del predio.

Figura 20
Área potencial número 5



Nota: Elaboración propia

Tabla 19
Tabla resultado área potencial 5

Número de predios	Área potencial	Código predial	Área Hectáreas
1	Área potencial 5	257580000000000050094000000000	20,89
2	Área potencial 5	257580000000000050096000000000	66,87
3	Área potencial 5	257580000000000050097000000000	9,99
4	Área potencial 5	257580000000000050102000000000	4,36
5	Área potencial 5	257580000000000050116000000000	30,35
6	Área potencial 5	257580000000000050130000000000	77,58

7	Área potencial 5	257580000000000050133000000000	54,61
8	Área potencial 5	257580000000000050135000000000	35,28
9	Área potencial 5	257580000000000050136000000000	32,90
10	Área potencial 5	257580000000000050596000000000	42,08
11	Área potencial 5	257580000000000050601000000000	13,25
12	Área potencial 5	257580000000000050603000000000	30,46
13	Área potencial 5	257580000000000050604000000000	28,38
14	Área potencial 5	257580000000000050609000000000	6,99
15	Área potencial 5	257580000000000050610000000000	4,16
16	Área potencial 5	257580000000000140114000000000	204,58

Nota: Elaboración propia

Sitio óptimo para relleno sanitario de contingencia

El sitio óptimo como propuesta de relleno sanitario de contingencia para el municipio de Sopó, se obtuvo 7 predios que cumplen con todas las variables, ponderaciones, restricciones y las áreas mínimas y máximas del predio para dicho uso.

Tabla 20
Tabla de resultados finales

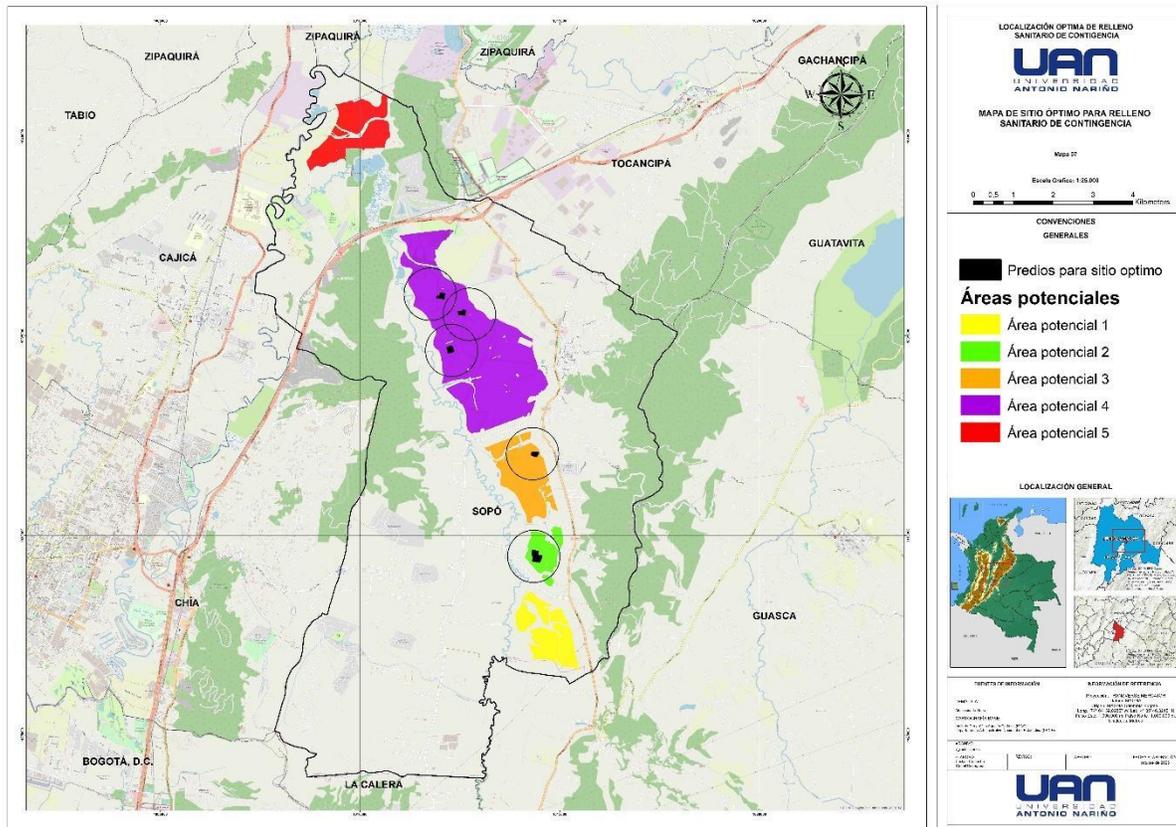
Zonas	Código predial	Área Hectáreas	Área m ²
Área potencial 2	257580000000000090022000000000	1,47	14639,77
Área potencial 2	257580000000000090272000000000	0,98	9835,41
Área potencial 2	257580000000000090273000000000	1,08	10817,50
Área potencial 3	257580000000000080270000000000	0,90	8957,51

Área potencial 4	257580000000000002032600000000	1,18	11782,92
Área potencial 4	257580000000000002057200000000	1,33	13326,36
Área potencial 4	257580000000000002068300000000	0,93	9287,75

Nota: Elaboración propia

Figura 21

Mapa de localización de un relleno sanitario de emergencia y contingencia para el municipio de Sopó, Cundinamarca



Nota: elaboración propia

10. Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos podemos concluir que se identificaron sitios óptimos como propuesta de un relleno sanitario de contingencia, con relación a un área de 7,86 hectáreas que se dividen en siete predios, a partir del análisis del geoprocesamiento de las áreas potenciales, logrando compatibilidad de la propuesta con el uso del suelo del plan de ordenamiento territorial vigente del municipio de Sopó, Cundinamarca.

En resumen, se establecieron 6 variables tales como; drenajes sencillos, drenajes dobles, cuerpos de agua, vías, pendientes y zonas urbanas, a partir de tomar como referencia la normatividad vigente y demás investigaciones. A su vez por medio de la aplicación de criterios y ponderaciones que permitieron el desarrollo la metodología de superposición ponderada para la identificación de áreas potenciales que se precisaron y delimitaron con exoneración de las restricciones, cuyo resultado se obtuvieron 5 áreas potenciales de las cuales 7 predios cumplen como sitio óptimo de un relleno sanitario de contingencia.

Analizando la generación de residuos sólidos que produce el municipio de Sopó al día en la actualidad y la proyección poblacional al año 2035, no se requieren predios con grandes magnitudes, lo que permite a la administración municipal dentro del ejercicio del ordenamiento territorial, adquirir con mayor facilidad algunos de los predios resultantes para un sitio óptimo debido a su valor en el mercado.

El empleo de Model Builder en este estudio demostró ser una herramienta valiosa para la identificación de sitios óptimos de relleno sanitario de contingencia en el municipio de Sopó. Al analizar las variables como drenajes, cuerpos de agua, vías, pendientes y zonas urbanas, y al aplicar criterios y ponderaciones a través de la metodología de superposición

ponderada, pudimos delimitar áreas potenciales con una alta compatibilidad con el plan de ordenamiento territorial vigente.

11. Recomendaciones

Los resultados obtenidos respaldan la viabilidad de esta metodología para la planificación de infraestructuras de gestión de residuos sólidos en áreas urbanas. El enfoque de Model Builder permitió una identificación precisa de los sitios óptimos y brindó una sólida base para la toma de decisiones en la administración municipal. Sin embargo, en futuros trabajos, se podrían considerar las siguientes recomendaciones.

1. Refinamiento de datos: Se podría mejorar la precisión de los resultados al utilizar datos más detallados y actualizados, especialmente en lo que respecta a la proyección poblacional y la generación de residuos sólidos.
2. Análisis de impacto ambiental: Sería beneficioso llevar a cabo un análisis de impacto ambiental en los sitios identificados para evaluar las implicaciones ambientales y sociales de la ubicación de un relleno sanitario de contingencia.
3. Participación comunitaria: Involucrar a la comunidad local en el proceso de selección del sitio y tener en cuenta sus preocupaciones y opiniones para garantizar un proceso de toma de decisiones más inclusivo.
4. Explorar tecnologías avanzadas: Investigar y evaluar tecnologías más avanzadas para la gestión de residuos sólidos que puedan mejorar la eficiencia y la sostenibilidad de los rellenos sanitarios.

12. Referencias Bibliográficas

- Antolínez, L. J. F., Joya, M. A. M., & Almeida, J. E. (2018). Situación de la disposición final de residuos sólidos en el Área Metropolitana de Bucaramanga: caso relleno sanitario El Carrasco (revisión). *Avances Investigación en Ingeniería*, 15(1), 180-193.
- Belalcázar Urbano, I. (2019). Identificación de áreas óptimas para la localización de un relleno sanitario en las subregiones Norte y Oriente del Valle del Cauca. *Revista Entorno Geográfico*. No. 18. Julio/ diciembre 2019. 46-78.
- CEPAL. (2021). Encuesta a municipios sobre gestión de residuos sólidos domiciliarios 2019. Colombia. CEMPRE.
- Cobos S., Solano J., Vera A., Monge J. (2017). EJE 02-02 Análisis multicriterio basado en GIS para identificar potenciales áreas de emplazamiento de un relleno sanitario mancomunado en la provincia del Azuay. *Memorias Y Boletines De La Universidad Del Azuay*, 1(XVI), 51–62. <https://doi.org/10.33324/memorias.v1iXVI.48>
- Concejo Municipal de Sopó. Acuerdo Municipal No. 009 de 2020. Por el cual se adopta el Plan de Desarrollo Municipal Sopó es Nuestro Tiempo 2020-2023 y se Dictan Otras Disposiciones. 3 de junio de 2020. Acta de Comisión No. 012.
- Contraloría de Cundinamarca. (2019). Gestión Integral de los Residuos Sólidos en el Departamento de Cundinamarca. <https://www.car.gov.co/uploads/files/5e29f9d0e2cda.pdf>
- DANE. (2019). Resultados Censo Nacional de Población y Vivienda 2018. 6 de diciembre de 2019. <https://www.dane.gov.co/files/censo2018/informacion-tecnica/cnpv-2018-presentacion-3ra-entrega.pdf>
- De La Cruz-Cabrera, V., Carrillo, S., & González, M. (2020). Manejo y disposición de residuos sólidos en la comunidad de Portobelo, Colón. *Revista Científica Orbis Cónnita*, 4(2), 1–23. <https://doi.org/10.48204/j.orbis.v4n2a1>
- Estacio Vidal, J. M., Tinoco Gómez, O. R., Díaz Tafur, J., & Moore Torres, R. K. (2021). Sistemas de Información Geográfica y Localización de un Relleno Sanitario en Cerro de Pasco. *Revista Del Instituto De investigación De La Facultad De Minas, Metalurgia Y Ciencias geográficas*, 24(48), 217–227. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v24i48.21774>
- Fazenda, A. J., & Tavares-Russo, M. A. (2016). Caracterización de residuos sólidos urbanos en Sumbe: herramienta para gestión de residuos. *Ciencias Holguín*, 22(4), 1-15.

- Giménez Vera, M., y Cardozo Carrera, C. R. (2013, Mayo). Localización óptima de relleno sanitario aplicando técnicas multicriterio en sistemas de información geográfica (SIG) en el área metropolitana del Alto Paraná. In VII Congreso de Medio Ambiente.
- Gobernación de Cundinamarca. (16 de febrero de 2018). Relleno sanitario Nuevo Mondoñedo será habilitado para vender bonos de carbono. cundinamarca.gov.co <https://www.cundinamarca.gov.co/noticias/nuevo+mondonedo+sera+habilitado+para+vender+bonos+de+carbono>
- Gómez, A. (2022). Zonas aptas para la ubicación del relleno sanitario en el municipio de Ortega Tolima. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10654/43773>.
- González Díaz, J. M. (2015). Una propuesta de localización óptima para un nuevo sitio de disposición final de residuos sólidos no peligrosos para Bogotá, DC. *Perspectiva geográfica*, 20(1), 155-174.
- Hernández Caballero, A. N. (2021). Análisis de la gestión de residuos sólidos en Colombia. Artículo de investigación. Especialización en planeación ambiental y manejo integral de recursos naturales. Universidad Militar Nueva Granada. <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/38925/Hern%C3%A1ndezCaballeroAngieNataly2021.pdf?sequence=1>
- Herrera, N. (2014). Identificación de áreas potenciales para el manejo de residuos o desechos peligrosos en el departamento de Cundinamarca. [Tesis de maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional UN. Biblioteca Digital.
- Mena Frau, C. A., Morales Hernández, Y., Ormazábal Rojas, Y., & Gajardo Valenzuela, J. (2010). Localización de un relleno sanitario en la Comuna Parral, Chile, a través de evaluación multicriterio. *Interciencia*, 35(9), 684-689.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (28 de febrero de 2017). Resolución 0472 de 2017. Por el cual se reglamenta la gestión integral de los residuos generados en las actividades de construcción y demolición – RCD y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial No. 50.166
- Nantes, E. A. (2019). Método analytic hierarchy process para la toma de decisiones: repaso de la metodología y aplicaciones. *Investigación operativa*, año 27, no. 46, pp. 54-73. Disponible en: <https://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/6060>
- Organización Mundial de la Salud. (2021). Urban Health Initiative a model process for catalysing change. <https://www.who.int/publications/i/item/WHO-HEP-ECH-AQH-2021-1>

- Pinzón, E. (2015). Determinación de zonas aptas para la construcción de colegios distritales en la localidad de suba, partiendo de métodos de análisis multicriterio y herramientas SIG. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10654/6305>.
- Presidencia de la República de Colombia. (23 de marzo de 2005). Decreto 838 de 2005. Por el cual se modifica el Decreto 1713 de 2002 sobre disposición final de residuos sólidos y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial No. 45.862
- Presidencia de la República de Colombia. (26 de mayo de 2015). Decreto 1077 de 2015. Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio. Diario Oficial No. 49.523
- Presidencia de la República de Colombia. (26 de mayo de 2016). Decreto 1076 de 2016. Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible. Diario Oficial No. 50.251
- Presidencia de la República de Colombia. (28 de agosto de 2016). Decreto 1736 de 2015. Por el cual se modifica el artículo 2.3.2.3.2.2.5 del Decreto 1077 de 2015. Diario Oficial No. 49.618
- Presidencia de la República de Colombia. (2 de noviembre de 2018). Decreto 1784 de 2018. por el cual se modifica y adiciona el Decreto 1077 de 2015 en lo relativo con las actividades complementarias de tratamiento. y disposición final de residuos, sólidos en el servicio público de aseo. Diario Oficial No. 50.405
- Saaty, T.L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*, McGraw-Hill.
- Sierra, J. C. (2021). Localización de áreas potencialmente adecuadas para el desarrollo de un relleno sanitario para el Área Metropolitana de Bucaramanga. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10654/38947>.
- Zafra Mejía, C. A., Mendoza Castañeda, F. A., & Montoya Varela, P. A. (2012). A methodology for landfill location using geographic information systems: a Colombian regional case. *Ingeniería e Investigación*, 32(1), 64-70.