



ZONAS APTAS PARA LA UBICACIÓN DEL RELLENO SANITARIO EN EL MUNICIPIO DE ORTEGA TOLIMA

AREAS SUITABLE FOR THE LOCATION OF THE SANITARY LANDFILL IN THE MUNICIPALITY OF ORTEGA TOLIMA

Arlinton Gómez Guzmán
Código 3101547
Ingeniero Ambiental

Director trabajo de grado:
Ing. Fredy Alberto Gutiérrez Garcia
MSc Gestión de la información y Tecnologías Geoespaciales
MSc in Geographic Information Science and Systems

**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
ESPECIALIZACIÓN EN GEOMÁTICA
JUNIO DE 2022
BOGOTÁ - COLOMBIA**

ZONAS APTAS PARA LA UBICACIÓN DEL RELLENO SANITARIO EN EL MUNICIPIO DE ORTEGA TOLIMA

AREAS SUITABLE FOR THE LOCATION OF THE SANITARY LANDFILL IN THE MUNICIPALITY OF ORTEGA TOLIMA

Arlinton Gómez Guzmán
Ingeniero Ambiental
Universidad Militar Nueva Granada.
Bogotá, Colombia
est.arlinton.gomez@unimilitar.edu.co

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo el identificar las zonas más aptas para la localización de un relleno sanitario en el municipio de Ortega Tolima, empleando la metodología de análisis multicriterio y herramientas de Sistemas de Información Geográfica. Para la identificación de las áreas se emplearon algunos criterios establecidos en la normatividad vigente y estudios realizados a nivel nacional e internacional, los cuales se tomaron para emplear la metodología de análisis jerárquico (AHP) y así determinar los pesos de cada uno de los criterios; en cuanto a la aplicación geográfica se manejó la herramienta *ModelBuilder*, donde se emplearon las capas geográficas descargadas de entes gubernamentales y/o entidades públicas de Colombia, con el fin de generar los productos cartográficos como insumo de la toma de decisiones, logrando determinar 4 zonas idóneas para el emplazamiento del relleno sanitario local del municipio.

Palabras Clave: Residuos sólidos, relleno sanitario, AHP, EMC, algebra de mapas

ABSTRACT

The objective of this study was to identify the most suitable areas for the location of a sanitary landfill in the municipality of Ortega Tolima, using the multicriteria analysis methodology and Geographic Information Systems tools. For the identification of the areas, some criteria established in the current regulations and studies carried out at a national and international level were used, which were taken to use the hierarchical analysis methodology (AHP) and thus determine the weights of each of the criteria; Regarding the geographical application, the *ModelBuilder* tool was used, where the geographical layers downloaded from government entities and/or public entities of Colombia were used, in order to generate cartographic products as input for decision-making, managing to determine 4 zones suitable for the location of the local sanitary landfill of the municipality.

Keywords: Solid waste, landfill, AHP, EMC, map algebra.

INTRODUCCIÓN

La generación de residuos sólidos es una de las actividades antrópicas que ha ocasionado mayores impactos ambientales a nivel mundial por su aumento significativo. Lo anterior aunado principalmente, por la incorrecta disposición final, el aumento progresivo de la población que a su vez demanda mayores producciones industriales y agroalimentaria [1], así como también el consumo acelerado y la mala calidad de los productos que son fabricados. según información de [2] para el año 2018, se estaban generando a nivel mundial alrededor de 2.01 mil millones toneladas/año de residuos y se espera que para el año 2050 aumente a 3.40 mil millones de toneladas aproximadamente. Por otro lado según el informe denominado Perspectiva de la Gestión de Residuos en América Latina y el Caribe, realizado por [3] menciona que en Latinoamérica para el año 2014 fueron generados cerca de 541.000 t/d de residuos sólidos urbanos (en adelante RSU), donde la tasa de generación es de 1 kg/ hab.-d; la anterior cifra para el año 2050 aumentará alrededor de los 671.000 t/d, es decir un crecimiento en el índice de generación de RSU de un 25 %; cabe resaltar que la mitad de RSU corresponden a Residuos Sólidos Orgánicos (RSO). Finalmente, en Colombia Para el año 2017 se dispusieron alrededor de 30.081 t/d de residuos sólidos [4], los residuos dispuestos tanto en sistemas autorizados y no autorizados abarcan aproximadamente 28.295 t/d. De igual manera [4] estableció que, de un total de 1109 municipios, el 78% de ellos es decir 865, cuentan con rellenos sanitarios, plantas de tratamiento y celdas de contingencia, manejando una cantidad de desechos alrededor de 27.418 t/d.

En la década de los 70 y los 80 la mayor parte de los desechos sólidos municipales se llevaban a botaderos a cielo abierto, allí se quemaban los residuos sólidos creando kilómetros de humo negro con malos olores, generando una alta contaminación atmosférica y grandes plagas de moscas, ratas etc. [5] Es por esto que se han venido implementado diferentes tecnologías que permiten llevar a cabo la disposición final de los residuos, entre esas tecnologías se encuentra el relleno sanitario [6]. El relleno sanitario o vertedero es un espacio destinado para la disposición final de los residuos sólidos [7]; El concepto de relleno sanitario surgió en la primera parte del siglo XX en distintas ciudades de Estados Unidos e Inglaterra, con el objetivo de controlar los olores y distintos tipos de vectores producidos por la acumulación de basura a cielo abierto [7]. En Colombia, el ministerio de vivienda en el Decreto 1077 de 2015 , define un relleno sanitario como: *“Lugar técnicamente seleccionado, diseñado y operado para la disposición final controlada de residuos sólidos, sin causar peligro, daño o riesgo a la salud pública, minimizando y controlando los impactos ambientales y utilizando principios de ingeniería, para la confinación y aislamiento de los residuos sólidos en un área mínima, con compactación de residuos, cobertura diaria de los mismos, control de gases y lixiviados, y cobertura final.”* [8].

En el país los rellenos sanitarios se convirtieron en una solución para el destino final de residuos sólidos, el primer relleno sanitario en Colombia fue construido en 1945 en el municipio de Girardot, el cual no duró mucho tiempo debido a su mal uso e inexperiencia con el tema [5]. Al respecto, localizar un relleno sanitario resulta bastante complejo si se tiene en cuenta, en primera medida el rechazo de la población, así como

también, los impactos ocasionados al ambiente por los productos contaminantes que resultan de procesos al interior del relleno, más cuando este no es operado de forma correcta [6].

El municipio de Ortega en el departamento de, Tolima, actualmente cuenta con un relleno sanitario el cual se localiza en la Vereda Los Colorados, sin embargo, los habitantes de la misma zona se han visto afectados por los constantes olores que produce el relleno, según [9], el relleno sanitario debió ser clausurado en el año 2009 por orden de la Corporación Autónoma Regional del Tolima – CORTOLIMA, sin embargo, dicha orden no se acató y el relleno siguió en funcionamiento, de otro lado, las constantes quejas de la comunidad hicieron que nuevamente la CAR diera un parte de clausura del relleno a la Empresa de Servicios Públicos Domiciliarios de Ortega – Emportega [9].

De acuerdo a lo anterior, la presente investigación tuvo como objetivo el identificar las zonas más aptas para el emplazamiento del relleno sanitario del municipio teniendo en cuenta la normatividad vigente empleando la metodología de Evaluación Multicriterio (EMC) en asociación con los Sistemas de Información Geográfica (SIG); para ello se identificaron las variables físico ambientales y socioeconómicas así como también se realizó un análisis de información espacial existente este último con el fin de generar productos cartográficos que a su vez servirán como insumo para la toma de decisiones a nivel administrativo, que permitan minimizar los impactos ambientales producto del mal manejo de la disposición de residuos sólidos.

El objetivo de la EMC, es ayudar a los tomadores de decisiones a priorizar áreas, apropiadas donde se pueda emplazar un equipamiento, todo esto a partir del análisis de múltiples criterios tenidos en cuenta para el desarrollo del proyecto [6]. El método más empleado dentro de la EMC es el de Análisis Jerárquico (AHP). el cual está diseñado para resolver problemas complejos de criterios múltiples, en donde se requiere tomar decisiones que proporcionen evaluaciones subjetivas respecto a la importancia relativa de cada uno de los criterios [1].

Los SIG son un conjunto de componentes, entre las cuales se encuentra el software y hardware, diseñados para capturar, manipular, analizar, modelar y desplegar información espacial geo referenciada con el objetivo de resolver problemas de gestión y planificación, cuya mayor aplicación ha sido en el área de los recursos naturales [10].

Palacios Orejuela en su artículo empleó la evaluación multicriterio para la ubicación óptima del relleno sanitario de la ciudad de Macas en Ecuador cuyo fin se orientó a establecer las opciones de sitios para el cambio del lugar actual del relleno, trabajando con algunas variables con el fin de asignar pesos y así poder modelarlos con ayuda de un SIG, obteniendo polígonos que cumplían con las condiciones impuestas para la ubicación del nuevo relleno de la ciudad [11].

En un segundo estudio realizado en el Canto de Santa Rosa en la provincia de El Oro – Ecuador, el autor empleo el análisis multicriterio y las herramientas SIG para la

ubicación del relleno sanitario en la zona de estudio encontrando que el 10% de la zona se encuentra en condiciones óptimas para emplazar el relleno [12].

Por otro lado, Pinzón Ospina en su trabajo presenta como se combina el análisis multicriterio cuyos parámetros se basan en evaluar mediante pesos algunas variables presentes en normas o criterios propios y empleando las herramientas SIG como el álgebra de mapas para lograr encontrar zonas óptimas para la localización de colegios distritales en la localidad de Suba ubicada en la ciudad de Bogotá [13].

1. MATERIALES Y MÉTODOS

1.1. Metodología

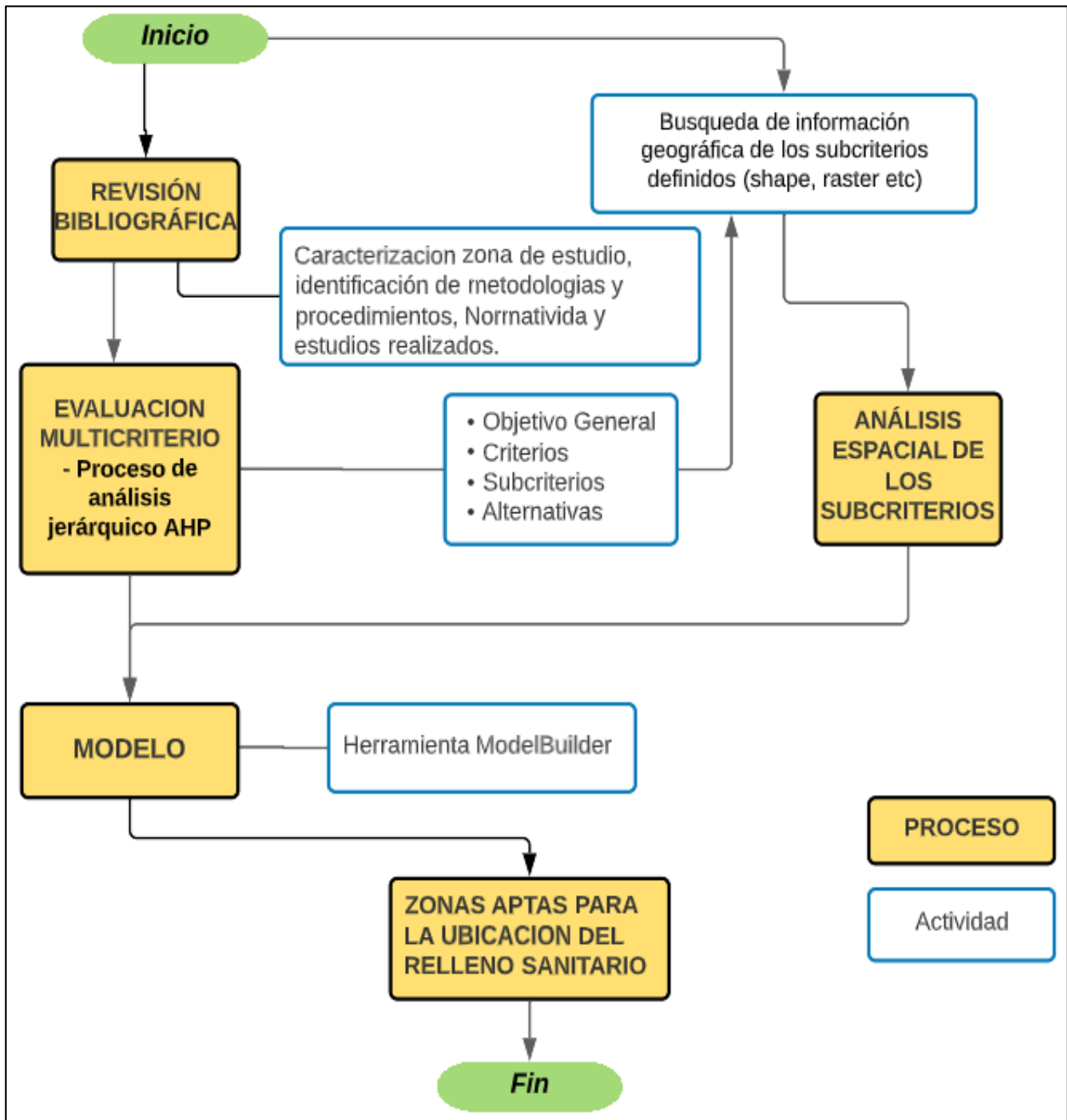
El proceso metodológico se encuentra esquematizado en la Figura 1, mostrando el flujo de procesos (color amarillo) y actividades (color azul) para llevar a cabo la determinación de las zonas aptas para la ubicación del relleno sanitario del municipio de Ortega – Tolima. Allí se puede evidenciar que al inicio se realizó la consulta bibliográfica que sustenta la elección de los criterios y subcriterios encontrando la caracterización de la zona de estudio, la metodología y procedimientos mencionados en la normatividad colombiana principalmente el Decreto 838 de 2005, así como también algunos estudios realizados a nivel internacional y nacional relacionados con el objetivo de la investigación; seguidamente se identifica el proceso Evaluación multicriterio cuya herramienta empleada fue el análisis jerárquico donde se determinaron los criterios a tener en cuenta para la localización del relleno sanitario; los cuales están compuestos por unos subcriterios; paralelamente se realizó la búsqueda de información geográfica como insumo para el análisis espacial de los subcriterios definidos en el paso anterior; luego se realizó un modelo en la herramienta visual de geoprocetamiento ModelBuilder con el fin de automatizar el proceso de extracción y generación de productos cartográficos así como también la administración de los datos; para finalmente obtener la zonas aptas para la implementación del relleno sanitario.

1.1.1. Zona de estudio

El municipio de Ortega está situado en el sur del departamento del Tolima, se localiza en las estribaciones orientales de la cordillera central y hace parte de la macrocuenca del río Magdalena, cuenca del río Saldaña, subcuenca del río Cucuana y Tetuán; cuenta con aproximadamente 943,5 Km², de los cuales 0.6 Km² hacen parte de la zona urbana y los restantes a la zona rural. [14]

El municipio se encuentra limitado por el norte con los municipios de Rovira, Valle de San Juan y San Luís, al sur con los municipios de Chaparral y Coyaima, por el oriente con los municipios Saldaña y Coyaima y al occidente con el municipio de San Antonio.

Figura 1. Esquema Metodológico del Estudio



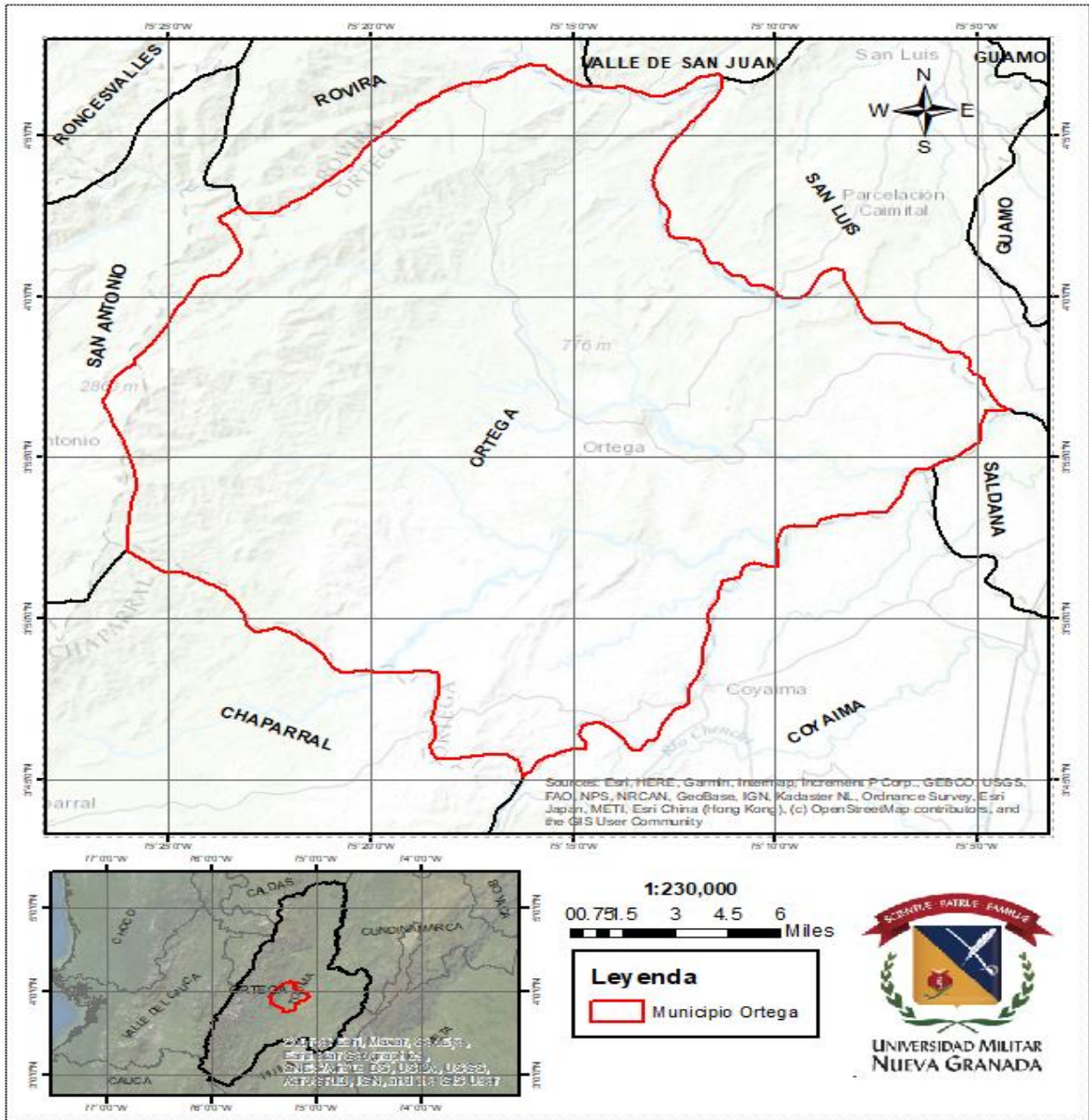
Fuente: Elaboración Propia

1.1.2. Información Geográfica Empleada

Con base en el objetivo planteado, la información necesaria fue descargada de los datos abiertos de algunos portales de entes gubernamentales o entidades públicas como lo son el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), El Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC) y la Corporación Autónoma Regional del Tolima (CORTOLIMA); de

donde se extrajo información como; áreas urbanas, uso del suelo, vías, drenajes, áreas protegidas, resguardos indígenas y fallas geológicas. La anterior información fue almacenada en formato shapefile, bajo el sistema de coordenadas Magna Sirgas con origen nacional.

Figura 2. Ubicación de la Zona de Estudio; Municipio de Ortega - Tolima



Fuente: Elaboración Propia a partir de cartografía base IGAC y mapa base topográfico de ESRI.

1.1.3. Normatividad Vigente

En el territorio colombiano, la atención a la problemática generada por la disposición de residuos sólidos tuvo origen desde la promulgación del Código Nacional de Recursos Naturales de 1974, donde se dispusieron reglas para su adecuado manejo

[1]. De igual manera; a partir de la constitución de 1991 se empiezan a emitir leyes, decretos y resoluciones cuyo fin ha sido tratar el manejo de los residuos sólidos, así como su disposición final en cada uno de los entes territoriales del país.

La Tabla 1 muestra la normatividad relacionada con los criterios para la ubicación de un relleno sanitario allí se encuentran leyes, decretos, guías etc.

Tabla 1. Normatividad

Norma	Sección y/o Artículo	Objetivo
Código Nacional de Recursos Naturales de 1974		Regular la conducta humana, individual o colectiva y la actividad de la Administración Pública, respecto del ambiente y de los recursos naturales renovables y las relaciones que surgen del aprovechamiento y conservación de tales recursos y de ambiente.
Constitución Política de 1991	49, 79 y 80	"La atención de la salud y el saneamiento ambiental son servicios públicos a cargo del estado". "Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarlo. Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines" "El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución."
Ley 142 de 1994	Toda la ley	Establecer el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones
Decreto 838 de 2005	Todo el decreto	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. Reglamentar el procedimiento a seguir por parte de las entidades territoriales para la definición de las áreas potenciales susceptibles para la ubicación del relleno sanitario.
Normatividad del reglamento del sector de agua potable y saneamiento básico - RAS 2000	Título F	Establece los criterios básicos, los requisitos mínimos técnicos para el diseño, implementación y construcción de infraestructura asociada al aseo urbano.
Resolución 754 de 2014	Toda la Resolución	Adoptar a metodología para la formulación, implementación, seguimiento y evaluación de los PGIRS

Fuente: Elaboración propia

1.1.4. Evaluación Multicriterio - Proceso de Análisis Jerárquico AHP

El proceso AHP está fundamentado por la estructuración del modelo jerárquico en donde se tiene la representación del problema o el objetivo, criterios, subcriterios y alternativas [14], esta metodología fue implementada en los años 70 por Thomas Saaty cuyo fin era reducir el armamento nuclear de la Unión Soviética y los Estados Unidos [14], la propuesta emplea la estructura jerárquica del problema para la toma de una decisión. De acuerdo a lo anterior la Figura 3 muestra la estructura jerárquica realizada para la toma de decisiones en el presente estudio; luego de haber establecido la estructura, se realiza la matriz de comparación por pares de criterio (MCP), lo cual permite analizar el grado de importancia por cuantificación numérica que tiene cada subcriterio con respecto a los demás, la Tabla 2 muestra la escala de cuantificación basada en la metodología del proceso de análisis jerárquico de Saaty.

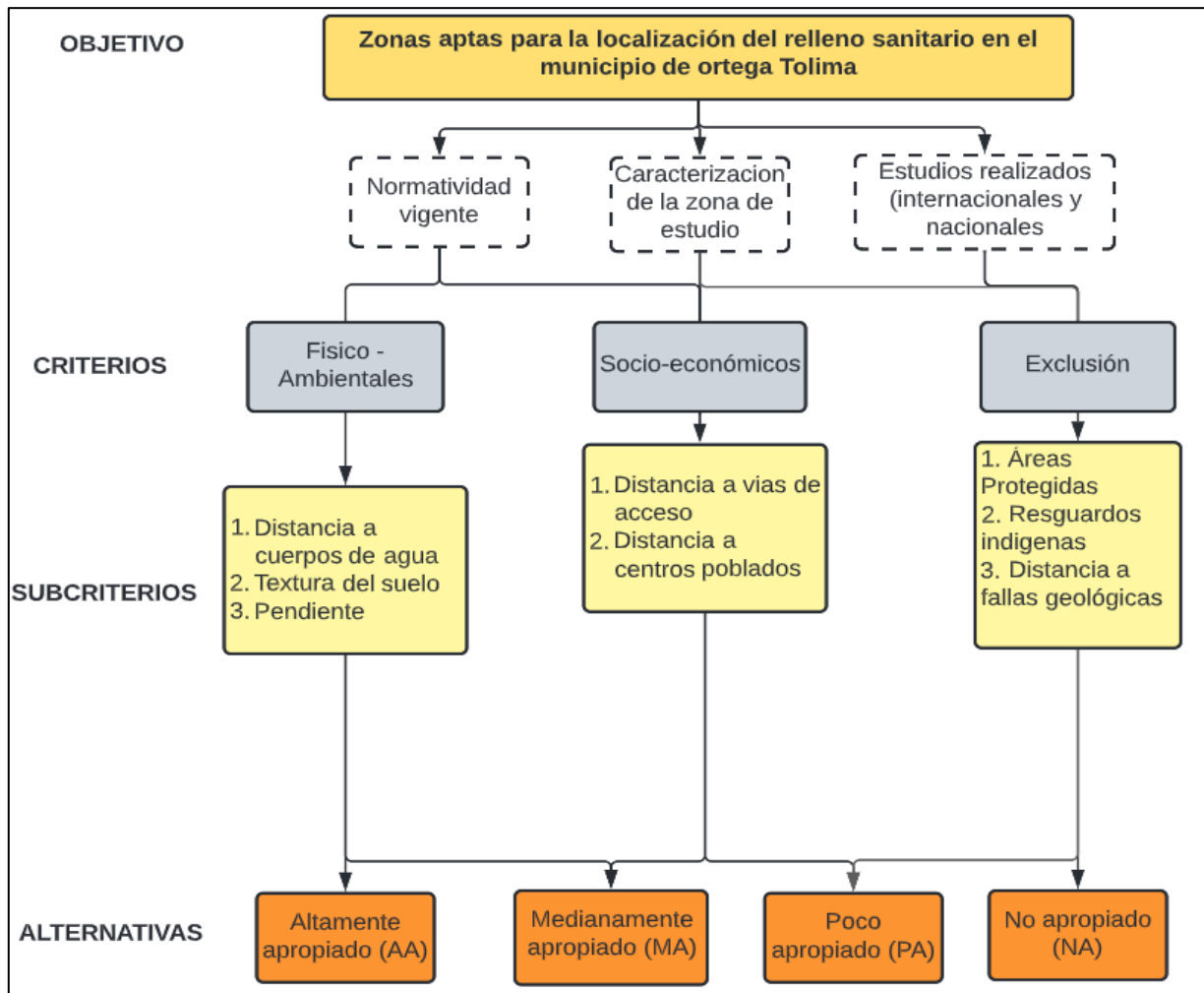
Con base en la escala de cuantificación se construye la MCP (Tabla 3) para cada uno de los subcriterios establecidos; es importante mencionar que no se tiene en cuenta los subcriterios de exclusión porque como su nombre lo indica son factores que cuentan con prohibición para localizar un relleno sanitario según la normatividad.

Tabla 2. Escala de Cuantificación para los Subcriterios Definidos

Escala Numérica	Escala escrita	Explicación
1	Igual de importante	Los dos elementos contribuyen igualmente al criterio
3	Moderadamente más importante un elemento que el otro	Se favorece un criterio frente al otro debido a su importancia
5	Fuertemente más importante un elemento que el otro	Se favorece un criterio frente al otro debido a su importancia
7	Muchos más fuerte la importancia de un elemento que la del otro	Uno de los criterios domina fuertemente con respecto al otro.
9	Importancia extrema de un elemento frente al otro	Uno de los criterios domina al otro

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

Figura 3. Estructura Jerárquica para la Ubicación de Zonas Aptas para la Construcción del Relleno Sanitario del Municipio de Ortega - Tolima



Fuente: Elaboración Propia a partir de la Metodología AHP

Tabla 3. Matriz de Comparación por Pares (MCP)

		Subcriterios					
		Subcriterio Y					
		1	2	3	4	6	
Subcriterio X		Subcriterio	Distancia a cuerpos de agua	Litología	Pendiente	Distancia a vías de acceso	Distancia a centros poblados
1	Distancia a cuerpos de agua	1	7/3	5/3	7/5	1	
2	Litología	3/7	1	5/3	3/7	3/7	
3	Pendiente	3/5	3/5	1	3/5	3/5	
4	Distancia a vías de acceso	5/7	7/3	5/3	1	3/7	
6	Distancia a centros poblados	1	7/3	5/3	7/3	1	

Fuente: Elaboración propia basado en la Metodología del Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) de Saaty.

Tabla 4. Matriz de Comparación por Pares (MCP) con Calificación Numérica.

Subcriterio	Distancia a cuerpos de agua	Litología	Pendiente	Distancia a vías de acceso	Distancia a centros poblados
Distancia a cuerpos de agua	1.0	2.3	1.7	1.4	1.0
Litología	0.4	1.0	1.7	0.4	0.4
Pendiente	0.6	0.6	1.0	0.6	0.6
Distancia a vías de acceso	0.7	2.3	1.7	1.0	0.4
Distancia a centros poblados	1.0	2.3	1.7	2.3	1.0
TOTALES	3.7	8.6	7.7	5.8	3.5

Fuente: Elaboración propia basado en la Metodología del Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) de Saaty.

Según la metodología AHP, el cálculo del *vector prioridad* de la matriz MCP, proporciona la ponderación de cada uno de los criterios, es decir, que los componentes del vector propio de la matriz MCP representan los pesos que tienen cada uno de los criterios sobre la toma de decisión final. Para calcular el vector propio de una matriz, fue necesario generar la matriz normalizada (MCN); la cual se obtiene dividiendo cada valor de cada una de las columnas por la suma total de la columna.

Tabla 5. Matriz de Comparación por Pares Normalizada (MCN).

Subcriterio	Distancia a cuerpos de agua	Litología	Pendiente	Distancia a vías de acceso	Distancia a centros poblados
Distancia a cuerpos de agua	0.27	0.27	0.22	0.24	0.29
Litología	0.11	0.12	0.22	0.07	0.12
Pendiente	0.16	0.07	0.13	0.10	0.17
Distancia a vías de acceso	0.19	0.27	0.22	0.17	0.12
Distancia a centros poblados	0.27	0.27	0.22	0.40	0.29

Fuente: Elaboración propia basado en la Metodología del Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) de Saaty.

Después de tener la matriz de comparación por pares normalizada, se procede a generar el vector de prioridad para cada subcriterio; este se determina generando la suma ponderada de cada fila de la matriz y calculando su promedio.

Tabla 6. Vector de Prioridad para los Subcriterios

Subcriterio	Ponderación	%
Distancia a cuerpos de agua	0.26	26%
Litología	0.13	13%
Pendiente	0.13	13%
Distancia a vías de acceso	0.20	20%
Distancia a centros poblados	0.29	29%
Total	1.00	100%

Fuente: Elaboración propia basado en la Metodología del Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) de Saaty.

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

Después de obtener la ponderación de cada uno de las variables, es necesario realizar una evaluación de los resultados obtenidos, para esto, Saaty dentro de la metodología AHP propone el cálculo de la razón de consistencia (RC), el cual determina si los resultados obtenidos en el vector de prioridad son adecuados o si se deben hacer ajustes en la matriz de comparación por pares, para optimizar los resultados. Según la metodología AHP, el RC debe ser inferior a 0,1 para matrices mayores de 5x5, si el resultado es mayor deben ser reconsiderados y modificados los valores de la matriz de comparación por pares [15], dicho calculo este dado por la siguiente formula

$$RC = \frac{IC}{IA} \quad (1)$$

Donde:

$$IA = \frac{1,98 (n - 2)}{n} \quad (3)$$

IC: Índice de consistencia

Entonces se tiene

IA: Índice de Consistencia aleatoria

$$IC = \frac{n_{max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

$$IC = \frac{5,18 - 5}{5 - 1} = 0,05$$

Donde:

$$IA = \frac{1,98 (5 - 2)}{5} = 1,18$$

n: dimensión de la matriz (alternativas)
 nmax: es la multiplicación de la matriz por pares con calificación numérica por el promedio

$$RC = \frac{0,05}{1,18} = 0,04$$

Para este caso el RC obtenido fue de 0,04; considerando que es una matriz de tamaño 5x5, se determinaron como aceptables los valores obtenidos y se validaron los resultados del análisis matricial y del vector prioridad.

1.1.5. Criterios y subcriterios

Como se mencionó anteriormente, con base en la información analizada en la revisión bibliográfica se definieron 3 criterios los cuales se encuentran compuestos por unos subcriterios, los mismos se clasificaron en rangos los cuales fueron valorados teniendo en cuenta la escala de valoración presentada en la Tabla 7. El criterio **físico - ambiental** corresponde a esa necesidad que se tiene para encontrar las zonas aptas de localización del relleno sanitario con base en la propuesta del desarrollo sostenible en cuanto a la necesidad de preservar los recursos naturales (agua, suelo, aire) ya que estos son el sustento para suplir las necesidades de la población actualmente y en un futuro, en la Tabla 8 se muestran los rangos definidos vs las alternativas de cada uno de los 3 subcriterios que lo componen.

Tabla 7. Escala de Valoración de Alternativas

Escala Numérica	Alternativa	Explicación
0	El parámetro No es apropiado (NA)	No se cumple con los requisitos definidos para la localización del relleno sanitario
1	El parámetro es Poco apropiado (PA)	No se cumple con los requisitos definidos para la localización del relleno sanitario
5	El parámetro es Medianamente apropiado (MA)	Cumple con algunos requisitos definidos para la localización del relleno sanitario
10	El parámetro es Altamente apropiado (AA)	Cumple totalmente con los requisitos definidos para la localización del relleno sanitario

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8. Rangos para los Subcriterios Físico – Ambientales en cuanto a las Alternativas

CRITERIOS FISICO-AMBIENTALES				
Subcriterio/Alternativa	Altamente apropiado (AA)	Medianamente apropiado (MA)	Poco apropiado (PA)	No apropiado (NA)
Distancia a cuerpos de agua	> 2000 metros	501 - 1999 metros	61 - 500 metros	< 60 metros

CRITERIOS FISICO-AMBIENTALES				
Subcriterio/Alternativa	Altamente apropiado (AA)	Medianamente apropiado (MA)	Poco apropiado (PA)	No apropiado (NA)
Litología	Arcillolitas Arcillolitas y areniscas tobáceas Arcillolitas, areniscas e inclusiones de calizas Arcillolitas, areniscas e intrusiones de granodiorita	Areniscas intercaladas con arcillolitas Areniscas tobáceas y arcillolitas Cenizas volcánicas sobre tonalitas y arcillolitas tobas	Cenizas sobre tonalitas Flujos de lodo y aglomerados Sedimentos coluvio - aluviales tonalitas Tonalitas y esquistos Tonalitas y granodioritas (Batolito de Ibagué)	Zona urbana Aluviones finos y medios Rocas variadas
Pendiente	3-12%	12-25%	<3%	> 25%

Fuente: Elaboración propia a partir de los criterios establecidos en Decreto 835 de 2005, modificado por el Decreto 1077 de 2015, Decreto 1784 de 2017 y la Resolución 938 de 19 de diciembre de 2019 y propuestas para el estudio.

El criterio **Socio - económico** tiene en cuenta las características del territorio en cuanto a población e infraestructura; buscando que la población del área de estudio se vea lo menos afectada por la zona donde se lleve a cabo el emplazamiento del relleno sanitario, pero a su vez que la infraestructura vial facilite la operación del mismo en cuanto a la ruta de recolección y disposición; en la Tabla 9 se muestran los rangos definidos vs las alternativas para los 2 subcriterios que lo componen.

Tabla 9. Rangos Definidos Para Cada Uno De Los Subcriterios Socio-Económicos En Cuanto A Las Alternativas

CRITERIOS SOCIO-ECONOMICOS				
Subcriterio/Alternativa	Altamente apropiado (AA)	Medianamente apropiado (MA)	Poco apropiado (PA)	No apropiado (NA)
Distancia a vías de acceso	< 2000 m	2000 - 5000 m	5000 - 10000 m	> 10000 m
Distancia a centros poblados	2000-5000 m	5000-8000m	0-2000 m	> 8000m

Fuente: Elaboración Propia A Partir De Los Criterios Establecidos En Decreto 835 De 2005, Modificado Por El Decreto 1077 De 2015, Decreto 1784 De 2017 Y La Resolución 938 De 19 De diciembre De 2019 Y Propuestas Para El Estudio

El criterio de **exclusión**, que se tuvo en cuenta para este estudio son las áreas protegidas, distancia a resguardos indígenas, así como también la distancia a fallas geológicas en donde bajo ninguna circunstancia puede llevarse a cabo la localización

de un relleno sanitario. Es importante mencionar que los subcriterios que lo componen no fueron procesados en la superposición ponderada ya que los mismos se excluirán de manera posterior.

1.1.6. Cálculo de áreas para la localización del relleno sanitario

Para la localización de un relleno sanitario es importante tener en cuenta la capacidad del mismo con el fin de que el área donde sea ubicado permita que la vida útil del mismo se encuentre estrechamente relacionada con la producción de residuos sólidos proyectada, teniendo en cuenta lo anterior para la cuantificación de esta variable se emplearan las proyecciones poblaciones y la producción per cápita.

En la Tabla 10 se relacionan los datos de población en el municipio de Ortega para los censos realizados entre los años de 1973 a 2008 por el DANE [16], dichos datos sirvieron de insumo para determinar el periodo de diseño el cual según el artículo 40 de la Resolución 0330 de 2017, menciona que debe ser de 25 años.

Tabla10. Población censada municipio de Ortega

POBLACIÓN	
Piedras	Cabecera
1973	3563
1985	5083
1993	5649
2005	7530
2008	6856

Fuente: Censos 1973- 2008 DANE

De acuerdo a lo anterior, para el cálculo de la población del área de estudio desde el año 2022 a 2046 se empleó el método geométrico el cual se encuentra dado por la fórmula 4

$$Pf = Puc(1 + r)^{Tf - Tuc} \quad (4)$$

Donde:

r: Tasa de crecimiento anual en forma decimal.

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

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

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

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

Tf: Año al cual se quiere proyectar la información.

La tasa de crecimiento anual se calcula basado en la fórmula 5

$$r = \left(\frac{Puc}{Pci} \right)^{\frac{1}{(Tuc-Tci)}} - 1 \quad (5)$$

Luego de realizado el anterior procedimiento se realiza el cálculo de residuos generados dado por la fórmula 6

$$Rga = Paño * Ppc * 365 \text{ dias} \quad (6)$$

Donde:

Rga: Residuos generados año

Paño: Población año

Ppc: Producción per cápita

Es importante aclarar que la producción per cápita fue tomada de la RAS 2000 [13] título f sección 1.4.1.1. donde menciona que la cifra de la producción per cápita de residuos sólidos municipales cuando no se tiene un estudio de campo es del 0,3 kg/hab/día.

Para el cálculo del volumen, se tomó como referencia la densidad de residuos sólidos comprimidos en relleno, sugerido de 0,8 kg/m³ [5]

$$Vaño = Rga * Dr \quad (7)$$

Donde:

Vaño: Volumen al año

Dr: Densidad de residuos sólidos comprimidos

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

$$\text{Área} = Vaño * Ac \quad (8)$$

La Tabla 11 muestra el cálculo de la población para un periodo de 25 años es decir hasta 2046 cuya población estimada es de 13.954 habitantes, de igual manera se determinó que para el mismo año el total de residuos que se acumularían en el municipio es de 30.798.349 kg/año; por otro lado se obtuvo el área requerida para el establecimiento del relleno sanitario es de 36,67 ha, sin embargo, se asumió que la cobertura que se maneja para el servicio de aseo es sobre el 65% de los residuos generados en el municipio es por ello que el área definitiva para la localización del relleno es aproximadamente de 23,48 ha.

Tabla 11. Proyección poblacional, Generación de residuos y cálculo de área requerida

Años de Proyección	Población estimada	Residuos generados (kg/año)	Residuos Acumulados (kg/año)	Volumen	Área m2	Área ha	Área ha definitiva
2022	8908	975409	975409	78033	234098	23.41	15.22
2023	9076	993822	1969231	79506	238517	23.85	15.50
2024	9247	1012582	2981813	81007	243020	24.30	15.80
2025	9422	1031696	4013509	82536	247607	24.76	16.09
2026	9600	1051171	5064679	84094	252281	25.23	16.40
2027	9781	1071013	6135692	85681	257043	25.70	16.71
2028	9966	1091230	7226922	87298	261895	26.19	17.02
2029	10154	1111829	8338751	88946	266839	26.68	17.34
2030	10345	1132816	9471567	90625	271876	27.19	17.67
2031	10541	1154200	10625767	92336	277008	27.70	18.01
2032	10740	1175987	11801755	94079	282237	28.22	18.35
2033	10942	1198186	12999941	95855	287565	28.76	18.69
2034	11149	1220804	14220744	97664	292993	29.30	19.04
2035	11359	1243848	15464592	99508	298524	29.85	19.40
2036	11574	1267328	16731920	101386	304159	30.42	19.77
2037	11792	1291250	18023170	103300	309900	30.99	20.14
2038	12015	1315625	19338795	105250	315750	31.57	20.52
2039	12242	1340459	20679255	107237	321710	32.17	20.91
2040	12473	1365763	22045017	109261	327783	32.78	21.31
2041	12708	1391543	23436561	111323	333970	33.40	21.71
2042	12948	1417811	24854372	113425	340275	34.03	22.12
2043	13192	1444574	26298946	115566	346698	34.67	22.54
2044	13441	1471843	27770789	117747	353242	35.32	22.96
2045	13695	1499626	29270415	119970	359910	35.99	23.39
2046	13954	1527934	30798349	122235	366704	36.67	23.84

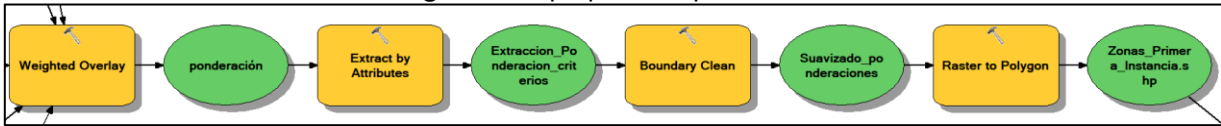
Fuente: Elaboración propia

1.1.7. Modelo Empleado

El modelo empleado se realizó bajo el lenguaje de programación visual *ModelBuilder*, dicho modelo encadena secuencias de procesos y herramientas de geoprocésamiento, utilizando la salida de un proceso como la entrada de otro.

En primera instancia se seleccionó el área de estudio a partir de la capa de municipios del departamento del Tolima como se muestra en la Figura 4, seguidamente se realizó un clip de las capas (drenajes, vías, áreas urbanas) con el fin de demarcar la zona de estudio, con las capas resultantes se realizaron procesos tales como fusiones, distancia euclidiana, pendiente, reclasificación y polígono a ráster; de los anteriores procesos se obtienen 5 capas resultantes de tipo ráster ver Figura 5; así: distancia a

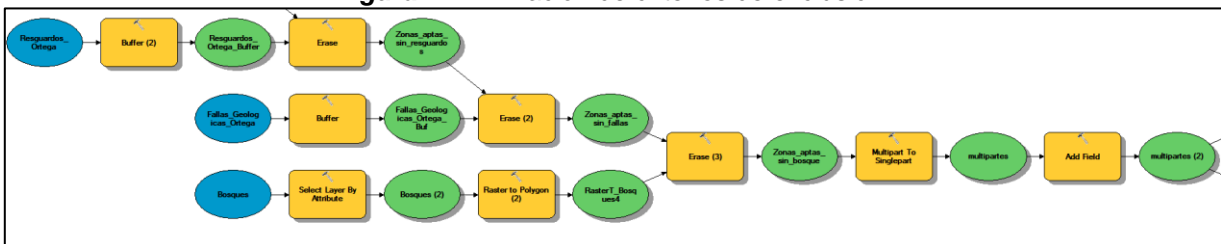
Figura 6. Superposición ponderada



Fuente: Elaboración propia – ModelBuilder

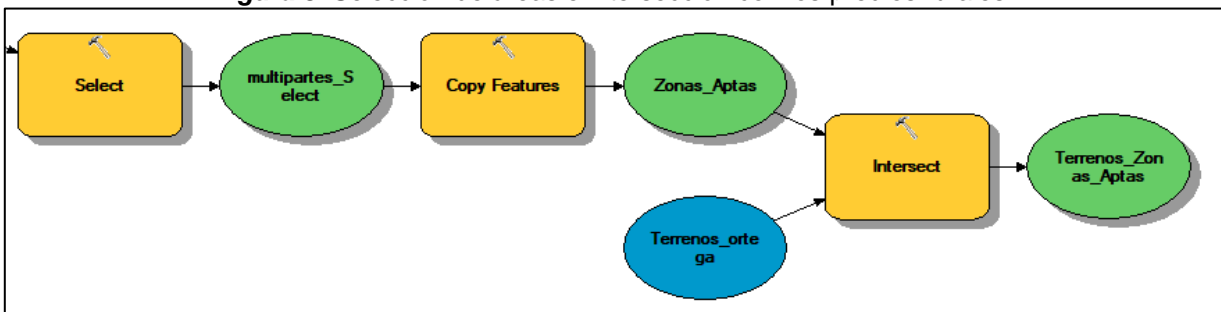
Luego a partir de los resultados obtenidos en el cálculo de áreas se seleccionan las zonas que cumplan con este parámetro, finalmente se realizó una intersección con los predios rurales de la zona los cuales servirán para el establecimiento del relleno sanitario el modelo para lo anteriormente expuesto se encuentra diagramado en la Figura 8.

Figura 7. Eliminación de criterios de exclusión



Fuente: Elaboración propia – ModelBuilder

Figura 8. Selección de áreas e intersección con los predios rurales



Fuente: Elaboración propia – ModelBuilder

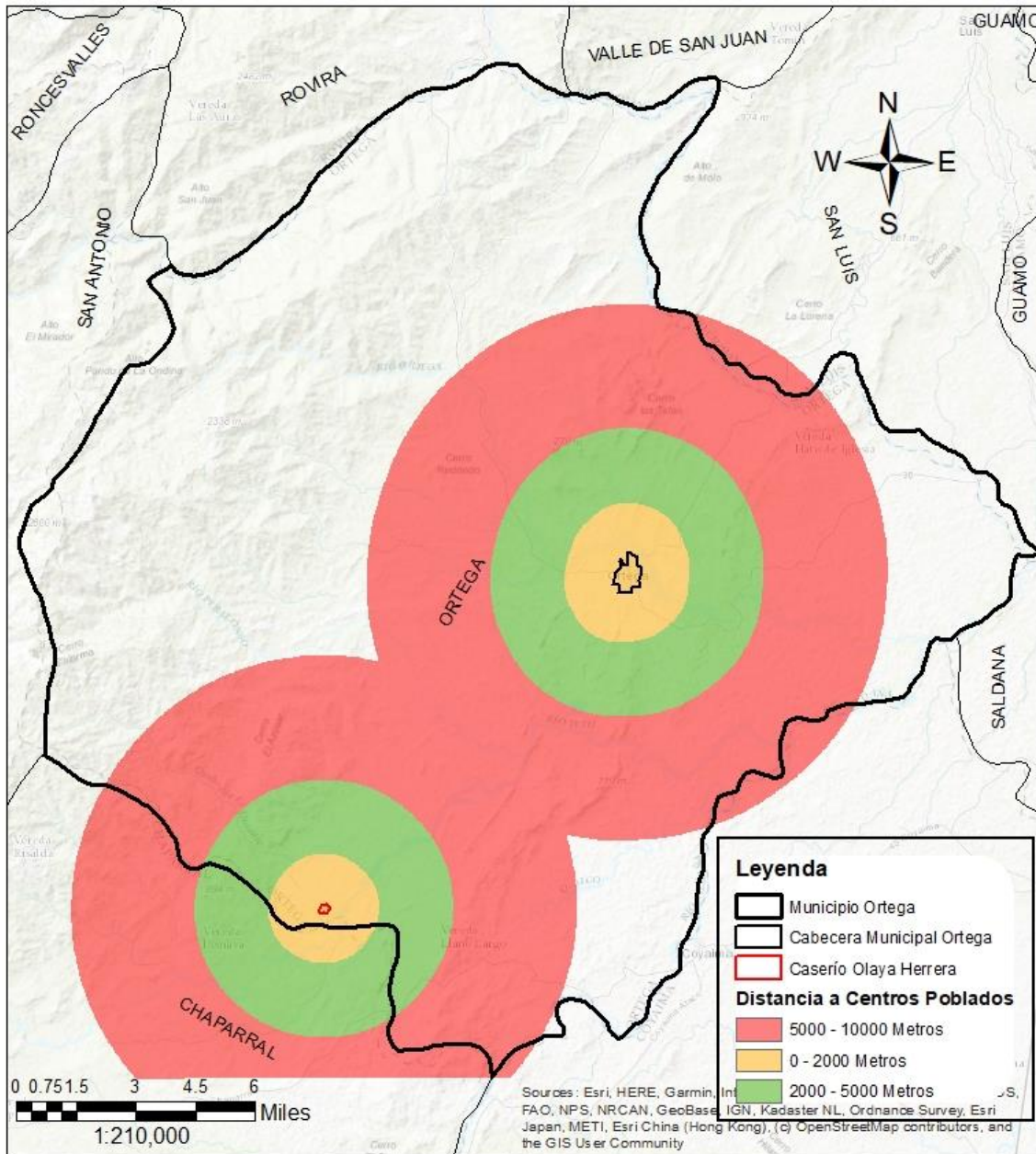
2. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Como resultado de lo propuesto en el acápite anterior, se presentaron 4 áreas óptimas para el establecimiento del relleno sanitario del municipio, las áreas se encuentran inmersas en 53 predios, para llegar al resultado final se obtuvieron los siguientes productos:

Distancia a centros poblados: El municipio cuenta con dos centros urbanos los cuales son, la cabecera municipal y el caserío Olaya Herrera, la Figura 9 muestra las distancias definidas con respecto a los centros urbanos mencionados, allí podemos evidenciar que las zonas que se encuentren a una distancia 2000 a 5000 metros son

las áreas altamente apropiadas para la ubicación del relleno ya que no generarían contaminación y no aumentaría el costo de recolección y disposición de los residuos.

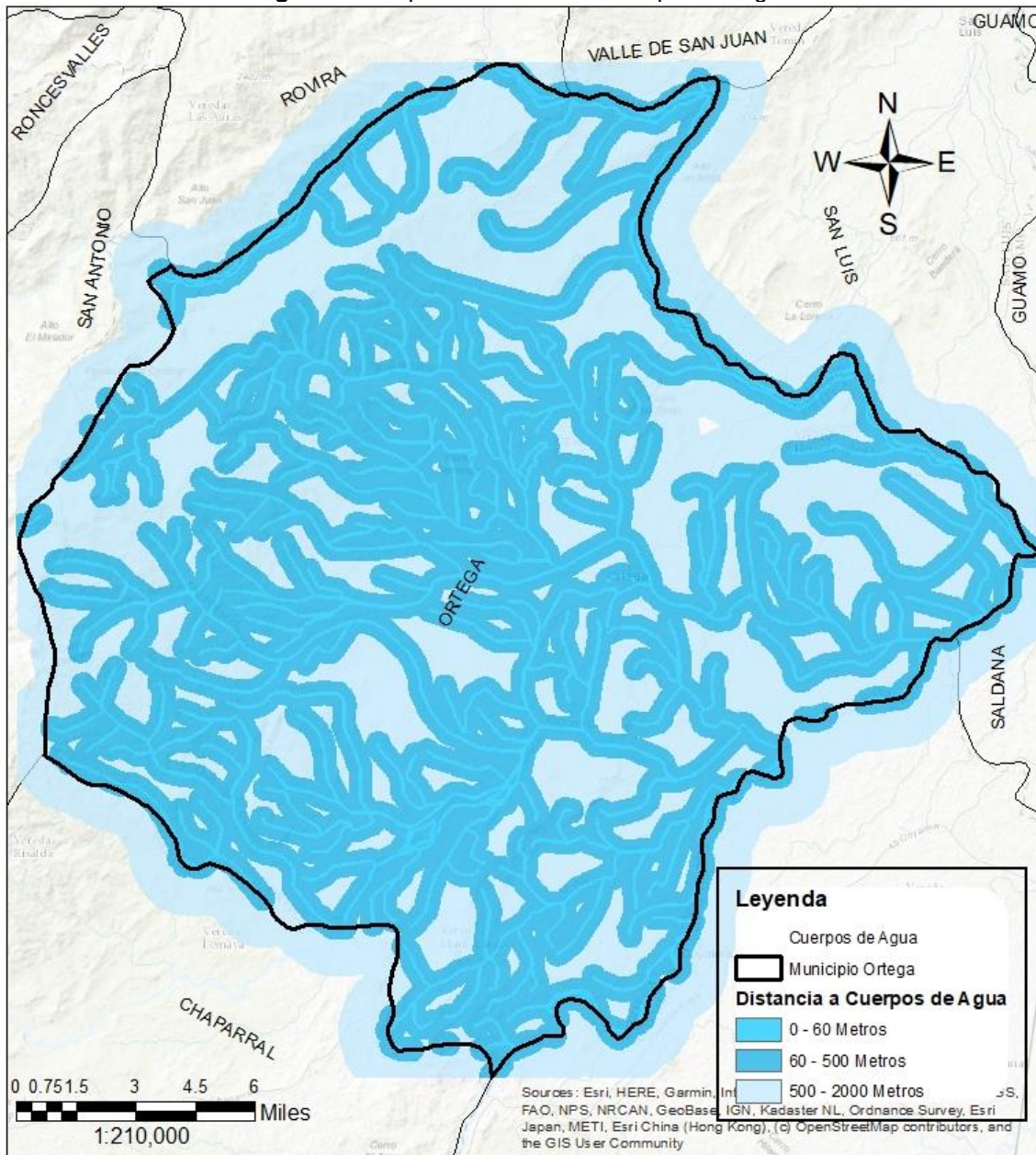
Figura 9. Mapa de Distancia a Centros Urbanos



Fuente: Elaboración propia

Distancia a cuerpos de agua: La zona de estudio comprende gran cantidad de cuerpos hídricos entre drenajes sencillo y dobles, los cuales podrían verse afectados por la contaminación de lixiviados generados por el relleno sanitario; la Figura 10 muestra las distancias definidas con respecto a estos cuerpos de agua, donde a mayor distancia del cuerpo de agua sería la zona altamente apropiada para el establecimiento del sitio de disposición final es decir en un rango de 500 a 2000 metros del cuerpo de agua.

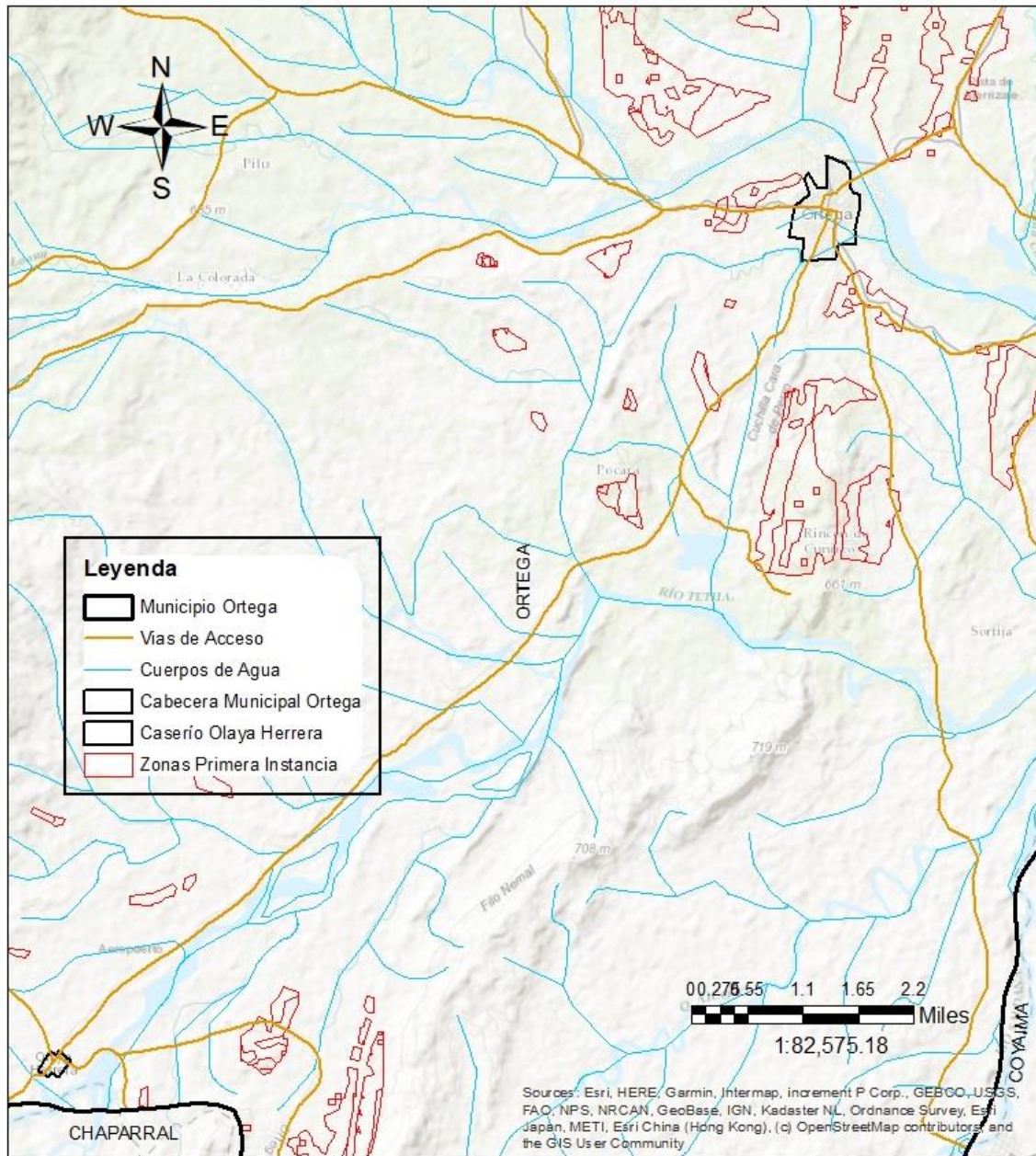
Figura 10. Mapa de Distancia a Cuerpos de Agua



Fuente: Elaboración propia

Distancia a vías de acceso: Las vías son una variable importante para el establecimiento de este tipo de infraestructura; el municipio cuenta con vías de tipo primaria para la conexión del casco urbano con otros municipios y vías secundarias para comunicar el casco urbano con el caserío Olaya Herrera, así como caminos en su mayoría. En la Figura 11, podemos observar que el emplazamiento del relleno sanitario estaría dado en áreas de distancia hasta los 2000 metros a la redonda de las mismas ya que a menor distancia de las zonas urbanas y el área donde se situó el mismo es menor el costo de transporte y la facilidad de acceso al sitio de disposición final de los residuos.

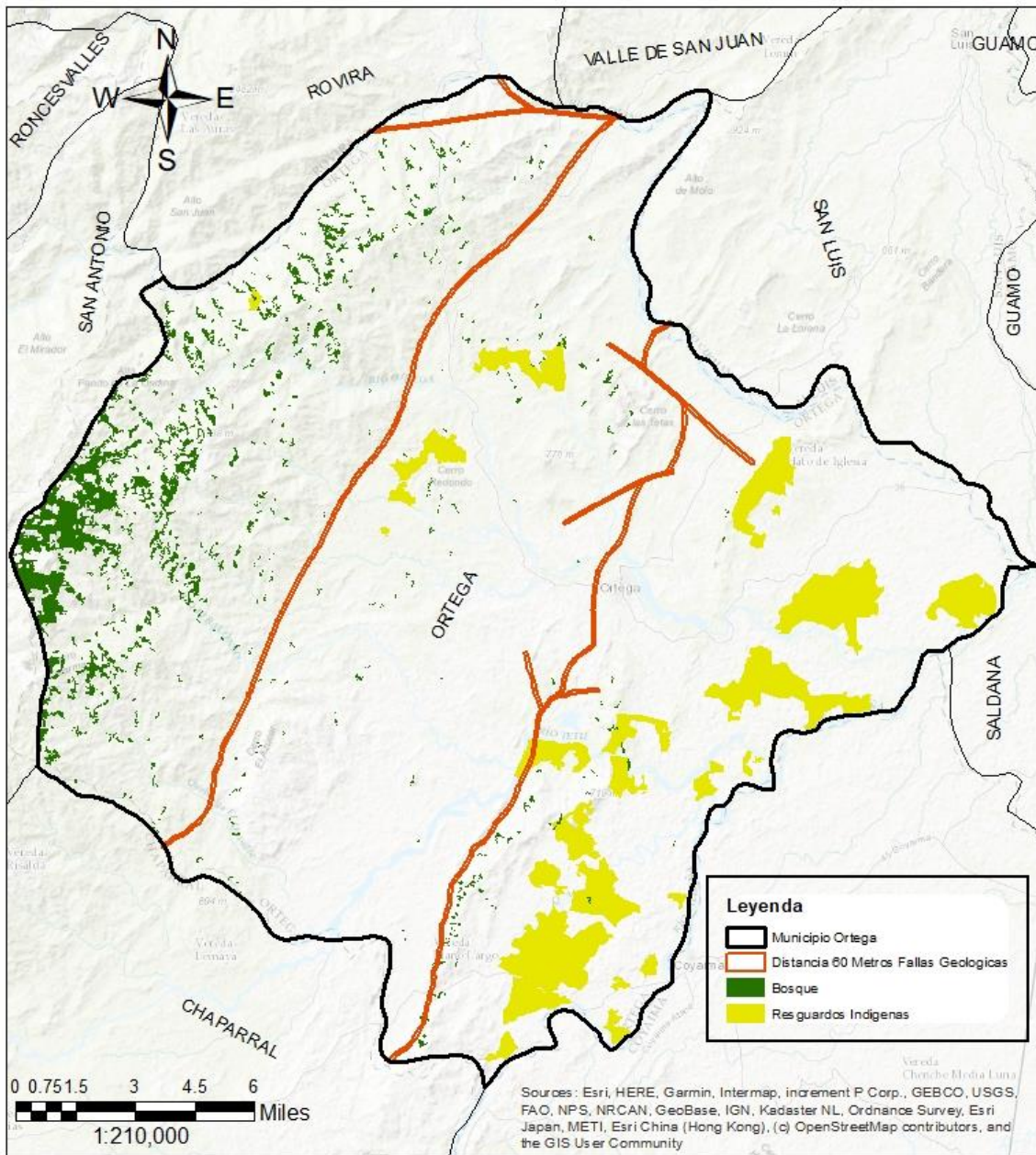
Figura 13. Mapa de zonas aptas que cumplen con los criterios físico ambientales y socioeconómicos



Fuente: Elaboración propia

Las zonas de exclusión presentes se muestran la Figura 14, el municipio cuenta con 22 resguardos indígenas que en su mayoría se encuentran ubicados en la zona sureste del mismo, en cuanto a las fallas geológicas se presentan 4 fallas geológicas allí tenemos la Falla la colorada – Samaria, Falla Fraile – la pava, Falla Cucuana y Falla Cañada, a la cuales se les realizó un buffer de 60 metros con respecto a las mismas de acuerdo a lo mencionado en la norma, por último se tienen las zonas de bosque que se encuentran amparados por el plan básico de ordenamiento territorial del municipio.

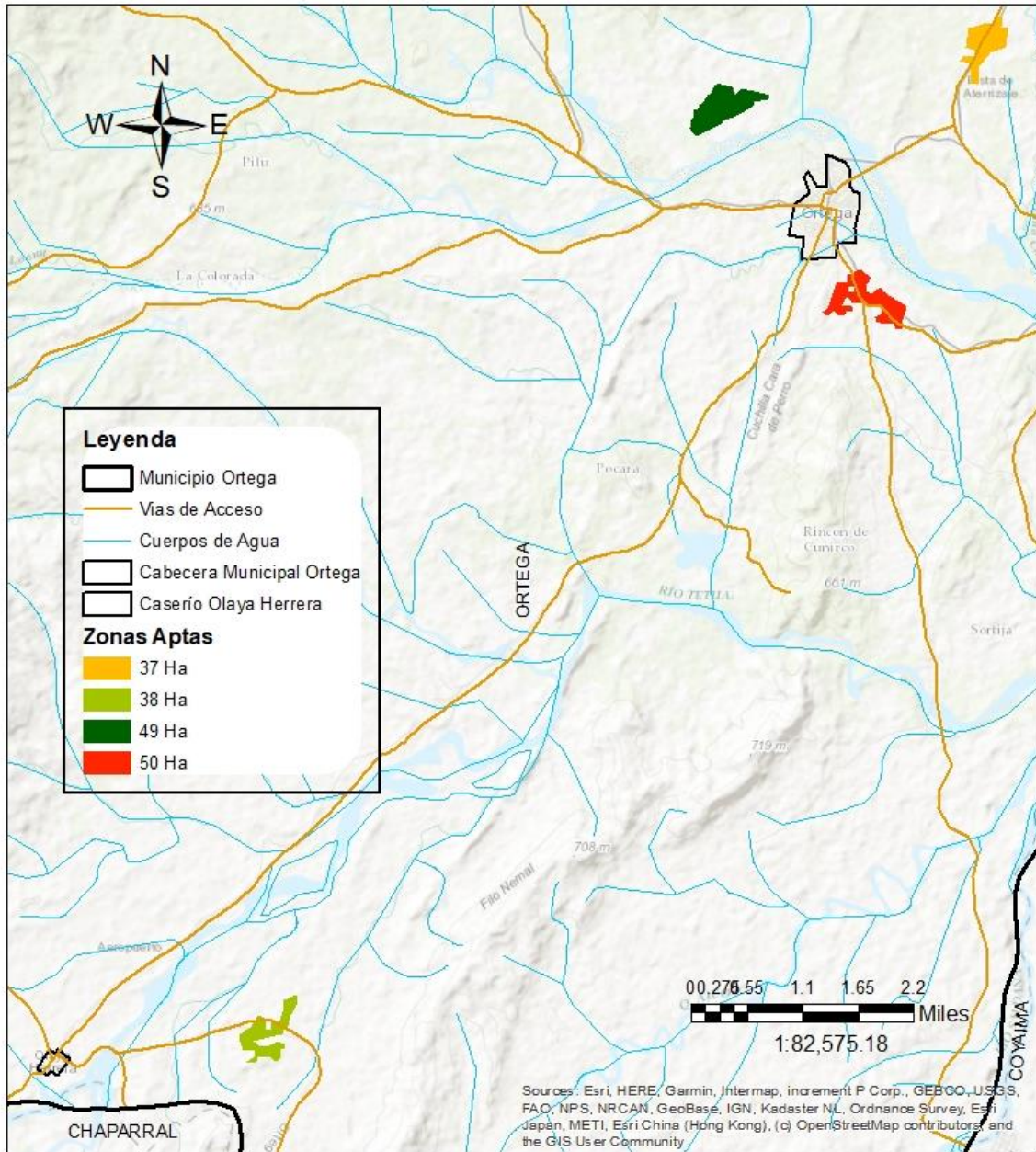
Figura 14. Mapa de Áreas de Exclusión



Fuente: Elaboración propia

Conforme a los resultados de las áreas calculadas para la capacidad del relleno sanitario por un periodo de 25 años, se tuvieron en cuenta las zonas cuyas áreas superaran las 24 ha y fueran menores a las 100 ha, obteniendo una cobertura donde se evidencian las zonas aptas para el emplazamiento del relleno sanitario, cuyo resultado se observa en la Figura 15, allí podemos observar que se tienen 4 zonas que cumplen con las condiciones previstas anteriormente, dichas zonas oscilan entre 37 a 50 ha

Figura 15. Mapa de zonas aptas para la ubicación del relleno sanitario municipio de Ortega - Tolima



Fuente: Elaboración propia

Finalmente, realizada la intersección con los predios rurales, se observa que las zonas anteriormente mencionadas se encuentran inmersas en 53 predios distribuidos según las Tablas 12, 13, 14 y 15 relacionada con cada una de las zonas; es importante mencionar que para el área de 50 ha aproximadamente la mitad del área no presenta terrenos asociados.

Tabla 12. Predios del área 1

Predio de 37 Ha	
Área Ha	CODIGO
0.19	735040001000000120095000000000
3.76	735040001000000120102000000000
4.11	735040001000000120103000000000
12.68	735040001000000120104000000000
1.71	735040001000000120105000000000
9.93	735040001000000120109000000000
3.86	735040001000000120112000000000

Fuente: Elaboración propia

Tabla 13. Predios del área 2

Predio de 38 Ha	
Área Ha	CODIGO
14.00	735040004000000080085000000000
2.43	735040004000000080103000000000
14.53	735040004000000080105000000000
5.90	735040004000000080107000000000
0.37	735040004000000080109000000000
0.60	735040004000000080110000000000
0.11	735040004000000080115000000000

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14. Predios del área 3

Predio de 49 Ha	
Área Ha	CODIGO
0.58	735040001000000130008000000000
12.58	735040001000000130009000000000
2.77	735040001000000130010000000000
2.48	735040001000000130011000000000
3.89	735040001000000130012000000000
4.10	735040001000000130013000000000
6.92	735040001000000130014000000000
5.93	735040001000000130015000000000
3.66	735040001000000130022000000000
0.42	735040001000000130109000000000
1.02	735040001000000130111000000000

Predio de 49 Ha

Área Ha	CODIGO
5.17	735040001000000130120000000000

Fuente: Elaboración propia

Tabla 15. Predios del área 4

Predio de 50 Ha	
Área Ha	CODIGO
0.04	735040002000000070114000000000
0.01	735040002000000070147000000000
0.72	735040002000000080021000000000
0.49	735040002000000080026000000000
2.38	735040002000000080027000000000
1.66	735040002000000080030000000000
1.28	735040002000000080031000000000
0.56	735040002000000080032000000000
0.48	735040002000000080033000000000
1.53	735040002000000080034000000000
1.24	735040002000000080035000000000
1.04	735040002000000080051000000000
0.70	735040002000000080072000000000
0.20	735040002000000080077000000000
2.71	735040002000000080078000000000
0.40	735040002000000080082000000000
0.05	735040002000000080093000000000
0.01	735040002000000080102000000000
0.18	735040002000000080312000000000
2.99	735040002000000080313000000000
1.06	735040002000000080314000000000
1.70	735040002000000080315000000000
0.11	735040002000000080324000000000
1.31	735040002000000080325000000000
1.43	735040002000000080326000000000
0.79	735040002000000080327000000000
1.05	735040002000000080328000000000

Fuente: Elaboración propia

3. CONCLUSIONES

- Los Sistemas de Información geográfica junto con Análisis Jerárquico AHP (Analytic Hierarchy Process), permitió priorizar los subcriterios determinados para esta investigación y definir su importancia dentro del método de superposición ponderada brindando herramientas óptimas para la toma de decisiones con el ordenamiento territorial y la gestión ambiental.
- Se recomienda complementar los resultados con estudios de factibilidad técnica y visita a los terrenos con el fin de corroborar que las zonas cumplan con los parámetros establecidos, así como también verificar en quien radica la propiedad de los predios y de esta manera determinar que tan factible es la compra de los mismos.
- Es importante tener en cuenta las demás variables mencionada en la normatividad tales como condiciones de la vía principal, pendiente promedio de la vía de acceso, condiciones de la vía de acceso, facilidad para el movimiento de tierras del área en que se efectuará dicha disposición final, Incidencia en la congestión de tráfico en la vía principal, dirección de los vientos. Para así incluirlo en el modelo y de esta manera complementar el estudio realizado.
- Para una posterior investigación se debería incluir la etapa de publicación de los resultados en un software de acceso libre con el fin de compartir y ofrecer a los usuarios la información en tiempo real, cuya interacción sea comprensible y adecuada.
- Para tomar como punto de referencia el modelo realizado para aplicarlo a otros municipios se deben tener en cuenta las variables propias del mismo con el fin de obtener los resultados más acordes.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] J. C. S. Muñoz, «LOCALIZACIÓN DE ÁREAS POTENCIALMENTE ADECUADAS PARA EL DESARROLLO DE UN RELLENO SANITARIO PARA EL ÁREA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA,» Bogotá, 2021.
- [2] S. Kaza, L. Yao, P. Bhada-Tata y F. Van Woerden, «What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050,» *Urban Development Series*, 2018.
- [3] O. p. I. N. U. -. ONU, «Perspectiva de la Gestión de Residuos en América Latina y el Caribe,» Ciudad de Panamá, Panamá, 2018.
- [4] S. d. S. P. Domiciliarios, «Informe de Disposición Final de Residuos Sólidos,» 2018.
- [5] L. Benavides y A. Vallejo, «PROPUESTA PARA EL DISEÑO DEL NUEVO RELLENO SANITARIO PARA EL MUNICIPIO DE AGUACHICA - CESAR,» BOGOTA, 2017.
- [6] I. A. B. Urbano, «Identificación de áreas óptimas para la localización de un relleno sanitario en las subregiones norte y oriente del Valle del Cauca,» Cali, 2019.
- [7] S. I. Torri, « ¿Qué es un relleno sanitario?,» Publicación on-line del Centro de Estudios y Desarrollo de Políticas Públicas, CECePP, <http://cedepp.org.ar/?p=381>, 2017.
- [8] c. y. t. Ministerio de Vivienda, «DECRETO NÚMERO 1077 DE 2015,» Bogotá, 2015.
- [9] R. Tolima, «Tras Orden de Clausura en Ortega buscan nuevo relleno sanitario,» *El Nuevo Dia*, p. A3, 04 08 2021.
- [10] M. Cabeza, A. Henao y J. Manrique, «Aplicación de SIG para la jerarquización de Sitios de Rellenos Sanitarios. Area Metropolitana de Mérida, Venezuela,» *Fundación Iffa*, Vols. %1 de %229 -2014-2016, nº 55, pp. 49-65, 11/07/2017.
- [11] I. F. Palacios Orejuela, «Evaluación multicriterio para la ubicación de un relleno sanitario en la ciudad de macas, a través de la ponderación de sus variables con el proceso analítico jerárquico,» *ciencias de seguridad y defensa vol III*, 2018.
- [12] C. A. Bustamante Noriega, «Análisis multicriterio basado en un sig enfocado a determinar áreas potenciales para el emplazamiento de un relleno sanitario en el canto santa rosa, provincia de el oro,» 2020.
- [13] E. Pinzon Ospina, «Determinación de zonas aptas para la construcción de colegios distritales en la localidad de suba partiendo de métodos de análisis multicriterio y herramientas SIG,» 2015.
- [14] M. d. Ortega, «Plan Básico de Ordenamiento Territorial,» Ortega, Tolima, 2001.

- [15] G. B. Toskano Hurtado, «El proceso de analisis jerarquico AHP como herramienta para la toma de decisiones en la seleccion de proveedores,» 2005.
- [16] T. Saaty, «The analytic hierarchy process: plannig, priority, setting, resource, allocation,» *McGraw-Hill*, p. 287, 1980.
- [17] D. A. N. d. E. (DANE). [En línea]. Available: <https://www.dane.gov.co/index.php>.
- [18] C. y. T. Ministerio de Vivienda, «TÍTULO F Sistemas de Aseo Urbano,» de *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS*, Bogotá D.C , 2012.