

**Metodología Multicriterio para la Identificación de Áreas Potenciales en la Ubicación
de Rellenos Sanitarios en jurisdicción de Cardique Integrando Herramientas SIG**

Juan Carlos Bello Florián

Einar Said Vasquez Borcia

Informe final de trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Especialistas en Sistemas de Información Geográfica

Director (a):

M.Sc. Omar Castrillón Osorio

Línea de Investigación

Grupo de Investigación y Desarrollo en Informática y Telecomunicaciones

Universidad de Manizales

Facultad de Ciencias e Ingeniería

Especialización en Sistemas de Información Geográfica

Manizales, 2023

Dedicatorias

A mi familia por ser apoyo incondicional en cada paso de mi vida, muchos de mis logros se los debo a ustedes y este es uno de ellos. Me han orientado a lo largo del camino con reglas y libertades, pero siempre con motivación constante para materializar mis sueños.

A cada una de las personas que son parte importante de mi vida, amigos, compañeros, maestros, colegas y personas especiales, que han aportado positivamente en mi proceso, muchas gracias, los llevo siempre en mi pensamiento.

Ing. Juan Carlos Bello Florián

Primero que todo le doy gracias a Dios por la oportunidad de poder seguir estudiando, ampliar mi sabiduría, herramienta fundamental para conseguir mis metas.

Como segunda instancia a mi familia por el apoyo incondicional en todo este proceso, compañeros y amigos de profesión por su ayuda en momentos difíciles, agradecido con la vida porque cada día supero mis límites como persona.

Ing. Einar Said Vasquez Borcia

Resumen

La tecnología de Relleno Sanitario es para Colombia la opción de disposición final de residuos más viable desde el punto de vista económico. El marco legal colombiano dispone de unos criterios y metodología orientados para la localización de nuevas áreas para ubicar rellenos sanitarios, pero estas metodologías carecen de una integración con las herramientas que ofrecen los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Considerando la oportunidad para ofrecer una alternativa que mejore la toma de decisiones en este ámbito, se propuso un Modelo Espacial de Adecuación que integre criterios legales y técnicos importantes al momento de definir áreas potenciales para ubicar nuevos rellenos sanitarios. El modelo propuesto fue validado en la jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Canal del Dique (CARDIQUE) teniendo en cuenta que en esta zona existen diferentes rellenos sanitarios con una vida útil limitada.

El modelo espacial ofreció diferentes polígonos considerados como viables para ubicar rellenos sanitarios, priorizando de manera específica la protección del recurso hídrico y la distancia segura a asentamientos humanos. Los polígonos obtenidos son el resultado de un estudio de prospección obtenida por medio de herramientas (SIG) y en conclusión ofrecen una posibilidad para mejorar la toma de decisiones para la ubicación de nuevos rellenos sanitarios.

Palabras Clave: Cardique, Modelo Espacial de Adecuación, Prospección, Relleno Sanitario, Sistemas de Información Geográfica.

Abstract

Landfill technology is for Colombia the most viable final waste disposal option from an economic point of view. The Colombian legal framework has criteria and methodology aimed at locating new areas to locate sanitary landfills, but these methodologies lack integration with the tools offered by Geographic Information Systems (GIS).

Considering the opportunity to offer an alternative that improves decision-making in this area, a Spatial Adaptation Model was proposed that integrates important legal and technical criteria when defining potential areas to locate new sanitary landfills. The proposed model was validated in the jurisdiction of the Regional Autonomous Corporation of the Canal del Dique (CARDIQUE) taking into account that in this area there are different landfills with a limited useful life.

The spatial model offered different polygons considered viable to locate sanitary landfills, specifically prioritizing the protection of water resources and the safe distance to human settlements. The polygons obtained are the result of a prospecting study obtained by means of tools (GIS) and in conclusion offer a possibility to improve decision-making for the location of new sanitary landfills.

Keywords: Cardique, Spatial Adaptation Model, Prospecting, Sanitary Landfill, Geographic Information Systems.

Contenido

	Pág.
1. LISTA ABREVIATURAS	XI
2. GLOSARIO.....	XII
3. INTRODUCCIÓN	XIV
4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN Y SU JUSTIFICACIÓN.....	17
4.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA PROBLEMÁTICA.....	17
4.2 JUSTIFICACIÓN	19
5. OBJETIVOS	22
5.1 OBJETIVO GENERAL.....	22
5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
6. ANTECEDENTES.....	23
7. REFERENTE NORMATIVO Y LEGAL	30
7.1 REFERENTE NORMATIVO DE CARÁCTER AMBIENTAL.	30
8. REFERENTE TEÓRICO.....	37
9. METODOLOGÍA.....	60
9.1 OBJETIVO 1: DESARROLLAR UNA METODOLOGÍA MULTICRITERIO QUE CONSIDERE LOS CRITERIOS TÉCNICOS Y LEGALES ASOCIADOS A LA IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS POTENCIALES PARA UBICAR RELLENOS SANITARIOS EN COLOMBIA.	60
9.2 OBJETIVO 2: INTEGRAR LA METODOLOGÍA MULTICRITERIO DESARROLLADA CON LAS HERRAMIENTAS SIG DISPONIBLES DE FORMA QUE SE LOGRE UN MODELO ESPACIAL.	72
9.3 OBJETIVO 3: VALIDAR EL MODELO ESPACIAL POR MEDIO DE UN ESTUDIO DE CASO DE FORMA QUE ESTA SEA COMPLETAMENTE REPLICABLE EN CUALQUIER CONTEXTO.	75
9.4 OBJETIVO 4: OFRECER POR MEDIO DE LA EJECUCIÓN DEL MODELO PRODUCTOS CARTOGRÁFICOS QUE PERMITAN LA TOMA DE DECISIONES.	77
10. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	80
11. CONCLUSIONES.....	103
12. RECOMENDACIONES	105
13. REFERENCIAS.....	107

Índice de Ilustraciones

<i>Ilustración 1</i> Representación artística sobre una toma de decisiones.....	37
<i>Ilustración 2</i> Representación básica de un desarrollo Multicriterio.....	39
<i>Ilustración 3</i> Representación de un (SAD) con enfoque geográfico para la toma decisiones especiales.....	41
<i>Ilustración 4</i> Paquete de productos (SIG) ArcGIS desarrollado por ESRI.....	43
<i>Ilustración 5</i> Análisis Espacial simple realizado por medio de un (DEM) en la extensión Spatial Analyst Tool.....	44
<i>Ilustración 6</i> Esquema de contexto que representa un Modelo de Procesos Parametrizado.....	46
<i>Ilustración 7</i> Herramienta Intersect en la interfaz de ArcGIS Desktop.....	48
<i>Ilustración 8</i> Herramienta Extract by Mask en la interfaz de ArcGIS Desktop.....	49
<i>Ilustración 9</i> Esquemmatización básica sobre cómo funciona la herramienta.....	50
<i>Ilustración 10</i> Herramienta Distancia Euclidiana en la interfaz de ArcGIS Desktop.....	51
<i>Ilustración 11</i> Esquemmatización básica sobre cómo funciona la herramienta Slope.....	52
<i>Ilustración 12</i> Herramienta Slope en la interfaz de ArcGIS Desktop.....	53
<i>Ilustración 13</i> Herramienta Reclassify en la interfaz de ArcGIS Desktop.....	54
<i>Ilustración 14</i> Ejemplo grafico sobre el funcionamiento de la herramienta Reclassify.....	55
<i>Ilustración 15</i> Ejemplo grafico sobre el funcionamiento de la herramienta Weighted Overlay.....	56
<i>Ilustración 16</i> Herramienta Weighted Overlay en la interfaz de ArcGIS Desktop.....	57

<i>Ilustración 17</i> Ejemplo grafico sobre el funcionamiento de la herramienta Raster to Polygon donde se observa la vectorización de las celdas.	58
<i>Ilustración 18</i> Herramienta Raster to Polygon en la interfaz de ArcGIS Desktop.....	59
<i>Ilustración 19</i> Jurisdicción de CARDIQUE en la zona Norte del Departamento de Bolívar.	76
<i>Ilustración 20</i> Metodología desarrollada para la realización de los objetivos específicos tres y cuatro.	79
<i>Ilustración 21</i> Modelo Espacial de Proceso Estructurado.	86
<i>Ilustración 22</i> Validación del Modelo Espacial por medio de la programación Visual de ModelBuilder	90
<i>Ilustración 23</i> Estadísticas de los Polígonos obtenidos a partir de la validación del Modelo Espacial.....	91
<i>Ilustración 24</i> Localización Geográfica de las zonas Optimas en la jurisdicción del Cardique	92
<i>Ilustración 25</i> Estadística obtenida para todas las áreas superiores a 50 Ha.....	93
<i>Ilustración 26</i> Localización Geográfica de las Zonas Optimas > 50 Ha.....	94
<i>Ilustración 27</i> Estadística obtenida para todas las áreas superiores a 150 Ha.....	95
<i>Ilustración 28</i> Localización Geográfica de las Zonas Optimas > 150 Ha.....	96
<i>Ilustración 29</i> Estadísticas correspondientes a los polígonos viables para la Ciudad de Cartagena de Indias.....	98
<i>Ilustración 30</i> Localización Geográfica de las Zonas Seleccionadas Detalle.....	98
<i>Ilustración 31</i> P Lancha Cartográfica con analisis de los poligonos identificados en función de la Malla Vial.	102

Lista de tablas

<i>Tabla 1</i> Criterios y Componentes propuestos para conformar la Matriz Multicriterio.....	61
<i>Tabla 2</i> Proceso de Jerarquización de Criterios.....	64
<i>Tabla 3</i> Metodología para asignar y jerarquizar los subcriterios.....	67
<i>Tabla 4</i> Subcriterios Restrictivos en la Metodología Multicriterio Propuesta.....	70
<i>Tabla 5</i> Estructura del Modelo Espacial de Procesos.....	73
<i>Tabla 6</i> Características Básicas de los productos de Entrada, Proceso y Salida del Modelo Espacial.....	74
<i>Tabla 7</i> Metodología Multicriterio Propuesta.....	84
<i>Tabla 8</i> Planchas Cartográficas utilizadas en la validación del modelo espacial.....	88
<i>Tabla 9</i> Modelos Digitales de Elevación utilizados para evaluar la jurisdicción de Cardique.....	89
<i>Tabla 10</i> Productos Cartográficos ofrecidos para la toma de decisiones en la jurisdicción de Cardique.....	101
<i>Tabla 11</i> Productos Cartográficos Asociados al Modelo Espacial.....	112

Índice de Planchas Cartográficas

<i>Plancha Cartográfica 1</i> Localización Geográfica del Área de Estudio	113
<i>Plancha Cartográfica 2</i> Localización Geográfica de las Áreas Protegidas	114
<i>Plancha Cartográfica 3</i> Localización Geográfica de los Cuerpos de Agua.....	115
<i>Plancha Cartográfica 4</i> Localización Geográfica de los Drenajes.....	116
<i>Plancha Cartográfica 5</i> Localización Geográfica de las Fallas Geológicas.....	117
<i>Plancha Cartográfica 6</i> Localización Geográfica del Componente Socio Cultural	118
<i>Plancha Cartográfica 7</i> Localización de los Subcriterios asignados a Drenajes en la Jurisdicción de Cardique.....	119
<i>Plancha Cartográfica 8</i> Localización de los Subcriterios asignados a Cuerpos de Agua en la Jurisdicción de Cardique.....	120
<i>Plancha Cartográfica 9</i> Localización de los Subcriterios asignados a Fallas Geológicas en la Jurisdicción de Cardique.....	121
<i>Plancha Cartográfica 10</i> Localización de los Subcriterios asignados a Zonas Protegidas en la Jurisdicción de Cardique.....	122
<i>Plancha Cartográfica 11</i> Localización de los Subcriterios asignados al Componente Socio Cultural en la Jurisdicción de Cardique	123
<i>Plancha Cartográfica 12</i> Localización de los Subcriterios asignados al Mapa de Pendientes de la Jurisdicción de Cardique.....	124
<i>Plancha Cartográfica 13</i> Localización Geográfica de las Zonas Optimas	125
<i>Plancha Cartográfica 14</i> Localización Geográfica de las Zonas Optimas > 50 Ha	126

<i>Plancha Cartográfica 15</i> Localización Geográfica de las Zonas Optimas > 150 Ha	127
<i>Plancha Cartográfica 16</i> Localización Geográfica de las Zonas Seleccionadas.....	128
<i>Plancha Cartográfica 17</i> Localización Geográfica de las Zonas Seleccionadas Detalle.....	129
<i>Plancha Cartográfica 18</i> Localización Geográfica de las Zonas Seleccionadas con Vías de Acceso	130

1. Lista abreviaturas

AHP: Proceso de Análisis Jerárquico (Siglas en inglés)

AMC: Análisis Multicriterio.

CARDIQUE: Corporación Autónoma Regional del Canal del Dique.

CONPES: Consejo Nacional de Política Económica y Social.

DEM: Modelo Digital de Elevación.

ESRI: Environmental Systems Research Institute.

IGAC: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

SAD: Sistemas de Apoyo para la Toma de Decisiones GDB

SIG: Sistemas de Información Geográfica.

2. Glosario

Franja de Protección: Son áreas de asilamiento que marcan una distancia entre una posible fuente de factores de deterioro ambiental y un aspecto que sea susceptible a ser afectado.

Lixiviado: líquido residual generado por la descomposición biológica de la parte orgánica o biodegradable de los residuos sólidos bajo condiciones aeróbicas y anaeróbicas y/o como resultado de la percolación de agua a través de los residuos en proceso de degradación.

Modelamiento de Adecuación: Tipo de modelación utilizado para identificar la mejor ubicación para situar cosas o áreas a conservar.

Modelo Espacial de Procesos: Son aquellos que intentan describir la interacción de los objetos que se muestran en un modelo de representación.

Modelo Espacial: Es una estructura formada por componentes digitales y matemáticos para representar fenómenos sobre la tierra.

Objetivos de Desarrollo Sostenibles: Son el corazón de la Agenda 2030 y muestran una mirada integral, indivisible y una colaboración internacional renovada. En conjunto, construyen una visión del futuro que queremos.

Ráster: Modelo de datos geográficos que representan la información a través de una malla regular de tipo mosaico, donde cada píxel es la unidad mínima de información que lleva asociado un número.

Relleno Sanitario: Es el 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.

Residuos Sólidos: Es cualquier objeto, material, sustancia o elemento sólido resultante del consumo o uso de un bien en actividades domésticas, industriales, comerciales, institucionales o de servicios, que el generador abandona, rechaza o entrega y que es susceptible de aprovechamiento o transformación en un nuevo bien, con valor económico o de disposición final.

Salud Pública: Se concibe como el conjunto de políticas que buscan garantizar de una manera integrada, la salud de la población por medio de acciones de salubridad dirigidas tanto de manera individual como colectiva, ya que sus resultados se constituyen en indicadores de las condiciones de vida, bienestar y desarrollo del país.

Shapefile: Formato sencillo y no topológico que se utiliza para almacenar la ubicación geométrica y la información de atributos de las entidades geográficas.

Superposición Ponderada: Técnica para combinar varios rásteres aplicando una escala de medición común de valores a cada ráster, ponderando cada uno en función de su importancia y agregándolos conjuntamente para crear un análisis integrado.

3. Introducción

La gestión adecuada de los residuos sólidos es crucial para la protección del medio ambiente y la salud de las comunidades. En Colombia, los rellenos sanitarios son la opción más viable desde el punto de vista técnico y financiero para tratar los residuos sólidos y cumplir con los Objetivos de Desarrollo Sostenible y la Agenda 2030. Sin embargo, la elección de las áreas adecuadas para instalar estos rellenos sanitarios representa un gran desafío, y se requieren mejores análisis de viabilidad y posibilidades de estudio de caso.

La metodología actual para seleccionar áreas viables para instalar la tecnología de relleno sanitario en Colombia, establecida en el Decreto 838 de 2005, no integra las nuevas tecnologías de la información geográfica (SIG) y debe actualizarse para garantizar una toma de decisiones más eficiente. Por lo tanto, surge la pregunta problema: ¿Puede una metodología multicriterio, integrada con herramientas SIG, ofrecer una mejora en la toma de decisiones para la ubicación de nuevos Rellenos Sanitarios en Colombia?

Este proyecto tiene como objetivo proponer una metodología multicriterio desarrollada sobre un modelo SIG que permita la identificación de áreas potenciales para ubicar Rellenos Sanitarios y ofrece una alternativa para mejorar la toma de decisiones en este ámbito a través de un Modelo Espacial de Adecuación que integra criterios legales y técnicos importantes para definir áreas potenciales para ubicar nuevos rellenos sanitarios.

El modelo fue validado en la jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Canal del Dique (CARDIQUE), donde existen diferentes rellenos sanitarios con una vida útil limitada.

El modelo espacial propuesto identificó diferentes polígonos considerados viables para ubicar rellenos sanitarios, priorizando la protección del recurso hídrico y la distancia segura a asentamientos humanos. Los polígonos obtenidos son el resultado de un estudio de prospección obtenido por medio de herramientas SIG y ofrecen una posibilidad para mejorar la toma de decisiones para la ubicación de nuevos rellenos sanitarios en Colombia.

Este proyecto es de gran importancia, dado que la gran cantidad de residuos sólidos generados en el mundo representa un reto importante para los sistemas de saneamiento ambiental. En Colombia, según cifras del año 2020, se están generando cerca de 32.580 toneladas diarias de residuos, con una baja tasa de reciclaje cercana al 11,82% en el año 2018. Además, el 38% de los Rellenos Sanitarios existentes en Colombia cuentan con una vida útil que oscila entre 2 a 3 años, lo que dificulta encontrar áreas adecuadas para ubicar nuevos Rellenos Sanitarios.

Las conclusiones de este estudio sugieren que la Metodología Multicriterio propuesta puede ser utilizada como una guía para la toma de decisiones en la planificación territorial. El modelo espacial debe ser una integración entre las herramientas SIG y la estructura general de la

Metodología Multicriterio, y los productos cartográficos obtenidos pueden ser herramientas útiles para mejorar la toma de decisiones en diferentes contextos de estudio.

Es importante destacar que la validación del modelo encontró varias opciones viables para ubicar nuevos rellenos sanitarios, pero es necesario que los profesionales con pleno conocimiento del territorio hagan una depuración de las opciones para asegurar la selección de las áreas más apropiadas.

En definitiva, con esta propuesta se espera beneficiar a los tomadores de decisiones, el sector prestador de servicios públicos, las comunidades afectadas y los ecosistemas, asegurando la protección de los derechos fundamentales y la inversión segura de los recursos limitados.

4. Planteamiento del problema de investigación y su justificación

En el siguiente apartado se realiza una breve contextualización sobre las problemáticas que motivan al desarrollo del proyecto propuesto, se describe de manera general la problemática asociada a la alta generación de residuos sólidos en el mundo, posteriormente se informa sobre la necesidad de construir nuevas infraestructuras para hacer disposición final adecuada en Colombia y se manifiesta la oportunidad de integrar las herramientas (SIG) junto con las disposiciones técnico-legales para poder mejorar la toma de decisiones en el ámbito nacional.

4.1 Descripción del área problemática

La gran cantidad de residuos sólidos generados en el mundo representa un reto importante para los sistemas de saneamiento ambiental, se estima según datos del (Banco Mundial, 2018) que la producción puede pasar de 2.010 millones de toneladas anuales con referencia al 2016, hasta cerca de 3.400 millones de toneladas por año para mediados del 2050.

En el contexto colombiano la situación no es diferente, según cifras del año 2020 se están generando cerca de 32.580 toneladas diarias de residuos, con una baja tasa de reciclaje cercana al 11,82% en el año 2018. (MinAmbiente, 2022)

En Colombia según las estimaciones realizadas dentro del Informe Nacional de Disposición Final, la tecnología de tratamiento final más utilizada en el país es el relleno sanitario, siendo más del 56% de la infraestructura disponible del país para realizar disposición final (SSPD, 2020)

Por otra parte según él (CONPES 3874, 2016) es necesario contar con sistemas de información que garanticen una toma de decisiones acertada, de manera adicional, es importante considerar que el 38% de los Rellenos Sanitarios existentes en Colombia cuentan con una vida útil que oscila entre 2 a 3 años y cada vez es más difícil encontrar áreas adecuadas para ubicar nuevos Rellenos Sanitarios.

Como parte de la Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos formulada por el Departamento Nacional de Planeación en el CONPES 3874, es importante resaltar que *“El relleno sanitario, junto con el compostaje, es la técnica que tiene un menor costo por tonelada, por debajo de otras como el aprovechamiento (reciclaje) y el tratamiento mecánico o con fines de generación de energía”*. (CONPES 3874, 2016)

Como lo indica el Departamento Nacional de Planeación y el Banco mundial en el año 2015 aproximadamente el 83% de los residuos sólidos generados en el país terminan en rellenos sanitarios y es urgente garantizar este servicio público aumentando la infraestructura necesaria para evitar un déficit en la capacidad de disposición final de los rellenos actuales.

Siendo la tecnología de Relleno Sanitario la opción más viable desde el punto de vista financiero, es importante que el país trabaje en la identificación de nuevas áreas viables para hacer disposición final, para en primer lugar seguir garantizando un tratamiento responsable de los residuos en las próximas décadas y por otra parte, se debe pensar en nuevas metodologías para seleccionar la ubicación de estos nuevos rellenos sanitarios de forma que se garanticen en el

entorno los derechos al ambiente sano, vivienda sana, protección del derecho a la salud y los demás beneficios que se alcanzan cuando se hace una toma de decisiones eficiente.

El marco legal colombiano ofrece en el Decreto 838 de 2005 una metodología para orientar la toma de decisiones en referencia a la localización de nuevas áreas para ubicar la opción de relleno sanitario, pero esta metodología carece de integración con las nuevas tecnologías de la información geográfica para garantizar una decisión acertada por parte de los organizadores del territorio. Ante este postulado, se formula la siguiente pregunta problema: *¿Puede una metodología multicriterio, integrada con herramientas SIG, ofrecer una mejora en la toma de decisiones para la ubicación de nuevos Rellenos Sanitarios en Colombia?*

4.2 Justificación

La disposición adecuada de los residuos sólidos es un tema de salud pública que se relaciona de manera intrínseca con los principios constitucionales de la Carta Magna, dado que en primera instancia se garantiza el derecho a gozar de un ambiente sano, por otra parte, se asegura el acceso a servicios públicos de calidad y se reducen las posibilidades de presentar situaciones negativas para la salud de las comunidades.

Los Rellenos sanitarios como se expuso en la formulación del problema, son por lo pronto la opción de tratamiento más viable para Colombia, desde el punto de vista técnico y financiero, lo que hace necesario contar con nuevas áreas disponibles para desarrollar esta tecnología. Disponer los residuos sólidos de manera correcta debe ser una prioridad para los

gobiernos nacionales en relación al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible y los compromisos de la Agenda 2030.

El marco normativo colombiano cuenta con una metodología para seleccionar áreas viables para instalar la tecnología de relleno sanitario, los criterios pueden ser consultados en el Decreto 838 de 2005, pero analizando la temporalidad de la norma y los recursos disponibles en la fecha actual, es preciso trabajar en propuestas que integren los criterios técnicos y legales, con las nuevas tecnologías de la información geográfica (SIG), agregando un abanico de posibilidades de análisis más amplio, que permita a lo largo del tiempo una toma de decisiones cada vez más acertada.

La propuesta de una metodología multicriterio integrada con herramientas (SIG) para identificar áreas viables para la ubicación de nuevos rellenos sanitarios en Colombia beneficia en primer lugar a los tomadores de decisiones que necesitan de nuevos insumos, sobre los cuales definir sus instrumentos de ordenamiento territorial, en segundo lugar, se beneficia el sector prestador de servicios públicos dado que dispondrá de nuevos lugares donde realizar la disposición final de manera correcta.

Como parte de un segundo grupo de beneficiarios es preciso indicar que mejorar las metodologías para identificar nuevas áreas garantiza una disminución en la generación de factores de deterioro ambiental asegurando la protección de los derechos fundamentales de las comunidades afectadas por las áreas de influencia y por otra parte los ecosistemas se ven favorecidos frente a una mejora en la planificación de infraestructuras de disposición final, que

permitan cada vez una mitigación más efectiva de los posibles impactos ambientales que esta tecnología genera.

Las herramientas (SIG) en este proyecto surgen como un aliado para mejorar la eficiencia en la toma de decisiones. La metodología actual debe sufrir mejoras en los análisis de viabilidad y las posibilidades de estudio de caso que ofrecen los (SIG) pueden brindar por medio de la integración propuesta, una nueva opción para los organizadores del territorio, contando con un modelo de estudios replicable en distintos contextos, asequible para una parte importante de las entidades y ofreciendo resultados concretos que garanticen la inversión segura de los recursos limitados.

5. Objetivos

5.1 Objetivo general

Proponer una metodología multicriterio desarrollada sobre un modelo SIG que permita la identificación de áreas potenciales para ubicar Rellenos Sanitarios en la jurisdicción de Cardique.

5.2 Objetivos específicos

- Desarrollar una metodología multicriterio que considere los criterios técnicos y legales asociados a la identificación de áreas potenciales para ubicar Rellenos Sanitarios en Colombia.
- Integrar la metodología multicriterio desarrollada con las herramientas SIG disponibles de forma que se logre un modelo espacial.
- Validar el modelo espacial por medio de un estudio de caso de forma que esta sea completamente replicable en cualquier contexto.
- Ofrecer por medio de la ejecución del modelo productos cartográficos que permitan la toma de decisiones.

6. Antecedentes

Considerando la naturaleza de la propuesta se realizó una revisión de antecedentes relacionados al objetivo de la propuesta desarrollada en el presente documento, encontrando que para el año 2012 se usó la técnica de jerarquía analítica (AHP) y SIG para la selección de sitios de vertederos en Asmara, Eritrea.

En cuanto a las variables utilizadas, los autores identificaron y evaluaron seis criterios principales: distancia a las áreas residenciales, distancia a las fuentes de agua, distancia a las carreteras principales, pendiente, elevación y costo del terreno. Estos criterios fueron asignados a subcriterios específicos y se evaluaron en términos de su importancia relativa mediante la técnica de AHP. La información espacial fue integrada en un sistema de información geográfica (SIG) para realizar el análisis multicriterio y generar un modelo de decisión. (Kidane et, 2012)

Posteriormente en Cisjordania, Palestina se describe el uso de la teledetección y SIG para la selección de sitios para nuevos rellenos sanitarios. El estudio considera criterios ambientales, sociales, económicos y técnicos, y se basa en el análisis multicriterio para seleccionar los sitios óptimos. Los autores utilizaron una combinación de imágenes satelitales, datos topográficos, datos de uso del suelo y datos demográficos para identificar las zonas adecuadas para la disposición final de residuos sólidos. (Almasri, 2013)

Los resultados mostraron que se pueden utilizar técnicas de teledetección y SIG para identificar sitios adecuados para la disposición final de residuos sólidos en Palestina. (Almasri, 2013)

En el año 2014 en Latinoamérica, específicamente en Argentina se desarrolló una interesante propuesta sobre una metodología basada en un análisis multicriterio para seleccionar los sitios más adecuados para la disposición final de residuos sólidos urbanos (RSU) en la región metropolitana de Buenos Aires.

Se evaluaron diez criterios: distancia a centros urbanos, distancia a rutas principales, distancia a cuerpos de agua, calidad del suelo, tipo de suelo, pendiente, elevación, capacidad de carga, accesibilidad y costos. Los resultados del análisis multicriterio fueron presentados en forma de mapas y tablas, lo que permitió identificar las áreas más adecuadas para la disposición final de los residuos sólidos urbanos en la región metropolitana de Buenos Aires. (González, 2014)

Para 2015 de nuevo en Palestina se describe el uso de un enfoque de análisis espacial multicriterio basado en SIG. Los autores identificaron varios criterios importantes, incluyendo la distancia a áreas urbanas, la distancia a fuentes de agua, la topografía y la presencia de zonas protegidas. Luego, utilizaron modelos de ponderación para asignar valores a cada criterio y generar mapas temáticos que ayudaron a identificar sitios potenciales para la disposición final de residuos sólidos. Finalmente, los autores evaluaron la idoneidad de los sitios seleccionados mediante una revisión de la literatura existente y una consulta con expertos locales. (Al-Khateeb, 2015)

En el año 2016, en esta ocasión en el continente africano, específicamente en Camerún, se efectuó una evaluación de la idoneidad de los sitios de vertederos utilizando SIG y la técnica de jerarquía analítica (AHP). Algunas de las variables ambientales incluyeron la distancia a cuerpos de agua y áreas protegidas, mientras que las variables socioeconómicas incluyeron la

densidad poblacional y la proximidad a las carreteras. Los autores utilizaron la técnica de jerarquía analítica (AHP) para asignar pesos a cada criterio y luego realizar un análisis multicriterio (MCA) para seleccionar el mejor sitio. (Tchanga, 2016)

Para 2016 de nuevo en África, Lago Victoria, los autores utilizaron el análisis jerárquico de procesos (AHP) en combinación con un Sistema de Información Geográfica (SIG) para evaluar la idoneidad de los sitios potenciales para rellenos sanitarios. Se consideraron múltiples criterios, incluyendo la proximidad a fuentes de residuos, la accesibilidad, la topografía, la geología, la hidrología y los factores socioeconómicos. Los resultados indicaron que los sitios más adecuados para la disposición final de residuos sólidos urbanos en la cuenca del lago Victoria se encuentran en áreas rurales o periféricas, lejos de los centros urbanos y de las zonas de conservación ambiental. (Nyaoro, 2016)

Volviendo a Argentina en el año 2016 un grupo de investigadores utilizó un sistema de información geográfica para integrar múltiples criterios, incluyendo la distancia a zonas urbanas, la topografía, la presencia de cuerpos de agua y la accesibilidad, entre otros. La evaluación multicriterio permitió obtener una clasificación de los sitios potenciales para la disposición final de residuos sólidos urbanos, identificando áreas que cumplieran con los criterios establecidos. (Collazo, 2016)

Para 2017 se encuentra una investigación realizada en Estambul, Turquía donde los autores utilizaron un enfoque de análisis multicriterio basado en SIG (Sistemas de Información Geográfica) y AHP (Proceso Analítico Jerárquico) para evaluar los criterios ambientales, sociales y económicos relevantes y seleccionar un sitio adecuado para el vertedero. Las variables utilizadas incluyeron factores ambientales como la distancia a los cuerpos de agua, las zonas de

conservación de la naturaleza y las áreas de alto valor ecológico, así como factores sociales y económicos como la distancia a las áreas residenciales, la accesibilidad y la topografía. Los autores concluyeron que el enfoque de análisis multicriterio basado en SIG y AHP es efectivo para la selección de sitios de vertederos en países en desarrollo. (Chrysoulakis, 2017)

En el mismo año en la Ciudad de Jhansi en la India, un grupo de investigadores utilizó datos geoespaciales y criterios ambientales, económicos y sociales para generar un modelo de decisión que permitió identificar los sitios de polígonos óptimos. Se presentan los resultados del estudio de caso y muestra que la técnica utilizada puede ser una herramienta útil para la selección de sitios para nuevos rellenos sanitarios en otras áreas urbanas. (Gupta, 2017)

Para 2018 en Pakistán un estudio se enfocó en la selección de sitios para la disposición final de residuos sólidos, utilizando una combinación de la técnica de jerarquía analítica difusa (FAHP) y SIG. Se utilizaron criterios sociales, ambientales, económicos y técnicos para identificar los sitios óptimos de disposición final de residuos sólidos. Los criterios incluyeron la proximidad a las vías de transporte, la distancia a los asentamientos humanos, la calidad del suelo, la hidrogeología, la topografía, el costo de adquisición de tierras y la facilidad de operación. La metodología desarrollada en este estudio puede ser útil para la toma de decisiones en la selección de sitios de vertederos en áreas urbanas densamente pobladas. (Ali, 2018)

En Turquía en región urbana de Menderes para el año 2019 de nuevo estudio utilizó la técnica de Análisis Jerárquico de Procesos (AHP) y un Sistema de Información Geográfica (SIG) para evaluar y seleccionar los sitios óptimos de vertederos basándose en factores como la distancia a zonas urbanas, distancia a fuentes de agua, topografía, geología, calidad del suelo y

características demográficas. Los resultados muestran que la técnica de AHP combinada con SIG es útil para la selección de sitios de vertederos en áreas urbanas en crecimiento.. (Aydin, 2019)

En el mismo año otro grupo de investigación revisó varias publicaciones relacionadas con la selección de sitios de disposición final de residuos sólidos en países en desarrollo. La literatura revisada proviene de diferentes países, entre ellos, Bangladesh, Brasil, China, Egipto, India, Irán, Jordania, Malasia, México, Nepal, Nigeria, Pakistán, Palestina, Perú, Sudáfrica, Turquía y Vietnam.

Los autores identificaron y evaluaron diferentes criterios utilizados en los estudios revisados, incluyendo factores ambientales, sociales, económicos, institucionales y tecnológicos. Los resultados del estudio indican que el MCDA es una herramienta efectiva para seleccionar sitios de vertedero sostenibles en países en desarrollo, ya que ayuda a los responsables de la toma de decisiones a identificar y evaluar los múltiples factores relevantes y tomar decisiones informadas y sostenibles. (Nduwayezu, 2019)

En Filipinas para el mismo año (2019) se trabajó en un modelo de lógica difusa y SIG para la selección de sitios de vertederos en un entorno con escasez de datos en esta Nación. Las variables utilizadas en la selección del sitio incluyeron restricciones ambientales, socioeconómicas y de infraestructura. Las restricciones ambientales incluyeron la pendiente, la proximidad a ríos y cuerpos de agua, y la distancia a los humedales y las áreas protegidas. Las restricciones socioeconómicas incluyeron la densidad de población, la distancia a las áreas residenciales y las zonas de protección, la proximidad a las instalaciones médicas y educativas, y la proximidad a los servicios públicos y de transporte. Las restricciones de infraestructura

incluyeron la proximidad a las carreteras, la distancia a la electricidad, y la proximidad a las fuentes de agua potable. (Lapis, 2020)

En el contexto colombiano para este año 2019, se trabajó en la Ciudad de Villavicencio, Meta con una metodología basada en análisis multicriterio y SIG para seleccionar el sitio más adecuado para la disposición final de residuos sólidos urbanos en la ciudad. Los criterios evaluados incluyen la distancia a las carreteras principales, la pendiente del terreno, la distancia a las fuentes de agua, la distancia a las zonas urbanas y la distancia a los sitios de interés ambiental. Luego de la evaluación, se seleccionaron dos sitios óptimos para la disposición final de residuos sólidos urbanos en la ciudad. (Rincón, 2019)

Volviendo a Latinoamérica, para 2019 en México se presenta una metodología para la selección de sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos (RSU), utilizando SIG y evaluación multicriterio. Se identificaron los criterios relevantes para la selección del sitio de disposición final y los integraron en un modelo de evaluación multicriterio. Luego, utilizaron SIG para integrar la información geográfica relevante y generar mapas temáticos que ayudaron en la selección del sitio de disposición final. (Aguilar, 2019)

Otro caso Latinoamericano se dio en Ecuador donde en el año 2019 se hizo un estudio con enfoque de análisis multicriterio y SIG para seleccionar sitios de rellenos sanitarios adecuados en zonas rurales. Los autores identificaron nueve criterios para la selección de sitios, incluyendo la distancia a centros poblados, la accesibilidad, la geología, la hidrología, la topografía, la vegetación, la disponibilidad de agua, la presencia de sitios arqueológicos y la propiedad del terreno. Luego, se aplicó un análisis multicriterio para evaluar la idoneidad de cada sitio. Los resultados mostraron que la mayoría de los sitios adecuados para la disposición final de

residuos sólidos urbanos en las zonas rurales del Ecuador se encuentran en la cuenca alta de los ríos Mira y Chota. (M. V. Cevallos Torres, 2019)

En el año 2021 en Colombia, departamento del Valle del Cauca, municipio de San Pedro, los investigadores utilizaron un enfoque de análisis multicriterio junto con un Sistema de Información Geográfica (SIG) para evaluar y clasificar diferentes sitios potenciales para la disposición final de residuos sólidos. Se evaluaron criterios ambientales, socioeconómicos y técnicos, tales como la distancia a cuerpos de agua, la distancia a centros urbanos, la topografía, el uso del suelo y la capacidad de carga del suelo. Los resultados de la evaluación fueron utilizados para generar un mapa de idoneidad de sitios para la disposición final de residuos sólidos en el municipio de San Pedro. (Orozco Quintero, 2021)

Para terminar la revisión de antecedentes, en el año 2021 en Colombia, se hizo una revisión sistemática de la literatura para identificar y analizar las metodologías multicriterio utilizadas para la selección de sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos. En total, se analizaron 44 artículos publicados en los últimos 10 años, y se identificaron 23 variables principales utilizadas en las metodologías de selección de sitio.

Entre las variables más utilizadas se encontraron las relacionadas con la topografía del terreno, la distancia a cuerpos de agua y la presencia de áreas protegidas o zonas de interés ambiental. También se consideraron variables socioeconómicas, como la densidad poblacional, la accesibilidad y la presencia de áreas urbanas. Además, se identificaron variables relacionadas con la gestión de residuos, como la cantidad y composición de los residuos generados.

Los autores concluyen que existe una gran diversidad de variables utilizadas en las metodologías multicriterio para la selección de sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos, lo que refleja la complejidad del problema y la necesidad de considerar múltiples factores para tomar una decisión informada. (León Rincón, 2021)

7. Referente normativo y legal

7.1 Referente Normativo de Carácter Ambiental.

El Marco Legal asociado a la disposición final de Residuos Sólidos en Colombia, está directamente relacionado con las bases sobre las cuales se inició y estructuró la legislación ambiental. De manera preliminar se construyeron los cimientos de protección ambiental que más tarde permitieron reglamentar los lineamientos básicos para hacer una disposición final adecuada, utilizando la tecnología de Relleno Sanitario en el país.

En primer lugar, la base histórica para la legislación ambiental es el Decreto 2811 de 1974 *“Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente”*. En este documento se regulan en su Inciso 10, Artículo 3, del Capítulo Único, Título Preliminar, los residuos, basuras, desechos y desperdicios. (Gobierno de Colombia, 1974)

En su definición de normas generales de la política ambiental Inciso L, Artículo 8 se entienden la acumulación o disposición inadecuada de residuos, basuras, desechos y desperdicios como factores que deterioran el ambiente. De este Decreto es importante resaltar el propósito del

Título III “De los Residuos, Basuras, Desechos y Desperdicios” donde se establece como fundamental el uso de los mejores métodos, tecnologías y avances científicos para garantizar una correcta disposición final de los residuos sólidos. (Gobierno de Colombia, 1974)

Posteriormente surge la Nueva Constitución Política de Colombia en el año 1991, que en cierta forma mantuvo el espíritu ambiental sembrado desde el año 1974, con el primer código ambiental. (Revista Semana, 2017)

Los principios ambientales de la Carta Magna son resaltados en el Artículo 8 donde se otorga a la nación la responsabilidad de proteger las riquezas culturales y naturales de la nación, en el artículo 49 se responsabiliza al estado sobre el saneamiento ambiental como un servicio público, de manera importante el Artículo 79 decreta el derecho a gozar de un ambiente sano, por lo que las acciones del estado lo deben garantizar. Y para terminar el Artículo 80 confiere al estado el deber de prevenir y controlar los diferentes factores de deterioro ambiental que se puedan generar. (Asamblea Nacional Constituyente, 1991)

Frente a la necesidad de reglamentar las diferentes directrices promulgadas dentro de la Nueva Constitución, el Estado Colombiano expidió la Ley 99 del 22 de diciembre de 1993, donde se organizó el Sistema Nacional Ambiental y se otorgaron a cada una de las entidades las respectivas obligaciones que tendrían en el marco de cumplir con esta Ley General Ambiental. (CEPAL, 2016) Dentro de estas obligaciones se otorgó a cada una de las entidades actuaciones específicas encaminadas a garantizar una correcta disposición final de los residuos sólidos.

Posteriormente surge la Ley 142 de 1994 “*Por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones*”. En esta Ley se reafirma la obligación del estado para asegurar la disposición final de residuos y mejorar la calidad de vida de los usuarios. De manera adicional en el Artículo 164 se establece la incorporación de costos especiales en las tarifas con el fin de proteger los recursos naturales afectados por la disposición final de residuos en rellenos sanitarios. (Congreso de Colombia , 1994)

En concordancia con la Ley 142, surge la necesidad de reglamentar sus disposiciones por medio del Decreto 1713 del 6 de agosto de 2002, donde se define técnicamente en su Artículo 1 el concepto de Relleno Sanitario y en el Capítulo VIII se dieron las pautas básicas para ubicar rellenos sanitarios, pero al carecer de profundidad técnica este apartado fue derogado por el Decreto 838 de 2005. (Belalcazar Urbano, 2020)

Este nuevo decreto modificatorio fue sancionado con el objetivo de facilitar la planificación, construcción y operación de tecnologías de relleno sanitario como alternativa para la correcta disposición de los residuos sólidos en Colombia. En este Decreto 838 de 2005 es destacable lo dispuesto en el Título I, Capítulo II, donde se comienza con las disposiciones del Artículo 4 “*Procedimiento para la localización de áreas para hacer disposición final*”, continua con el Artículo 5 “*Criterios y metodología para la localización de áreas para disposición final de residuos sólidos, mediante la tecnología de relleno sanitario*” y prosigue con el Artículo 6 sobre “*Prohibiciones y restricciones en la localización de áreas para disposición final de residuos sólidos*”. (Gobierno de Colombia, 2005)

El Decreto 838 de 2005 es evidentemente el referente normativo más significativo en el desarrollo del presente proyecto, dado que define los criterios técnicos, legales y los lineamientos metodológicos necesarios para proponer una metodología multicriterio que estructurada sobre un modelo (SIG) ofrezca alternativas innovadoras que se ajusten al contexto normativo del país.

Continuando con la presente revisión normativa es importante mencionar la reglamentación del Artículo 251 de la Ley 1450 de 2011 (Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014), donde se ofrecen incentivos a los municipios donde se construyan y operen rellenos sanitarios, estos beneficios son ratificados exactamente por el Decreto 920 del 08 de mayo de 2013. (Congreso de Colombia, 2011)

De manera más reciente se cuenta con el Decreto 1784 del 02 de noviembre de 2017, el cual modificó el Capítulo 3 del Título 2 de la Parte 3, del Libro 2 del Decreto 1077 de 2015. El Decreto 1784 de 2017 se podría definir como el segundo referente normativo más importante, dado que el Artículo 2.2.2.3.9 de nuevo hace énfasis en los criterios a tener en cuenta para definir áreas viables para ubicar nuevos rellenos sanitarios en el país. (Gobierno de Colombia, 2017)

Por último es importante destacar que la Ley 388 de 1997, también conocida como la Ley de Ordenamiento Territorial, establece ciertas disposiciones específicas en relación a los rellenos sanitarios. En concreto, el artículo 32 de la ley establece que los planes de gestión integral de residuos sólidos que deben diseñar y ejecutar los municipios y distritos deben contener medidas para la disposición final de los residuos sólidos, entre ellas la construcción y operación de rellenos sanitarios.

Asimismo, el artículo 34 de la Ley establece que los rellenos sanitarios deben ser construidos y operados bajo criterios técnicos, ambientales y sanitarios que garanticen la protección de la salud y el ambiente. Para ello, la ley establece que se deben establecer normas y reglamentaciones técnicas para la construcción y operación de los rellenos sanitarios, así como para el monitoreo y control de los mismos. Además, el artículo 39 de la Ley establece que los municipios y distritos deben elaborar planes de cierre y poscierre de los rellenos sanitarios, con el objetivo de garantizar su estabilización y recuperación ambiental una vez que dejan de operar.

En resumen, la Ley 388 de 1997 establece disposiciones específicas para la construcción, operación, monitoreo y cierre de los rellenos sanitarios, con el fin de garantizar su adecuado funcionamiento y proteger la salud y el ambiente.

Referente Normativo Asociado a la Aplicación de los (SIG).

Es importante manifestar que la legislación Colombiana no cuenta entre su normatividad con documentos que definan legalmente una metodología de selección que pueda ser integrada con un (SIG), (Torres, Londoño, & Posada, 2019) por lo que se deja abierta la posibilidad de trabajar sobre los lineamientos del Decreto 838 de 2005 y de esta manera desde el hacer profesional proponer nuevos recursos técnicos que mejoren la planificación y toma de decisiones en los diferentes territorios del país.

De forma esencial es importante considerar la Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) de Colombia que es un conjunto de políticas, tecnologías, estándares, acuerdos institucionales y

recursos humanos necesarios para adquirir, procesar, almacenar, distribuir y mejorar la calidad de la información geoespacial disponible en Colombia. La IDE se rige por la Ley 1753 de 2015 y su objetivo principal es asegurar el acceso a la información geoespacial para promover la toma de decisiones informada y el desarrollo del país. Además, la Ley establece la creación del Sistema de Información Geográfica de Colombia (SIGCO) como la plataforma tecnológica que soporta la IDE, y establece una serie de obligaciones para las entidades públicas y privadas en relación con la producción, gestión y difusión de información geoespacial. En resumen, la IDE busca promover la coordinación, estandarización y acceso a la información geoespacial en Colombia para impulsar el desarrollo sostenible del país.

Con referencia a la producción de Cartografía es importante tener claro que para todos los fines el Instituto Geográfico Agustín Codazzi es la máxima “*autoridad en materia geográfica, geodésica, cartográfica, catastral y agrológica nacional*” como es estipulado en el artículo 4 del Decreto 846 del 29 de julio de 2021. (Gobierno de Colombia, 2021) Lo anterior hace que los productos generados a través de la integración entre los criterios normatizados y los (SIG) genere productos cartográficos que respondan a las especificaciones básicas del (IGAC).

Es importante tener en cuenta las especificaciones básicas para generar productos geográficos en el país, la Norma técnica colombiana NTC 5662:2010 sobre información geográfica permite consultar “*los conceptos básicos, estructura y contenido que debe tener las especificaciones técnicas para la generación de productos geográficos*” (IDEAM, 2020)

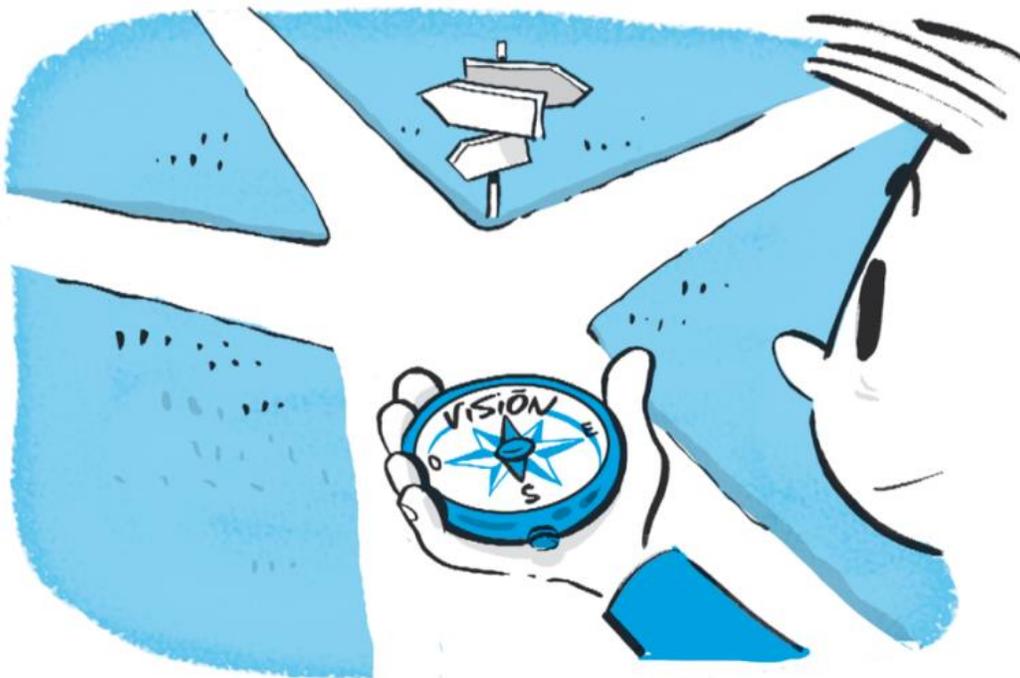
Para terminar, es relevante recordar que con la resolución No. 370 del 16 de junio del 2021 el (IGAC) ordena la adopción de un nuevo sistema oficial de coordenadas planas denominado Origen Nacional y se encuentra codificado por el European Petroleum Survey Group como EPSG:9377.

8. Referente teórico

En la toma de decisiones se maneja una alta complejidad con referencia al análisis de los múltiples criterios técnicos y reglamentarios que pueden estar inmersos frente a la búsqueda de soluciones para resolver un problema en específico. Con base a lo anterior es relevante contar con herramientas que permitan analizar criterios de manera conjunta y discernir entre las posibles alternativas de solución de una manera concreta y justificada. (Cáceres & Gómez, 2021)

Ilustración 1

Representación artística sobre una toma de decisiones.



Nota: Ilustración tomada de IAPDO Consultorio Psicológico. (Publicado 29 de Abril de 2016)

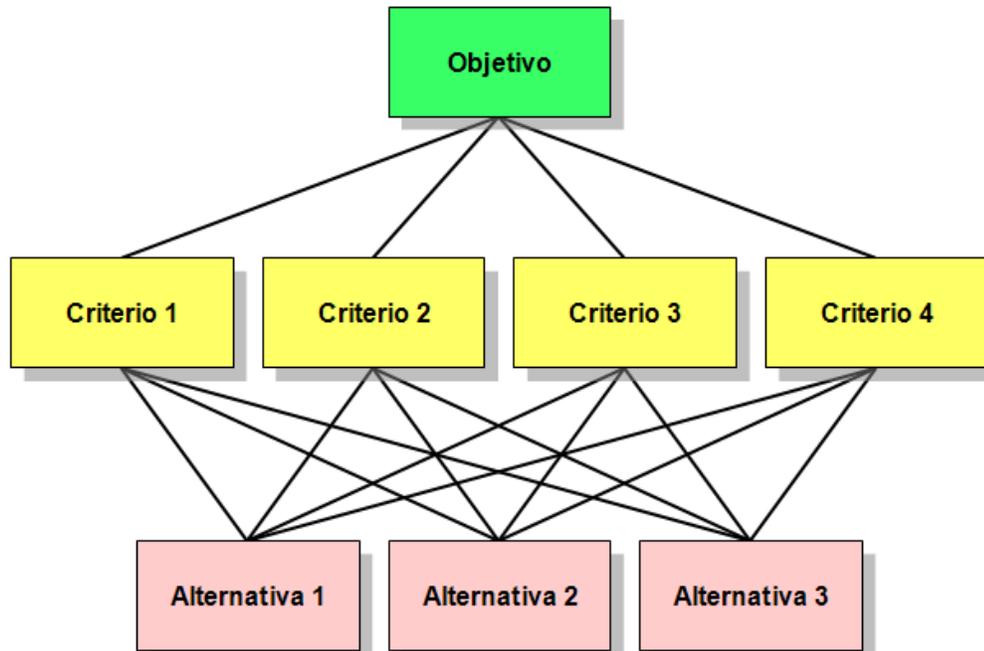
Para el profesor Pedro Pavesi una decisión es “un *proceso deliberado que lleva a la selección de una acción determinada entre un conjunto de acciones alternativas. La decisión es un proceso previo a la acción*” (Gómez, 2019)

“Las decisiones ambientales generalmente las toman personas distintas a los interesados, por lo tanto, las elecciones y etapas que justifiquen la toma de decisiones deben ser transparentes”. (Herrera Basulto & Vásquez Sánchez, 2021) Como lo manifestó el autor *Ackoff* el acceso a la información se ha facilitado de diversas formas, por lo que siempre será necesario ofrecer nuevos recursos que permitan transformar esa información disponible en decisiones eficientes y soportadas en argumentos cada vez menos subjetivos. (Pimienta Prieto, Zambrano Miranda, & Albornoz Camacho, 2021)

El análisis multicriterio (AMC) para el caso en estudio, existe como una ayuda fundamental para los tomadores de decisiones al ser una herramienta que permite seleccionar la alternativa más factible entre un abanico de posibilidades que surgen luego de correlacionar diversos criterios asociados directamente al estudio de la problemática en cuestión. (Velásquez Ordóñez & Gómez Vargas, 2020)

Ilustración 2

Representación básica de un desarrollo Multicriterio.



Nota: Ilustración publicada por Medical Sapiens el 14 de junio de 2018

En otra definición sintetizada se puede comprender como “*una metodología para evaluar alternativas según criterios individuales y combinarlos en una evaluación general*”. (Bravo, 2018) En este contexto, la definición anterior es de manera más concreta la que describe el propósito general del objetivo específico número uno.

Con igual importancia es fundamental manejar una estructuración de la metodología en función de los principios básicos del Proceso de Análisis Jerárquico con sus siglas en inglés (AHP). Este proceso está pensado en manejar múltiples criterios para encontrar solución a problemas complejos. Para la aplicación de toma de decisiones por metodología multicriterio es

fundamental manejar una jerarquización subjetiva de los criterios implícitos en el análisis. (Ramírez Hernández & Castellanos Garzón, 2021) Este desarrollo por ende maneja un componente de estructuración subjetivo y un segundo componente objetivo relacionado a categorización basada en lineamientos técnicos - legales que en este caso son expuestos en el desarrollo normativo.

Para realizar una toma de decisiones acertada se cuenta desde hace varias décadas con Sistemas de Apoyo para la Toma de Decisiones (SAD), generalmente estos sistemas están soportados en softwares que favorecen la correlación y análisis de múltiples variables, los (SAD) han sido de amplia aplicación en los campos de la medicina, la ingeniería y las Ciencias Ambientales y de la Tierra. Estos sistemas ofrecen herramientas de análisis, diversas alternativas de solución basadas en la información disponible y en los sistemas más avanzados se pueden simular las consecuencias de aplicar alguna de las alternativas disponibles. (Bernal, Díaz, & Arias, 2020)

Con la llegada de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) soportados en Bases de Datos Espaciales (GDB), se ha progresado en la formulación de modelos de análisis multicriterio más explícitos que permiten analizar la dinámica espacial de los criterios analizados por medio del modelo geográfico planteado. (Bernal, Díaz, & Arias, 2020)

propuestas (SIG) que más adelante permitan establecer los lineamientos mínimos que debe contemplar una Metodología Multicriterio Espacial que ofrezca mejores resultados.

Dentro de todas las opciones existentes con relación a los Sistema de Apoyo para la Toma de Decisiones (SAD), el software ArcGIS como lo define su desarrollador (ESRI) es un *“completo sistema que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica”*. Por otra parte, es sin discusión el software más reconocido por todos los profesionales (SIG) del mundo. (ESRI, 2023)

De manera concreta es importante manifestar que el (SAD) ArcGIS es un producto que destaca por su capacidad de ofrecer herramientas especializadas para efectuar análisis espacial. *“El objetivo que persigue es derivar nueva información de los datos existentes para permitir una mejor toma de decisiones”*. (ESRI, 2023) La afirmación expuesta de esta forma contribuye a la búsqueda de una respuesta a la pregunta problema formulada.

Ilustración 4

Paquete de productos (SIG) ArcGIS desarrollado por ESRI.



Nota: Ilustración creada por Mockups Design. (Recueprado en Enero de 2023)

El (SAD) ArcGIS en cuestión es un paquete de herramientas, donde es importante destacar la colección de ArcToolBox que no es más que un conjunto de extensiones destinadas a ejecutar geo procesos distintos, en función con la especialidad de cada uno de los conjuntos de herramientas que lo conforman. (Caso Osorio, 2010)

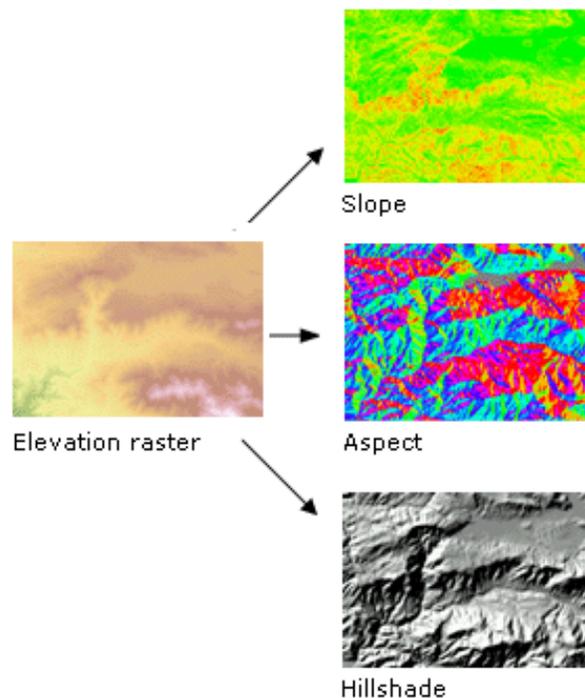
Entre las extensiones que conforman el ArcToolBox una de las más relevantes es Spatial Analyst Tool dado que es una amplia colección de recursos que facilitan un análisis espacial integral con la opción de trabajar en conjunto con archivos tipo Raster o tipo Vector. Esta extensión según su desarrollador “*permite resolver múltiples escenarios, de menor o mayor*

complejidad y que nos podemos encontrar en estudios de Impacto Ambiental, gestión de fauna, gestión de residuos, Geomarketing, etc.” (Dimas, 2014)

La extensión Spatial Analyst Tool presenta solución de análisis para diversos escenarios asociados a dinámicas naturales, como el análisis de riesgos, distribución espacial de la contaminación, usos de suelos, otra gran cantidad de aplicaciones y de manera relevante para el proyecto, la funcionalidad para encontrar ubicaciones óptimas para desarrollar distintas actividades que pueden influir de manera importante en su entorno más cercano. (ESRI, 2023)

Ilustración 5

Análisis Espacial simple realizado por medio de un (DEM) en la extensión Spatial Analyst Tool.



Nota: Ilustración tomada de ArcMap/ESRI sitio web. (Recueprado en Enero de 2023)

Para una propuesta de análisis espacial que permita identificar áreas óptimas para ubicar rellenos sanitarios en Colombia, se pasó por realizar una revisión teórica, definiendo que un modelo de procesos es la ruta idónea dado que este tipo de modelos evalúan las distintas interacciones que suceden en el paisaje. Y para evaluar este tipo de interacciones que van más allá de los límites del modelo de representación se dispone del Spatial Analyst de ArcGIS.

“Cada herramienta de Spatial Analyst puede ser considerada un modelo de proceso. Algunos modelos de proceso son simples, mientras que hay otros que son más complejos. Se puede agregar más complejidad añadiendo lógica y combinando varios modelos de proceso con Álgebra de mapas o ModelBuilder”. (ESRI, 2022) Dentro de los modelos de proceso existen algunos tipos de modelación, entre las cuales está la modelación de adecuación, según la definición literal del diccionario (SIG) de ESRI es:

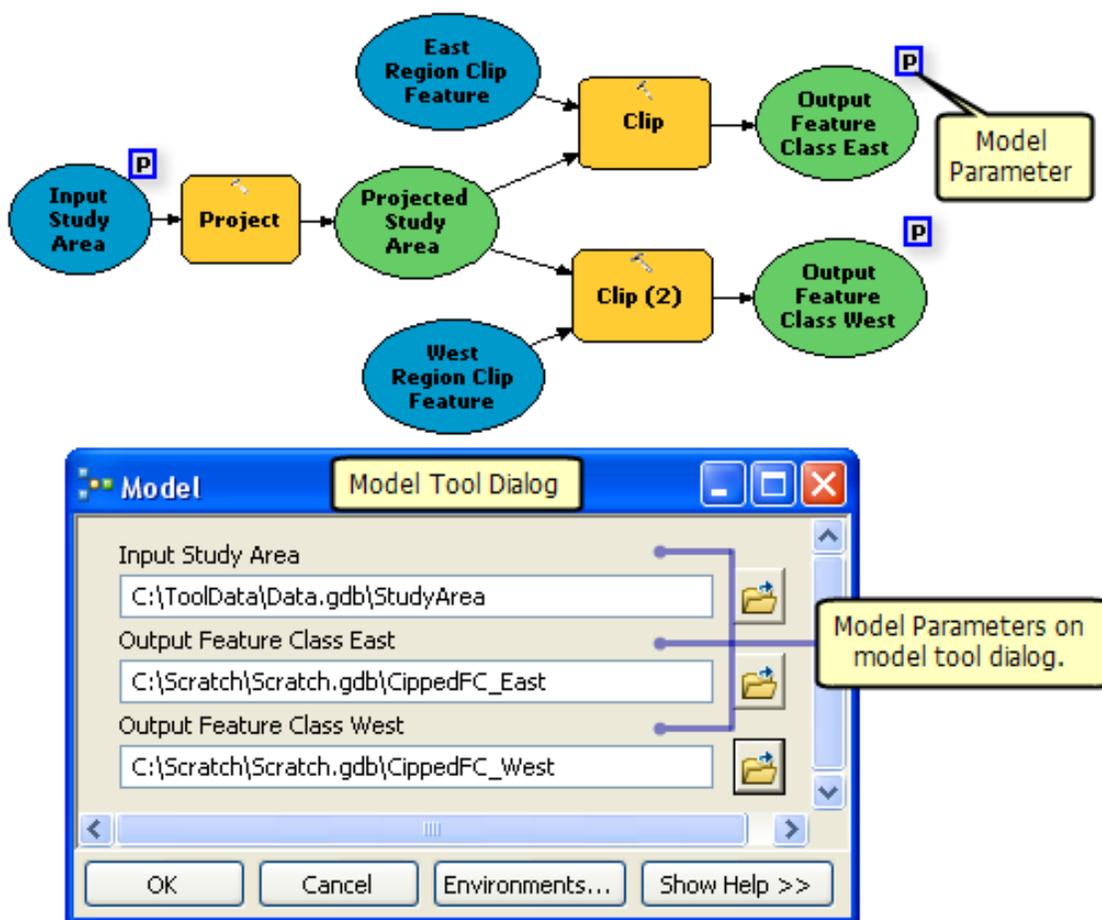
“Modelo que pondera las ubicaciones en relación con otras con base a un criterio dado. Los modelos de adecuación pueden ayudar a encontrar una ubicación favorable para una instalación nueva, una ruta o un hábitat para una especie”.

Los modelos espaciales en esencia son cadenas de proceso que combinados con distintas extensiones o variables de estudio alcanzan altos grados de complejidad, para facilitar la estructuración y ejecución de modelos espaciales de proceso, se cuenta con la aplicación ModelBuilder como un confiable administrador de modelos.

Con definición documental de ArcGIS “Los modelos son flujos de trabajo que encadenan secuencias de herramientas de geoprocésamiento y proporcionan la salida de una herramienta a otra herramienta como entrada” La aplicación ModelBuilder en este orden de ideas facilita la programación visual como una opción de lenguaje para diseñar flujos de trabajo. (ESRI, 2022)

Ilustración 6

Esquema de contexto que representa un Modelo de Procesos Parametrizado.



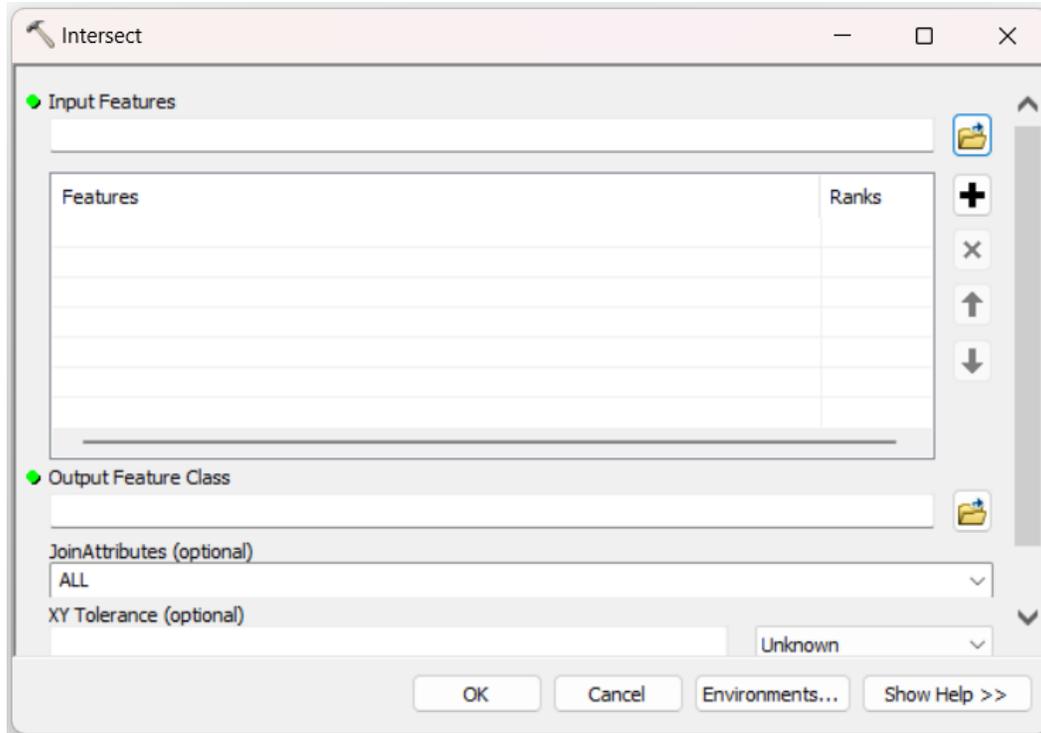
Nota: Ilustración tomada de ArcMap/ModelBuilder/ESRI sitio web. (Recueprado en Enero de 2023)

Con la consecución del Modelo Espacial para efectuar la modelación de adecuación requerida, se inició con la fundamentación técnico-teórica necesaria para definir los geo procesos necesarios para conformar el ModelBuilder que permitió desarrollar la programación visual de la cadena de procesos.

Desde el punto de vista teórico es importante considerar que la herramienta Intersect permite “*calcular una intersección geométrica de dos capas y generar un nuevo Shapefile que conserva los atributos de ambas*”. (GEASIG, 2018) La ruta definida en ArcGIS para insertar la función es: *ArcToolbox < Analysis Tools < Overlay < Intersect*.

Ilustración 7

Herramienta Intersect en la interfaz de ArcGIS Desktop.

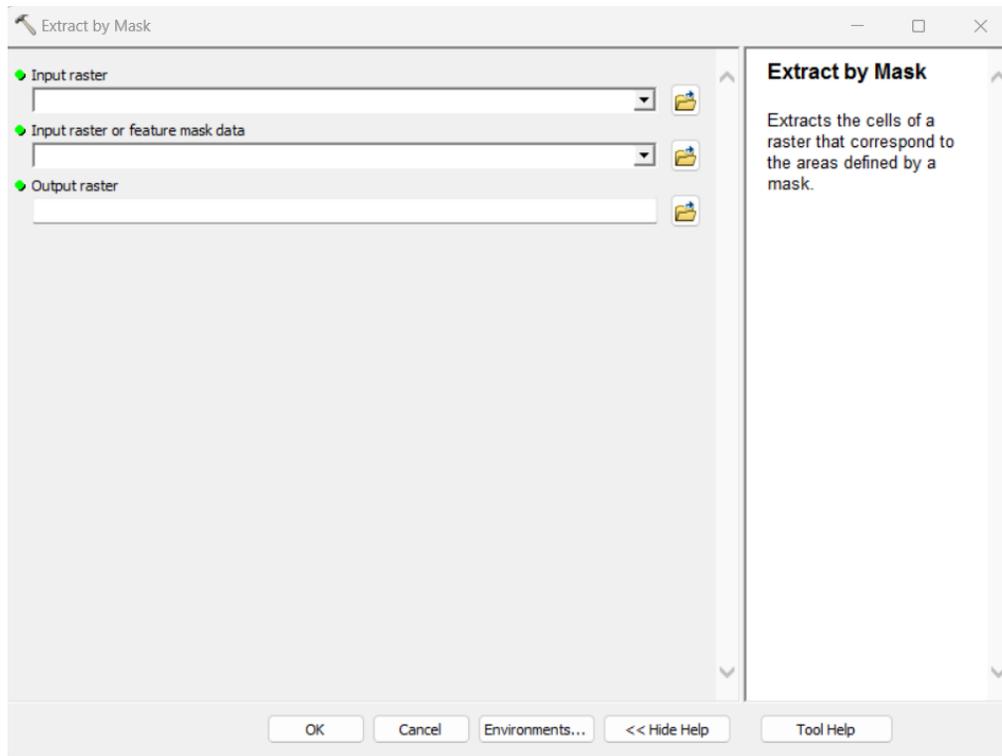


Nota: Captura tomada por los autores del proyecto en el Software ArcGIS. (Recueprado en Enero de 2023)

Considerando que el Modelo Espacial desde su planteamiento contemplaba el uso de un Modelo Digital de Elevación (DEM) se hizo necesario el uso de la herramienta Extract by Mask la cual permite delimitar el DEM en función del polígono del área de estudio. La Ruta ArcGIS para llegar a esta herramienta es la siguiente: *ArcToolbox < Spatial Analyst Tools < Extraction < Extract by Mask*. En la siguiente captura se puede observar la interfaz de la herramienta:

Ilustración 8

Herramienta Extract by Mask en la interfaz de ArcGIS Desktop.



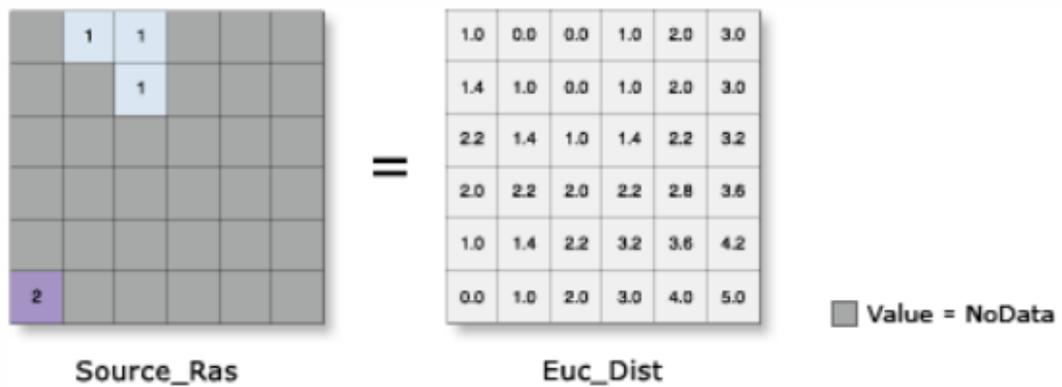
Nota: Captura tomada por los autores del proyecto en el Software ArcGIS. (Recueprado en Enero de 2023)

En concordancia con el Modelo Espacial expuesto en la **Ilustración 21** se requería incluir una función que permitiera la generación de áreas de influencia para cada uno de los criterios, que en relación con el modelo espacial lo necesitaran. La herramienta seleccionada fue la *distancia Euclidiana* que básicamente “describe la relación de cada celda con un origen o un conjunto de orígenes basándose en la distancia de la línea recta”. (ESRI, 2023)

La Ruta ArcGIS para llegar a esta herramienta es la siguiente: *ArcToolbox < Spatial Analyst Tools < Distance < Euclidean Distance*. En resumen, la herramienta calcula, para cada celda, la *distancia Euclidiana* hasta el origen más cercano, (ESRI, 2023) como se muestra en la siguiente ilustración:

Ilustración 9

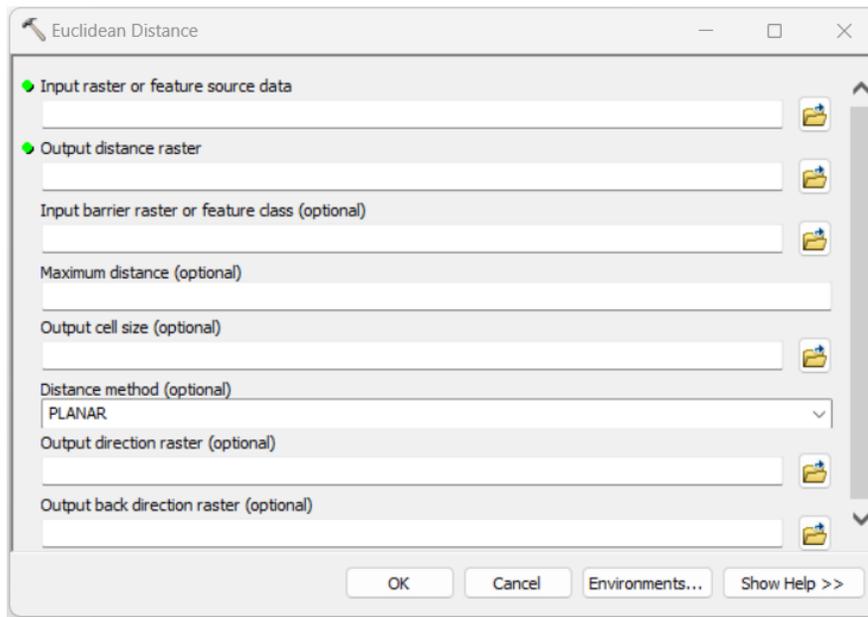
Esquematización básica sobre cómo funciona la herramienta.



Nota: Ilustración tomada de ArcMap/ Distancia Euclidiana/ ESRI sitio web. (Recueprado en Enero de 2023)

Ilustración 10

Herramienta Distancia Euclidiana en la interfaz de ArcGIS Desktop.



Nota: Captura tomada por los autores del proyecto en el Software ArcGIS. (Recueprado en Enero de 2023)

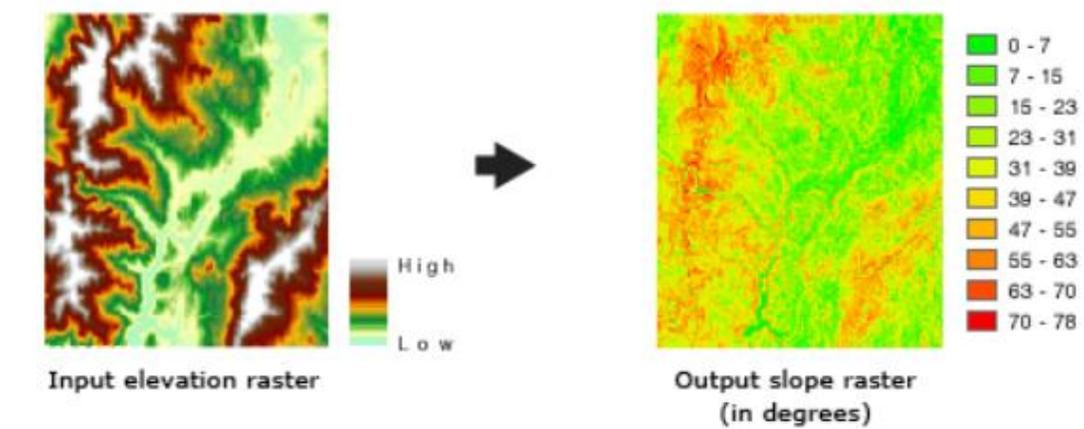
En la **Ilustración 10** se muestra la herramienta *Distancia Euclidiana* en el entorno del software ArcGIS, con cada uno de sus valores de entrada y los métodos de estimación disponibles en la interfaz.

Para analizar el criterio de Topografía se utilizó de manera específica la herramienta *Slope*, con la cual se generó el mapa de pendientes sobre el que se ajustaron los subcriterios de porcentaje de pendiente. La definición concreta la ofrece (ESRI) de la siguiente forma “*Para cada celda, la herramienta Pendiente calcula la tasa máxima de cambio del valor de esa celda a*

sus vecinas”. En la siguiente ilustración se puede observar la representación de un (DEM) convertido a mapa de pendientes:

Ilustración 11

Esquemmatización básica sobre cómo funciona la herramienta Slope.

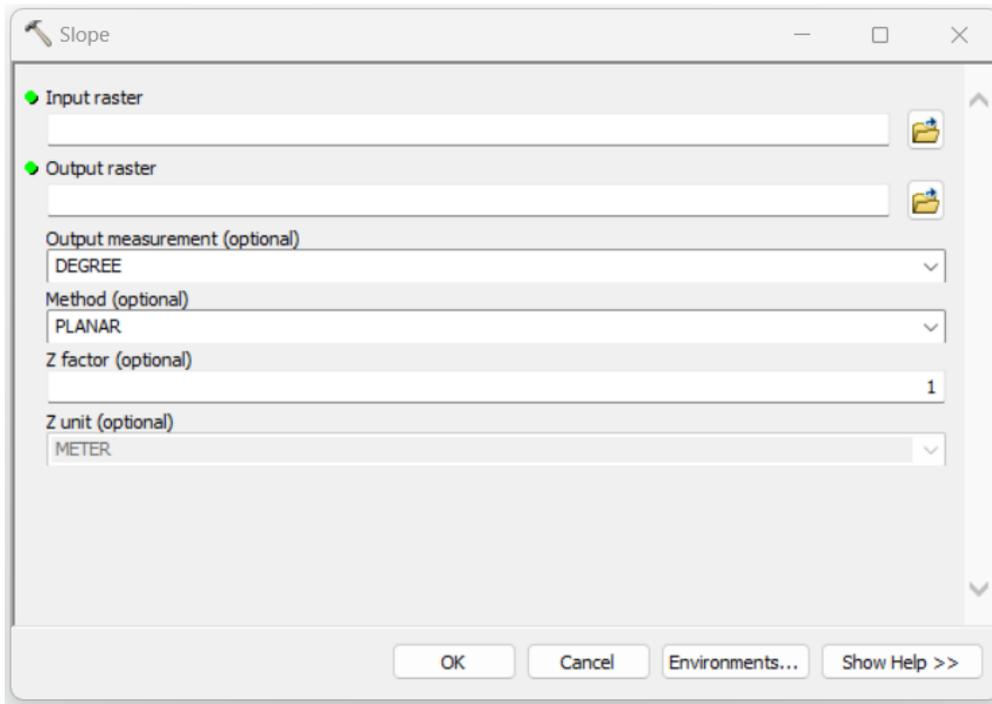


Nota: Ilustración tomada de ArcMap/ Pendiente/ ESRI sitio web. (Recueprado en Enero de 2023)

La Ruta ArcGIS para llegar a esta herramienta es la siguiente: *ArcToolbox < Spatial Analyst Tools < Surface < Slope*. En la siguiente ilustración se observa la interfaz de la herramienta *Slope* en el entorno ArcGis:

Ilustración 12

Herramienta Slope en la interfaz de ArcGIS Desktop.



Nota: Captura tomada por los autores del proyecto en el Software ArcGIS. (Recueprado en Enero de 2023)

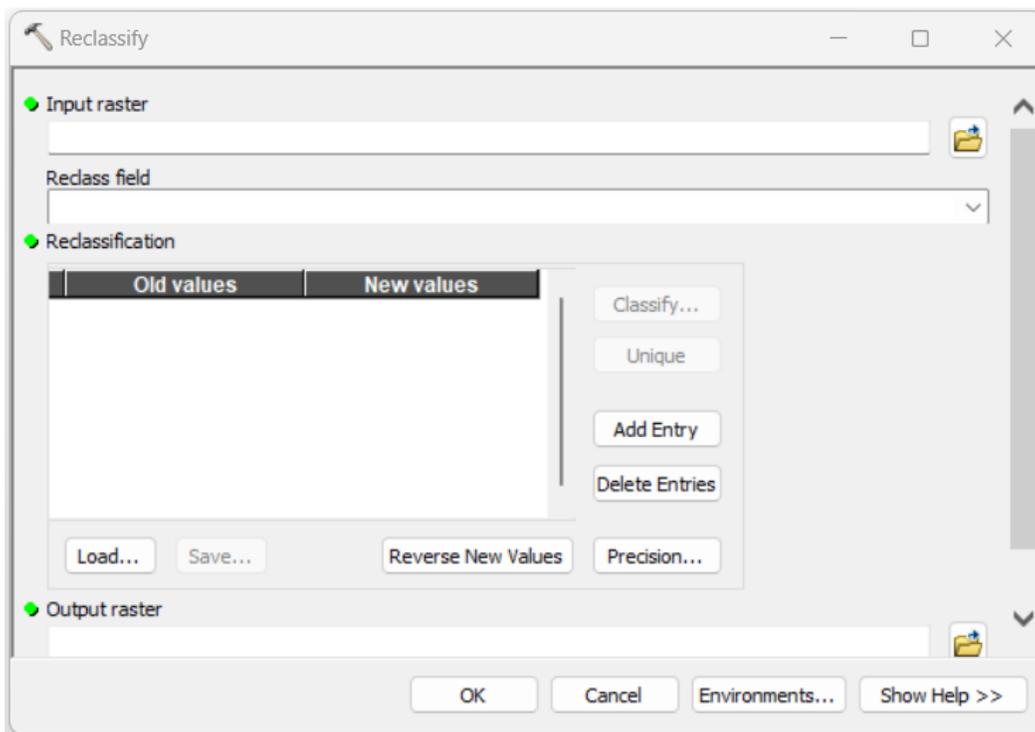
La aplicación de las herramientas *Distancia Euclidiana* para el caso de los criterios de tipo Shapefile y de la Herramienta *Slope* (Pendientes) para el criterio tipo (DEM), permitió obtener un producto tipo Raster para cada uno de los (5) criterios implícitos en el modelo espacial de proceso. (Ver **Ilustración 21**) Sobre estos productos Raster fue necesaria la fijación de los subcriterios técnicos propuestos, por lo que se aplicó la herramienta *Reclassify*, según la documentación de respaldo de ArcMap es “*útil cuando se desea reemplazar los valores en el ráster de entrada por nuevos valores*”, en este caso los valores de entrada de cada uno de los

geos procesos efectuados fueron cambiados a los parámetros estipulados en los subcriterios definidos.

En el (SAD) ArcGIS la ruta para acceder a la herramienta es *ArcToolbox < Spatial Analyst Tools < Reclass < Reclassify*. En la siguiente ilustración se puede apreciar la interfaz de la herramienta en el entorno del Software:

Ilustración 13

Herramienta Reclassify en la interfaz de ArcGIS Desktop.



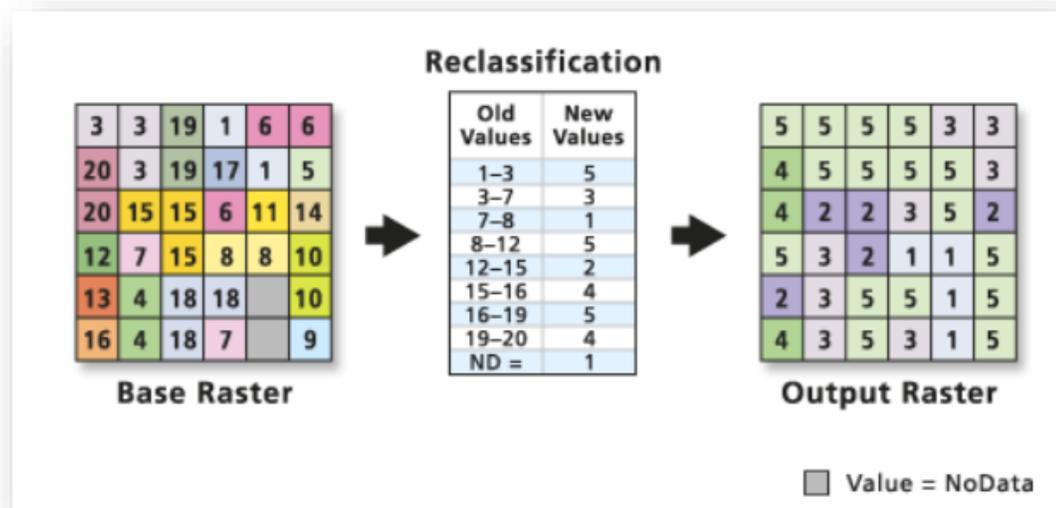
Nota: Captura tomada por los autores del proyecto en el Software ArcGIS. (Recueprado en Enero de 2023)

Para contextualizar al lector sobre el funcionamiento de la herramienta *Reclassify* se consideró adecuado adoptar para el documento el ejemplo grafico de la **Ilustración 14**, que

ofrece la página de ArcMap en línea, en esta se muestra en tres simples pasos como los valores iniciales son cambiados por la parametrización propuesta, considerando a la ponderación asignada.

Ilustración 14

Ejemplo grafico sobre el funcionamiento de la herramienta Reclassify.



Fuente: Ilustración tomada de ArcMap/ Reclassificar por rangos de valores/ ESRI sitio web.

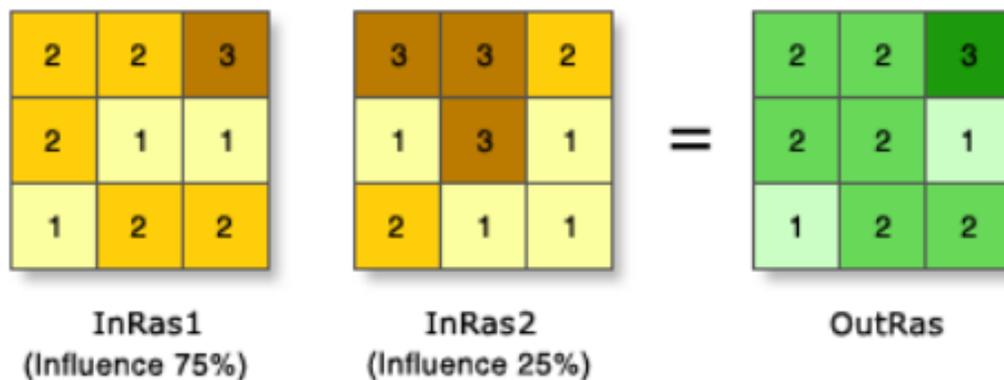
(Recueprado en Enero de 2023)

Una vez ejecutada la herramienta *Reclassify* se generan los *Insumos Procesados*, representados en el Modelo Espacial. (Ver **Ilustración 21**) Para realizar la modelación de adecuación que permitió hallar las áreas óptimas para ubicar nuevos rellenos sanitarios en el Área de estudio, se integraron los Raster Reclassificados en la herramienta *Weighted Overlay* (Superposición Ponderada) que de manera específica “*Superpone varios rásteres con una escala de medición común y pondera cada uno según su importancia*”. (ESRI, 2023)

La ruta definida para acceder a la herramienta es *ArcToolbox < Spatial Analyst Tools < Overlay < Weighted Overlay*. En la **Ilustración 15** se adopta el ejemplo ofrecido por el sitio web de ArcGIS Pro, donde de manera simple se muestra el mecanismo de funcionamiento de la herramienta.

Ilustración 15

Ejemplo gráfico sobre el funcionamiento de la herramienta Weighted Overlay.



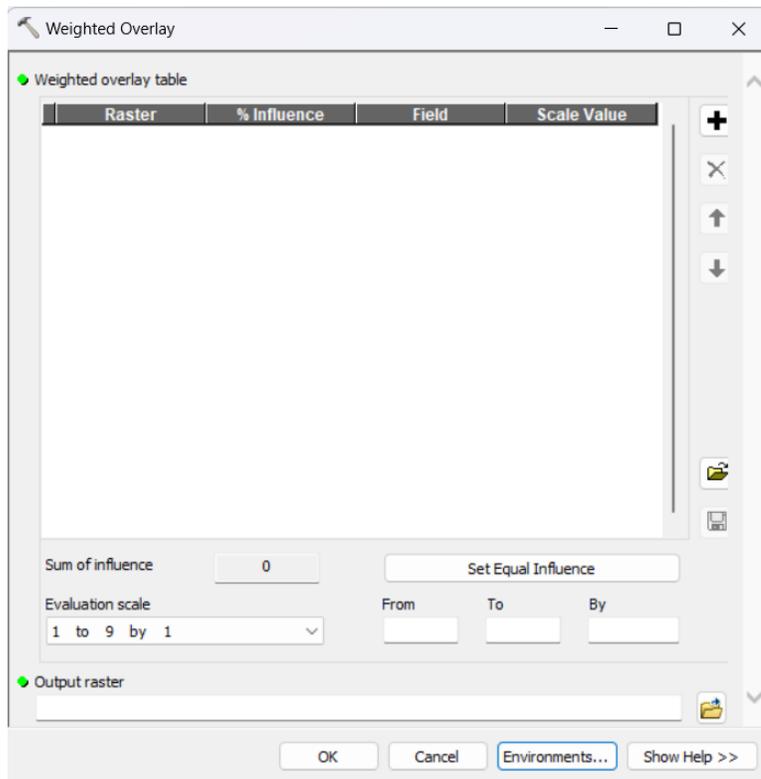
Nota: Ilustración tomada de ArcGIS Pro/ Superposición Ponderada / ESRI sitio web.

(Recueprado en Enero de 2023)

Posteriormente en la **Ilustración 16** se muestra la interfaz de la herramienta Superposición ponderada en el entorno de ArcGIS:

Ilustración 16

Herramienta Weighted Overlay en la interfaz de ArcGIS Desktop.



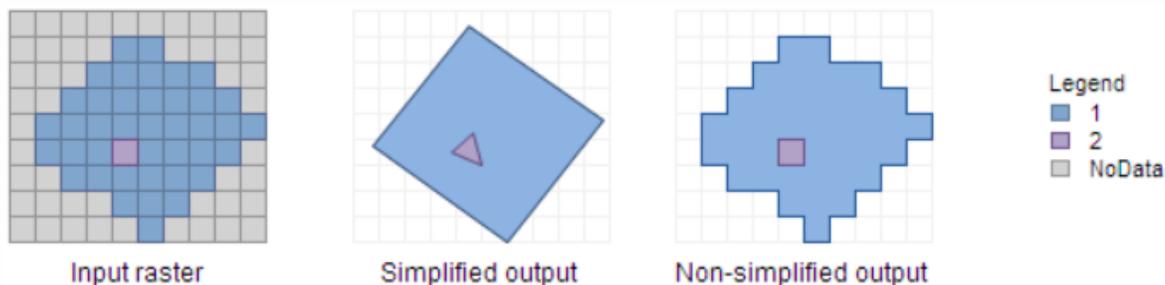
Nota: Captura tomada por los autores del proyecto en el Software ArcGIS. (Recueprado en Enero de 2023)

Como se observa en la **Ilustración 16** la herramienta permite asignar para cada criterio una ponderación que en este caso es la columna (% Influence) y por otra parte en la columna (Scale Value) permite en primer lugar asignar valores de importancia a cada uno de los subcriterios y en segundo lugar definir cuáles de estos subcriterios serán Restrictivos en el Modelo generado.

Cuando la Herramienta de Superposición Ponderada ha generado el producto final con el que se concluye el modelamiento de adecuación, por medio de la ejecución del modelo espacial de proceso, se obtiene un producto tipo Raster, el cual delimita las celdas que cuentan con las mejores ponderaciones. Este documento tipo Raster puede ser depurado y convertido en un formato vectorial tipo Shapefile por medio de la herramienta *Raster to Polygon* que cambia las entidades del archivo de entrada. La ruta en ArcGIS para acceder a esta herramienta es *ArcToolbox < Conversion Tools < Raster to Polygon* y su principio básico de funcionamiento se muestra en la siguiente ilustración:

Ilustración 17

Ejemplo grafico sobre el funcionamiento de la herramienta Raster to Polygon donde se observa la vectorización de las celdas.

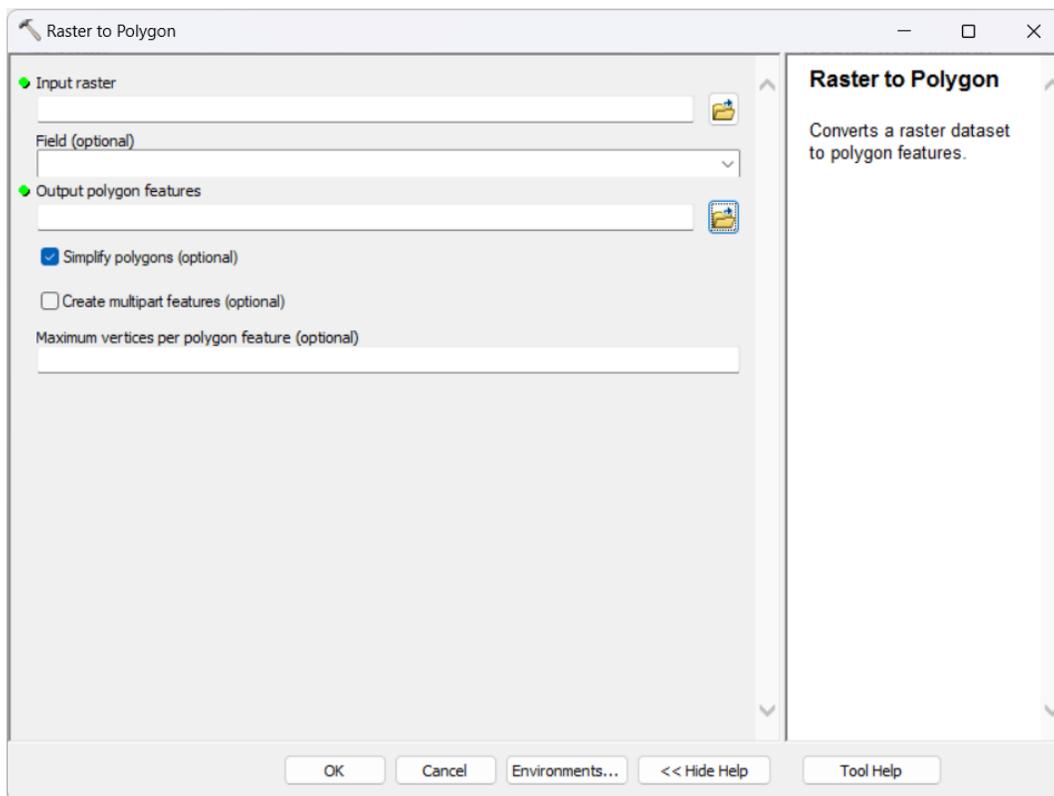


Nota: Ilustración tomada de ArcMap/ De ráster a polígono / ESRI sitio web. (Recueprado en Enero de 2023)

En la **Ilustración 18** se observa la herramienta Raster to Polygon en el Software ArcGIS donde simplemente ingresando un Raster Data Set y definiendo la ruta de guardado se puede obtener un producto vectorial:

Ilustración 18

Herramienta Raster to Polygon en la interfaz de ArcGIS Desktop.



Nota: Captura tomada por los autores del proyecto en el Software ArcGIS. (Recueprado en Enero de 2023)

Con la ejecución total del Modelo Espacial, se generaron los insumos vectoriales necesarios para generar los productos cartográficos requeridos en cumplimiento del objetivo específico número (4). Los Shapefile generados en el modelamiento de adecuación son llevados a la ventana Layout View donde se realizó la composición de mapas por medio de los recursos de edición que esta ventana ofrece para diseñar las salidas graficas que fueron necesarias para cumplir con parte de las metas del presente proyecto.

9. Metodología

En el presente desarrollo metodológico se describe paso a paso como se realizó el planteamiento y ejecución de cada uno de los objetivos específicos para alcanzar e interpretar los resultados obtenidos en cada fase de la propuesta.

9.1 Objetivo 1: Desarrollar una metodología multicriterio que considere los criterios técnicos y legales asociados a la identificación de áreas potenciales para ubicar Rellenos Sanitarios en Colombia.

A. Definir los Criterios y componentes necesarios para estructurar la Metodología propuesta.

La selección de los criterios y componentes necesarios se hizo con base a las 2 normas nacionales vigentes descritas en el marco legal (Decreto 838 de 2005 y Decreto 1784 de 2017). De manera adicional se realizó la adición de varios componentes que garanticen un análisis más completo en cada criterio. Para esta fase se tiene en cuenta la Ley 388 de 1997, pero cabe aclarar que no es determinante para definir los criterios y subcriterios de la metodología Multicriterio.

Los criterios seleccionados en el desarrollo de esta actividad ofrecen una matriz multicriterio que con el desarrollo propuesto son la base para definir técnicamente las áreas potenciales para ubicar nuevos rellenos sanitarios atendiendo a la evaluación general de variables relacionadas a la localización de nuevas áreas.

En el caso particular de los componentes (**Tabla 1**), es importante tener en cuenta que estos conforman el criterio principal al cual pertenecen. En cada uno de los criterios, no se propusieron componentes, considerando que la asignación de estos atiende a las características particulares de cada criterio. En este orden de ideas los componentes de Topografía y Fallas geológicas presentan características que no hacen viable la consideración de componentes.

Tabla 1

Criterios y Componentes propuestos para conformar la Matriz Multicriterio.

CRITERIOS PROPUESTOS EN LA MATRIZ			
Variable	Criterio	Componentes	Justificación
C1	Topografía expresada en un Mapa de Pendientes, desarrollado por medio de un DEM de (12.5 x 12.5)	No presenta	Es un criterio determinante considerando que las pendientes altas reducen la viabilidad de construir y operar la tecnología de relleno sanitario.
C2	Hidrografía con la red de drenajes existentes en la zona de estudio y los diferentes cuerpos lentos identificados. (Escala 1:25000)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Acuíferos 2. Ciénaga 3. Jagüey 4. Laguna 5. Embalse 6. Madre vieja 7. Manglar 8. Pantano 9. Drenaje Sencillo 10. Drenaje Doble 	En el contexto ambiental y con el conocimiento del manejo de lixiviados que debe mantener un Relleno Sanitario, el criterio de Hidrografía es fundamental para evitar impactos ambientales y sociales relevantes.
C3	Fallas Geológicas	No presenta	Con la exclusión de rellenos sanitarios en cercanía a cuerpos de agua y con los criterios de pendiente adecuada se reduce parcialmente la posibilidad que

			estas tecnologías queden expuestas en zonas de alta vulnerabilidad por ocurrencia de eventos naturales, por lo que es pertinente abordar desde este criterio la existencia de fallamientos geológicos en la zona de estudio.
C4	Contexto Socio-Cultural	<ol style="list-style-type: none"> 1. Centro Poblado. 2. Perímetro Urbano. 3. Resguardo Indígena. 4. Consejos Comunitarios Afrocolombianos. 5. Zonas de reserva Campesina. 6. Zonas Arqueológicas. 	Es un componente prioritario ya que está asociado al bienestar social y al aseguramiento de la salud pública.
C5	Áreas Protegidas	Se incluyen todas las contempladas en el Registro Único Nacional de Áreas Protegidas – RUNAP	Es fundamental garantizar una mínima afectación en las áreas de protección e interés ambiental, independientemente de que estas áreas ya cuenten con una protección legal.

Los criterios incluidos en la **Tabla 1** son seleccionados luego de hacer una revisión de los criterios y metodología definidos en los artículos 5 y 6 del Decreto 838 de 2005. Por otra parte, también se tomó en consideración lo definido en el Artículo 2.3.2.3.9 del Decreto 1784 de 2017.

Es importante mencionar que el Criterio de Fallas Geológicas está considerado en el artículo 6 del Decreto 838/2005, definiéndolo como un criterio de prohibición para ubicar Rellenos Sanitarios, se considera que una distancia de prohibición de 60 m es muy reducida para evitar posibles afectaciones en una infraestructura de disposición final, por

lo tanto, se incluyó en esta matriz, como un criterio prioritario para desarrollar una propuesta de evaluación más responsable.

El criterio de áreas protegidas también ingresó como criterio de prohibición en la normatividad relacionada, pero se encuentra que no define a que distancia se debería ubicar un relleno sanitario con relación a los límites de las áreas protegidas, por lo que fue importante hacer propuestas de distanciamiento que limitarán la posible afectación que estas tecnologías podrían efectuar sobre estas zonas de alta importancia ecosistémica.

Se incluyó por otra parte un criterio de Contexto socio-cultural que permite hacer un análisis más amplio de las distintas variables asociadas, en el artículo 5 del Decreto 838 de 2005, simplemente se considera el distanciamiento a perímetros urbanos y en el artículo 6 del mismo Decreto se estipula un distanciamiento de 1000 metros para suelos urbanos. Se encontró que es importante adicionar distancia segura a resguardos indígenas, comunidades afrocolombianas, zonas de interés arqueológico, comunidades campesinas y otras variables asociadas a la reducción de posibles conflictos sociales en la zona de influencia del proyecto.

Para cerrar este apartado es importante mencionar que se evaluó que cada uno de los criterios incluidos en la matriz generada, tuviera acceso libre a la información por medio de los Datos Abiertos de Colombia, considerando que de no ser así se tendría una limitante crítica para cuando se ejecutara el modelo propuesto.

B. Jerarquización de los criterios propuestos.

Esta estructuración se realiza con los principios básicos del Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) considerando que la asignación de pesos o valores es una determinación subjetiva, donde los profesionales en función de las particularidades del área de estudio deben definir qué criterios tienen una mayor prioridad con relación a los otros. La ponderación asignada por otra parte permite que los resultados manejen un enfoque de análisis de situación priorizando en este caso en la protección de los Recursos hídricos, limitación de impactos negativos en el área de influencia para evitar conflictos sociales y propender por la preservación de la salud pública como un derecho fundamental.

Tabla 2

Proceso de Jerarquización de Criterios.

JERARQUIZACIÓN DE CRITERIOS			
VARIABLE	CRITERIO	CONCEPTO	PONDERACIÓN
Cr1	Hidrografía	Se define para esta metodología como el criterio más importante dada su alta importancia en la estabilidad ecosistémica y en el aseguramiento de la Salud Pública.	30
Cr2	Contexto Socio-Cultural	Es el segundo criterio más relevante dado que su protección es clave para evitar conflictos sociales, garantizar la no vulneración de los derechos	25

		fundamentales y por otra parte se limita al máximo la afectación en infraestructuras públicas vitales.	
Cr3	Topografía	Es importante manejar un rango de pendientes optimas que en primer lugar garanticen una construcción y operación segura del Relleno Sanitario, así como limitar al máximo la propagación de flujos contaminantes vía escorrentía.	20
Cr4	Fallas Geológicas	Este criterio es importante para garantizar la protección de las aguas subterráneas, pero se reduce su importancia dado que es descartable en los estudios técnicos de campo y no garantiza la protección de varios aspectos ambientales y sociales como si lo hacen los criterios anteriores.	15
Cr5	Áreas Protegidas	Se ubica en el último escalón de importancia dado que estas zonas ya cuentan con una protección legal específica que impide el desarrollo de cualquier actividad de esta característica. Pero aun así es importante para descartar importantes áreas cercanas a estas zonas en protección.	10
TOTAL			100

La ponderación asignada permite a los profesionales manejar un enfoque de análisis, esta asignación de ponderados y la jerarquización otorga la posibilidad de establecer qué criterios tendrán prioridad al momento de definir espacialmente las áreas

óptimas generadas por medio de la modelación de adecuación. Los profesionales en esta propuesta tendrán la posibilidad de definir jerarquías y ponderados diferenciales de forma que la propuesta se puede ajustar al contexto particular de diferentes áreas de estudio. En este caso en la **Tabla 2** se realizó una propuesta ajustada a las particularidades de la jurisdicción de Cardique.

La asignación de criterios propuestos en la **Tabla 1** junto con la ponderación ajustada en la **Tabla 2** permiten que los planificadores del territorio cuenten con un análisis preliminar de las variables transversales a la generación de impactos negativos ante una posible gestión inadecuada del Relleno Sanitario, por lo que las áreas sugeridas en el desarrollo metodológico podrán ser candidatas a iniciar el proceso de “*requisitos mínimos*” estipulado en el artículo 2.3.2.3.11 del Decreto 1784 de 2017.

C. Asignación de subcriterios técnicos y normativos para cada uno de los criterios propuestos.

Los subcriterios definidos fueron asignados con base a los lineamientos del artículo 6 del Decreto 838 de 2005, pero se trabajó en ofrecer una propuesta más responsable en cuanto al distanciamiento entre las variables de interés y las zonas viables para definir nuevas áreas para localizar rellenos sanitarios. Los subcriterios dispuestos en esta estructuración metodológica de igual forma conservan las directrices básicas que el marco legal dispone.

Tabla 3

Metodología para asignar y jerarquizar los subcriterios.

ASIGNACIÓN Y JERARQUIZACIÓN DE LOS SUBCRITERIOS REQUERIDOS			
VARIABLE	CRITERIO	SUBCRITERIOS	CONCEPTO
Cr1	Hidrografía	1. ≤ 100 m	Son las distancias criterio definidas para garantizar afectaciones mínimas al recurso hídrico.
		2. ≤ 500 m	
Cr1	Hidrografía	3. ≤ 1000 m	Una distancia menor o igual a 100 metros no es recomendable para asegurar la reducción del riesgo de afectación, por otra parte, una distancia mayor o igual a 2000 es la más recomendable.
		4. ≤ 1500 m	
		5. ≥ 2000 m	
Cr2	Contexto Socio-Cultural	1. < 2000 m	Se hace una propuesta más exigente a la solicitada en las disposiciones legales del Decreto 838/2005, en lo que tiene que ver con distancia mínima.
		2. ≤ 4000 m	
		3. ≤ 6000 m	
		4. ≤ 8000 m	
		5. > 8000 m	
Cr2	Contexto Socio-Cultural	1. < 2000 m	Es importante tener en cuenta que el mayor valor (5) se asigna a la variable que está a la distancia más segura del criterio evaluado, pero de otra forma
		2. ≤ 4000 m	
		3. ≤ 6000 m	
		4. ≤ 8000 m	
		5. > 8000 m	

			<p>también debe mantener una distancia cercana al lugar donde se originan los residuos a disponer de forma segura.</p> <p>Esta asignación también se propone con base a los lineamientos legales del artículo 5 del Decreto 838/2005.</p>
Cr3	Topografía	<ol style="list-style-type: none"> 1. $\geq 25\%$ 2. 12.1% - 25% 3. 7.1% - 12% 4. 0 % - 3% 5. 3.1% - 7% 	<p>Las pendientes menos pronunciadas favorecen el control de lixiviados y permiten una operación más sencilla del relleno sanitario.</p> <p>El rango de pendientes entre (3.1% - 7%) se seleccionó como el más idóneo por ser una pendiente moderada que favorece los drenajes por gravedad y evita los encharcamientos del sitio de disposición.</p> <p>Se adaptó de los parámetros definidos en el Decreto 838 de 2005.</p>
Cr4	Fallas Geológicas	<ol style="list-style-type: none"> 1. ≤ 100 m 2. ≤ 200 m 3. ≤ 300 m 	<p>El Decreto 838 de 2005 sugiere una distancia de 60 m</p>

		4. ≤ 400 m 5. >400 m	para fallas geológicas, pero se propone una distancia segura de 500 m, para asegurar una disminución más alta del Riesgo de daños severos en el sitio de disposición por eventos geológicos.
Cr5	Áreas Protegidas	1. ≤ 2000 m 2. ≤ 3000 m 3. ≤ 4000 m 4. ≤ 5000 m 5. >5000 m	En el artículo 6 del Decreto 838 de 2005 se restringe la aplicación de esta tecnología de Relleno Sanitario en Áreas de Protección, pero no se definen las distancias mínimas para ubicar estas tecnologías en las zonas de influencia de estos ecosistemas por lo que se hace una propuesta para reducir la posibilidad de afectar estas zonas de alta importancia ecosistémica. Se asignan subcriterios de distancia progresivos donde a mayor distancia mayor viabilidad para sugerir una nueva área de disposición final.

Importante tener en cuenta que en los subcriterios también se maneja un modo de ponderación donde el subcriterio ubicado en el inciso (1) es el de menor valor en la matriz, por lo

que espacialmente significa una muy baja viabilidad para delimitar áreas para nuevos rellenos sanitarios. En contra parte el inciso (5) es el mayor valor que puede obtener un subcriterio en la matriz y de manera geográfica representa las zonas con mayor potencial para localizar áreas viables para ubicar nuevos Rellenos Sanitarios.

D. Determinación de subcriterios que deben tener carácter de prohibición

Para que el modelo propuesto desarrolle Franjas de Protección en torno a algunos criterios fijados en la Metodología estructurada fue necesario otorgar la connotación de subcriterios restrictivos cuando estos por sus particularidades lo requerían.

En esta aplicación se estableció que los subcriterios candidatos a definirse como de prohibición o restricción debían ser los de valor (1) dado que son los que representan las condiciones técnicas menos favorables para obtener áreas potenciales para ubicar rellenos sanitarios en Colombia.

Tabla 4

Subcriterios Restrictivos en la Metodología Multicriterio Propuesta.

SUBCRITERIOS QUE DEBEN TENER CARÁCTER DE PROHIBICIÓN		
Criterio	Subcriterio	Concepto
Hidrografía	1. ≤ 100 m	Restrictivo: Debe ser considerado como subcriterio de prohibición dentro del modelo espacial, dado que no es recomendable tener fuentes de generación de lixiviados cerca de cuerpos hídricos lentos o loticos.

Contexto Socio-Cultural	$1. \leq 2000 \text{ m}$	Restictivo: Se aplico como zona de restricción a las distancias iguales o menores a 2000 metros considerando que debe existir franjas de protección frente a los centros urbanos o poblados.
Topografía	$1. \geq 25\%$	Restictivo: Se fija como restrictivo para todas la pendientes mayores o iguales al 25%.
Fallas Geológicas	$1. \leq 100 \text{ m}$	Restictivo: Se restringe la viabilidad en cualquier área ubicada a menos de 100 metros de una falla geológica. Esto se considera con base a las afectaciones que podría generar un evento de esta característica en el lecho del Relleno Sanitario.
Áreas Protegidas	$1. \leq 2000 \text{ m}$	Restictivo: Se aplica restricción en todas las áreas ubicadas a menos de 2000 metros del límite estipulado para las áreas protegidas declaradas.

Terminada la consolidación de la Metodología Multicriterio por medio del desarrollo de cada una de las actividades que permitieron alcanzar el cumplimiento del objetivo específico número (1), se procedió a unificar cada uno de los componentes obtenidos para de esta forma obtener la propuesta final de Metodología Multicriterio con articulación de criterios técnicos y legales para identificar áreas potenciales para ubicar Rellenos Sanitarios en Colombia. El producto obtenido es presentado en la sección de Resultados, Tabla 7.

9.2 Objetivo 2: Integrar la metodología multicriterio desarrollada con las herramientas SIG disponibles de forma que se logre un modelo espacial.

Con la Metodología Multicriterio estructurada en el desarrollo del objetivo específico número (1) se trabajó en la integración de esta con las herramientas (SIG) disponibles de forma que se lograra un modelo espacial adecuado para correlacionar los criterios técnicos que tras la ejecución del modelo ofrecieran los resultados esperados desde la planificación del proyecto.

Para cumplir con el propósito del presente objetivo específico se desarrollaron las siguientes actividades:

A. Seleccionar un Sistema de Apoyo para la Toma de Decisiones (SAD)

Para esta actividad se consideró como viable la utilización del Software ArcGIS Desktop en su versión 10.8 considerando que sigue siendo un paquete de Sistemas de Información Geográfica bastante confiable dada la amplia experiencia de *Environmental Systems Research Institute (ESRI)*.

B. Definir el tipo de Modelo Espacial que se debe estructurar

Considerando las características del problema espacial a resolver se determinó que el Modelo requerido debe permitir una simulación básica de procesos en el paisaje, dado que se analizan en el modelo la correlación entre variables de distinta característica.

Dentro de los recursos que ofrece el paquete ArcToolBox del Software ArcGIS se encuentra que es posible realizar Modelos de Proceso por medio de las herramientas del Spatial Analyst Tools para efectuar Modelamientos de Adecuación los cuales son el Tipo de Modelado que permite determinar ubicaciones optimas.

C. Definir la Estructura del Modelo Espacial de Procesos

Tabla 5

Estructura del Modelo Espacial de Procesos.

ESTRUCTURA DEL MODELO ESPACIAL							
ÁREA DE ESTUDIO	CRITERIOS (Insumos Cartográficos)	PROCESOS		CRITERIOS PROCESADOS (Productos a Correlacionar)	CORRELACION DE CRITERIOS	EJECUTAR EL MODELO ESPACIAL	
		PRIMARIOS	SECUNDARIOS				
		Cr1	PrP1	PrS1	CP1	APLICAR JERARQUIZACIÓN DE CRITERIOS	DEFINIR SU CRITERIOS RESTRICTIVOS O DE PROHIBICIÓN
		Cr2	PrP2	PrS2	CP2		
		Cr3	PrP3	PrS3	CP3		
		Cr4	PrP4	PrS4	CP4		
	Cr5	PrP5	PrS5	CP5			
PRODUCTO CARTOGRAFICO FINAL OBTENIDO POR MEDIO DE LA EJECUCIÓN DEL MODELO ESPACIAL DE PROCESOS (PCF)							

Nota: Considerar las siguientes siglas:

Cr(n): Criterios definidos y jerarquizados en el Objetivo Especifico número (1).

PrP(n): Procesos Primarios realizados a los Criterios Ingresados en el Modelo.

PrS(n): Procesos Secundarios efectuados sobre los Productos generados en el proceso primario.

CP(n): Criterios Procesados que generan los productos a correlacionar en la fase final del Modelo Espacial.

PCF: Es el Producto Cartográfico Final obtenido luego de desarrollar el Modelo Espacial.

Para esta actividad específica se postuló una estructura simple, la cual permite conocer los pilares fundamentales para componer y ejecutar el modelo espacial requerido, se debe considerar que en esta fase aún no se han estipulado las características de cada uno de los productos tanto de entrada, proceso y salida. Con relación a la afirmación anterior se definieron las particularidades en la siguiente actividad del desarrollo metodológico.

D. Precisar las características básicas de los Productos de Entrada, Proceso y Salida.

Tabla 6

Características Básicas de los productos de Entrada, Proceso y Salida del Modelo Espacial.

CARASTERISTICAS BASICAS DE LOS PRODUCTOS			
CRITERIOS	ENTRADA	PROCESO	SALIDAS
Cr1	Shapefile Hidrografía. Tipo Polilínea y Tipo Polígono.	Área de Influencia Formato Raster	PRODUCTO CARTOGRAFICO FINAL FORMATO RASTER PRODUCTO CARTOGRAFICO FINAL FORMATO SHAPEFILE
Cr2	Shapefile Contexto Socio – Cultural. Tipo Polígono.	Área de Influencia Formato Raster	
Cr3	Modelo Digital de Elevación (12.5 x 12.5) ajustado al área de estudio.	Mapa de Pendientes. Formato Raster.	

Cr4	Shapefile Fallas Geológicas. Tipo Polilínea.	Área de Influencia Formato Raster
Cr5	Shapefile áreas protegidas. Tipo Polígono.	Área de Influencia Formato Raster

Concluyendo con la especificación de las características requeridas para cada uno de los Productos Cartográficos involucrados en el Modelo Espacial se procedió a unificar la estructura propuesta en un modelo espacial general, que se puede encontrar en la sección de resultados, donde se realizó la validación del Modelo.

9.3 Objetivo 3: Validar el modelo espacial por medio de un estudio de caso de forma que esta sea completamente replicable en cualquier contexto.

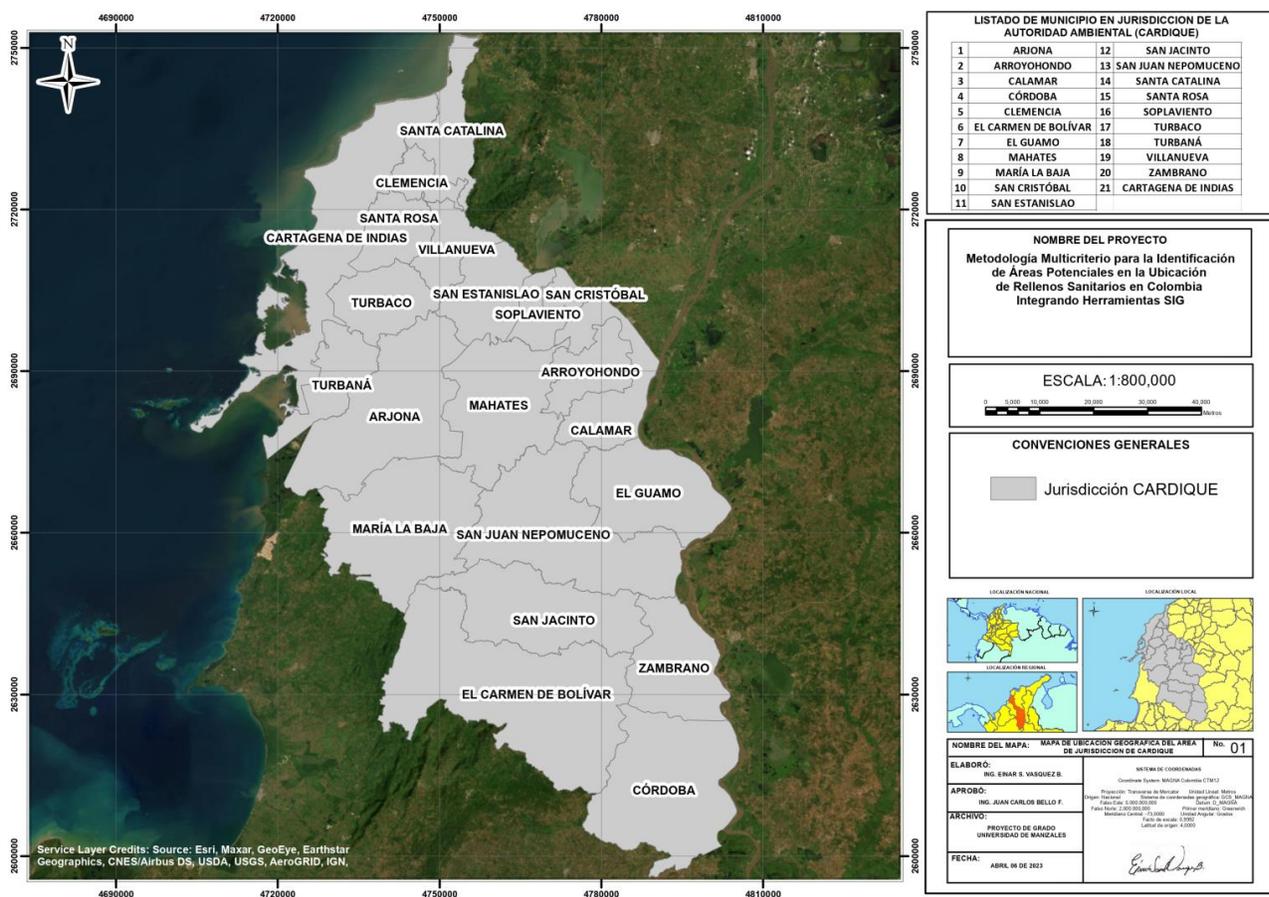
Con la descripción de las herramientas (SIG) en el desarrollo del marco teórico y la definición del Modelo Espacial fue necesario ejecutar el Modelo de Proceso diseñado para proceder con la validación del mismo, por lo que se seleccionó un área para desarrollar el estudio de caso. Para los fines del Objetivo específico (3) se decidió trabajar sobre la jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Canal del Dique (CARDIQUE), la cual está ubicada en el extremo norte del Departamento Colombiano de Bolívar.

El área de estudio según el Acuerdo de Asamblea (CARDIQUE) No. 1 del año 2017, se compone en su jurisdicción por el Distrito Turístico y Cultural de Cartagena de Indias y por los municipios Bolivarenses de Arjona, Arroyo Hondo, Calamar, Clemencia, Córdoba, El

Carmen de Bolívar, El Guamo, Mahates, Marialabaja, San Cristóbal, San Estanislao de Kostka, San Jacinto, San Juan de Nepomuceno, Santa Catalina, Santa Rosa de Lima, Soplaviento, Turbaco, Turbana, Villanueva y Zambrano. La delimitación oficial de CARDIQUE se muestra en la siguiente ilustración:

Ilustración 19

Jurisdicción de CARDIQUE en la zona Norte del Departamento de Bolívar.



Nota: Plancha Cartográfica del área de estudio, creada por los autores.

Para la validación del Modelo Espacial se realizó la búsqueda de una zona del país donde el relleno sanitario de la zona tuviera una vida útil limitada de forma que existiera una necesidad

inminente de identificar nuevas zonas viables para realizar la disposición final de los residuos sólidos generados.

El Relleno Sanitario de Cartagena denominado *Parque Ambiental Bioger*, según el Informe Nacional de Disposición Final de Residuos Sólidos 2021 cuenta apenas con una vida útil de 2.5 años lo que es un panorama complejo para los prestadores del servicio público de aseo, por otra parte según el mismo informe, el *Relleno Sanitario La Paz* en Turbaná tiene una vida útil de 10.5 años, que a pesar de ser más prolongada no disminuye la necesidad de buscar otras áreas optimas, en vista de que este último Relleno, es el sitio de disposición de 12 municipios distintos a los 11 que disponen sus residuos en el Parque Bioger de Cartagena de Indias. (Superservicios, 2021)

Con la definición del área de estudio se procede a describir en la **Ilustración 20** cada uno de los seis (6) pasos en que el Modelo Espacial fue validado para el estudio de caso en la jurisdicción de CARDIQUE en el Departamento de Bolívar. Los Resultados obtenidos en la validación del Modelo son analizados y presentados en el apartado de resultados del presente documento.

9.4 Objetivo 4: Ofrecer por medio de la ejecución del modelo productos cartográficos que permitan la toma de decisiones.

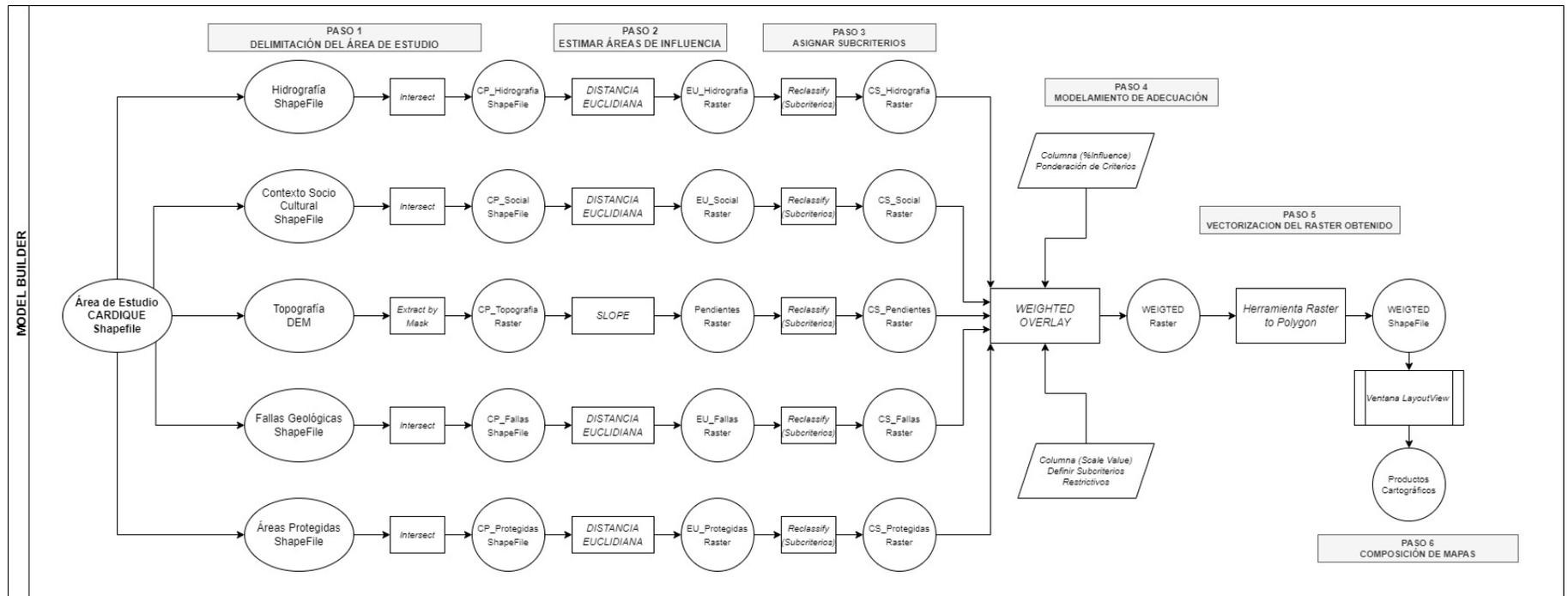
Con las capas obtenidas por medio de la ejecución del modelo espacial se elaboraron los productos Cartográficos necesarios para dar cumplimiento al cuarto objetivo específico, los Shape File Obtenidos fueron llevados a la ventana Layout View la cual ofrece los recursos necesarios para hacer la composición de mapas requerida para ofrecer los productos

cartográficos necesarios como para permitir la toma de decisiones en el territorio estudiado.

(Ver Ilustración 20)

Ilustración 20

Metodología desarrollada para la realización de los objetivos específicos tres y cuatro.



Nota: Metodología ejecutada para la Validación del Modelo Espacial y la obtención de los productos Cartográficos. (Bello & Vásquez)

10. Resultados y discusión

Los resultados presentados en este apartado son el producto del desarrollo de cada uno de los objetivos específicos planteados para lograr el cumplimiento del Objetivo General del proyecto. Se hace una entrega del producto generando en cada uno de los desarrollos metodológicos descritos y de manera conjunta se efectúa un análisis sobre los resultados obtenidos de manera secuencial.

Objetivo 1: Desarrollar una metodología multicriterio que considere los criterios técnicos y legales asociados a la identificación de áreas potenciales para ubicar Rellenos Sanitarios en Colombia.

La metodología multicriterio propuesta en la Tabla 7 se constituyó como una adaptación de la metodología estipulada en el marco legal colombiano, en esta adaptación se realizó la composición de una matriz que considero los criterios técnicos y legales aptos para ser integrados en un modelo espacial, cimentado en la aplicación de herramientas (SIG).

En el desarrollo de la metodología propuesta se encontró que los criterios incluidos en una matriz de este tipo y la jerarquización de criterios asignada a cada uno permiten manejar un enfoque de análisis, para este caso en particular se manejaron de forma prioritaria dos criterios considerados fundamentales para delimitar áreas potenciales para ubicar rellenos sanitarios.

En primer lugar, se dio una ponderación de 30% en criterios y componentes asociados a hidrografía, este criterio permite que el posible relleno sanitario genere impactos negativos mínimos sobre el recurso hídrico en las diversas formas que se presenta en el contexto colombiano, se entiende que este criterio es fundamental para proteger la estabilidad ecosistémica, el suministro de agua para actividades productivas y el abastecimiento de aguas para consumo humano que relaciona el criterio directamente a la protección de la salud pública.

En segundo lugar, el criterio de contexto Socio – Cultural es muy relevante junto con los componentes que lo conforman, entendiendo que la construcción de un relleno sanitario nuevo genera un malestar social importante en su zona de influencia, por lo que en la metodología propuesta se consideran distintos componentes (Ver Tabla 7). Los componentes asociados a este criterio buscan que los nuevos proyectos tengan una menor probabilidad de generar conflictos sociales. Este criterio recibe una ponderación del 25% debido a su relación con el bienestar social, reducción de posibles conflictos y de manera transversal con el criterio de hidrografía garantiza la protección de la salud pública.

Los criterios de topografía (20%) y fallas geológicas (15%) se asocian de manera más cercana con las condiciones de seguridad y operación requeridas para contar con un posible relleno sanitario bien gestionado, la topografía en un rango adecuado favorece el drenaje de lixiviados, así como también permite una labor segura en los frentes de trabajo que mantenga el relleno sanitario a lo largo de su vida útil.

Por otra parte, las fallas geológicas deben ser consideradas para garantizar que la tecnología de relleno sanitario no sea construida sobre estas zonas inestables donde hay una alta probabilidad de daños sobre el lecho del Relleno Sanitario condición que representaría un alto riesgo de contaminación para los acuíferos de la zona.

El criterio de zonas protegidas se hizo necesario dado que son áreas con alta importancia ecosistémica y aunque cuentan con exclusión legal no han sido definidas unas propuestas sobre que franjas de protección se debería manejar entre los límites del área en protección y el inicio del vertedero.

Sobre la estructuración de la metodología multicriterio es importante inferir que la selección de criterios y su jerarquización como lo permite la metodología (AHP) son labores subjetivas que corresponden al criterio técnico de los formuladores de la metodología, eso permite que cada grupo técnico pueda replicar la metodología para proponer enfoque de análisis ajustados a la necesidad o contexto particular de cada zona de estudio.

Es importante resaltar que la adaptación de subcriterios es un componente de estructuración objetivo donde se toman como referencia las distintas disposiciones legales y se deja la posibilidad de proponer subcriterios más estrictos, con el fin de ofrecer cada vez mejores resultados en procura de contar a futuro con lugares de disposición final más seguros frente a su entorno más próximo.

En la estructuración también se evidencia que los criterios propuestos para componer la metodología deben ser insumos cartográficos disponibles dado que el acceso a la información es fundamental para alcanzar los fines del modelo. Para terminar, la metodología multicriterio propuesta es un insumo con injerencia en la toma de decisiones, pero la determinación definitiva sobre donde ubicar un nuevo relleno sanitario debe estar soportada con los estudios preliminares de campo, estipulados en el Decreto 1784 de 2017 citado en el Referente Legal del presente documento.

Objetivo específico (1): Desarrollar una metodología multicriterio que considere los criterios técnicos y legales asociados a la identificación de áreas potenciales para ubicar Rellenos Sanitarios en Colombia.

Tabla 7

Metodología Multicriterio Propuesta .

METODOLOGÍA MULTICRITERIO PROPUESTA					
VARIABLE	VALOR	CRITERIO	COMPONENTES	SUBCRITERIOS PONDERADOS	RESTRICCIÓN
Cr1	30	Hydrografía	1. Acuíferos 2. Ciénaga 3. Jagüey 4. Laguna 5. Embalse 6. Madre vieja 7. Manglar 8. Pantano 9. Drenaje Sencillo 10. Drenaje Doble	1. ≤ 100 m 2. ≤ 500 m 3. ≤ 1000 m 4. ≤ 1500 m 5. ≥ 2000 m	1. ≤ 100 m
Cr2	25	Contexto Socio-Cultural	1. Centro Poblado. 2. Perímetro Urbano. 3. Resguardo Indígena. 4. Consejos Comunitarios Afrocolombianos. 5. Zonas de reserva Campesina. 6. Zonas Arqueológicas.	1. < 2000 m 2. ≤ 4000 m 3. ≤ 6000 m 4. ≤ 8000 m 5. > 8000 m	1. ≤ 2000 m
Cr3	20	Topografía	No presenta	1. $\geq 25\%$ 2. 12.1% - 25% 3. 7.1% - 12% 4. 0% - 3%	1. $\geq 25\%$

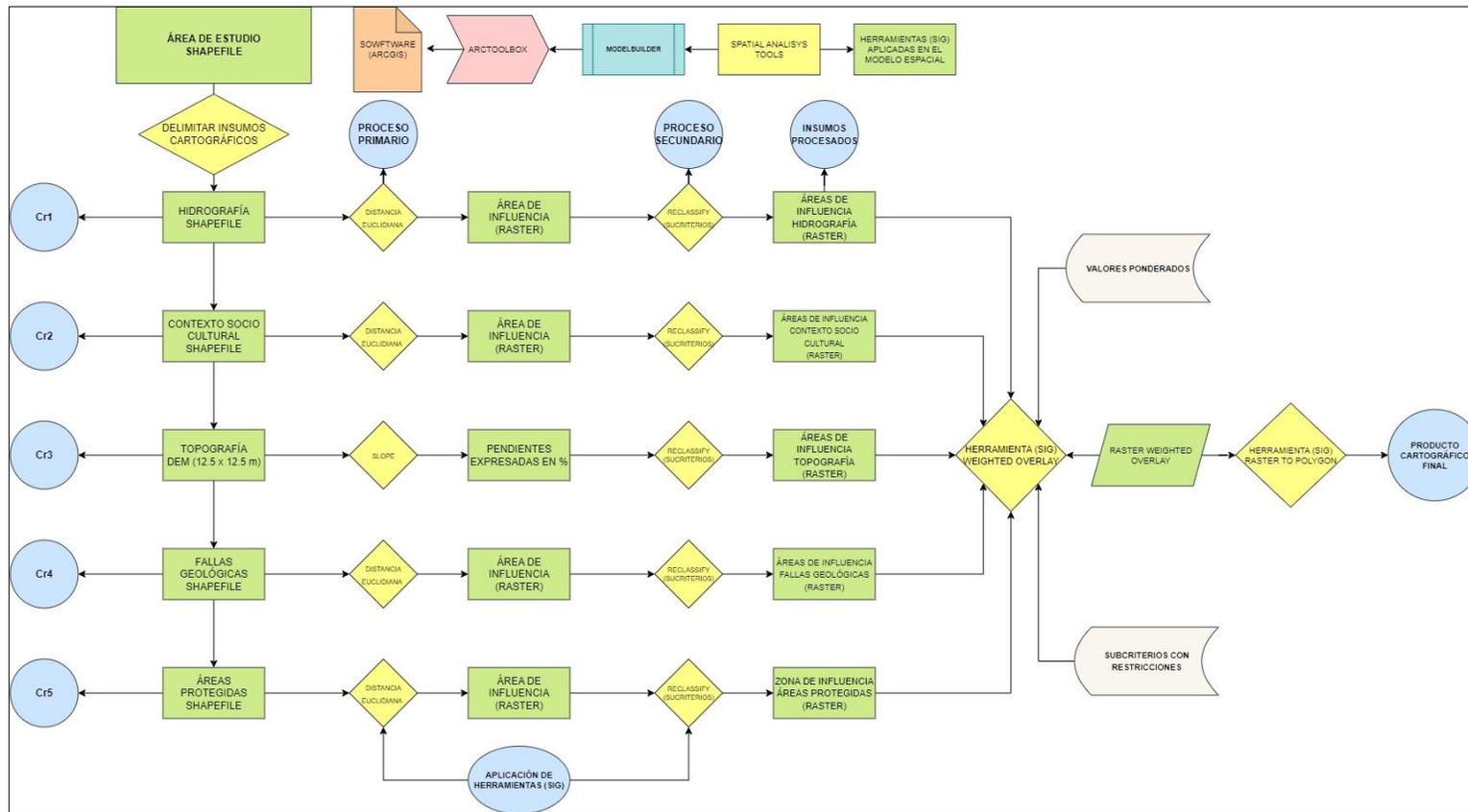
5. 3.1% - 7%					
Cr4	15	Fallas Geológicas	No presenta	1. ≤ 100 m 2. ≤ 200 m 3. ≤ 300 m 4. ≤ 400 m 5. >400 m	1. ≤ 100 m
Cr5	10	Áreas Protegidas	Se incluyen todas las contempladas en el Registro Único Nacional de Áreas Protegidas – RUNAP	1. ≤ 2000 m 2. ≤ 3000 m 3. ≤ 4000 m 4. ≤ 5000 m 5. >5000 m	1. ≤ 2000 m

Nota: Desarrollo Metodológico Propuesto por los autores del Proyecto (Bello & Vásquez), 2023.

Objetivo específico (2): Integrar la metodología multicriterio desarrollada con las herramientas SIG disponibles de forma que se logre un modelo espacial.

Ilustración 21

Modelo Espacial de Proceso Estructurado.



Nota: Modelo Espacial Propuesto por los autores del proyecto (Bello & Vásquez), 20

2. Integrar la metodología multicriterio desarrollada con las herramientas SIG disponibles de forma que se logre un modelo espacial.

Para la integración del modelo fue importante el desarrollo metodológico en cada una de sus (4) fases, la selección del (SAD) implicó que los autores del proyecto analizaran los recursos disponibles, las habilidades y conocimientos frente a cada una de las opciones de software disponibles, como también la oferta de recursos (SIG) que el software seleccionado ofreció para los resultados del proyecto. Es esta fase es importante resaltar que los planificadores deben decidir si para ellos es posible el trabajo con Software licenciado o si el camino es por medio del código libre que también puede ofrecer resultados cercanos.

La segunda fase es importante dado que una vez definido el (SAD) se debe revisar entre la oferta de herramientas (SIG) la cadena de procesos que más se adapte a las necesidades de geoprocésamiento, en este caso es necesario que los planificadores tengan conocimientos importantes en el manejo de herramientas de análisis espacial, de forma que se pueda integrar de forma correcta la Metodología Multicriterio con las herramientas (SIG) disponibles. Esta fase es fundamental para obtener resultados positivos.

En las fases tres y cuatro de este objetivo los planificadores deben definir el diseño general del modelo espacial por medio del cual se obtienen los resultados esperados, es fundamental que se trabaje como se ha mostrado a lo largo del documento para obtener productos clave como el Modelo Espacial de Proceso de la **Ilustración 21** y el paso a paso

descrito en la **Ilustración 20**, por medio del cual se puede proceder con la ejecución del objetivo específico número 3.

Objetivo 3: Validar el modelo espacial por medio de un estudio de caso de forma que este sea completamente replicable en cualquier contexto.

Es importante considerar que la validación del modelo necesita la obtención de los insumos cartográficos básicos o productos de entrada, por lo que en la siguiente tabla se muestran las planchas cartográficas descargadas en formato Shapefile, utilizadas para componer los productos de entrada requeridos para alimentar el modelo desarrollado y realizar la validación de la propuesta en la jurisdicción del Cardique.

Tabla 8

Planchas Cartográficas utilizadas en la validación del modelo espacial.

N	PLANCH								
o	A								
1	23IIA	15	30ID	29	31ID	43	37IVC	57	44IIA
2	16IVD	16	30IIA	30	31IIIA	44	37IVD	58	44IIB
3	23ID	17	30IIB	31	31IIIB	45	38IA	59	45IA
4	23IIB	18	30IIC	32	31IIIC	46	38IB	60	45IB
5	23IIC	19	30IID	33	31IIID	47	38IC	61	45IC
6	23IID	20	30IIIB	34	31IVC	48	38ID	62	45IIA
7	23IIIB	21	30IIID	35	37IB	49	38IIA	63	45IIC
8	23IIID	22	30IVA	36	37ID	50	38IIC	64	45IIIA
9	23IVA	23	30IVB	37	37IIA	51	38IIIA	65	45IIIB
10	23IVB	24	30IVC	38	37IIB	52	38IIIB	66	45IIID
11	23IVC	25	30IVD	39	37IIC	53	38IIIC	67	45IVA
12	23IVD	26	31IA	40	37IID	54	38IIID	68	45ID
13	24IIC	27	31IB	41	37IVA	55	38IVA	69	29IIA
14	30IB	28	31IC	42	37IVB	56	38IVC	70	29IIC

Nota: Planchas Cartográficas obtenidas por medio de Mapas de Colombia.

Con referencia al insumo de entrada requerido en el criterio No. 3 relacionado al mapa de pendientes se trabajó como producto de entrada con seis modelos digitales de elevación (DEM) con un tamaño de celda (X, Y) de 12.5,12.5, los DEM utilizados para evaluar la zona de Cardique, fueron los siguientes:

Tabla 9

Modelos Digitales de Elevación utilizados para evaluar la jurisdicción de Cardique.

Modelos Digitales de Elevación (12.5,12.5)	
No	Referencia
1	HH/ALPSRP249450170_HH
2	HH/ALPSRP249450180_HH
3	HH/ALPSRP249450190_HH
4	HH/ALPSRP249450200_HH
5	HH/ALPSRP251930180_HH
6	HH/ALPSRP251930190_HH

Nota: Modelos Digitales de Elevación de acceso libre en el servidor Alaska Satellite Facility – Distributed Active Archive Center. (<https://asf.alaska.edu/data-sets/sar-data-sets/alos-palsar/>)

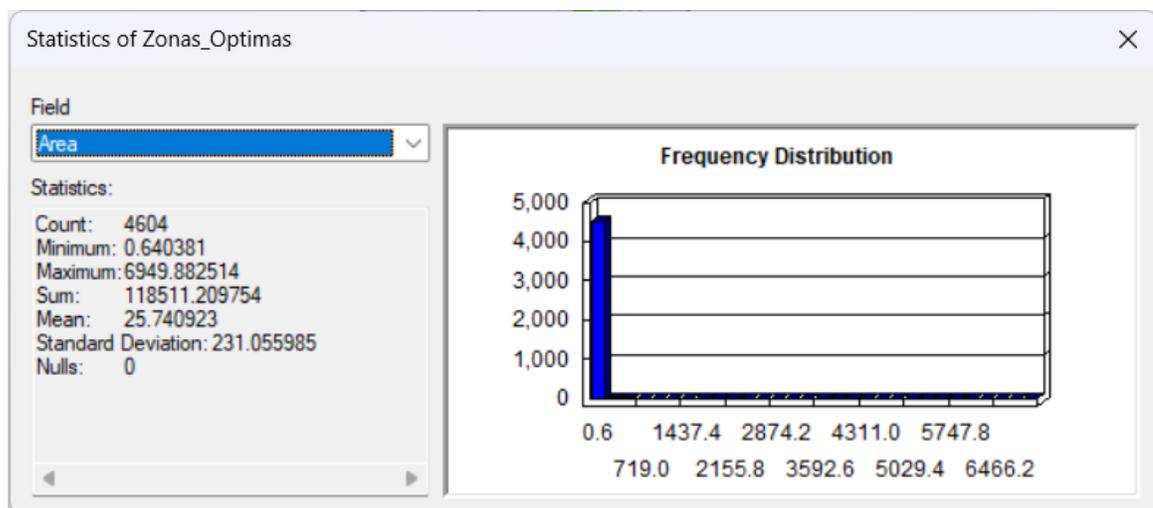
El Modelo Espacial fue validado en su totalidad por medio de la herramienta Model Builder, adoptando a la cadena de procesos espaciales la estructura definida desde el desarrollo metodológico, el resultado de la validación fue el siguiente:

El Modelo de geoprocésamiento permitió automatizar los seis pasos descritos en la **Ilustración 20**, desarrollando por medio de esto la validación del Modelo Espacial, con base a la geo información propia de la jurisdicción de Cardique, el Model Builder de manera adicional permitió cumplir con lo estipulado en las Tablas 5 y 6, donde se estableció la estructura del modelo y características de los productos respectivamente.

El ModelBuilder obtenido cumplió con su propósito, ofreciendo la oportunidad de generar cadenas de procesos que funcionaron en la estructura de dos formas, primero en secuencia o cadena para cada uno de los criterios y en segundo lugar en paralelo con relación al procesamiento de cada uno de los criterios en forma simultánea. El Modelamiento de adecuación efectuado en primera instancia proporciono los siguientes resultados:

Ilustración 23

Estadísticas de los Polígonos obtenidos a partir de la validación del Modelo Espacial

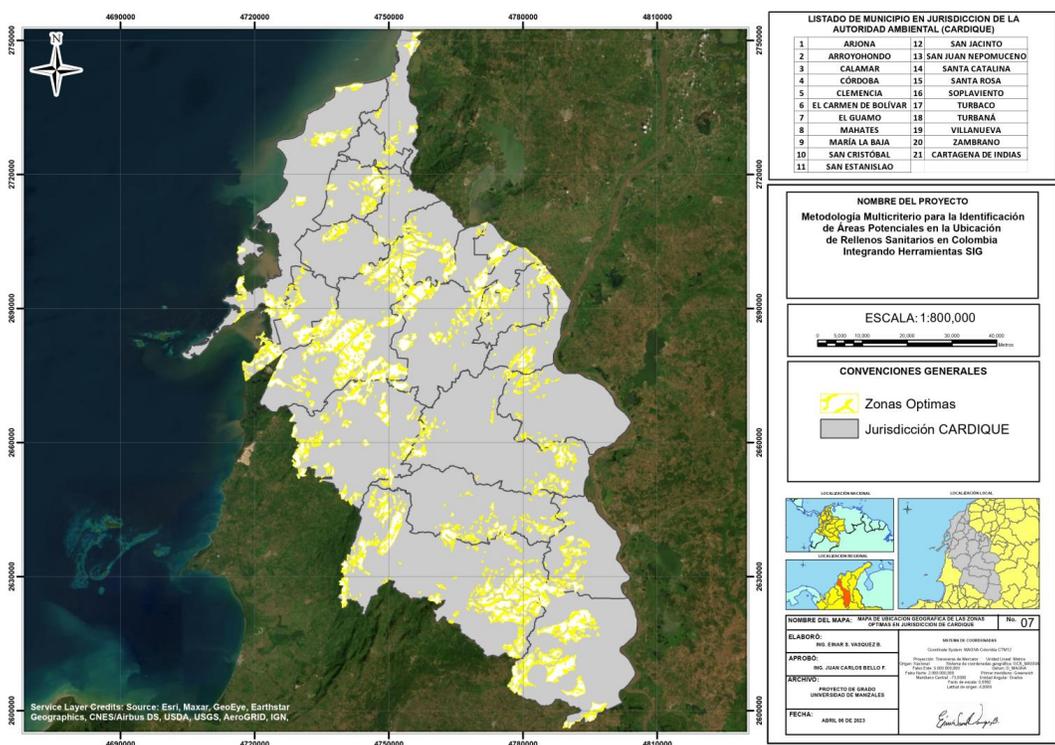


Nota: Captura obtenida por los autores con relación a las estadísticas de la Capa de Zonas Optimas, como producto final del modelo. (Ver Ilustración 22)

Con base a los resultados obtenidos es preciso indicar que en la jurisdicción de Cardique el Modelo identifico aproximadamente 4604 áreas viables (1185.11 Km² en total) para ubicar rellenos sanitarios, pero esa cantidad de polígonos potenciales debió posteriormente ser analizada y depurada, para ofrecer unos productos cartográficos útiles para tomar decisiones coherentes a la realidad de la zona de estudio. (El Resultado grafico de esta primera etapa se puede consultar en el anexo B “Localización Geográfica de las Zonas Optimas”)

Ilustración 24

Localización Geográfica de las zonas Optimas en la jurisdicción del Cardique



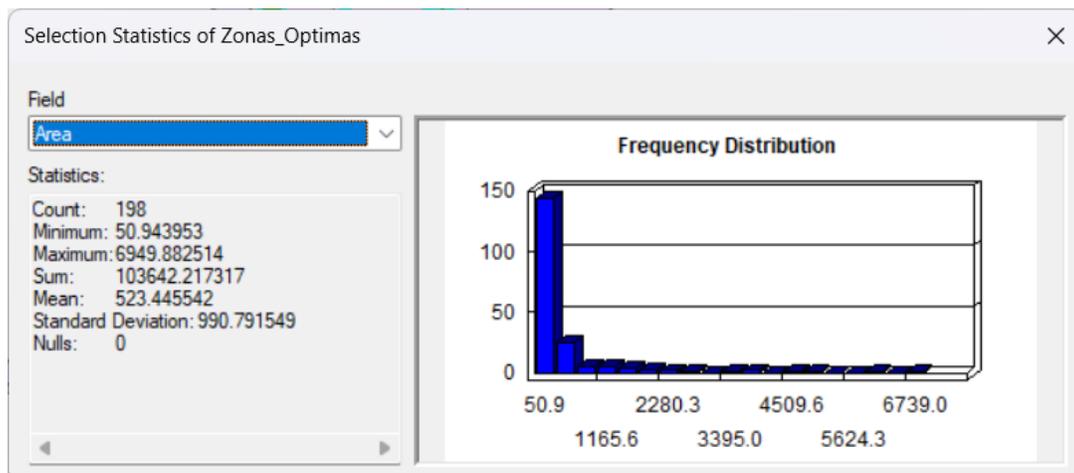
Nota: Plancha Cartográfica con las zonas Optimas identificadas en la Jurisdicción de Cardique (Son todas las áreas obtenidas luego de la ejecución del modelo)

En primer lugar, se debe considerar que la estadística indica que el valor de área mínima identificada es de cerca de 0.64 Ha lo que indica que técnicamente áreas tan reducidas no son viables para ser entregadas dentro de un instrumento de planificación con fines de disposición final a escala regional. Por otra parte, se comprende que la extensión promedio de las áreas viables es de 25.74 Ha aproximadamente, lo que mostraba que una importante cantidad de polígonos presentaron extensiones muy reducidas como para ser considerados en la generación de los productos cartográficos.

Para realizar una primera depuración de los polígonos viables se excluyó del área en estudio todos aquellos polígonos con áreas inferiores a 50 Ha, obteniendo el siguiente resultado:

Ilustración 25

Estadística obtenida para todas las áreas superiores a 50 Ha

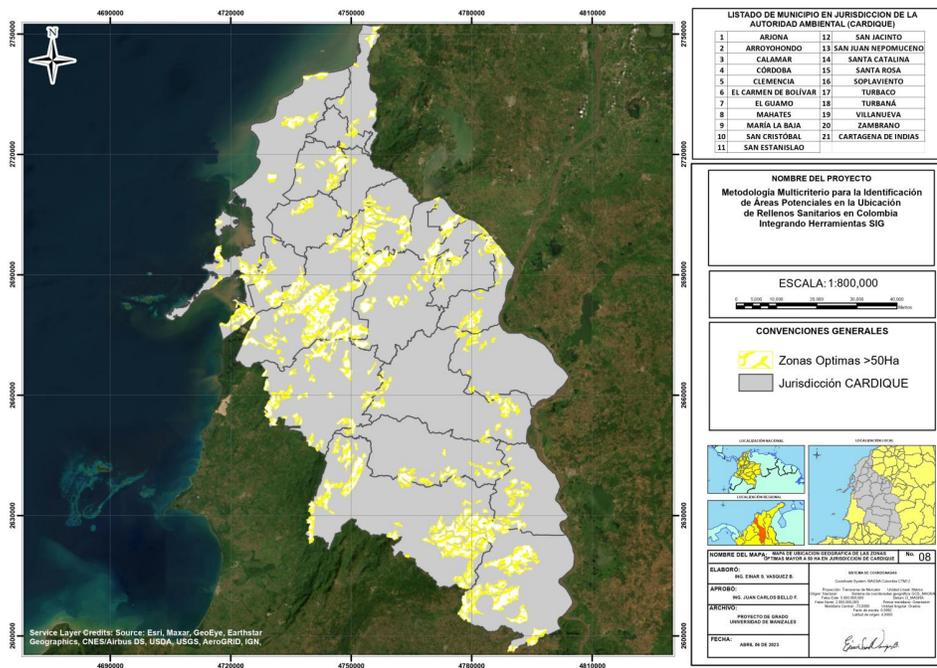


Nota: Captura obtenida por los autores con relación a las estadísticas de la Capa de Zonas Optimas. (Ver Ilustración 22)

Se observa un cambio drástico en la distribución de frecuencias, encontrando que luego de esta primera depuración de los resultados se obtuvo un total de 198 Polígonos Viables y por otra parte es de resaltar que el área total presento cambios mínimos considerando que el área total inicial fue de 1185.11 Km² y luego de la depuración la extensión total cambio a 1036.42 Km² representando una reducción porcentual de apenas el 12.54% luego de descartar un total de 4406 polígonos inferiores a 50 Ha. Esta interpretación permite establecer que la primera depuración de resultados es efectiva y puede mejorar el uso de los productos cartográficos ofrecidos. (El Resultado grafico de esta segunda etapa se puede consultar en el anexo B “Localización Geográfica de las Zonas Optimas > 50 Ha”)

Ilustración 26

Localización Geográfica de las Zonas Optimas > 50 Ha

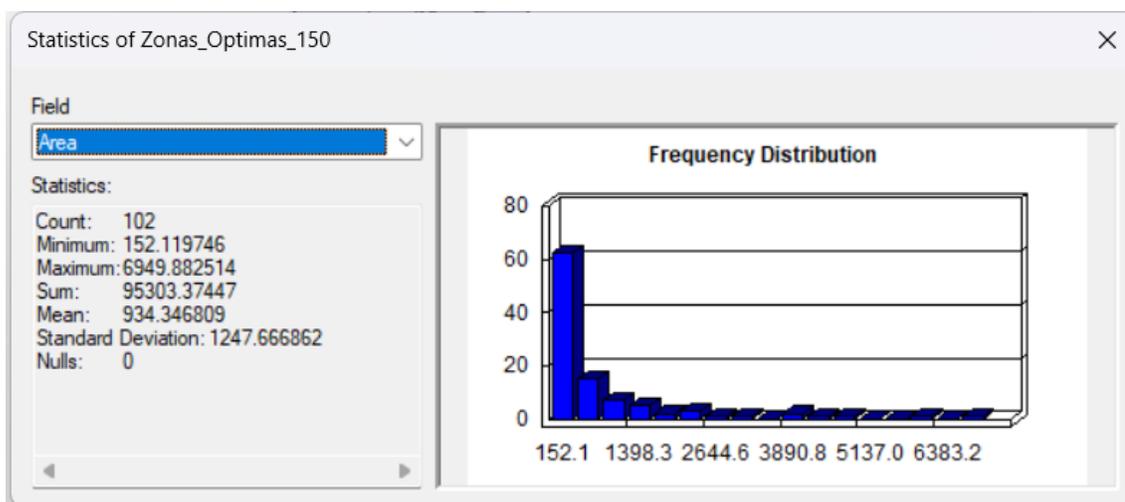


Nota: Plancha Cartográfica con las zonas Optimas > 50 Ha en la jurisdicción de Cardique.

Analizando los resultados obtenidos se consideró importante efectuar una segunda depuración, teniendo en cuenta que las áreas de mayor proporción pueden ofrecer un abanico de posibilidades más amplio para los planificadores del territorio y estableciendo que las áreas de mayor extensión pueden presentar más garantías al momento de aplicar el proceso de *requisitos mínimos*” estipulado en el artículo 2.3.2.3.11 del Decreto 1784 de 2017. La segunda depuración consistió en excluir del modelo todas aquellas áreas inferiores a 150 Ha, las estadísticas generadas son las siguientes:

Ilustración 27

Estadística obtenida para todas las áreas superiores a 150 Ha.



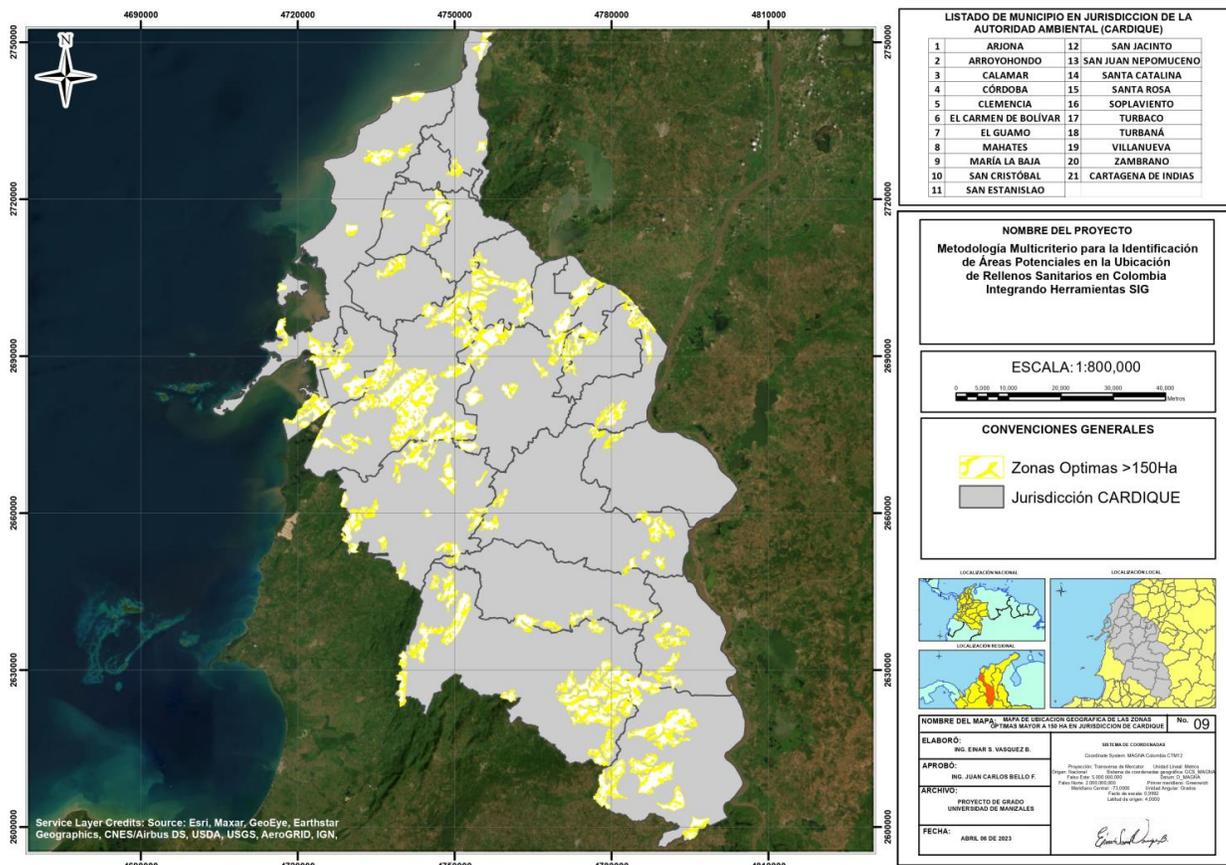
Nota: Captura obtenida por los autores con relación a las estadísticas de la Capa de Zonas Optimas. (Ver Ilustración 21)

Como se evidencia la reducción en la cantidad de polígonos viables es importante pero no en la misma proporción que en los resultados del primer filtro de áreas, el promedio en la extensión de los polígonos potenciales aumento y el área total también presento una reducción

poco considerable del menos 8% con relación a la distribución anterior. Con la aplicación de las dos depuraciones se estableció un total de 102 polígonos viables para ubicar rellenos sanitarios en la jurisdicción de Cardique y de manera adicional estas áreas presentan una extensión promedio de 934.34 Ha. (El resultado grafico de esta segunda etapa se puede consultar en el anexo B “Localización Geográfica de las Zonas Optimas > 150 Ha”)

Ilustración 28

Localización Geográfica de las Zonas Optimas > 150 Ha



Nota: Plancha Cartográfica con las zonas Optimas > 150 Ha en la jurisdicción de Cardique.

Posteriormente se procedió a definir una propuesta adicional de áreas óptimas para la Ciudad de Cartagena de Indias, considerando tres aspectos básicos:

1. Proximidad a la zona con mayor generación de residuos sólidos, para este caso se buscó zonas cercanas a la Ciudad de Cartagena de Indias.
2. Acceso vial garantizado por medio de rutas nacionales con flujo vehicular constante.
3. Consideración para este caso específico de áreas mayores a 50 Ha.

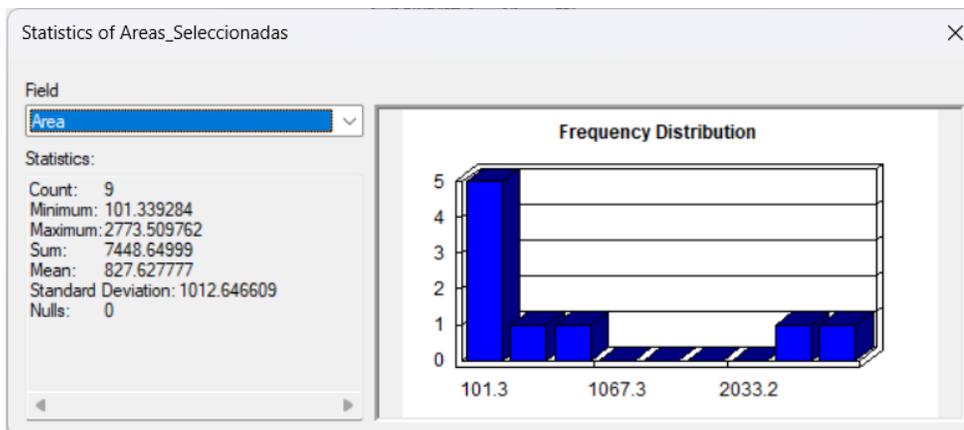
Es de aclarar que las áreas sugeridas son una propuesta ajustada a la necesidad que presenta la Ciudad de Cartagena de Indias para contar con nuevas áreas viables para realizar disposición final de sus residuos sólidos, pero formalmente en la jurisdicción de Cardique se identifican en conformidad al modelo, 102 áreas que tienen el potencial para ubicar rellenos sanitarios.

Para la Ciudad de Cartagena de Indias se sugieren 9 zonas viables de las cuales 8 se encuentran en zona continental y una propuesta adicional encontrada en la isla de Tierra Bomba, como una opción individual de disposición final para esta isla que presenta problemáticas para hacer correcta disposición de sus residuos sólidos.

Los polígonos sugeridos como viables para el Distrito Especial de Cartagena son entregados por medio de la Plancha Cartográfica denominada “*Localización Geográfica de las Zonas Seleccionadas Detalle*” que se puede consultar en el anexo B. Las estadísticas básicas de las 9 áreas sugeridas son:

Ilustración 29

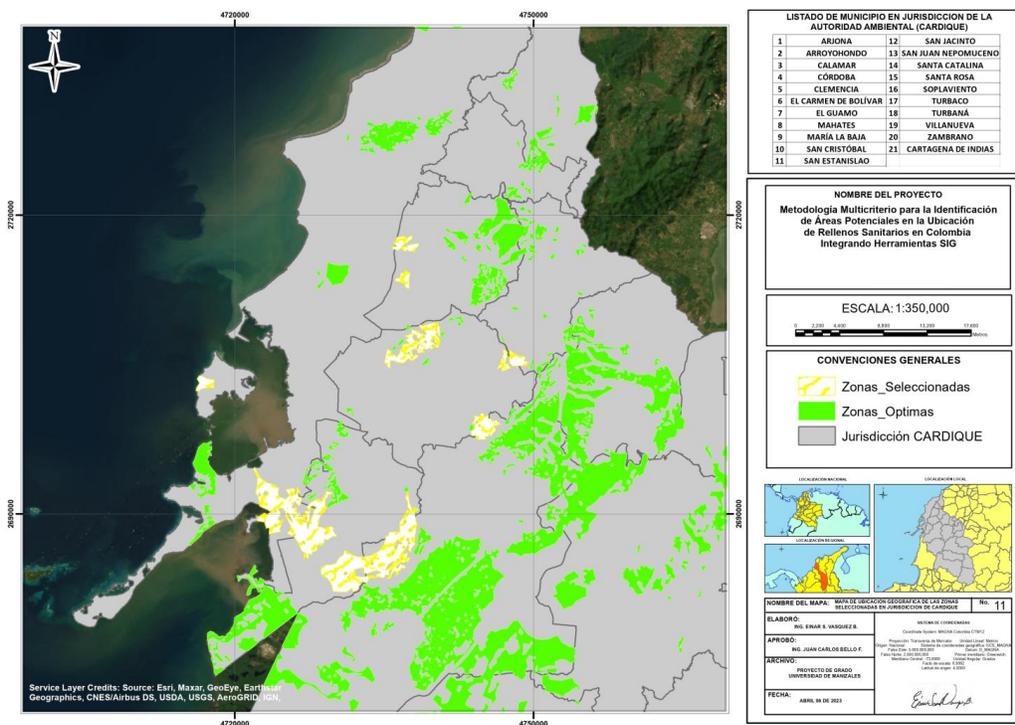
Estadísticas correspondientes a los polígonos viables para la Ciudad de Cartagena de Indias.



Nota: Estadísticas obtenidas en ArcGis, con referencia a los polígonos sugeridos.

Ilustración 30

Localización Geográfica de las Zonas Seleccionadas Detalle



Nota: Plancha Cartográfica con las 9 zonas Viables

Los polígonos sugeridos como propuesta adicional en este proceso de validación ofrecen en conformidad a las estadísticas un área aproximada de 7448 Ha, donde el distrito especial de Cartagena podría considerar el inicio de estudios de campo para establecer nuevos rellenos sanitarios.

Como se manifestó anteriormente como sugerencia adicional se identifica un área viable en la Isla de Tierra Bomba, donde esta comunidad podría encontrar espacio para hacer una correcta disposición de sus residuos sólidos.

Con base a los resultados obtenidos para toda la jurisdicción de Cardique, se puede manifestar que la validación del modelo, permitió conocer las posibilidades de análisis de la propuesta, así como las limitaciones del modelo, los resultados reafirman que la propuesta es una herramienta de prospección muy útil para viabilizar zonas con condiciones favorables para ubicar nuevos rellenos sanitarios, los polígonos identificados ofrecen múltiples posibilidades de solución para los planificadores del territorio, pero es importante tener en cuenta que las áreas definitivas en todos los casos deben ser definidas, por los estudios de campo mencionados en líneas anteriores.

Los resultados son una herramienta útil para que los planificadores del territorio tomen mejores decisiones sobre su ordenamiento territorial y de esta forma también se favorece la inversión en los estudios detallados y la protección de los recursos limitados.

Sobre el área de estudio es importante resaltar que presenta una particular dificultad considerando que ofrece una cantidad importante de cuerpos de agua tanto loticos, como lenticos, los cuales limitaron en su gran mayoría la obtención de más áreas viables, esta

particularidad coincidió con el planteamiento inicial de la Metodología Multicriterio, dado que esta prioriza la protección de los recursos hídricos.

La experiencia en la validación del modelo permite afirmar que tanto la metodología multicriterio como el modelo espacial pueden ser libremente modificables al contexto de cada zona de estudio y de esta forma se puede hablar de una metodología de análisis replicable y adaptable a las diversas condiciones del contexto colombiano.

Objetivo 4: Ofrecer por medio de la ejecución del modelo productos cartográficos que permitan la toma de decisiones.

Una vez analizados los resultados del Modelo Espacial y efectuados los procesos de depuración considerados necesarios para obtener productos cartográficos útiles para la toma de decisiones se generaron 4 salidas graficas correspondientes a los resultados más relevantes para ser utilizados como instrumento para la toma de decisiones en la jurisdicción de Cardique.

Las Planchas cartográfica ofrecidas cumplen con la Proyección en Coordenadas Planas del Origen Único Nacional, los polígonos generados son plenamente identificables y cuentan con soporte vectorial tipo Shapefile para que puedan ser utilizados por los entes interesados para evaluar las condiciones de cada uno de los polígonos sugeridos tras la aplicación de la metodología multicriterio integrada con Herramientas (SIG). A continuación, se describen las características básicas de cada una de los productos cartográficos:

Tabla 10

Productos Cartográficos ofrecidos para la toma de decisiones en la jurisdicción de Cardique

PRODUCTOS CARTOGRÁFICOS			
Nombre del Producto	Cantidad de Polígonos Viables	Área Total Obtenida (Km²)	Descripción
<i>Localización Geográfica de las Zonas Optimas</i>	4604	1185.11	Este producto cartográfico ofrece la totalidad de áreas identificadas y luego de la validación del Modelo.
<i>Localización Geográfica de las Zonas Optimas > 50 Ha</i>	198	1036.42	Este producto representa los resultados obtenidos luego de aplicar la primera depuración en función del área. Se considera de mayor utilidad.
<i>Localización Geográfica de las Zonas Optimas > 150 Ha</i>	102	953.03	Este producto representa los resultados obtenidos luego de aplicar la segunda depuración en función del área. Se considera que este producto es el de mayor utilidad para identificar áreas viables en la jurisdicción de Cardique.
<i>Localización Geográfica de las Zonas Seleccionadas</i>	198	1036.42	Este producto se enfoca en la propuesta de zonas viables para la Ciudad de Cartagena, por ello resalta las 9 áreas seleccionadas junto con las otras zonas identificadas en Cardique.

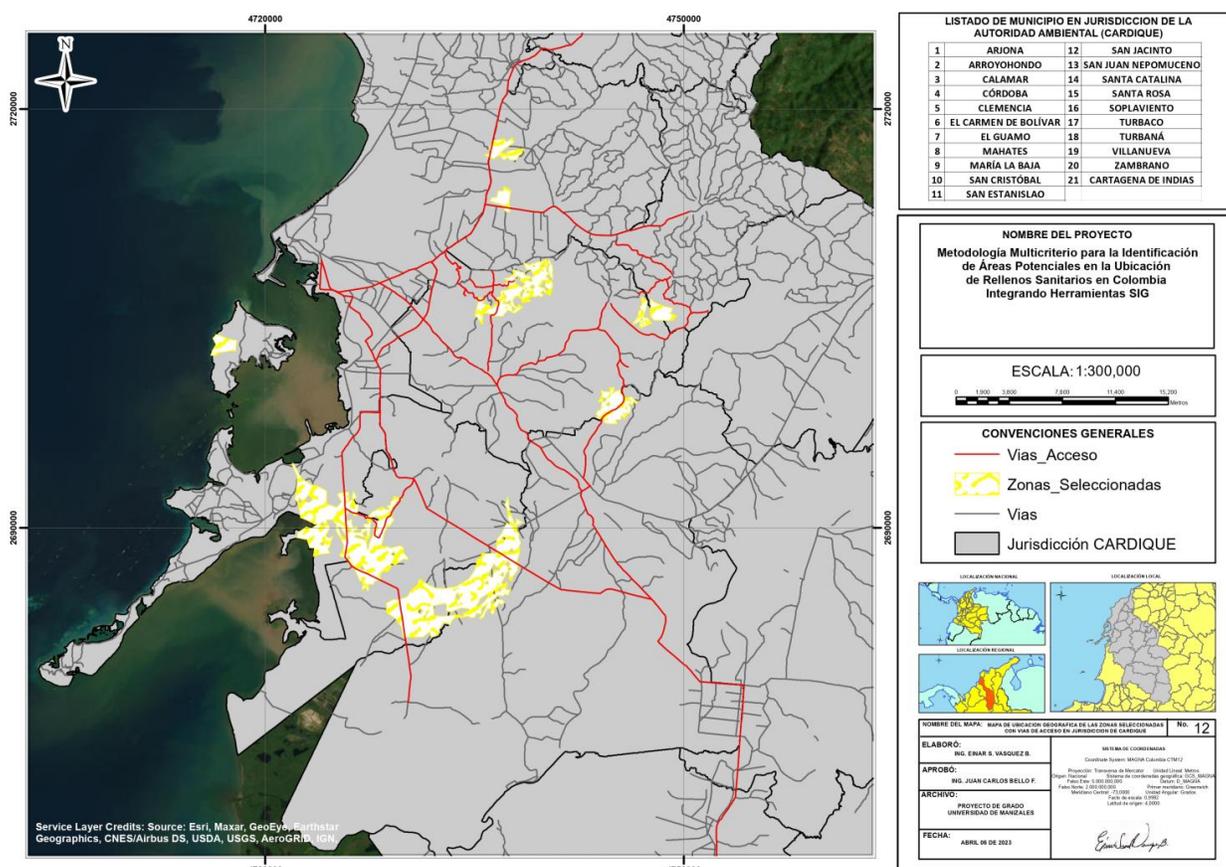
Nota: Estas planchas cartográficas pueden ser consultadas en la sección de anexos.

Los Productos cartográficos presentados son completamente útiles para apoyar la toma de decisiones en la jurisdicción de Cardique, donde se realizó la validación del Modelo Espacial. Esto se ve reflejado en la aplicación de los criterios técnicos y legales aplicados por medio de la modelación de adecuación ejecutada. Los planificadores del territorio podrán enfocar sus decisiones en la interpretación de los resultados obtenidos y el conocimiento de su territorio, que es fundamental para determinar en qué sitios específicos se puede focalizar la inversión en

estudios de campo o requisitos mínimos para construir infraestructura de relleno sanitario. De manera adicional se presenta la siguiente Plancha Cartográfica donde se muestra una posibilidad de análisis basada en la malla vial de la región:

Ilustración 31

Plancha Cartográfica con análisis de los polígonos identificados en función de la Malla Vial.



Nota: La Plancha Cartográfica muestra las zonas óptimas con mejor acceso vial, en las zonas próximas al Distrito Especial de Cartagena de Indias.

Los productos cartográficos cumplen con las condiciones de calidad suficientes para ser presentados ante las entidades interesadas y aportar de manera positiva en la identificación de áreas óptimas para construir nuevos rellenos sanitarios.

El modelo fue aplicado en Cardique, pero sin duda puede ser replicado en cualquier contexto colombiano considerando siempre el acceso a la información, la aplicación del enfoque de análisis ajustado a las particularidades de cada territorio y el criterio técnico de los planificadores del territorio para adoptar los polígonos que más se ajusten a su realidad.

11. Conclusiones

- La Metodología Multicriterio propuesta deja abierta la posibilidad para que los planificadores del territorio la utilicen como una hoja de ruta que permita manejar un enfoque de análisis, dado que la jerarquización de criterios es un proceso subjetivo que da la oportunidad de dirigir la toma de decisiones hacia la protección de algunos criterios en específico. Por otra parte, los subcriterios son el componente objetivo en la metodología para componer un sistema adaptado al contexto normativo de la nación.
- El modelo espacial debe ser una integración entre las herramientas (SIG) y la estructura general de la Metodología Multicriterio, pero es importante que el modelo propuesto de manera definitiva esté ligado a los recursos de trabajo del (SAD) seleccionado. En definición el Modelo espacial obtenido es uno de procesos, en el cual se pueden efectuar análisis de adecuación especializados en la determinación de áreas óptimas.
- En la validación del modelo se encontró que la propuesta ofrece distintas áreas con diferente potencial para ser utilizadas para ubicar nuevos rellenos sanitarios, pero es necesario que sobre los resultados obtenidos se haga una depuración de las opciones, dado que muchos polígonos pueden ser viables en conformidad al modelo espacial, pero

en referencia al contexto particular del área de estudio pueden ser descartadas por los profesionales con pleno conocimiento de su territorio.

- Los productos cartográficos obtenidos son instrumentos completamente útiles para apoyar la toma de decisiones, si bien, no son estudios de detalle, si son análisis de prospección que permiten mejorar la toma de decisiones en cada uno del contexto de estudio sobre los que se desarrolle el modelo propuesto.

12. Recomendaciones

- La metodología multicriterio desarrollada es una propuesta para apoyar la toma de decisiones en el ámbito de la planificación del territorio, proporcionando herramientas informáticas con rigor técnico para la toma de mejores decisiones.
- Las áreas proporcionadas por el modelo no atienden a criterios de **área mínima** para construir rellenos sanitarios, dado que la normatividad vigente no estipula una área determinada o mínima para la identificación de áreas óptimas para las actividades de disposición final en relleno sanitario.
- Los polígonos obtenidos por medio de la ejecución del modelo espacial propuesto inevitablemente heredan la calidad de los productos cartográficos de entrada, por lo que es importante que esto sea considerado en la interpretación de resultados. Además, si se cuenta con cartografía de mayor detalle el modelo tienden a ser más preciso y ayudaría a una segunda etapa de verificación en campo.
- El modelo espacial de proceso desarrollado en el software ArcGis, ofrece áreas con alta viabilidad para ubicar rellenos sanitarios teniendo en cuenta el contexto del área de estudio, pero la decisión final en todos los casos debe estar ligada a los estudios preliminares de campo que estipula el Decreto 1784 de 2017.

- Los criterios expuestos en el Decreto 838 de 2005 no deben ser desestimados dado su carácter reglamentario, los resultados del Modelo Espacial deben ser tomados como un insumo orientado a tomar mejores decisiones y garantiza la inversión en estudios técnicos de campo en el área elegida.
- Se debe tener en cuenta que para todos los efectos los resultados del modelo espacial corresponden a un estudio de prospección o de posibilidades futuras, en este orden de ideas los polígonos ofrecidos deben pasar por lo estudios de campo donde se determina de manera definitiva las áreas viables y se puede iniciar los estudios de dimensionamiento de la infraestructura de relleno y de manera posterior efectuar los respectivos presupuestos.
- Para el caso de los aeropuertos es importante que se considere que en cualquier circunstancia los rellenos sanitarios no deben estar ubicados a menos de 13 km de este tipo de infraestructuras, según la *Guía para Uso de Suelos en Áreas Aledañas a Aeropuertos en Colombia*.
- Los resultados obtenidos en el modelo deben ser armonizados con los instrumentos de ordenamiento territorial de cada municipio de forma que se cumpla con la Ley 388 de 1997.

13. Referencias

- Ackoff, R. L. (1974). *Redesigning the future : A systems approach to societal problems*. New York, Estados Unidos .
- Aguilar. (2019). Metodología para la selección de sitios para la disposición final de residuos sólidos urbanos en México usando SIG y evaluación multicriterio.
- Al-Khateeb. (2015). GIS-based spatial multi-criteria analysis for landfill site selection in the West Bank, Palestine.
- Almasri. (2013). Landfill Site Selection Using Remote Sensing and GIS in the West Bank- Palestine.
- Asamblea Nacional Constituyente. (04 de 07 de 1991). Constitución Política de Colombia . Bogotá, Colombia.
- Aydin. (2019). Application of AHP and GIS for landfill site selection in growing urban regions: a case study in Menderes, Izmir.
- Banco Mundial. (2018). *Informe del Banco Mundial: Los desechos a nivel mundial crecerán un 70 % para 2050, a menos que se adopten medidas urgentes*. Obtenido de <https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2018/09/20/global-waste-to-grow-by-70-percent-by-2050-unless-urgent-action-is-taken-world-bank-report>
- Bation. (2019). GIS-based landfill site selection using fuzzy logic in a data-scarce environment: a case study in the Philippines.
- Belalcazar Urbano, I. A. (27 de Mayo de 2020). La normativa de localización de rellenos sanitarios en Colombia. *Las 2 Orillas*. Obtenido de <https://www.las2orillas.co/la-normativa-de-localizacion-de-rellenos-sanitarios-en-colombia/>
- Bravo, D. G. (11 de Octubre de 2018). *NeuroEconomix*. Obtenido de <https://www.neuroeconomix.com/es/analisis-de-decision-multicriterio-mcda/>
- Caso Osorio, E. E. (2010). *MANUAL DE ARCGIS 9.3 - Básico*. Huancayo.
- Castro. (2020). Selección de sitios para rellenos sanitarios en zonas rurales del Ecuador mediante análisis multicriterio y SIG.
- CEPAL. (2016). *Observatorio Regional de Planificación para el Desarrollo de América Latina y el Caribe*. Recuperado el 29 de Diciembre de 2022, de

- <https://observatorioplanificacion.cepal.org/es/marcos-regulatorios/ley-general-ambiental-de-colombia-ley-99-de-1993>
- Chrysoulakis. (2017). A GIS-based multi-criteria decision analysis approach for landfill site selection in a developing country megacity.
- Collazo. (2016). 7. Análisis multicriterio para la selección de sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos en la ciudad de Neuquén, Argentina.
- Congreso de Colombia . (1994). Ley 142. Bogotá. Obtenido de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=2752>
- Congreso de Colombia. (2011). Ley 1450., *Diario Oficial 48102*. Obtenido de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=43101>
- CONPES 3874. (2016). *CONSEJO NACIONAL DE POLÍTICA ECONÓMICA Y SOCIAL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN . CONSEJO NACIONAL DE POLÍTICA ECONÓMICA Y SOCIAL*. Obtenido de <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3874.pdf>
- Correa. (2020). Selección de sitios para la disposición final de residuos sólidos mediante análisis multicriterio y SIG en el municipio de San Pedro, Valle del Cauca.
- Cotos Yáñez, J. M., & Taboada González, J. Á. (2005). *Sistemas de Información Medioambiental*. 296: Netbiblo.
- Dimas, A. (2014). *ArcGIS Spatial Analyst: Una gran opción para el análisis espacial*. Obtenido de https://geoinnova.org/blog-territorio/arcgis-spatial-analyst/?gclid=Cj0KCQiAw8OeBhCeARIsAGxWtUwya9Zf1OACBMF_MGi-exouDCmY3pwT6AlzWkOfOUYTqxmFyDd6abkaAjRKEALw_wcB
- ESRI. (2022). *¿Qué es ModelBuilder?* Obtenido de <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/analyze/modelbuilder/what-is-modelbuilder.htm>
- ESRI. (2022). *Resolver problemas espaciales con modelos de representación y de proceso*. Obtenido de <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/extensions/spatial-analyst/solving-problems/solving-spatial-problems-with-representation-and-process-models.htm>
- ESRI. (25 de Enero de 2023). *ArcGIS Resources*. Obtenido de <https://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm>

- ESRI. (2023). *Comprender el análisis de distancia euclidiana*. Obtenido de <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/understanding-euclidean-distance-analysis.htm>
- ESRI. (2023). *Distancia euclidiana*. Obtenido de <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/euclidean-distance.htm>
- ESRI. (2023). *Superposición ponderada (Spatial Analyst)*. Obtenido de <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/weighted-overlay.htm#:~:text=La%20herramienta%20Superposici%C3%B3n%20ponderada%20permite,criterios%20y%20sus%20respectivas%20propiedades.>
- GEASIG. (14 de Septiembre de 2018). *Herramientas de Superposición con ArcGIS*. Obtenido de [https://www.geasig.com/herramientas-de-superposicion-con-arcgis/#:~:text=INTERSECT%20\(INTERSECCI%C3%93N\),conserva%20los%20atributos%20de%20ambas.](https://www.geasig.com/herramientas-de-superposicion-con-arcgis/#:~:text=INTERSECT%20(INTERSECCI%C3%93N),conserva%20los%20atributos%20de%20ambas.)
- Geneletti, D. (2004). A GIS based decision support system to identify nature conservation priorities in an alpine valley. *Land Use Policy*, 149-160.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2003.09.005>
- Gobierno de Colombia. (18 de Diciembre de 1974). *Función Pública, Decreto 2811 "Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente"*. Obtenido de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=1551#2811>
- Gobierno de Colombia. (2005). DECRETO 838. Diario Oficial 45.862 .
- Gobierno de Colombia. (2017). DECRETO 1784., *Diario Oficial No.50.405*.
- Gobierno de Colombia. (2021). Decreto 846. Bogotá. Obtenido de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=167626#40>
- González. (2014). Análisis multicriterio para la selección de sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos en la región metropolitana de Buenos Aires, Argentina.
- Gupta. (2017). Landfill Site Selection using GIS based multi-criteria evaluation technique in Jhansi City, India.
- Hurtado, T., & Bruno, G. (sf). El Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) como Herramienta para la Toma de Decisiones en la Selección de Proveedores. Recuperado el 12 de Enero de 2023, de https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/tesis/basic/toskano_hg/cap3.PDF

- IDEAM. (2020). *MANUAL PARA EL DILIGENCIAMIENTO DE LAS ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Bogotá. Obtenido de <http://sgi.ideam.gov.co/documents/412030/499496/M-GCI-E-M025+MANUAL+PARA+EL+DILIGENCIAMIENTO+DE+LAS+ESPECIFICACIONES+T%C3%89CNICAS+DE+LA+INFORMACI%C3%93N+GEOGR%C3%81FICA+v1.pdf/4f139448-3b3a-49a2-97e3-e114faf93810?version=1.0#:~:text=Norma%20t%C3%A9cnica%20de%20informaci%C3%B3n+geogr%C3%A1fica>
- Kidane et. (2012). Landfill site selection for solid waste disposal using GIS and AHP technique: a case study in Asmara, Eritrea.
- Lahore. (2018). Fuzzy analytic hierarchy process and GIS for site selection of landfill in densely populated cities: a case study of Lahore, Pakistan.
- Mendoza, M. (2009). *Análisis de la aptitud territorial. Una perspectiva biofísica*. Instituto Nacional de Ecología.
- MinAmbiente. (2022). *Hoy no se habla de basura, sino de residuos que son insumos para productos: Minambiente*. Obtenido de <https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/hoy-no-se-habla-de-basura-sino-de-residuos-que-son-insumos-para-productos-minambiente/#:~:text=La%20cifra%20m%C3%A1s%20reciente%20entregada,0.89%20%25%20respecto%20al%20a%C3%B1o%202019>.
- Nduwayezu. (2019). multi-criteria decision analysis for sustainable landfill site selection in developing countries: a review.
- Nyaoro. (2016). Integration of GIS and multicriteria decision analysis for landfill site selection in the Lake Victoria Basin.
- Osorio Gómez , J. C., & Orejuela Cabrera, J. P. (2008). EL PROCESO DE ANÁLISIS JERÁRQUICO (AHP) Y LA TOMA DE DECISIONES MULTICRITERIO. EJEMPLO DE APLICACIÓN. *Scientia et Technica Año XIV(39)*, 247 - 252.
- Paredes , M. D., & Salerno, M. L. (2013). “La Racionalidad y las Emociones en la toma de decisiones”. *Repositorio Institucional, Universidad Nacional de Villa María*.
- Revista Semana. (03 de 08 de 2017). El primer código ambiental y los Parques Nacionales Naturales. *Revista Semana, especial Conservando la Memoria*. Obtenido de <https://www.semana.com/medio-ambiente/articulo/el-primer-codigo-ambiental-de-colombia-y-los-parques-nacionales-naturales/38344/>

- Rincón. (2019). Análisis multicriterio para la selección de sitios para disposición final de residuos sólidos urbanos en la ciudad de Villavicencio, Colombia.
- SSPD. (2020). *Informe Nacional de disposición final de Residuos Sólidos*. Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. Obtenido de https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/2022-01/informe_df_2019_final_22-12-2020_0.pdf
- Superservicios. (2021). *Informe Nacional de Disposición Final de Residuos Sólidos 2021*. Bogotá.
- Tchanga. (2016). Assessment of landfill site suitability using geographic information system and analytical hierarchy process.
- Zafra, C. A., Mendoza, F. A., & Montoya, P. A. (01 de abril de 2012). A methodology for landfill location using geographic information systems: a Colombian regional case. *INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN*, 32, 64-70. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/39748/28527-102131-1-PB.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

A. Anexo: Descripción de los Productos cartográficos asociados a la estructura del Modelo Espacial

Tabla 11

Productos Cartográficos Asociados al Modelo Espacial

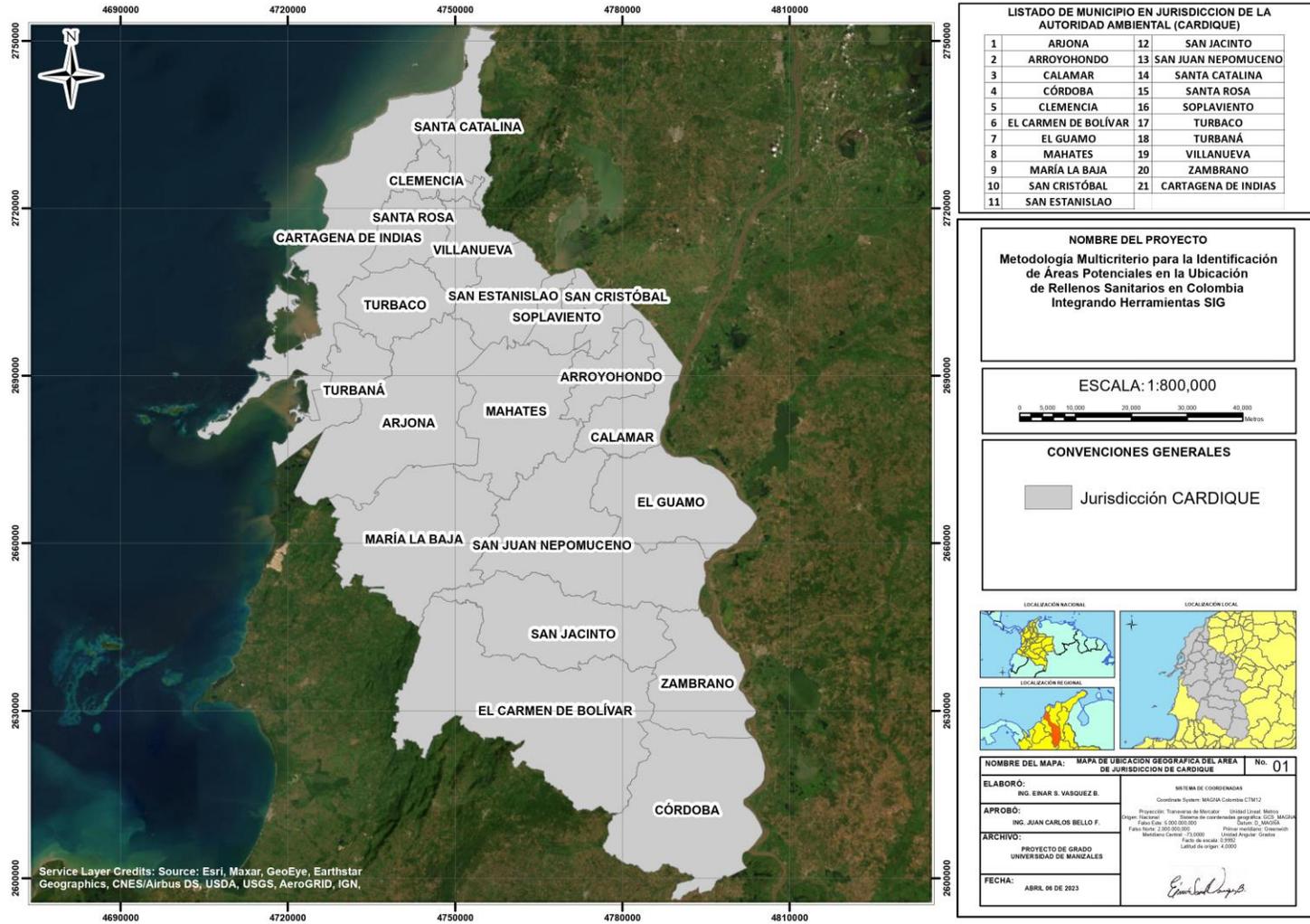
PRODUCTOS CARTOGRAFICOS ASOCIADOS AL MODELO ESPACIAL		
PROCESO EJECUTADO	Validación del Modelo en la jurisdicción de Cardique	
Tipo de Producto	No	Nombre del Mapa
ENTRADA	1	Localización Geográfica del Área de Estudio
	2	Localización Geográfica de las Áreas Protegidas
	3	Localización Geográfica de los Cuerpos de Agua
	4	Localización Geográfica de los Drenajes
	5	Localización Geográfica de las Fallas Geológicas
	6	Localización Geográfica del Componente Socio Cultural
PROCESO	7	Localización de los Subcriterios asignados a Drenajes en la Jurisdicción de Cardique
	8	Localización de los Subcriterios asignados a Cuerpos de Agua en la Jurisdicción de Cardique
	9	Localización de los Subcriterios asignados a Fallas Geológicas en la Jurisdicción de Cardique
	10	Localización de los Subcriterios asignados a Zonas Protegidas en la Jurisdicción de Cardique
	11	Localización de los Subcriterios asignados al Componente Socio Cultural en la Jurisdicción de Cardique
	12	Localización de los Subcriterios asignados al Mapa de Pendientes de la Jurisdicción de Cardique
SALIDA	13	Localización Geográfica de las Zonas Optimas
	14	Localización Geográfica de las Zonas Optimas > 50 Ha
	15	Localización Geográfica de las Zonas Optimas > 150 Ha
	16	Localización Geográfica de las Zonas Seleccionadas
	17	Localización Geográfica de las Zonas Seleccionadas Detalle
	18	Localización Geográfica de las Zonas Seleccionadas con Vías de Acceso

Nota: Productos de Entrada, Proceso y Salida asociados a la validación del Modelo Espacial

B. Anexo: Planchas cartográficas generadas por medio de la Validación del Modelo Espacial (Productos de Entrada, Proceso y Salida)

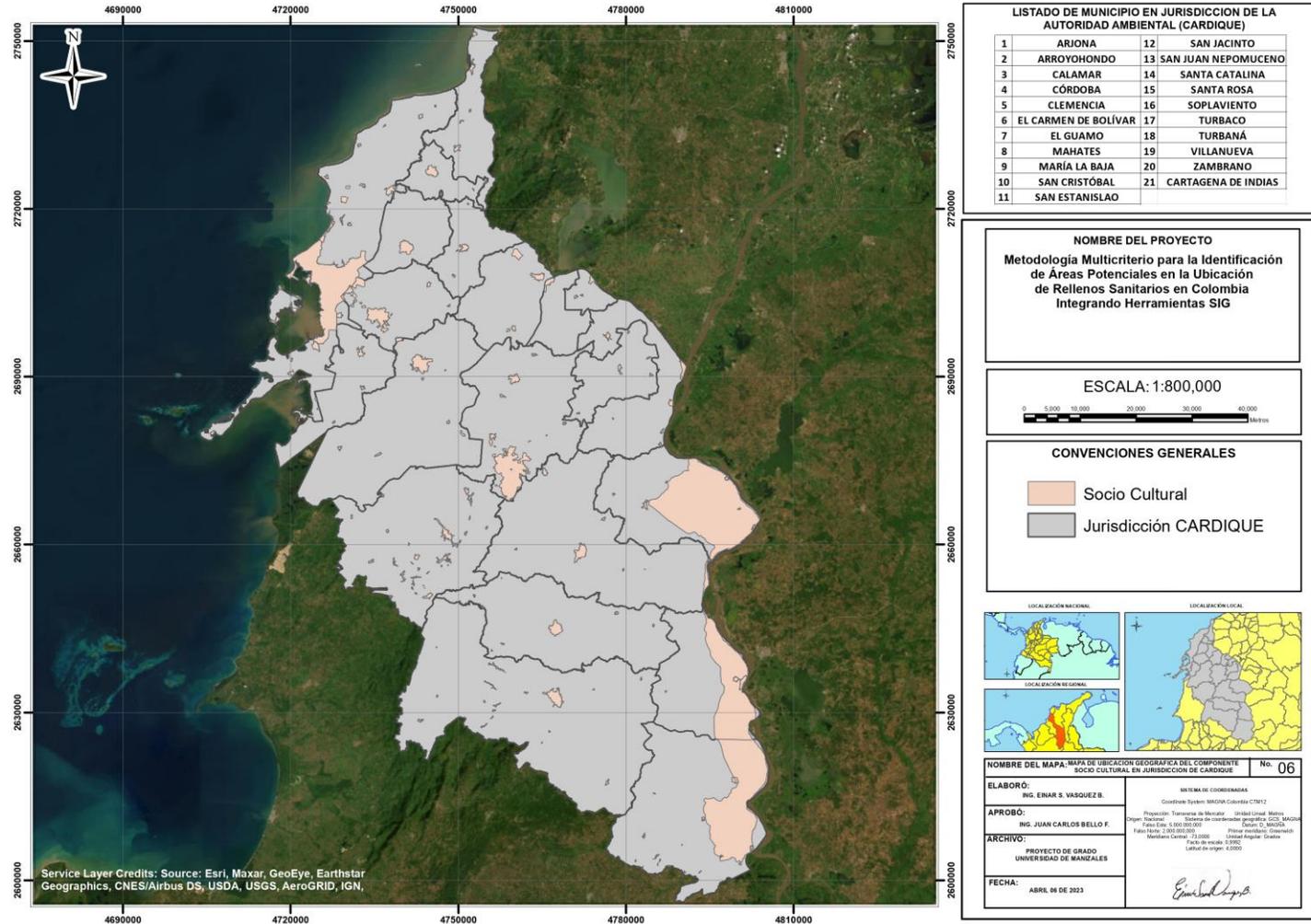
Plancha Cartográfica 1

Localización Geográfica del Área de Estudio



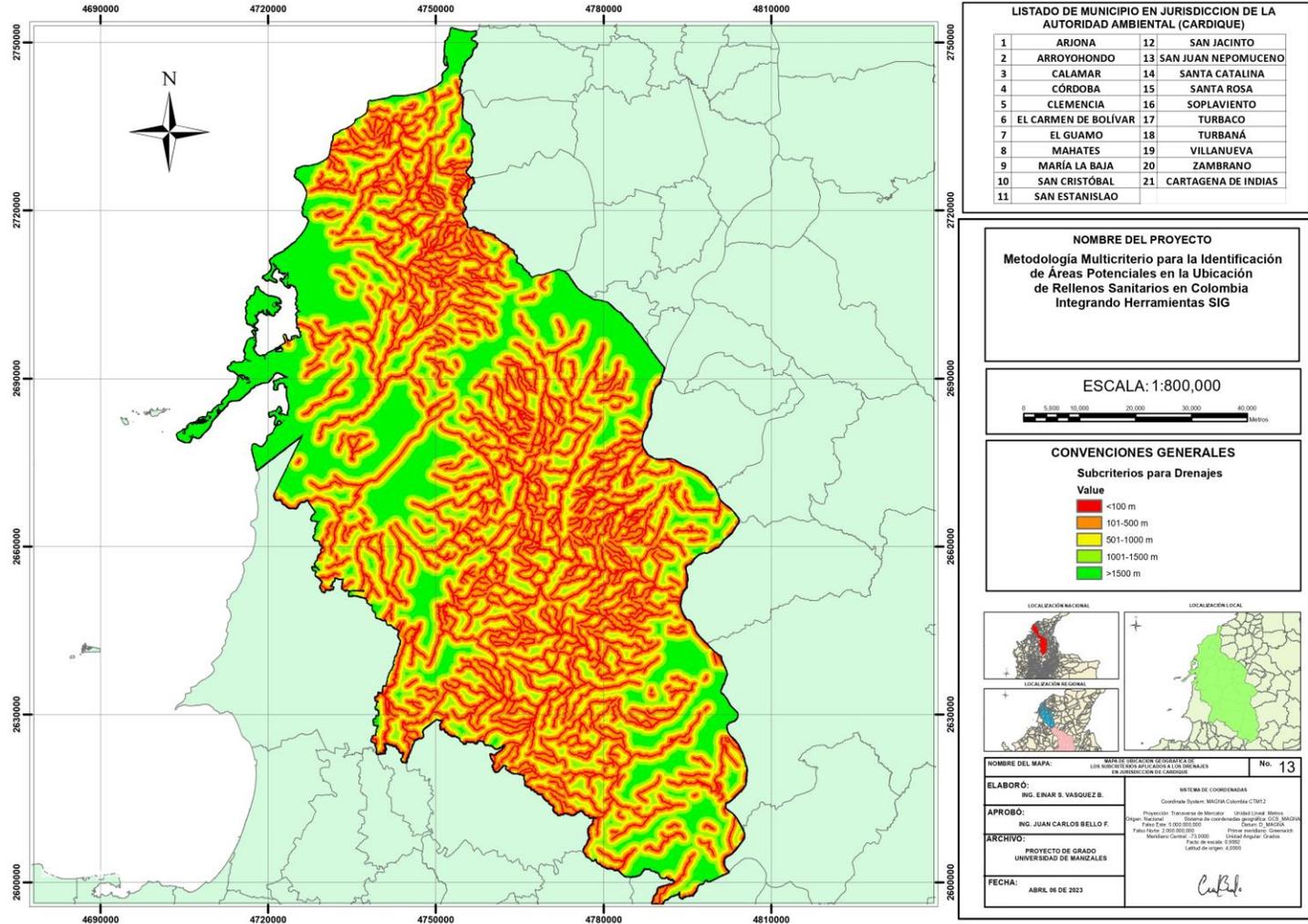
Plancha Cartográfica 6

Localización Geográfica del Componente Socio Cultural



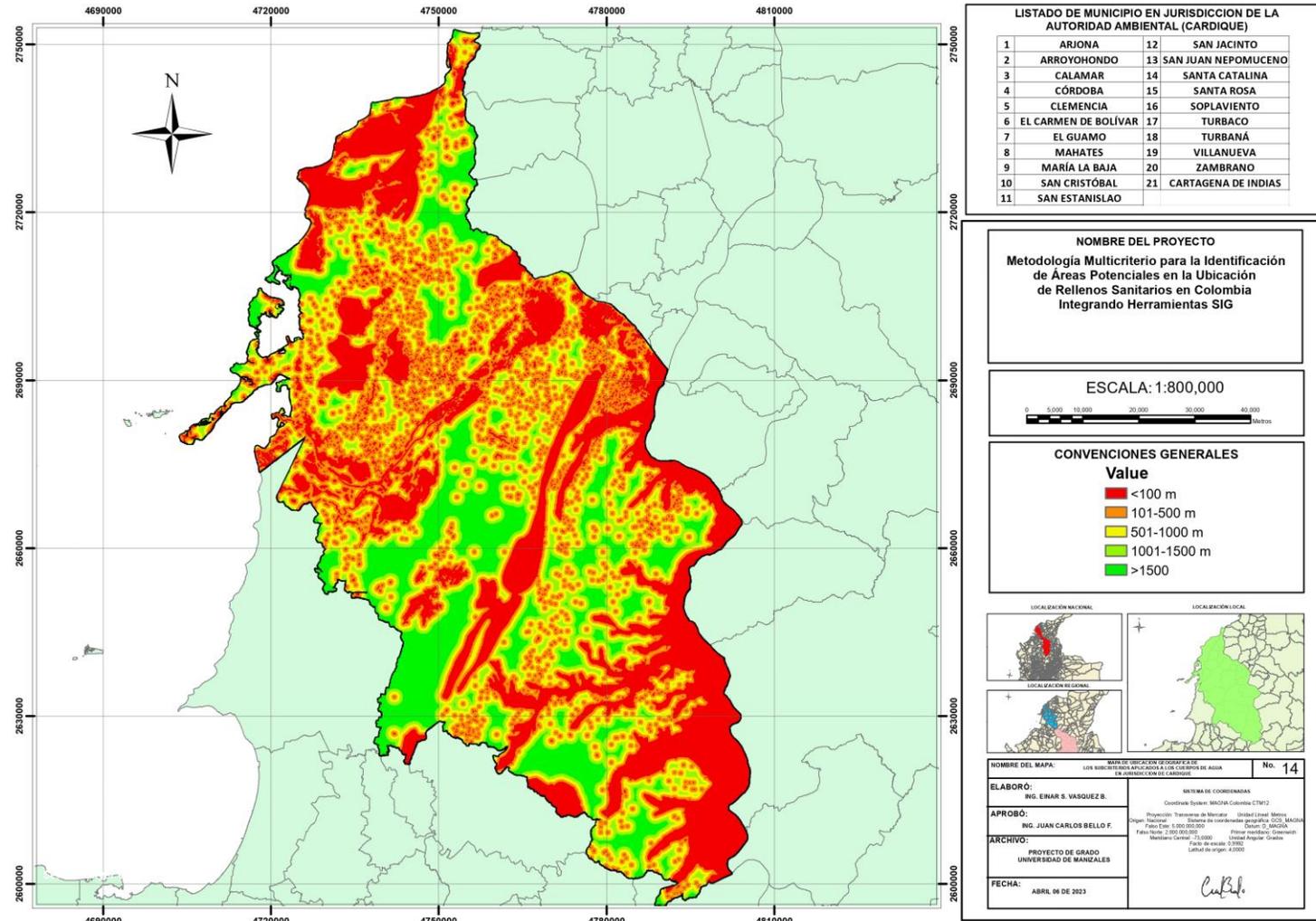
Plancha Cartográfica 7

Localización de los Subcriterios asignados a Drenajes en la Jurisdicción de Cardique



Plancha Cartográfica 8

Localización de los Subcriterios asignados a Cuerpos de Agua en la Jurisdicción de Cardique



LISTADO DE MUNICIPIO EN JURISDICCION DE LA AUTORIDAD AMBIENTAL (CARDIQUE)

1	ARJONA	12	SAN JACINTO
2	ARROYOHONDO	13	SAN JUAN NEPOMUCENO
3	CALAMAR	14	SANTA CATALINA
4	CÓRDOBA	15	SANTA ROSA
5	CLEMENCIA	16	SOPLAVENTO
6	EL CARMEN DE BOLÍVAR	17	TURBACO
7	EL GUAMO	18	TURBANÁ
8	MAHATES	19	VILLANUEVA
9	MARÍA LA BAJA	20	ZAMBRANO
10	SAN CRISTÓBAL	21	CARTAGENA DE INDIAS
11	SAN ESTANISLAO		

NOMBRE DEL PROYECTO
Metodología Multicriterio para la Identificación de Áreas Potenciales en la Ubicación de Rellenos Sanitarios en Colombia Integrando Herramientas SIG

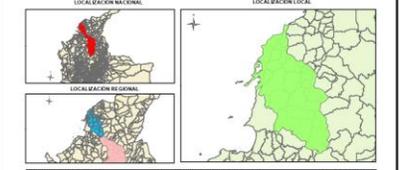
ESCALA: 1:800,000

0 5,000 10,000 20,000 30,000 40,000 Metros

CONVENCIONES GENERALES

Value

- <100 m
- 101-500 m
- 501-1000 m
- 1001-1500 m
- >1500



NOMBRE DEL MAPA: MAPA DE IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS POTENCIALES DE LOS SUBCRITERIOS APLICADOS A LOS CUERPOS DE AGUA EN LA JURISDICCION DE LA AUTORIDAD AMBIENTAL. No. 14

ELABORÓ: ING. ENAR S. VASQUEZ B. SISTEMA DE COORDENADAS: Coordenada Sistema: WGS84/Colombia, CTM12

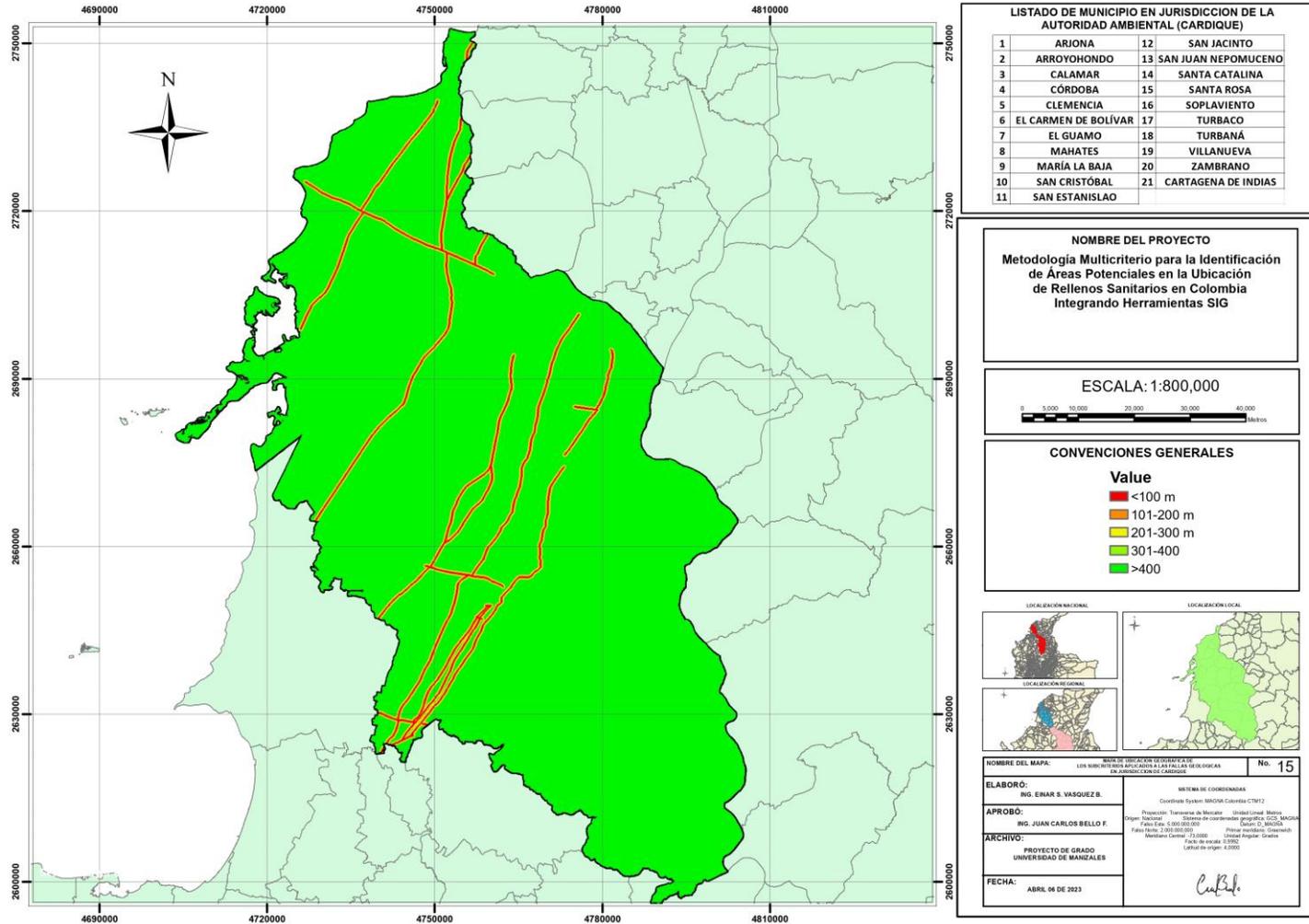
APROBÓ: ING. JUAN CARLOS BELLO F. Proyección: Transverso de Mercator. Unidad Local: Metro Nacional. Origen de coordenadas geográficas: O. MAGDA. Fecha: Abril 06 de 2023. Escala: 1:800,000. Fuente: Información: Universidad de Manizales. Fecha de emisión: 03/2023. Fecha de origen: 03/2023.

ARCHIVO: PROYECTO DE GRADO UNIVERSIDAD DE MANIZALES

FECHA: ABRIL 06 DE 2023

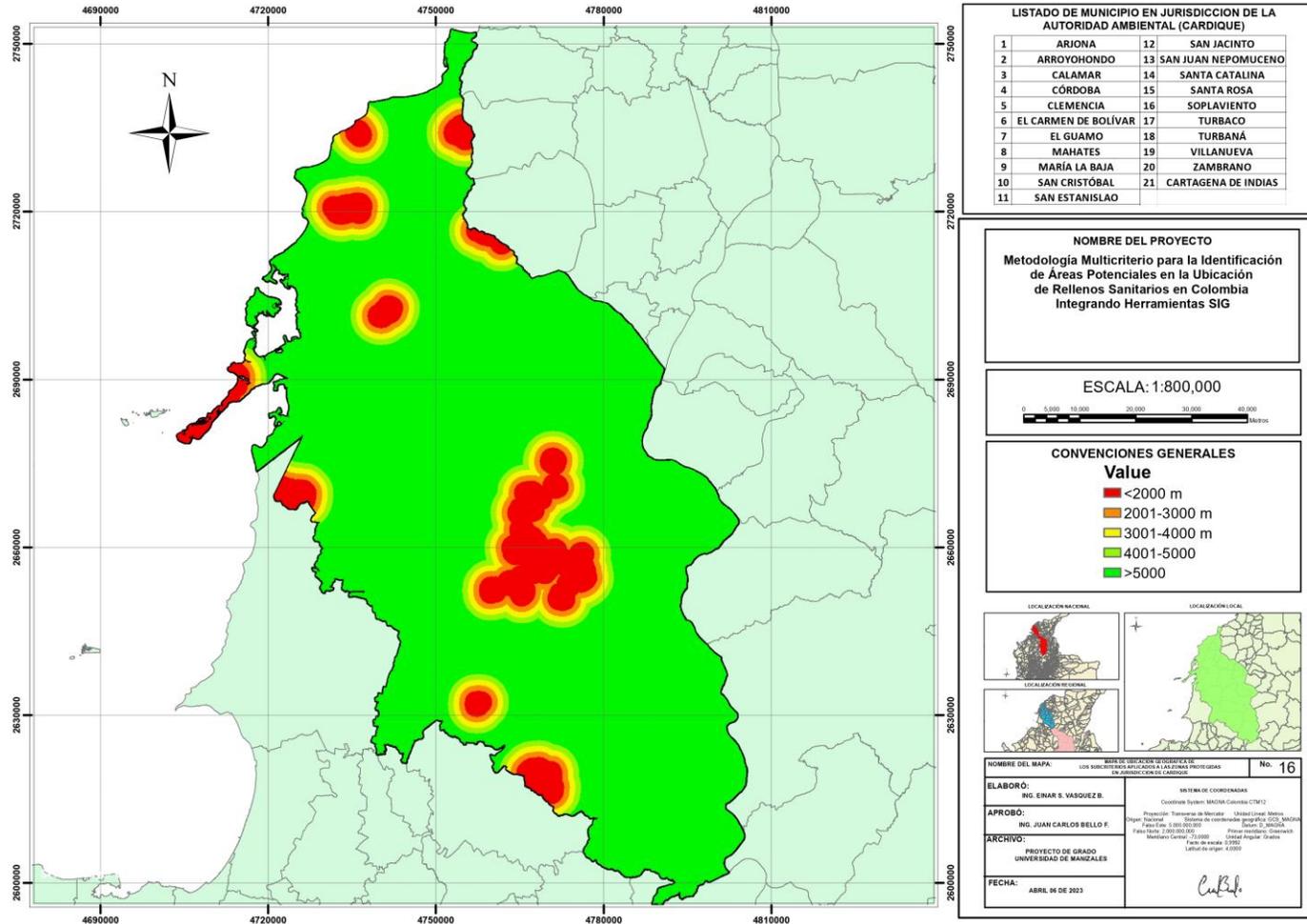
Plancha Cartográfica 9

Localización de los Subcriterios asignados a Fallas Geológicas en la Jurisdicción de Cardique



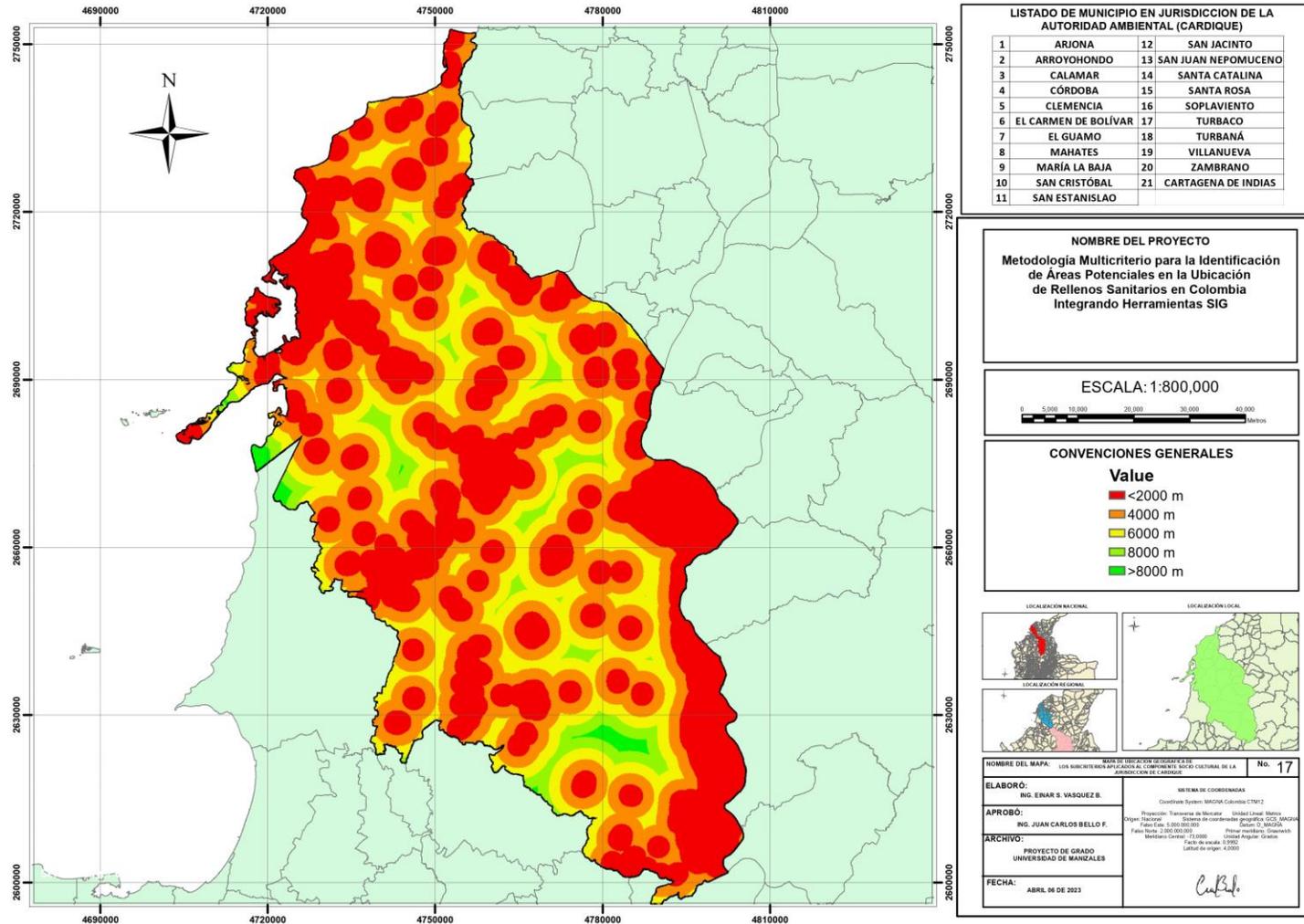
Plancha Cartográfica 10

Localización de los Subcriterios asignados a Zonas Protegidas en la Jurisdicción de Cardique



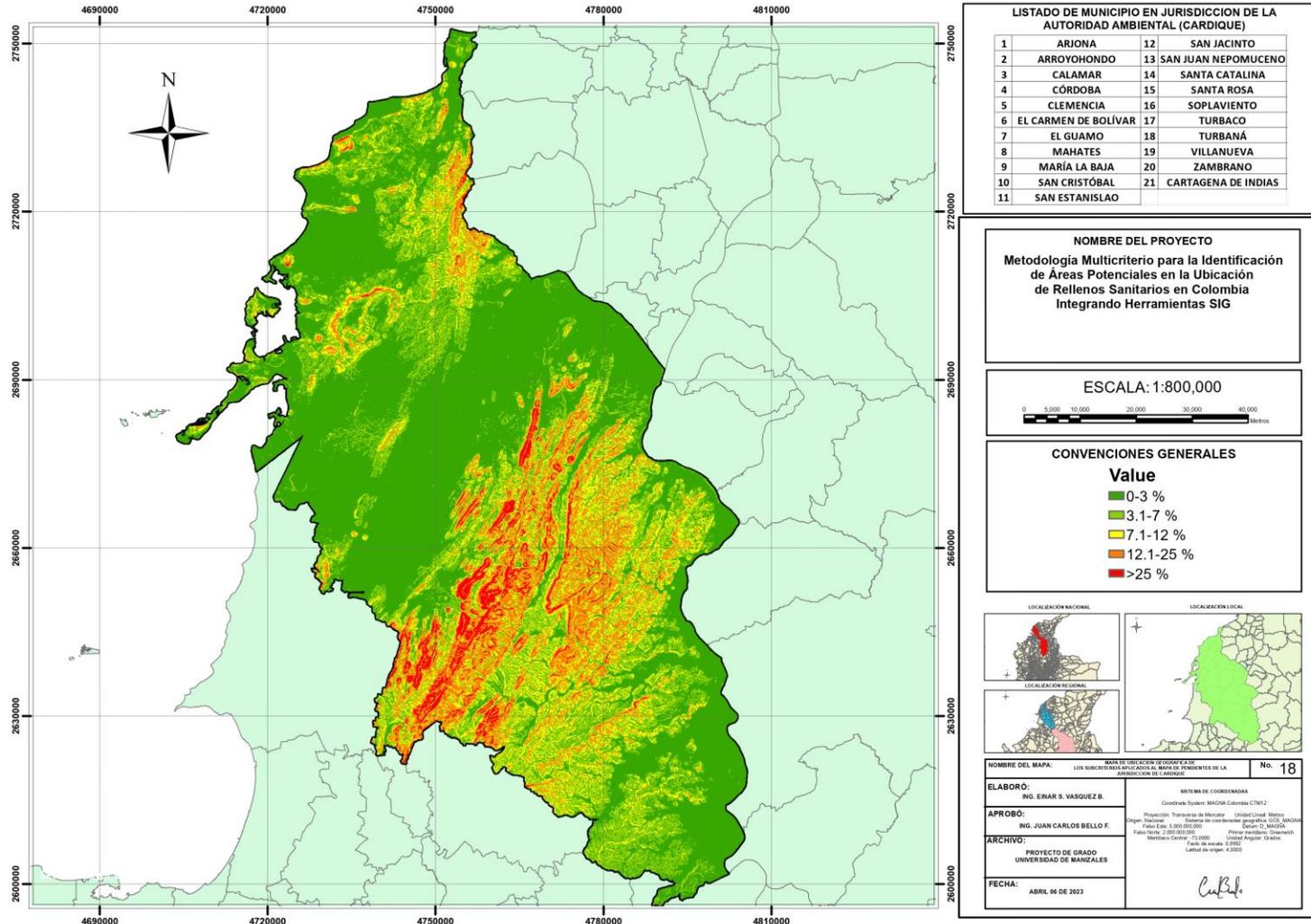
Plancha Cartográfica 11

Localización de los Subcriterios asignados al Componente Socio Cultural en la Jurisdicción de Cardique



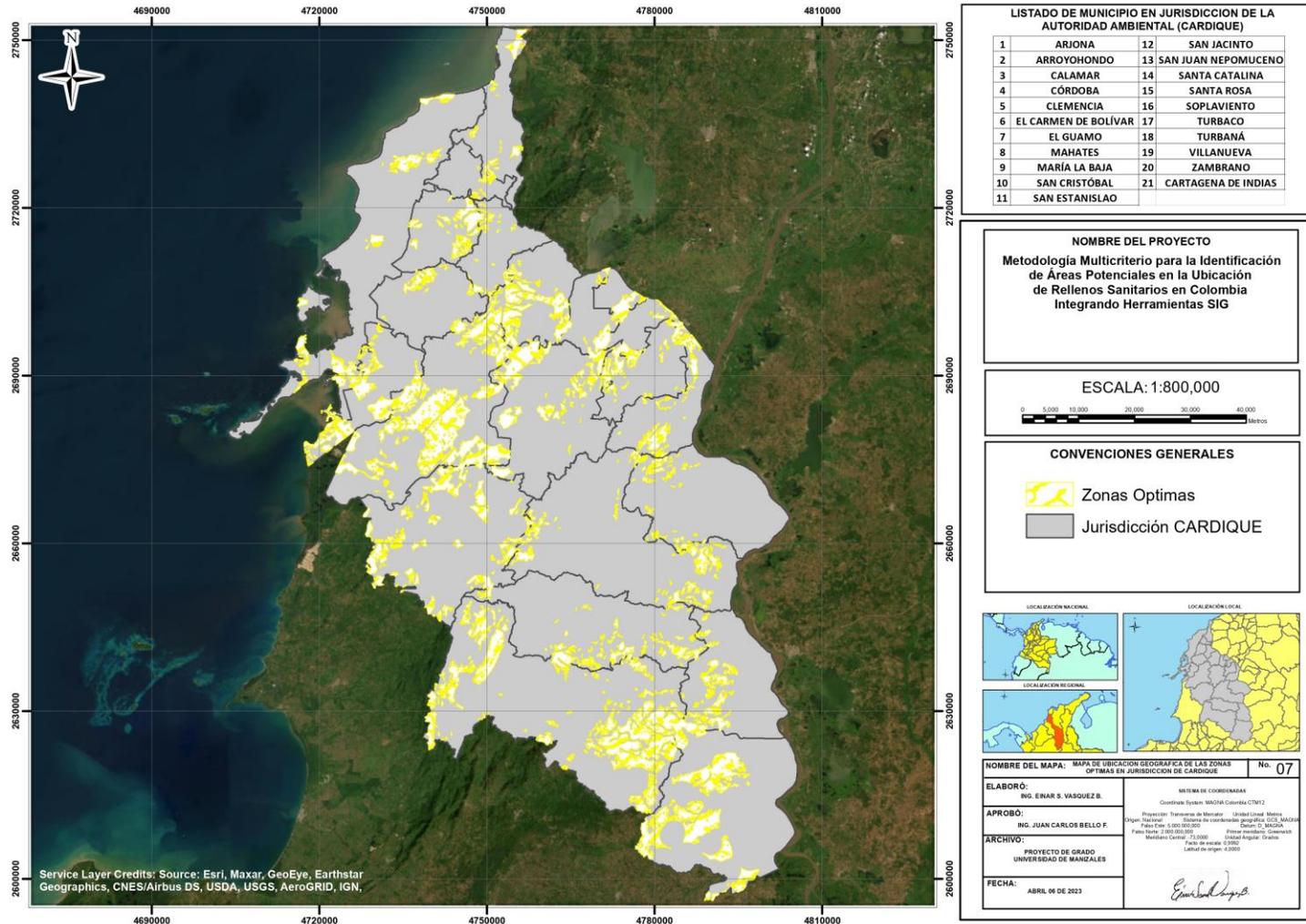
Plancha Cartográfica 12

Localización de los Subcriterios asignados al Mapa de Pendientes de la Jurisdicción de Cardique



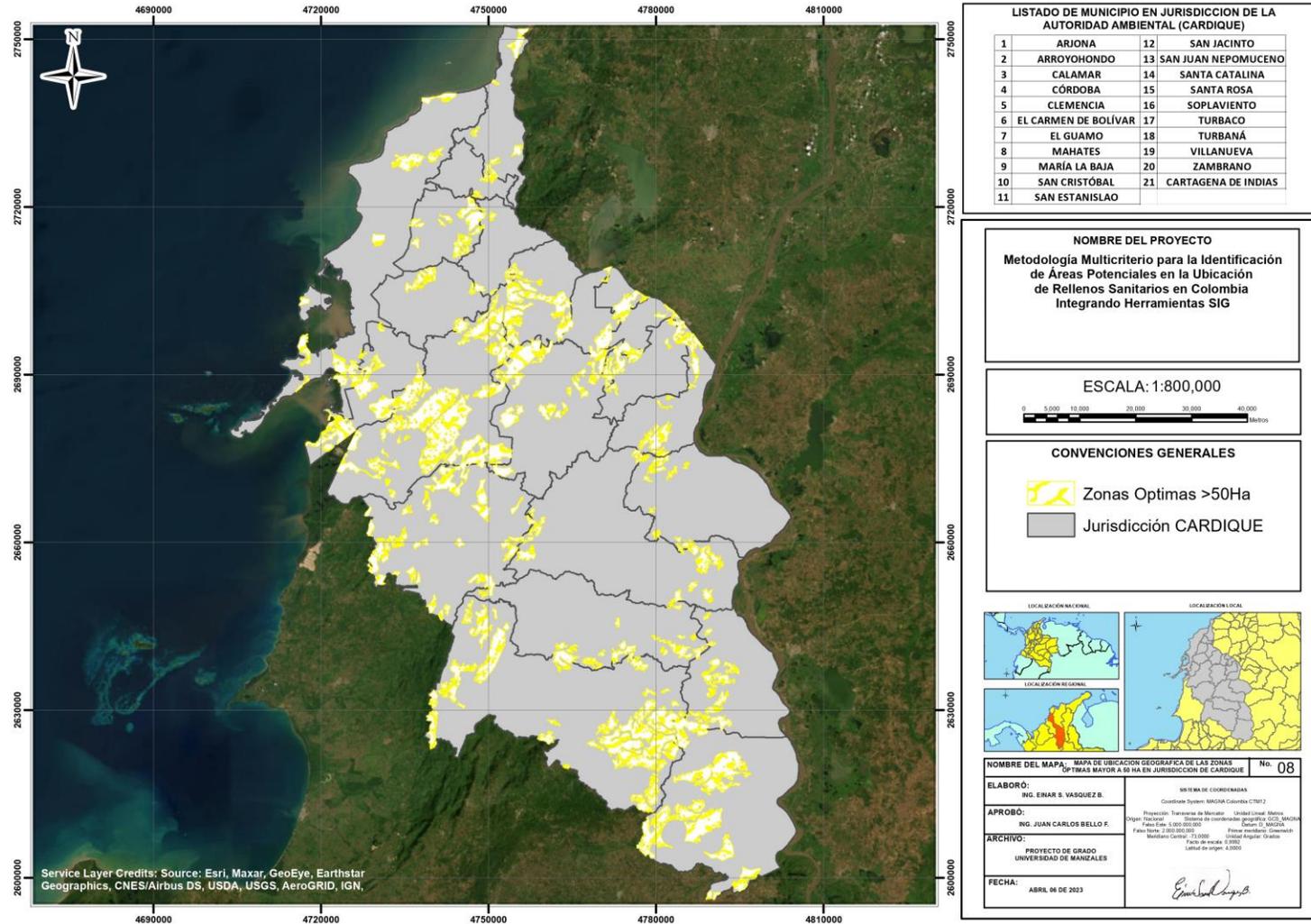
Plancha Cartográfica 13

Localización Geográfica de las Zonas Optimas



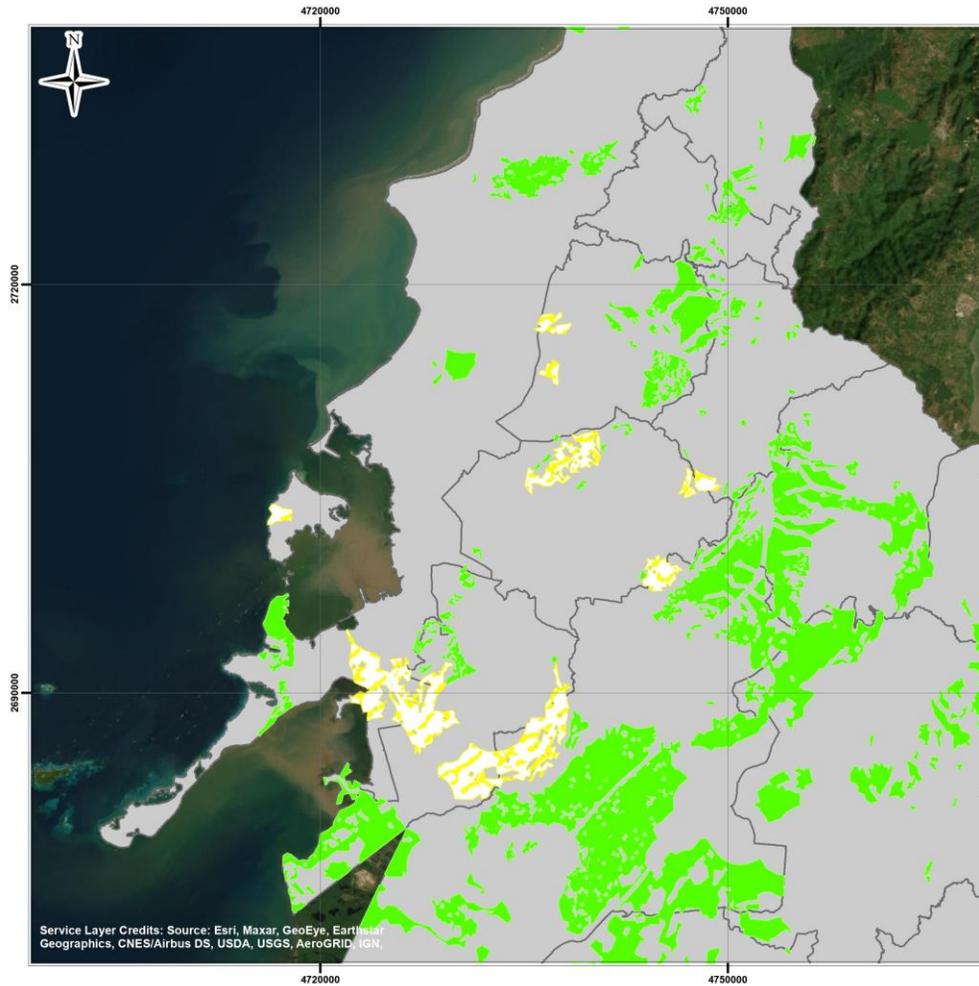
Plancha Cartográfica 14

Localización Geográfica de las Zonas Optimas > 50 Ha



Plancha Cartográfica 17

Localización Geográfica de las Zonas Seleccionadas Detalle



Service Layer Credits: Source: Esri, Maxar, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN,

LISTADO DE MUNICIPIO EN JURISDICCION DE LA AUTORIDAD AMBIENTAL (CARDIQUE)

1	ARJONA	12	SAN JACINTO
2	ARROYOHONDO	13	SAN JUAN NEPOMUCENO
3	CALAMAR	14	SANTA CATALINA
4	CÓRDOBA	15	SANTA ROSA
5	CLEMENCIA	16	SOPLAVIENTO
6	EL CARMEN DE BOLÍVAR	17	TURBACO
7	EL GUAMO	18	TURBANÁ
8	MAHATES	19	VILLANUEVA
9	MARÍA LA BAJA	20	ZAMBRANO
10	SAN CRISTÓBAL	21	CARTAGENA DE INDIAS
11	SAN ESTANISLAO		

NOMBRE DEL PROYECTO
Metodología Multicriterio para la Identificación de Áreas Potenciales en la Ubicación de Rellenos Sanitarios en Colombia Integrando Herramientas SIG

ESCALA: 1:350,000

CONVENCIONES GENERALES

- Zonas _ Seleccionadas
- Zonas _ Optimas
- Jurisdicción CARDIQUE

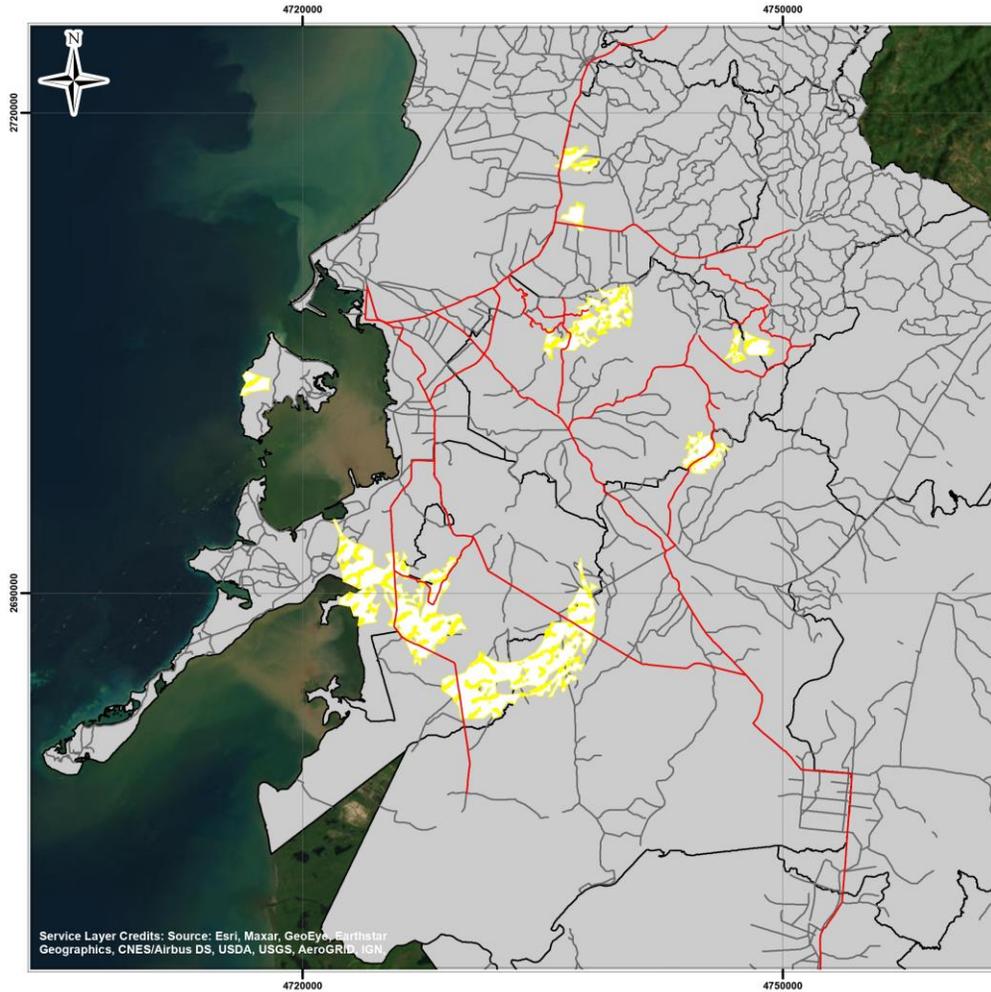


NOMBRE DEL MAPA: MAPA DE UBICACION GEOGRAFICA DE LAS ZONAS SELECCIONADAS EN JURISDICCION DE CARDIQUE **No. 11**

ELABORO: ING. ENAR S. VASQUEZ B.	SISTEMA DE COORDINADAS Coordenadas System MAGNA Colombia CTM12
APROBO: ING. JUAN CARLOS BELLO F.	Proyección: Transversa de Mercator - Unidad Local - Metros Origen: Bogotá - Origen de coordenadas geográficas: UTM - MAGNA Formato: EPS: 31466 (EPS) Esfera: S. Bessel Falso Norte: 2.000.000,000 Proyección: Mercator - Universal Resolución: 30,000 Unidad: Angles - Grados Factor de escala: 0,992 Unidad: Angles - Grados Latitud en origen: 0,992
ARCHIVO: PROYECTO DE GRADO UNIVERSIDAD DE MANIZALES	
FECHA: ABRIL DE 2023	

Plancha Cartográfica 18

Localización Geográfica de las Zonas Seleccionadas con Vías de Acceso

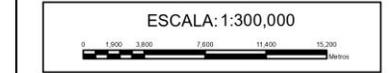


Service Layer Credits: Source: Esri, Maxar, GeoEye, Earthstar
Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN

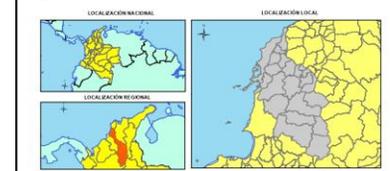
LISTADO DE MUNICIPIO EN JURISDICCION DE LA AUTORIDAD AMBIENTAL (CARDIQUE)

1	ARJONA	12	SAN JACINTO
2	ARROYOHONDO	13	SAN JUAN NEPOMUCENO
3	CALAMAR	14	SANTA CATALINA
4	CÓRDOBA	15	SANTA ROSA
5	CLEMENCIA	16	SOPLAVIENTO
6	EL CARMEN DE BOLÍVAR	17	TURBACO
7	EL GUAMO	18	TURBANA
8	MAHATES	19	VILLANUEVA
9	MARÍA LA BAJA	20	ZAMBRANO
10	SAN CRISTÓBAL	21	CARTAGENA DE INDIAS
11	SAN ESTANISLAO		

NOMBRE DEL PROYECTO
Metodología Multicriterio para la Identificación de Áreas Potenciales en la Ubicación de Rellenos Sanitarios en Colombia Integrando Herramientas SIG



- CONVENCIONES GENERALES**
- Vías_Acceso
 - Zonas_Seleccionadas
 - Vías
 - Jurisdicción CARDIQUE



NOMBRE DEL MAPA: MAPA DE UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LAS ZONAS SELECCIONADAS CON VÍAS DE ACCESO EN JURISDICCION DE CARDIQUE **Nº:** 12

ELABORO: ING. ENAR S. VASQUEZ B.

APROBO: ING. JUAN CARLOS BELLO F.

ARCHIVO: PROYECTO DE GRADO UNIVERSIDAD DE MANIZALES

FECHA: ABRIL 06 DE 2023

SISTEMA DE COORDINADAS:
 Coordenada Sistema: NAD83 Colombia CTM12
 Proyección: Transverso de Mercator Unidad Central Métrica
 Datum: Bogotá 1989
 Datum: Bogotá 1989
 Escala Horizontal: 1:300,000
 Escala Vertical: 1:1000
 Fecha de origen: 2002
 Fecha de origen: 4:0000

Enar S. Vasquez B.