

**PROPUESTA DE UN MODELO DE LOCALIZACIÓN PARA UNA PLANTA DE
TRATAMIENTO DE RESIDUOS PELIGROSOS EN EL VALLE DEL CAUCA**

PAOLA ANDREA GALEANO MARTINEZ
Cód. 1256216
SEBASTIAN CARLOS HURTADO SARRIA
Cód. 1256524



UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
ZARZAL
2017

**PROPUESTA DE UN MODELO DE LOCALIZACIÓN PARA UNA PLANTA DE
TRATAMIENTO DE RESIDUOS PELIGROSOS EN EL VALLE DEL CAUCA**

PAOLA ANDREA GALEANO MARTINEZ
Cód. 1256216
SEBASTIAN CARLOS HURTADO SARRIA
Cód. 1256524

Trabajo de grado presentado para optar el título de Ingenieros Industriales.

Director:
Carlos Alberto Rojas Trejos, M.Sc.



UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
ZARZAL
2017

NOTA DE ACEPTACIÓN

Director

Director

Jurado

Jurado

Zarzal Valle, febrero de 2017.

DEDICATORIA

Gracias a Dios por permitirme vivir esta experiencia y estar siempre a su lado, por llenar mis días de alegrías, fortaleza, paciencia, resistencia y mucha perseverancia. A mis padres por su apoyo incondicional, amor, sabiduría y compañía en todas y cada una de las etapas de mi vida. A mis hermanos y mis abuelos por el apoyo moral que me han brindado.

Paola Andrea Galeano Martinez

Este trabajo de grado se lo dedico a mi familia ya que por ellos soy lo que soy. Para mis padres que por su apoyo, consejos, comprensión, amor, ayuda en todo momento y por brindarme los recursos necesarios para estudiar. Ellos, además me han dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi carácter y mi empeño para conseguir mis objetivos.

Sebastian Carlos Hurtado Sarria

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por ser nuestro guía durante todo este proceso, colmándonos de disciplina y paciencia para llevar a cabo la realización de este trabajo.

A nuestras familias, por creer en nosotros y apoyarnos en todo lo que nos hemos propuesto a lo largo de nuestra vida.

Al profesor Carlos Alberto Rojas Trejos por ser quien direccionó nuestro trabajo y nos brindó todo su conocimiento, comprensión y acompañamiento en cada etapa de este proceso.

A la Universidad del Valle, al coordinador del programa Julián González y a todos los profesores que contribuyeron a nuestra formación académica y profesional.

A nuestros compañeros y amigos, por confiar y creer en nosotros y haber hecho de nuestra etapa universitaria un trayecto de vivencias inolvidables.

A la empresa DH Ecoambiental, por tener la disposición de atender nuestra solicitud, por confiar en nosotros y por proporcionarnos la información necesaria para el desarrollo de este trabajo de grado.

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE TABLAS	8
LISTA DE FIGURAS.	9
LISTA DE ANEXOS.	10
INTRODUCCIÓN	11
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
1. OBJETIVOS	18
1.1 Objetivo general	18
1.2 Objetivos específicos.....	18
2. JUSTIFICACIÓN	19
3.MARCO DE REFERENCIA	21
3.1 ESTADO DEL ARTE	21
3.2 MARCO TEÓRICO.....	26
3.2.1 Localizacion de Instalaciones	26
3.2.2 Localizacion de Instalaciones no Deseables	27
3.2.3 Modelos de localizacion Multiobjetivo	28
3.2.4 Metodos de evaluacion y Decision Multicriterio	30
3.3 MARCO CONCEPTUAL	38
3.4 MARCO LEGAL.....	40
4. DIAGNOSTICO DEL SISTEMA ACTUAL DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS PELIGROSOS EN EL VALLE DEL CAUCA	45
4.1 FUENTES DE GENERACIÓN	45
4.2 TIPOS DE TRATAMIENTO	49
4.3 DESCRIPCIÓN DE LA REGIÓN CASO DE ESTUDIO	50
4.4 ANÁLISIS INTERNO Y EXTERNO DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS PELIGROSOS EXISTENTES EN EL VALLE DEL CAUCA.....	52
5. FACTORES CLAVES QUE INCIDEN EN LA LOCALIZACION DE INSTALACIONES NO DESEABLES	55
6. PROPUESTA METODOLÓGICA.....	64

7. FORMULACION DEL MODELO.	66
7.1 MODELO VERBAL	66
6.1.1 Supuestos	66
6.1.2 Funcion objetivo	66
6.1.3 Conjuntos	66
6.1.4 Variables de decision	66
6.1.5 Parametros	67
6.1.6 Restricciones	67
7.2 MODELO MATEMATICO	68
8. CASO DE ESTUDIO	70
8.1 DESCRIPCION DE PARAMETROS	73
8.1.1 Costos Fijos	73
8.1.2 Costos de Transporte	73
8.1.3 Riesgo Ambiental	75
8.1.4 Rechazo Social	75
8.2 DEFINICION DE PONDERACIONES	77
9. SOLUCIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	82
10. ANALISIS DE SENSIBILIDAD	86
11. CONCLUSIONES	88
12.BIBLIOGRAFÍA.	91
13. ANEXOS.	95

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Escala de preferencias del método AHP	36
Tabla 2. Listado de empresas con licencia ambiental o plan de manejo ambiental- CVC	45
Tabla 3. Criterios para la selección de áreas para la disposición final de residuos sólidos en rellenos sanitarios	58
Tabla 4. Factores de elección de lugares de disposición	61
Tabla 5. Evaluación de artículos de referencia asociados con factores claves en la localización de instalaciones no deseables	62
Tabla 6. Cantidad de residuos peligrosos generada en el Valle del Cauca, según municipio (RPGM) 2014.....	70
Tabla 7. Cantidad de habitantes en los municipios del Departamento del valle del Cauca	76
Tabla 8. Escala de Saaty	78
Tabla 9. Matriz de comparación por pares de criterios-Evaluador 1	78
Tabla 10. Matriz de comparación por pares de criterios-Evaluador 2	79
Tabla 11. Matriz de comparación por pares de criterios-Evaluador 3	79
Tabla 12. Matriz de comparación por pares de criterios- Unificada	79
Tabla 13. Matriz Normalizada	80
Tabla 14. Matriz Normalizada con el vector característico	80
Tabla 15. Máximo valor propio λ_{max}	81
Tabla 16. Indicadores de los criterios	81
Tabla 17. Resultados del modelo.....	83
Tabla 18. Escenarios análisis de sensibilidad.....	86
Tabla 19. Resultados del analisisde sencibilidad.....	87

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Generación de Residuos Peligrosos en el Período 2012 a 2015 (Toneladas).....	13
Figura 2. Municipios según mediano generador de residuos peligrosos, año 2014	14
Figura 3. Municipios según Gran generador de residuos peligrosos, año 2014	15
Figura 4. Árbol de Jerarquías.....	33
Figura 5. Cantidad de Desechos generados por cada tipo de Residuo Peligroso .	50
Figura 6. Extensión Territorial de las Subregiones del Departamento del Valle Del Cauca (Km ²)	51
Figura 7. Descomposición del modelo de capacidad de acogida	57
Figura 8. Distancia más corta desde la posible localización de la planta hasta un generador de residuos peligrosos.....	74
Figura 9. Ubicación geográfica de la planta de tratamiento de residuos peligrosos	83
Figura 10. Mapa de la localización óptima para la planta de tratamiento	84

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Datos parametros Costos.....	95
Anexo B. Datos Cantidad de residuos peligrosos.....	95
Anexo C. Datos Poblacion de los municipios del valle del cauca	95
Anexo D. Archivo Modelo AMLP.....	95
Anexo E. Archivo de Datos para la solución del modelo.....	95
Anexo F. Archivo de comandos	95
Anexo G. Solución de modelo original	96
Anexo H. Solución de escenario 1 del análisis de sensibilidad.....	97
Anexo I. Solución de escenario 2 del análisis de sensibilidad	98
Anexo J. Solución de escenario 3 del análisis de sensibilidad	99
Anexo K. Solución de escenario 4 del análisis de sensibilidad	100

INTRODUCCIÓN

El desarrollo constante de los sectores económicos en Colombia ha generado una forma de vida consumista y por ende se ha dado un mayor impacto en el medio ambiente. En la actualidad las empresas del sector industrial, sector automotriz y sector hospitalario han incrementado su producción de residuos peligrosos, causando un alto riesgo y múltiples efectos en la calidad de vida, conservación del ambiente y ganancia de las industrias, debido al inadecuado proceso de recolección, transporte, almacenamiento y disposición final que se les brinda a estos.

El constante incremento en la generación de residuos peligrosos generados por la actividad industrial, conlleva a la necesidad de establecer centros especializados para su tratamiento y posterior disposición final, siendo indispensable identificar técnicas adecuadas para localizar de manera óptima estas instalaciones. Sin embargo, a pesar de que este tipo de instalaciones presenta un peligro potencial tanto para la población cercana como para el medio ambiente, son un componente inevitable por el estilo de vida actual. (Bronfman & Garrido, 2003).

Para localizar una instalación no deseable es necesario tener en cuenta el concepto de sostenibilidad, no solo por los impactos al medio ambiente que se pueden mitigar, sino también porque es necesario diseñar alternativas viables que generen una ganancia para la población; por esto es necesario que la estrategia de localización se base en la formulación de una serie de principios y magnitudes generales de eficiencia y equidad que permitan realizar la búsqueda y determinación de los lugares más adecuados para localizar estas instalaciones.

De acuerdo con el impacto que genera la localización de este tipo de instalaciones, tanto para la comunidad como para las industrias, es necesario tener claro que lo ideal es que se localice lo más lejos posible para evitar las externalidades negativas en la población y lo más cerca posible para lograr algún tipo de eficiencia operativa, lo cual conlleva a un problema de carácter multiobjetivo (Medina & Serna, 2008).

La localización de instalaciones no deseables es considerada una decisión estratégica importante que debe contemplar una organización, por ende, la localización de una planta de tratamiento de residuos peligrosos tiene como finalidad determinar la ubicación óptima de esta instalación a partir de la definición de un conjunto de alternativas, comparando su desempeño respecto a dimensiones en conflicto.

Con base en lo anterior, el presente proyecto busca proponer un modelo multiobjetivo de localización de una planta de tratamiento de residuos peligrosos (RESPEL) en el Valle del Cauca con fin de determinar el mejor sitio para la disposición de este tipo de materiales, para ello inicialmente se realizará una

descripción de la problemática enmarcada en la generación de residuos peligrosos, adicionalmente se determinará el objetivo general y los objetivos específicos que se pretendan desarrollar con el estudio de investigación; a partir de estos se realizará un análisis de los diversos trabajos desarrollados en torno a la problemática de interés teniendo en cuenta la identificación de los modelos de localización y los factores críticos analizados así como las estrategias de solución empleadas por los autores.

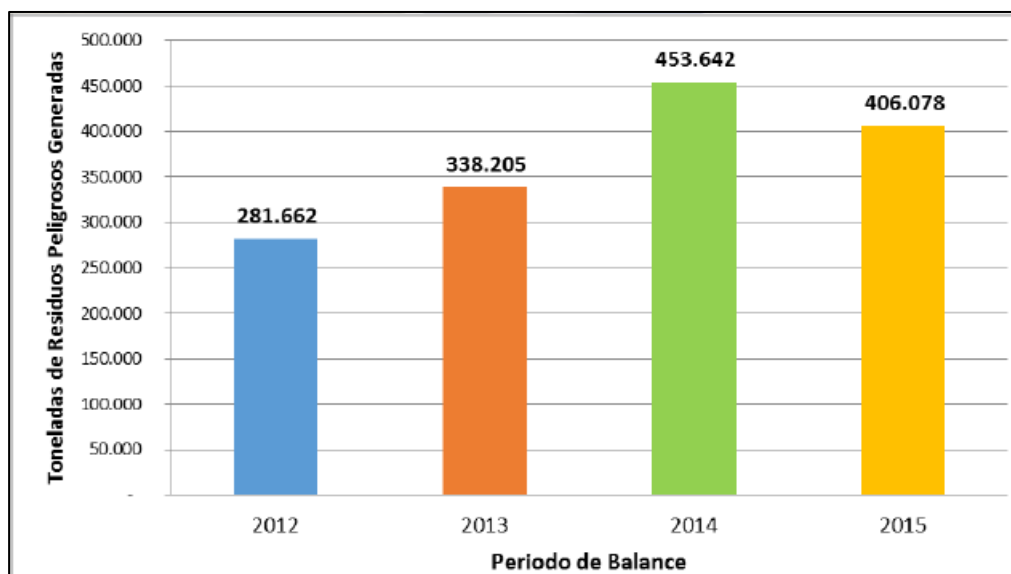
Finalmente, se presentará la propuesta metodológica que describe las actividades encaminadas al logro de los objetivos específicos del proyecto.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El crecimiento económico en la región se debe al desarrollo y avance de las actividades que realizan las industrias. Sin embargo, éstas son causantes de todo tipo de contaminación debido a la generación de residuos peligrosos que están desechan. A medida que la industrialización se torna más indispensable en el campo productivo, se hace necesario tomar acciones y generar alternativas de solución que permitan mitigar los efectos negativos de los desechos industriales.

En el año 2015, según el Informe Nacional de Generación y Manejo de Residuos o Desechos Peligrosos (2016), Colombia genero 406.078,2 toneladas de residuos o desechos peligrosos, cifra inferior a la generada en el 2014, pero superior a la generada en los años 2013 y 2012 respectivamente (ver Figura 1). Se estima que la disminución de las cantidades reportadas para el año 2015 con respecto al año 2014, pueden atribuirse a una menor actividad de extracción de petróleo crudo, código CIU 0610.

Figura 1. Generación de Residuos Peligrosos en el Período 2012 a 2015 (Toneladas)



Fuente: Informe Nacional de Generación de Residuos o Desechos Peligrosos, Colombia

Además, cabe resaltar que las mezclas y emulsiones de desechos de aceite y agua o de hidrocarburos y agua (Y9+A4060) son los residuos o desechos peligrosos que más se generan en el país, seguidas por la corriente de aceites minerales no aptos para el uso al que estaban destinados (Y8+A3020) y la corriente de desechos clínicos y afines (Y1+A4020). En 2015, la primera representó el 53,5% del total de residuos generados, la segunda el 11,8% y la tercera el 8,3%.

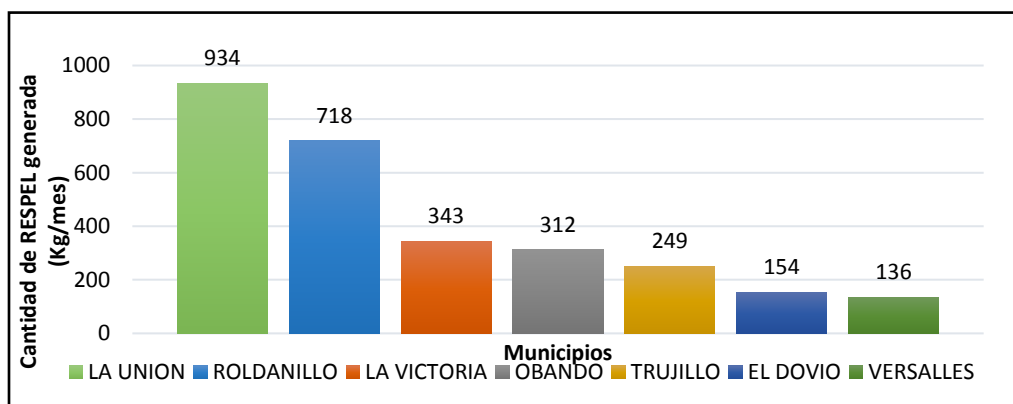
Otras corrientes con una cantidad menos significativa de generación en 2015 son: los residuos peligrosos resultantes de las operaciones de eliminación de desechos

industriales (Y18) que representaron el 3,6% de la generación, los desechos resultantes de la utilización de dispositivos de control de la contaminación industrial para la depuración de gases industriales (A4100) con un 2,7%, los desechos que tengan como constituyentes plomo y compuestos de plomo (Y31) con un 1,9%, los líquidos de desecho del decapaje de metales (A1060) aportaron el 1,3%, los 27 desechos resultantes de la producción, preparación y utilización de tintas, colorantes, pigmentos, pinturas, lacas o barnices (Y12) representaron el 1.3% y los desechos metálicos y desechos que contengan aleaciones de cualquiera de las sustancias siguientes: Antimonio, Arsénico, Berilio, Cadmio, Plomo, Mercurio, Selenio, Telurio, Talio (A1

En cuanto a la generación de residuos o desechos peligrosos en el Valle del Cauca, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), mediante información solicitada para el presente documento, registro 15.148 Toneladas de residuos peligrosos generados por los municipios que reportaron en el año 2014, cabe notar que la información proporcionada por el IDEAM, es la más actual.

En el Decreto 4741 de 2005 se clasifican los generadores de residuos o desechos peligrosos en tres categorías de acuerdo a la cantidad de residuos generados, por esto, los municipios que según la cantidad de residuos peligrosos reportada, este entre los 100 Kg y 1.000 Kg se considera un mediano Generador. De acuerdo con esto, en la figura 2 se observa que los municipios más distintivos como mediano generador son, La Union y Rodanillo; con 934 Kg y 718 Kg respectivamente.

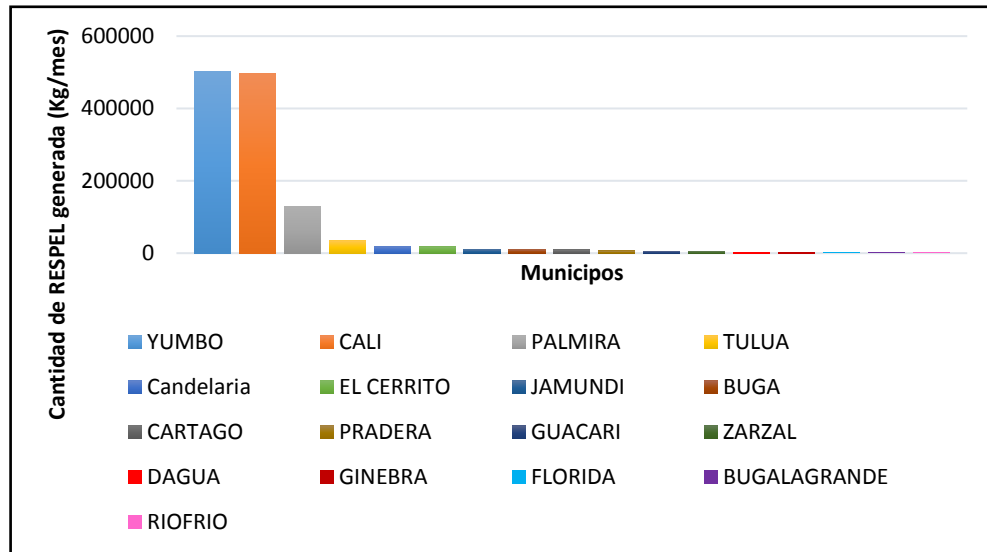
Figura 2. Municipios según mediano generador de residuos peligrosos, año 2014



Fuente: Informe Nacional de Generación de Residuos o Desechos Peligrosos, Colombia

En lo que respecta al gran generador, la cantidad de residuos peligrosos debe de ser de mayor o igual a 1000 Kg. En la figura 3, los municipios de Yumbo y Cali, son los que generan la mayor cantidad de residuos, 502.667 Kg/mes y 495.877 Kg/mes, respectivamente.

Figura 3. Municipios según Gran generador de residuos peligrosos, año 2014



Fuente: Informe Nacional de Generación de Residuos o Desechos Peligrosos, Colombia

- **Impactos ambientales generados por los residuos peligrosos**

Según el Plan departamental para la gestión integral de residuos o desechos peligrosos, CRQ (s.f), el medio ambiente natural es proveedor de materias primas para la manufactura de la mayor parte de los productos que se consumen, pero al mismo tiempo se convierte en el receptor de los desechos producidos por las actividades propias del ser humano.

Los residuos peligrosos dispuestos sin ningún tipo de tratamiento desencadenan una serie de impactos negativos al agua, el aire y suelo, recursos que se convierten en receptores de los mismos ocasionando problemas de salubridad a la población.

El inadecuado manejo de los residuos peligrosos genera una gran cantidad de impactos ambientales, los cuales se pueden definir de la siguiente forma:

- ✓ Impactos para la Salud: El inadecuado manejo de los residuos origina proliferación de vectores, como: roedores, algunas aves e insectos transmisores de enfermedades.
- ✓ Impactos sobre la Seguridad Personal: Están asociados a la posibilidad de explosiones y/o fuegos incontrolados. Para las personas involucradas en la recuperación y el reciclaje, puede ocasionarles pinchazos, quemaduras con residuos irritantes e infecciones de cualquier índole.
- ✓ Contaminación del Aire: Problemas relacionados con los malos olores, gases y material particulado generado por quemas.

- ✓ Contaminación del Recurso Hídrico: La disposición de los residuos peligrosos de forma directa a los cuerpos de agua como ríos, quebradas, lagos y demás, ocasionan la pérdida de oxígeno, vital para la vida acuática, además de que genera un impacto visual, también puede generar problemas de salud a la comunidad.
- ✓ Contaminación de Aguas Subterráneas: Está asociada a los botaderos a cielo abierto y con el mal manejo de los rellenos sanitarios que generan el denominado Lixiviado (jugo producto de la descomposición de materia orgánico mezclado con sustancias peligrosas), se caracteriza por el color oscuro. Este se puede filtrar por el suelo y contaminar las fuentes hídricas subterráneas y a su vez las superficiales y pueden afectar la calidad del recurso hídrico y la salud humana y animal.
- ✓ Contaminación Visual: Está relacionado con el impacto visual, es decir, si algún sitio, zona o paisaje en el cual se realice una inadecuada disposición de residuos peligrosos puede afectar la salud de los individuos. Ejemplo: botaderos a cielo abierto, grafitis, entre otros.

Según el Informe Nacional de Calidad del Aire (2016), el estado de la calidad del aire es un factor importante que influye en la salud y en el bienestar de las personas. Su deterioro se relaciona con los efectos de las emisiones de contaminantes a la atmósfera, provenientes de fuentes de diferentes clases y orígenes, las cuales son causadas por la actividad humana o natural. Entre estas se destacan las fuentes fijas asociadas principalmente a los procesos industriales y de manufactura; las fuentes móviles que se relacionan con actividades de transporte y las fuentes naturales que involucran los incendios forestales, la actividad volcánica, la erosión, entre otros.

Además, de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (2016), el 23% de las muertes a nivel mundial están relacionadas con causas medioambientales (esto representa unas 12,6 millones de muertes al año, de las cuales menos de un millón se reportaron en toda América) y aproximadamente 2 millones de muertes son atribuibles a la contaminación del aire intra y extra mural.

Por consiguiente, los residuos peligrosos que se derivan de las actividades industriales, de servicios y agrícolas son causantes de daños en el medio ambiente y en la salud de las personas; debido a que presentan una inadecuada disposición; como también, la falta de instalaciones y tecnologías necesarias para el procesamiento y tratamiento que estos requieran. Por esto, las instalaciones de tratamiento de residuos peligrosos son necesarias en el sector, sin embargo, cuando se desea localizar, se deben considerar las externalidades positivas y negativas que generen este tipo de instalaciones en el sector involucrado. De esta

forma, es necesario definir los factores más relevantes que intervienen en la localización de instalaciones no deseables, ya que las plantas de tratamiento de este tipo de residuos generan impacto en las industrias que desechan estos residuos, la sociedad y el medio ambiente que giran alrededor de la instalación objeto de estudio.

Con base en lo anterior, la pregunta primordial que pretende abordar el desarrollo del presente proyecto puede definirse de la siguiente manera: ¿Cuál es la localización óptima de una planta de tratamiento de residuos peligrosos considerando un ambiente de múltiples objetivos en el departamento del Valle del Cauca que facilite el proceso de toma de decisiones en torno a esta problemática?

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Proponer un modelo de localización para una planta de tratamiento de residuos peligrosos en el departamento del Valle del Cauca que contribuya a la minimización de impactos ambientales enmarcados dentro del concepto de sostenibilidad.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Realizar un diagnóstico del sistema actual de tratamiento de residuos sólidos peligrosos en el departamento del Valle del Cauca.
- Identificar los factores claves que inciden en la localización de instalaciones no deseadas.
- Formular un modelo de localización que integre los factores críticos analizados.
- Validar el modelo propuesto a partir de un análisis de sensibilidad.

2. JUSTIFICACIÓN

En Colombia, los sectores económicos representan un crecimiento a lo largo de los años, lo cual se observa en la variedad de productos y servicios disponibles y útiles en el mercado. Sin embargo, este crecimiento afecta negativamente al medio ambiente, ya que las empresas son las principales generadoras de residuos.

Es importante y necesario para las empresas reconocer el tipo de residuos que estas generan, porque de acuerdo a su clasificación ya sea peligroso o no peligroso, se realiza el tratamiento adecuado que logre minimizar el impacto negativo causado.

Las instalaciones generadoras de residuos peligrosos deben de realizar el tratamiento correspondiente o contratar con terceros, el adecuado proceso de modificación de las características de peligrosidad que los diferencian, minimizando así los riesgos en la salud de las personas y el medio ambiente.

En el Art 10, literal A y K, del Decreto 4741 de 2005, el gobierno nacional a través del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, el Ministerio de Protección Social y el Ministerio de Transporte, señalan que el generador debe garantizar la gestión y manejo integral de los residuos o desechos peligrosos que genera y debe por obligación contratar los servicios de almacenamiento, aprovechamiento, recuperación, tratamiento y/o disposición final, con instalaciones que cuenten con las licencias, permisos, autorizaciones o demás instrumentos de manejo y control ambiental a que haya lugar, de conformidad con la normatividad ambiental vigente.

Para el año 2014, algunos municipios del Valle del Cauca reportaron ante el IDEAM 15.148.513,4 kilogramos de residuos peligrosos generados por las empresas productivas y de servicios inmersas en el departamento. Cabe notar que a pesar de que no todos los municipios del departamento reportaron sus residuos peligrosos, la cantidad es considerable.

Según el listado de empresas con licencia ambiental o plan de manejo ambiental de la CVC para el manejo de residuos peligrosos(2016), se encuentran en regla 35 empresas ubicadas en el pacífico, norte, suroccidente y suroriente del departamento del Valle del Cauca, las cuales realizan algún tipo de tratamiento a diferentes residuos peligrosos; sin embargo la mayoría estas empresas realizan el proceso de incineración, siendo este objeto de críticas desde el punto de vista medioambiental debido a la formación de sustancias muy tóxicas, dioxinas y furanos, que junto a diferentes metales pesados pueden ser emitidos por estas instalaciones.

En la actualidad, las empresas generadoras de residuos peligrosos deben de incurrir en costos adicionales, debido a que tienen que dirigirse a municipios extremos del departamento o inclusive a otros departamentos para recibir el tratamiento y disposición final de sus residuos.

Por lo tanto, es de vital importancia localizar en el departamento del Valle del Cauca, una instalación de tratamiento de diversos desechos o residuos peligrosos, la cual brinde beneficios económicos a la empresa generadora y beneficios ambientales y

de salubridad a la población incluyente en la zona. Para esto, se debe contemplar que la decisión del lugar óptimo para una instalación no deseable, requiere involucrar factores que incidan en el desarrollo de las operaciones, ya que es necesario reconocer el impacto productivo, ambiental y social que se va a generar dentro del espacio geográfico delimitado.

Con base en lo anterior, el presente trabajo se orienta en proponer un modelo que permita determinar la localización óptima de una planta de tratamiento de residuos peligrosos considerando un ambiente de múltiples objetivos en el departamento del Valle del Cauca.

3. MARCO DE REFERENCIA

3.1 ESTADO DEL ARTE

Los problemas de localización de instalaciones, hacen parte de las decisiones estratégicas a la cual se enfrentan las empresas en la actualidad. Por esto, es necesario realizar un análisis crítico y de gran profundidad que permita encontrar la ubicación óptima, que a su vez permita diseñar una eficiente cadena de suministro dentro de la compañía. (Daskin et al., 2003). Encontrar la ubicación óptima de una instalación en un problema de decisión de carácter estratégico sugiere establecer criterios, donde luego de ser evaluados, contribuyan a determinar el lugar de ubicación de la instalación teniendo en cuenta las externalidades consecuentes de la actividad realizada por la misma.

Para definir la ubicación de una instalación que garantice el máximo beneficio a la población, es necesario considerar el tipo de externalidad espacial que cada instalación produce en su entorno inmediato, ya sea externalidad positiva o negativa. No obstante, se puede clasificar las instalaciones de servicios en dos grandes tipos: las instalaciones deseables (los colegios, hospitales) y las no deseables (plantas de tratamiento RESPEL, rellenos sanitarios). (Bosque et al., 1995). De acuerdo con esto, los modelos de localización pueden diferir en su función objetivo, ya que se pueden contemplar los costos, los efectos en la población y el medio ambiente. Cuando se involucra más de un objetivo se procede a realizar una adecuada optimización multiobjetivo.

Los problemas de localización de instalaciones no deseables se pueden abordar desde las técnicas de análisis multicriterio con el fin de buscar una solución de compromiso entre la minimización de las distancias entre productores e instalaciones y la maximización de las distancias entre la población y las instalaciones, donde esto concierne a lo que se denomina eficiencia espacial. Por otra parte, la justicia espacial se mide por el grado en que la población de una región determinada comparte los riesgos y molestias que dichas instalaciones representan. (Bosque et al., 1995).

A continuación se describen las investigaciones que se han encontrado en torno al problema de localización de instalaciones no deseables desde el punto de vista multiobjetivo y multicriterio.

En la vida real, el problema de localizar una instalación no deseable y/o peligrosa es claramente un problema de decisión multiobjetivo donde dentro de la región factible existirán zonas prohibidas, como parques naturales protegidos, lagos, zonas de seguridad, entre otras. En este sentido, el artículo de Mehrez, Sinuany-Stern y Stulman (1983) consideran una función objetivo ponderado que combina los criterios MINIMAX y MAXIMIN y utilizan la distancia rectangular, desarrollando una

metodología que genera una gráfica de la localización óptima para cualquier peso y obtiene el conjunto de puntos eficientes.

Por otra parte, el trabajo realizado por Erkut y Neuman (1992) muestra el desarrollo de un modelo multiobjetivo que describe las ventajas y desventajas que tienen lugar cuando la localización de una o más instalaciones indeseables brinda servicios a una región. El modelo tiene como objetivos minimizar el costo total de las instalaciones ubicadas, la oposición total a las instalaciones, y la desutilidad máxima impuesta a cualquier individuo. La Oposición y desutilidad supone la disminución no lineal de las funciones de distancia, y el aumento de las funciones del tamaño de la instalación. Los autores formularon un modelo de programación lineal entera mixta multiobjetivo y generaron un conjunto de soluciones eficientes utilizando un algoritmo de enumeración. Por último, llevaron a cabo un ejemplo en el cual se ilustró el equilibrio entre los tres objetivos, que son inevitables en una ubicación.

Según Plastria y Carriboza (1999) una instalación indeseable se encuentra dentro de alguna región factible dentro del plano en el cual existe un número finito de puntos donde se concentra la población afectada. Por ende, consideran dos criterios: el primero es maximizar el radio de influencia de la población, en el cual se tiene en consideración la distancia desde la población afectada hasta la instalación no deseable, y el segundo es minimizar el área de influencia de la instalación. Para determinar todas las soluciones no dominadas se utilizan algoritmos polinomiales de baja complejidad.

También en el mismo año, Bosque et al., plantean un procedimiento de selección de lugares candidatos para la ubicación de instalaciones de tratamiento y/o eliminación de residuos, el cual consiste en la utilización de un sistema de información geográfica (SIG) y técnicas multicriterio, considerando factores como la eficiencia, la cual incluye los aspectos económicos y sociales; y la justicia espacial. Por esto, se debe obtener el nivel de adecuación del territorio para la localización de plantas de tratamiento, a través del método del Análisis de Punto Ideal y luego seleccionar el conjunto de píxeles contiguos que se configuran como los más adecuados y que además, cumplen los requisitos de área mínima requerida para cada una de las instalaciones; para así tener los posibles lugares a ubicar. De acuerdo con lo planteado por los autores, los procedimientos de tratamiento de la información geográfica facilitan la solución de problemas de localización ya que se realizan con una mayor rapidez y no es complejo; no obstante los resultados alcanzados son simplemente una primera aproximación al tema, la decisión final definitiva exige un estudio pormenorizado de los lugares candidatos elegidos para ordenar y cuantificar la posición de cada uno de ellos.

Colebrook, Gutiérrez y Sicilia (2003) estudian el problema de localización de un servicio no deseado en una red no dirigida y conexa, considerando el criterio anti-cent-dian. Este criterio representa la combinación convexa del centro no deseado

(maximizar la mínima distancia) y de la mediana no deseada (maximizar la suma de distancias), ósea los criterios maximin y maxisum. Se presenta un procedimiento eficiente para determinar el punto de localización deseado.

Guerrero, Saameño y Muñoz (2003), presentan un modelo general de localización que engloba a los habituales y permite la utilización de otros. Además permiten tratar todos estos problemas, a nivel teórico, con un método único tanto si se trata de criterios distintos como si se utilizan diferentes normas. Para visualizar los resultados en modelos reales y ejemplos en caso particulares se presentan rutinas en Matlab.

Reconociendo la naturaleza multiobjetivo para resolver este tipo de problemas, Bronfman y Garrido (2003) consideran que la minimización de múltiples objetivos, como lo son: los costos asociados al transporte e implementación de Centros de Tratamiento, el número esperado de accidentes en el proceso de descarga y la consecuencia asociada a estos accidentes, se pueden resolver utilizando la metodología multicriterio y de programación multiobjetivo identificando un conjunto de alternativas no-dominadas para la localización de centros de tratamiento para los distintos cortes temporales considerados. De acuerdo con el estudio realizado la incorporación de nuevos centros de tratamiento en cada configuración presentó una lógica consecuente a través del tiempo, demostrando a través de los resultados que la metodología propuesta es una herramienta viable y puede proporcionar información útil para los tomadores de decisión al seleccionar la localización de un centro de tratamiento.

Por otro lado, Yapicioglu, Smith y Dozier (2007) en su trabajo de investigación, introducen un nuevo modelo para el problema de localización de instalaciones no deseables. El nuevo modelo se compone de una función Minisum ponderada en el cual se representan los costos de transporte y una función a trozos basada en la distancia quien a su vez sirve para representar los efectos indeseables de la instalación. Para resolver el problema los autores diseñaron métodos y algoritmos de optimización, como lo es la optimización por enjambre de partículas (PSO) para un solo objetivo y también PSO para dos objetivos. Los resultados se compararon en un conjunto de instancias de prueba y muestran que el PSO de dos objetivos produce un conjunto diverso de soluciones no dominadas de manera más eficiente que el PSO de un solo objetivo y es competitivo con los mejores resultados de la literatura.

Según Medina y Cerda (2007) es necesario analizar los principios y estructuras de modelación de localización óptima de actividades indeseables, al igual que realizar una revisión de criterios de “eficiencia espacial” en la localización, y “justicia espacial” en la distribución de externalidades. Para los autores, la eficiencia se logra con modelos de localización-asignación, optimizando el costo total y para la justicia se calibran curvas de rechazo con métodos econométricos. Finalmente, para

optimizar las alternativas tanto económicas como sociales, ellos utilizan una estructura multiobjetivo ponderada.

Guerrero (2007) en su tesis, aborda el problema de localización de centros no deseados en el plano real, restringiendo el conjunto de soluciones factibles a una región cerrada y acotada, donde se pondera el daño infringido en cada población y el efecto nocivo que se propague radialmente con diferentes intensidades en cada dirección. Este autor presenta un modelo que integra los problemas correspondientes a los criterios “maximin” y “maxisum” desde el cual es posible resolver cualquiera de ellos e incluso cualquier otro obtenido a través de la especificación de un criterio dentro de una amplia familia, obteniendo así una teoría unificada que permitirá aplicar una línea de razonamientos común.

Además, Bosque, Gómez y Palm (2007) desarrollan un modelo integrador MinMaxSum que combina un modelo MiniSum con otro MaxiSum; este nuevo modelo incluye los criterios de localización y asignación, los cuales son utilizados para medir la eficiencia espacial de las localizaciones seleccionadas. El modelo MinMaxSum tiene como objetivo obtener las mejores localizaciones que aseguren el mínimo impacto posible sobre la población y que, por otra parte, satisfagan los requerimientos de los demandantes de los servicios que prestan este tipo de instalaciones. Por lo tanto, para dar solución al modelo se debe utilizar el procedimiento de Punto Ideal junto con el algoritmo de Teitz y Bart, lo cual permite obtener la mejor solución al problema de localización. Los autores para comprobar la efectividad del modelo, realizan una comparación entre los modelos MiniSum, MaxiSum y MinMaxSum con los datos del caso de estudio, lo cual pudieron concluir que el modelo propuesto, MinMaxsum, se puede considerar mejor desde los dos puntos de vista, es decir, por un lado disminuye la distancia a la demanda y por el otro, aumenta la suma de las distancias a la población.

Tuskaya et al. (2008) abordan el problema de selección del sitio de la instalación no deseada, mediante el proceso analítico en red (ANP), una técnica de toma de decisiones multicriterio. La técnica ANP permite tener en cuenta criterios tanto cualitativos como cuantitativos, así como las interdependencias y evaluaciones. Una serie de criterios (beneficios, oportunidades, costos y riesgos) y sus subcriterios se consideran para la ubicación de la instalación.

Mena et al. (2010) realizan la comparación de dos métodos de evaluación multicriterio (EMC), como lo es, la sumatoria lineal ponderada y la sumatoria lineal ponderada ordenada, las cuales son aplicadas en la evaluación de sitios idóneos para la localización óptima de un relleno sanitario. Los autores utilizaron un sistema de información geográfica (SIG) ráster y una base de datos cartográfica digital de la comuna. La evaluación de los distintos criterios se realizó a través del método de las jerarquías analíticas (MJA), lo que permitió definir la importancia relativa de cada criterio dentro de la evaluación. Los resultados obtenidos muestran claras

diferencias entre los modelos generados por cada uno de los métodos, representando distintos escenarios de decisión.

Más adelante, Song, Morrison y Daeko (2013) examinaron las características de los fenómenos NIMBY los cuales se refieren a los fenómenos sociales en el que los residentes se oponen a la construcción o la ubicación de las instalaciones no deseables cerca de sus hogares. También sugirieron dos modelos matemáticos de optimización de alternativas, los cuales tienen el objetivo de minimizar el grado total de sentimientos NIMBY. Los autores realizan una estructura objetiva que permite abordar el hecho de que los residentes que albergan la planta en su localidad absorben todos los costos ambientales, mientras que los residentes de otros lugares disfruten de los beneficios de la instalación. Por esto, se proponen algoritmos genéticos para resolver modelo de programación lineal y no lineal enteros, que busca minimizar el costo de localización y asignación de nodos de clientes a NIMBY, sujeto a una condición de radio máximo de servicio. Los resultados obtenidos a través de algoritmos genéticos para los modelo de programación lineal enteros se comparan con los de CPLEX para evaluar su rendimiento.

En el mismo año, Manyoma, Pardo y Torres (2013) proponen una metodología de selección, la cual determina el sitio propicio de depósitos internos para residuos sólidos hospitalarios. Los autores se basaron en técnicas multicriterio (Analytic Hierarchy Process, AHP, y Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, TOPSIS), que luego de ser analizadas, se comparan y se elige la mejor alternativa de localización. La metodología empleada, se desarrolla en un centro de salud de Santiago de Cali, Colombia. En el caso de estudio se observa, la implementación paso a paso de la metodología, la complementariedad de las dos técnicas usadas, lo cual permite robustecer la toma de decisiones a partir de las relaciones que se forman por las opiniones de los involucrados entre los criterios principales de evaluación y las alternativas posibles de localización.

Varón, Orejuela y Manyoma (2015) realizan una investigación la cual tiene como objetivo central representar la localización de estaciones de transferencia, las cuales son instalaciones que están dedicadas al manejo y traslado de Residuos Sólidos Urbanos o Municipales; a través de un modelo de programación lineal entera mixta, que tiene en cuenta las principales características de las estaciones, como la capacidad total y la capacidad de recuperación de materiales. La función objetivo formulada por los autores, busca reducir al mínimo los costos fijos de apertura, los costos de transporte y los costos de operación, evaluados en el momento actual a través de una función de costo presente equivalente.

Finalmente, Manyoma, Torres y Vidal (2015) proponen una investigación la cual tiene como objetivo general desarrollar una metodología para localizar rellenos sanitarios, teniendo en cuenta los múltiples objetivos que se deben cumplir en un esquema regional de disposición final de Residuos Sólidos Municipales en áreas

urbanas de rápido crecimiento. Para ello establecieron tres fases metodológicas: Construcción de la línea base de investigación, diseño de la estructura de modelación y evaluación a escala real. El principal resultado de la primera fase, además de los enfoques generales, fue obtener los criterios que deberían ser usados según el momento en la línea de tiempo en que se encuentre la decisión. Para ello, en la etapa 1 se identificaron los criterios relacionados con los requerimientos políticos y jurídicos, para la etapa 2, se aborda la identificación de los sitios posibles o idoneidad del sitio, y en la etapa 3 los criterios que deben determinar la selección del sitio final, siendo este último el centro de la investigación. Para el diseño de la estructura de modelación, se conformó un grupo de expertos que a través de un instrumento de recolección de información basada en herramientas de decisión multicriterio, pudiera entregar sus preferencias acerca de los criterios conformantes de la etapa 3. Los principales productos obtenidos fueron el vector peso de las preferencias y las relaciones de los diferentes tipos de decisión con las funciones de desempeño más representativas: Inductores de Riesgo Ambiental, Impacto Social y Tarifa a pagar por el servicio prestado. La evaluación en una escala mayor, utilizó los tipos de decisión encontrados en la anterior fase, para presentar un desarrollo real en la selección de un sitio para la localización de rellenos sanitarios regionales.

3.2 MARCO TEÓRICO

En el presente apartado se exponen los diferentes aspectos teóricos que giran en torno al problema de localización de instalaciones no deseadas, los cuales guían el desarrollo del presente proyecto.

3.2.1 LOCALIZACION DE INSTALACIONES

Los problemas de localización se plantean y se estudian desde el siglo XVII; a grosso modo, estos problemas consisten en buscar la mejor ubicación posible para ubicar una instalación que afecta o afectará a determinados núcleos de población (Guerrero, 2007).

Las decisiones sobre localización son muy importantes ya que entrañan una movilización considerable de recursos financieros a largo plazo y además son decisiones que afectan a la capacidad competitiva de la empresa, así una buena elección favorecerá el desarrollo de las operaciones de forma eficiente, mientras que una incorrecta impondrá considerables limitaciones a las mismas (Carro y González, s.f.).

Si el deseo de cada una de las poblaciones colindantes es que el centro a ubicar quede lo más cerca posible de ella, entonces se hablara de problemas de localización propiamente dichos o problemas de localización de centros deseados como por ejemplo, servicios de emergencia (policía/bomberos/ ambulancias),

grandes almacenes/superficies, colegios, entre otros. En el caso contrario, ciertas características perjudiciales de algunos centros de servicios pueden hacer que las poblaciones colindantes tengan interés en que se ubique lo más lejos y menos perjudicial posible, como sucedería si el centro a instalar es potencialmente peligroso, altamente contaminante, detestable o nocivo, como por ejemplo, las prisiones, bases militares, basureros, plantas depuradoras, reactores nucleares, centrales químicas, o plantas industriales. A este tipo de problemas se les denomina problemas de localización de centros no deseados (Guerrero, 2007; Colebrook, Gutiérrez y Sicilia, 2003). Este último tipo de localización constituye el marco del trabajo a tratar.

3.2.2 LOCALIZACIÓN DE INSTALACIONES NO DESEABLES

Las instalaciones no deseables producen numerosas reacciones de la población ante su proximidad espacial: desde la oposición a que tales servicios se instalen en las cercanías de su domicilio, reacciones sintetizadas en las expresiones "No en mi patio trasero" (NIMBY por las siglas en inglés, 'Not in My Backyard') o "Uso del suelo localmente indeseable" (LULU, 'Locally Unwanted Land Use'), hasta la negativa absoluta a la creación de tales centros en ningún lugar, al considerar, por ejemplo, que es necesario llevar a adelante políticas de reciclado absoluto y nula producción de residuos (BANANA, 'Build Absolutely Nothing at AU Near Anybody') (Bosque y Franco, 1995).

Según la literatura, los modelos de localización de instalaciones no deseables se caracterizan por tener generalmente dos principios que minimizar: el primero, es el de eficiencia espacial y por otro lado, el de justicia espacial debido a la distribución de externalidades (Medina y Cerda, 2007).

El principio de eficiencia espacial se refiere al volumen global de desplazamientos que el conjunto de la demanda debe efectuar para utilizar las instalaciones, pero en este contexto se entendería como la búsqueda de localizaciones que, resultando beneficiosas de manera general, perjudiquen lo menos posible a las poblaciones de sus alrededores. Una primera formulación de este principio sería colocar las instalaciones no deseables lo más alejadas que sea posible de la población residente en la zona de estudio. Para ello basta, desde un punto de vista operativo, maximizar la distancia en línea recta (se supone que las molestias se difunden de este modo) entre las instalaciones y la población. Con esta idea se han formulado modelos como los denominados MaxiSum o MaxiMin. (Bosque et., 2007).

El principio de justicia espacial se refiere al grado de desigualdad en la distribución de los servicios de cada equipamiento hacia la población. En la localización de actividades indeseables, la justicia espacial es representada por el grado en que una población comparte los riesgos o molestias que dichas instalaciones representan. Para ello es necesario minimizar estas externalidades, por lo tanto, la

localización más justa es aquella en que existan las menores diferencias en la forma en que los diversos sectores de la población se ven afectados por el emplazamiento de una instalación y, por ende, el menor costo para el Sistema. Desde un punto de vista operativo esta idea de justicia espacial se podría medir consiguiendo que las distancias euclidianas que separan la población de la oferta no sean excesivamente diferentes, ya que esto implica grandes diferencias en el posible impacto de la oferta sobre la población y mayor grado de injusticia espacial (Bosque et., 2007).

Teniendo en cuenta esta situación, la localización óptima de las instalaciones no deseables se debe basar en la formulación de una serie de principios y magnitudes generales de eficiencia y equidad que guíen en la búsqueda y determinación de los lugares más adecuados para ubicar estas instalaciones (Morrill y Symons, 1977; Ogryczack, 2000).

3.2.3 MODELOS DE LOCALIZACIÓN MULTIOBJETIVO

La utilización de herramientas en la selección de una alternativa que considera múltiples objetivos es realidad desde hace más de treinta años, con métodos que permiten involucrar restricciones económicas, ambientales, sociales, financieras, técnicas y de cualquier otro tipo, algunas de las cuales podrían representarse mediante complejas funciones matemáticas y otras tan sólo con algunas expresiones cualitativas. Problemas como estos donde se tienen varios objetivos incompatibles, comúnmente llamados multicriterio u multiobjetivo, se caracterizan por la subjetividad. Al determinar su peso o relevancia, cualquiera sea la sofisticación de la función agregada que se quiera optimizar, al final prima la subjetividad, ya que el peso depende de la capacidad de persuasión del representante a cargo de un criterio (si existen distintos responsables del problema de elección social) o de la decisión del representante que tenga el poder de decisión (cuando alguien está a cargo de representar las preferencias sociales) (Tobón y Agudelo, s.f.).

El proceso o enfoque tradicional para abordar problemas de tipo multiobjetivo puede resumirse de la siguiente forma: Romero (1993) y Steuer (1986) proponen que el valor de las variables de decisión que satisfacen las restricciones constituyen lo que se denomina conjunto factible o alcanzable que determinan lo que se entiende por “soluciones posibles”. Una vez determinadas estas soluciones, el interés se centra en identificar la “mejor solución”. Para ello se define una función de criterio que refleja adecuadamente las decisiones de preferencias o deseos. Esta función de criterio, llamada también función de utilidad, asocia de una manera monótona un número real a cada solución factible. Recurriendo a técnicas matemáticas se optimiza la función de utilidad sobre el conjunto factible, obteniendo de esta manera la solución óptima.

En la literatura sobre instalaciones no deseables (Bosque y Franco, 1995; Daskin, 1995; Bosque y Moreno, 2004) se pueden encontrar una serie de modelos que en muchos casos parten de otros preexistentes y que han sido modificados en su formulación precisamente para introducir las externalidades negativas derivadas de este tipo de instalaciones:

- a) Modelo MaxiSum, o anti-mediano: la solución que encuentra maximiza la distancia, ponderada por la población, entre las instalaciones y los lugares poblados. Una variante de este modelo es el p-maxisum o p-defense que maximiza la dispersión promedio entre instalaciones. Este modelo más complejo genera una solución distribuida hacia la periferia de la región considerada y tiene la ventaja de considerar todas las distancias y no únicamente las distancias mínimas como el modelo siguiente.
- b) Modelo MaxiMin: la solución que obtiene maximiza la distancia mínima entre cualquier centro poblado (ponderada o no por la población residente) y la(s) instalación(es) no deseables más próximas. Este problema conocido como p-anticenter, puede considerarse como la versión maximin del problema p-center en los modelos utilizados para la localización de instalaciones deseables. Una segunda variante de este modelo denominado p-disperse se resuelve a partir de la maximización de las distancias mínimas de entre cada par de puntos del conjunto de posibles instalaciones, lo que permite una distribución más regular en la disposición final de las instalaciones y, por tanto, de mayor justicia espacial.
- c) Modelo anti-cobertura: minimiza la población residente, y por tanto potencialmente afectada, dentro de una distancia determinada en torno a cada instalación. Para ello es preciso establecer un radio de cobertura, que indicaría el área donde las molestias y perjuicios que provoca la instalación son graves (se supone que fuera de este radio estos perjuicios desaparecen o se hacen insignificantes). La solución encontrada en este modelo asegurará que la población residente en ese radio de cobertura sea la mínima posible.
- d) De la combinación de alguno de estos modelos surgen otros más completos y relevantes, pero que no han sido suficientemente desarrollados y aplicados. Sería el caso del modelo anti-center-maxian o el disperse-defense. El primero maximiza la suma de las distancias ponderadas por el volumen de población residente en los distintos núcleos y minimiza la proximidad entre localidades e instalaciones. El segundo maximiza las distancias mínima y promedio entre las distintas instalaciones.
- e) Modelo complementario-anticobertura. Este modelo surge de la preocupación por incluir en su formulación elementos que recojan de alguna forma la percepción del riesgo derivado del funcionamiento de estas

instalaciones entre la población (Ratick y White, 1988). Parte del modelo anticobertura, pero incluyendo un parámetro de riesgo percibido que es proporcional a la escala o magnitud de las instalaciones. Por lo tanto el modelo final busca minimizar tres objetivos: el costo de construcción y operación de una instalación, la compensación a la población y el riesgo agregado derivado del tamaño de la instalación. Saameño et. al (2005) también intentan incluir en este tipo de modelos el problema relacionado con el rechazo a estas instalaciones por parte de la población. Sin embargo en este caso ese parámetro se asigna a cada núcleo de población, considerando que los núcleos menos poblados presentan menos oposición que los más poblados y que este rechazo disminuye con la distancia. Fernández et. al (2000) por su parte, dan un paso más en este sentido y desarrollan un modelo que incluye dos parámetros relacionados tanto con el tipo de instalación como con la intensidad de la repulsión por parte de la población. Este último podría derivarse a partir de la realización de encuestas a la población en los núcleos implicados o bien realizar algún tipo de generalización a partir de diferentes variables como el número de habitantes, su distribución por edad o incluso la tasa de desempleo.

3.2.4 MÉTODOS DE EVALUACIÓN Y DECISIÓN MULTICRITERIO

El taller de Análisis multicriterio expuesto en el documento Urbanística y Ordenación del Territorio (2012). Define que los métodos de evaluación y decisión multicriterio comprenden la selección entre un conjunto de alternativas factibles, la optimización con varias funciones objetivo simultáneas y un agente decisor y procedimientos de evaluación racionales y consistentes. Son especialmente utilizadas para tomar decisiones frente a problemas que cobijan aspectos intangibles a evaluar. Sus principios se derivan de la Teoría de Matrices, Teoría de Grafos, Teoría de las Organizaciones, Teoría de la Medida, Teoría de las Decisiones Colectivas, Investigación de Operaciones y de Economía.

Los métodos de evaluación y decisión multicriterio no consideran la posibilidad de encontrar una solución óptima. En función de las preferencias del agente decisor y de objetivos pre-definidos (usualmente conflictivos), el problema central de los métodos multicriterio consiste en:

- Seleccionar la(s) mejor(es) alternativas;
- Aceptar alternativas que parecen “buenas” y rechazar aquellas que parecen “malas”;
- Generar una “ordenación” (ranking) de las alternativas consideradas (de la “mejor a la “peor”)

Para ello han surgido diversos enfoques, métodos y soluciones: Un criterio clasificador en la Decisión Multicriterio corresponde al número, que puede ser finito

o infinito, de las alternativas a tener en cuenta en la decisión. Dependiendo de esta situación existen diferentes métodos. Cuando las funciones objetivo, toman un número infinito de valores distintos, que conducen a un número infinito de alternativas posibles del problema se llama Decisión Multiobjetivo.

Aquellos problemas en los que las alternativas de decisión son finitas se denominan problemas de Decisión Multicriterio Discreta. Los métodos de Decisión Multicriterio Discreta se utilizan para realizar una evaluación y decisión respecto de problemas que, por naturaleza o diseño, admiten un número finito de alternativas de solución, a través de:

1. Un conjunto de alternativas estable, generalmente finito (soluciones factibles que cumplen con las restricciones- posibles o previsibles); se asumen que cada una de ellas es perfectamente identificada, aunque no son necesariamente conocidas en forma exacta y completa todas sus consecuencias cuantitativas y cualitativas;
2. Una familia de criterios de evaluación (atributos, objetivos) que permiten evaluar cada una de las alternativas (analizar sus consecuencias), conforme a los pesos (o ponderaciones) asignados por el agente decisor y que reflejan la importancia (preferencia) relativa de cada criterio;
3. Una matriz de decisión o de impactos que resumen la evaluación de cada alternativa conforme a cada criterio; una valoración (precisa o subjetiva) de cada una de las soluciones a la luz de cada uno de los criterios; la escala de medida de las evaluaciones puede ser cuantitativa o cualitativa, y las medidas pueden expresarse en escalas cardinal (razón o intervalo), ordinal, nominal, y probabilística;
4. Una metodología o modelo de agregación de preferencias en una síntesis global; ordenación, clasificación, partición o jerarquización de dichos juicios para determinar la solución que globalmente recibe las mejores evaluaciones;
5. Un proceso de toma de decisiones (contexto de análisis) en el cual se lleva a cabo una negociación consensual entre los actores o interesados (analista- "experto"-, decisor y usuario)".

El análisis o evaluación multicriterio (EMC) se define como un conjunto de técnicas orientadas a asistir en procesos de decisión (Barredo, 1996). Se basa en la ponderación y compensación de variables que van a influir de manera positiva (Aptitud) o negativa (Impacto) sobre la actividad objeto de decisión y que deben ser inventariados y clasificados previamente.

Los principales métodos de evaluación y decisión multicriterio discretos son los siguientes: Ponderación Lineal (Scoring), Utilidad multiatributo (MAUT), Relaciones de superación y el Proceso analítico Jerárquico (AHP - Analytic Hierarchy Process).

Ponderación Lineal (Scoring): Es un método que permite abordar situaciones de incertidumbre o con pocos niveles de información. En dicho método se construye una función de valor para cada una de las alternativas. El método de Ponderación Lineal supone la transitividad de preferencias o la comparabilidad. Es un método completamente compensatorio, y puede resultar dependiente, y manipulable, de la asignación de pesos a los criterios o de la escala de medida de las evaluaciones. Es un método fácil y utilizado ampliamente en el mundo.

Utilidad Multiatributo (MAUT): Para cada atributo se determina la correspondiente función de utilidad (parcial), y luego se agregan en una función de utilidad multiatributo de forma aditiva o multiplicativa. Al determinarse la utilidad de cada una de las alternativas se consigue una ordenación completa del conjunto finito de alternativas. El método de utilidad multiatributo supone la transitividad de preferencias o la comparabilidad, utiliza “escalas de intervalo”, y acepta el principio de “preservación de orden” (rank preservation). La condición de independencia preferencial mutua entre los atributos suele aceptarse casi axiomáticamente, e implícitamente es cuestionable y no refleja la estructura de preferencias del agente decisor. El rigor y rigidez de los supuestos teóricos de este método usualmente controvertidos y difíciles de contrastar en la práctica, lo que obliga a relajarlos, requiere un elevado nivel de información del agente decisor para la construcción de funciones de utilidad multiatributo, aunque permiten abordar fluidamente cuestiones de incertidumbre y riesgo. No obstante las dificultades en su utilización este método cuenta con una variedad de experiencias prácticas en Estados Unidos e Inglaterra (Martínez, 1997).

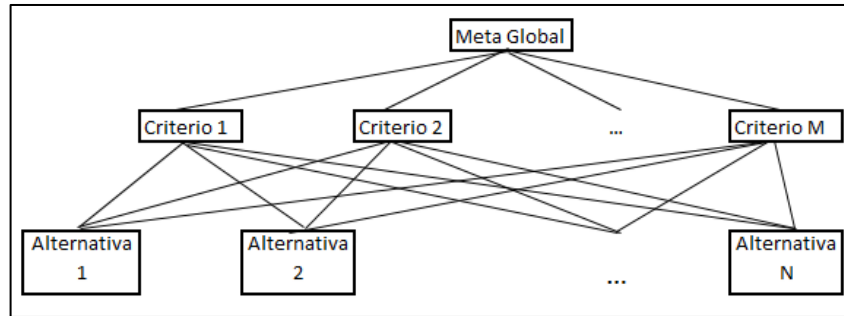
Relaciones de Superación: Estos métodos usan como mecanismo básico el de las comparaciones binarias de alternativas, es decir comparaciones dos a dos de las alternativas, criterio por criterio. De esta forma puede construirse un coeficiente de concordancia C_k asociado con cada par de alternativas (a_i, a_k) . Existen dos métodos de la escuela francesa: ELECTRE y PROMETHEE.

Del método ELECTRE (Elimination Et Choix Traduisant la Réalité) ya existen varias versiones que usan pseudo criterios y la teoría de conjuntos difusos. El método PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation) se ha aplicado, con predicción para problemas de ubicación.

Proceso Analítico Jerárquico (AHP- The Analytic Hierarchy Process): El Proceso Analítico Jerárquico (AHP por sus siglas en inglés) fue desarrollado por el matemático Thomas L. Saaty a fines de los años 70's y consiste en formalizar la comprensión intuitiva de problemas complejos mediante la construcción de un

modelo jerárquico. En la figura 4 se muestra esquemáticamente un árbol de jerarquías y las Análisis del Impacto interrelaciones de los componentes: meta global u objetivo, criterios y alternativas del problema que se pretende resolver.

Figura 4. Árbol de Jerarquías



Fuente: Análisis del Impacto en la Red Eléctrica al Adicionar Nueva Capacidad en la CNLV

En el método AHP existe completa libertad para construir la jerarquía; en la parte superior del árbol se presenta el objetivo principal. En los niveles inferiores intervienen el conjunto de criterios, el conjunto de los diferentes grupos involucrados o los sub-criterios relacionados con algún criterio específico. Finalmente, en el nivel de base se presentan las diferentes alternativas. No existe restricción respecto a la cantidad de niveles ni al número de elementos de cada nivel. Lograr la construcción del árbol brinda claridad y entendimiento sobre los componentes del problema que se está analizando.

Es muy posible que dos personas conceptualicen un problema de maneras distintas y en consecuencia, construyan dos jerarquías diferentes. En este método se pretende que la jerarquía sea construida por un grupo de personas, por lo que es indispensable llegar a un consenso tomando en consideración las opiniones de todos los involucrados

- **Ventajas del método AHP**

Algunas de las ventajas que presenta el método AHP frente a otros métodos de decisión multicriterio son:

- Presenta un sustento matemático.
- Permite desglosar y analizar un problema por partes.
- Permite la participación de diferentes personas o grupos de interés y genera un consenso.
- Permite incorporar aspectos cualitativos que suelen quedarse fuera del análisis debido a su complejidad para ser medidos, pero que pueden ser relevantes en algunos casos.
- Permite verificar el índice de consistencia y hacer correcciones, si es necesario.

- Genera una síntesis y da la posibilidad de realizar análisis de sensibilidad.
- Es de fácil aplicación y permite que su solución se pueda complementar con métodos matemáticos de optimización.

- **Etapas del AHP:**

1. Estructuración del modelo jerárquico (representación del problema mediante identificación de meta, criterios, subcriterios y alternativas).
2. Priorización de los elementos del modelo jerárquico.
3. Comparaciones pareadas entre los elementos.
4. Evaluación de los elementos mediante la asignación de “pesos”.
5. Ranking de las alternativas de acuerdo con los pesos dados.
6. Síntesis.
7. Análisis de Sensibilidad.

- **Estructuración del modelo Jerárquico**

La estructuración del modelo consiste en ordenar jerárquicamente el problema a tratar, esto es, se debe identificar el problema, definir objetivos e identificar criterios y alternativas.

- **Identificar el problema**

El problema es lo que se pretende resolver mediante alguna de las alternativas analizadas en el proceso.

- **Definición del objetivo**

El objetivo o meta representa la respuesta que se pretende obtener a través del proceso.

- **Identificación de alternativas**

Las alternativas son las propuestas factibles dadas por el grupo decisor para poder alcanzar el objetivo general mediante la selección de alguna de ellas.

- **Árbol de jerarquía**

El árbol de jerarquías puede construirse de arriba a abajo (ver Figura 3) y viceversa. Cuando se construye de arriba hacia abajo se inicia con la identificación de los criterios más globales (de lo más general a lo más particular), es decir, éstos serán el primer nivel en la definición del problema. Puede haber subcriterios si se requieren y deben mantener una relación jerárquica con el criterio del cual se desprenden.

En la construcción de abajo hacia arriba, primero se generan todas las características de las alternativas y posteriormente se construye el modelo jerárquico agrupando aquellas características que mantienen un factor común con ellas (criterios y subcriterios) hasta llegar al objetivo general.

La construcción de la jerarquía dependerá de la información disponible y del grupo decisor. Si en el problema están definidas las alternativas y sus características, la jerarquía puede ser de abajo hacia arriba. De lo contrario, se recomienda iniciar de arriba a abajo.

- **Evaluación del modelo**

Los pasos a seguir para la evaluación de los componentes del modelo jerárquico son el establecimiento de prioridades y la emisión de juicios y evaluaciones.

- **Establecimiento de prioridades con el AHP**

En el método AHP, quien toma las decisiones elige una preferencia o prioridad con respecto a cada alternativa de decisión de acuerdo a la contribución que tenga sobre cada criterio. Con la importancia relativa y las preferencias obtenidas, se resume la información y se proporciona la jerarquización de prioridades de las alternativas, en términos de la preferencia global, por medio del proceso llamado síntesis.

- **Comparaciones por pares**

El proceso de Saaty permite dar valores numéricos a las preferencias dadas por cada integrante del grupo decisor, logrando medir cómo contribuye cada elemento de la jerarquía al nivel inmediatamente superior del árbol de jerarquías. Para estas comparaciones se utilizan escalas de razón en términos de preferencia, importancia o probabilidad, sobre la base de una escala numérica propuesta por el mismo Saaty, que va desde 1 hasta 9 (ver Tabla 1)

Las variables A y B de la tabla 1 pueden ser criterios, subcriterios y/o alternativas.

Tabla 1. Escala de preferencias del método AHP

Planteamiento verbal de la preferencia	Calificación numérica
A es extremadamente preferible a B	9
A es entre muy fuerte y extremadamente preferible a B	8
A es muy fuertemente preferible a B	7
A es entre fuerte y muy fuertemente preferible a B	6
A es fuertemente preferible a B	5
A es entre moderada y fuertemente preferible a B	4
A es moderadamente preferible a B	3
A es entre igual y moderadamente preferible a B	2
A es igualmente preferible a B	1

Fuente: Tomado de Análisis del Impacto en la Red Eléctrica al Adicionar Nueva Capacidad en la CNLV

- **Matriz de comparaciones por pares**

Es una matriz cuadrada que contiene comparaciones pareadas de alternativas o criterios.

Sea **A** una matriz $n \times n$, donde $n \in \mathbb{Z}^+$ (enteros positivos). Sea a_{ij} el elemento (i, j) de **A**, para $i = 1, 2, \dots, n$, y $j = 1, 2, \dots, n$. Decimos que **A** es una matriz de comparaciones pareadas de n alternativas, si a_{ij} es la medida de la preferencia de la alternativa en el renglón i cuando se le compara con la alternativa de la columna j . Cuando $i = j$, el valor de a_{ij} será igual a 1, pues se está comparando la alternativa consigo misma.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

El AHP sustenta esto con los axiomas referidos a cada una de las condiciones siguientes:

Axioma 1. Condición de juicios recíprocos. Si **A** es una matriz de comparaciones pareadas se cumple que:

$$a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$$

Axioma 2. Condición de homogeneidad de los elementos. Los elementos que se comparan son del mismo orden de magnitud, o jerarquía.

Axioma 3. Condición de estructura jerárquica o dependiente. Existe dependencia jerárquica en los elementos de dos niveles consecutivos.

Axioma 4. Condición de expectativas de orden de rango. Las expectativas deben estar representadas en la estructura en términos de criterios y alternativas.

Síntesis

Después de construir la matriz de comparaciones pareadas se puede calcular lo que se denomina prioridad de cada uno de los elementos que se comparan. A esta parte del método AHP se le conoce como “síntesis”; para obtenerla se requiere el cálculo de valores y vectores característicos. Sin embargo, las prioridades sintetizadas pueden aproximarse mediante los siguientes pasos algebraicos.

1. Sumar los valores en cada columna de la matriz de comparaciones pareadas.
2. Dividir cada elemento de tal matriz entre el total de su columna; a la matriz resultante se le denomina matriz de comparaciones pareadas normalizada.
3. Calcular el promedio de los elementos de cada renglón de las prioridades relativas de los elementos que se comparan

La síntesis obtendrá prioridades generales y una ordenación de las alternativas.

Matriz de prioridades

Las prioridades de cada criterio respecto a la meta global se presentan en el vector columna denominado vector de prioridades de los criterios, es decir, de este vector se desprende que m es el número de criterios y P_i es la prioridad del criterio i con respecto a la meta global, para $i = 1, 2, \dots, m$.

$$\begin{array}{c} \text{Meta} \\ \text{Global} \\ \text{Criterio 1} \\ \text{Criterio 2} \\ \dots \\ \text{Criterio } m \end{array} \begin{pmatrix} P'_1 \\ P'_2 \\ \dots \\ P'_m \end{pmatrix}$$

La matriz de prioridades es aquella que resume las prioridades para cada alternativa en términos de cada criterio. Para m criterios y n alternativas se tiene:

$$\begin{array}{c}
 \text{Criterio 1} \quad \text{Criterio 2} \quad \dots \quad \text{Criterio } m \\
 \begin{array}{l}
 \text{Alternativa 1} \\
 \text{Alternativa 2} \\
 \dots \\
 \text{Alternativa } n
 \end{array}
 \left(\begin{array}{cccc}
 P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1m} \\
 P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2m} \\
 \dots & \dots & \dots & \dots \\
 P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nm}
 \end{array} \right)
 \end{array}$$

Donde P_{ij} es la prioridad de la alternativa i con respecto al criterio j , para $i = 1, 2, \dots, n$; y $j = 1, 2, \dots, m$.

La prioridad global para cada alternativa se obtiene del vector columna que resulta de multiplicar la matriz de prioridades con el vector de prioridades de los criterios.

$$\begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1m} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nm} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P'_1 \\ P'_2 \\ \dots \\ P'_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Pg_1 \\ Pg_2 \\ \dots \\ Pg_i \end{pmatrix}$$

Donde Pg_i es la prioridad global (respecto a la meta global) de la alternativa i para $i = 1, 2, \dots, n$.

3.3 MARCO CONCEPTUAL

Es importante aclarar conceptos, fundamentos y términos que se consideran básicos en el tema de localización de instalaciones no deseadas, esto con el fin de definir el enfoque y correcta orientación en el tema a tratar.

- **Residuos:** Es cualquier objeto, material, sustancia, elemento o producto que se encuentra en estado sólido o semisólido, o es un líquido o gas contenido en recipientes o de pósitos, cuyo generador descarta, rechaza o entrega porque sus propiedades no permiten usarlo nuevamente en la actividad que lo generó o porque la legislación o la normatividad vigente así lo estipula. (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2005).
- **Residuos peligrosos:** Es aquel residuo o desecho que por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables, infecciosas o radiactivas puede causar riesgo o daño para la salud humana y el ambiente. Así mismo, se considera residuo o desecho peligroso los envases, empaques y embalajes que hayan estado en contacto con ellos. (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2005).

- **Residuos no peligrosos:** Son aquellos producidos por el generador en desarrollo de su actividad, que no presentan ninguna de las características de peligrosidad establecidas en la normativa vigente.(Art.5, Capítulo II, Decreto número 351, Ministerio de Salud y Protección Social)
- **Instalación deseable:** Son aquellas instalaciones en las que predominan las externalidades positivas: escuelas, hospitales, comercios, cines, etc. (Bosque y Franco, 1995).
- **Instalación no deseable:** Son aquellas instalaciones en las que las externalidades negativas son predominantes. En este caso se encuentran, sobre todo, los lugares donde se procesan los residuos que la sociedad produce: vertederos de residuos sólidos urbanos, centros de tratamiento de residuos industriales (tóxicos y peligrosos); los centros para el tratamiento de personas con problemas (cárceles, centros contra la drogadicción, etc.) o las propias centrales nucleares, etc. (Bosque y Franco, 1995).
- **Justicia espacial:** El principio de justicia espacial se refiere al grado de igualdad en la distribución de los servicios de cada equipamiento hacia la población. (Medina y Cerda, 2007).
- **Eficiencia espacial:** Se refiere al volumen global de desplazamientos que el conjunto de la demanda debe efectuar para utilizar las instalaciones y trata de medir el coste, en tiempos de recorrido o distancias, que la población se verá obligada a recorrer para poder utilizar los servicios (Bosque y Sendra, 1992).
- **Tratamiento de residuos peligrosos:** Es el conjunto de operaciones, procesos o técnicas mediante el cual se modifican las características de los residuos o desechos peligrosos, teniendo en cuenta el riesgo y grado de peligrosidad de los mismos, para incrementar sus posibilidades de aprovechamiento y/o valorización o para minimizar los riesgos para la salud humana y el ambiente (Decreto número 351, Ministerio de Salud y Protección Social)
- **Optimización multiobjetivo:** la optimización multiobjetivo puede ser definida como el problema de encontrar un vector de variables de decisión que satisfacen restricciones y optimizan un vector de funciones cuyos elementos representan las funciones objetivos. (Coello, 1999).La optimización multiobjetivo significa encontrar un conjunto de soluciones óptimas, considerando múltiples objetivos.

3.4 MARCO LEGAL

De acuerdo a la temática del presente proyecto, se hace necesario denotar algunos artículos que hacen parte de la legislación Colombiana, en la cual se contemplan aspectos concernientes a los residuos peligrosos, tales como su manejo, disposición, transporte y consecuencias al ambiente.

La Constitución Política de Colombia de 1991 elevó a norma constitucional la consideración, manejo y conservación de los recursos naturales y el medio ambiente, a través de los siguientes principios fundamentales:

Derecho a un ambiente sano: En su Artículo 79, la Constitución Nacional consagra que: “Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La Ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarlo. Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines”. Esta norma constitucional puede interpretarse de manera solidaria con el principio fundamental del derecho a la vida, ya que éste sólo se podría garantizar bajo condiciones en las cuales la vida pueda disfrutarse con calidad.

El medio ambiente como patrimonio común : La Constitución Nacional incorpora este principio al imponer al Estado y a las personas la obligación de proteger las riquezas culturales y naturales (Art. 8), así como el deber de las personas y del ciudadano de proteger los recursos naturales y de velar por la conservación del ambiente (Art. 95). En desarrollo de este principio, en el Art. 58 consagra que: “la propiedad es una función social que implica obligaciones y, como tal, le es inherente una función ecológica”; continúa su desarrollo al determinar en el Art. 63 que: “Los bienes de uso público, los parques naturales, las tierras comunales de grupos étnicos, las tierras de resguardo, el patrimonio arqueológico de la Nación y los demás bienes que determine la Ley, son inalienables, imprescriptibles e inembargables”.

Desarrollo Sostenible: Definido como el desarrollo que conduce al crecimiento económico, a la elevación de la calidad de vida y al bienestar social, sin agotar la base de los recursos naturales renovables en que se sustenta, ni deteriorar el medio ambiente o el derecho de las generaciones futuras a utilizarlo para la satisfacción de sus propias necesidades, la Constitución Nacional en desarrollo de este principio, consagró en su Art. 80 que: “El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación o sustitución. Además, deberá prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental, imponer las sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados. Así mismo, cooperará con otras naciones en la protección de los ecosistemas situados en zonas fronterizas”. Lo anterior implica asegurar que la satisfacción de las necesidades actuales se realice de una manera tal que no

comprometa la capacidad y el derecho de las futuras generaciones para satisfacer las propias

Ley 430 del 16 de enero de 1998: “Por la cual se dictan normas prohibitivas en materia ambiental, referentes a los desechos peligrosos y se dictan otras disposiciones”, el generadores responsable de los Respel que él genera. Dicha Ley, establece que la responsabilidad se extiende a sus afluentes, emisiones, productos y subproductos por todos los efectos ocasionados a la salud y al ambiente. Así mismo, el fabricante o importador de una sustancia química con propiedad peligrosa, se equipara a un generador de Respel, en cuanto a la responsabilidad por el manejo de los embalajes y residuos del producto o sustancia.

En otras palabras, los residuos peligrosos cuentan con un régimen especial, que ante todo consagra la responsabilidad del generador desde “la generación del residuo o desecho peligroso hasta su aprovechamiento o disposición con carácter definitivo”.

La Ley 430 de 1998 al consagrar responsabilidades referentes al receptor, lo vincula con el generador (cualquier persona que los haya generado), una vez lo reciba del transportador, con el fin de establecer la responsabilidad solidaria entre éstos mientras no se haya efectuado y comprobado el aprovechamiento o disposición final del residuo peligroso, pues tan responsable es el que lo genera, como el que está autorizado y se responsabiliza de disponerlo finalmente. De esta manera, la responsabilidad de quien genera un residuo o desecho peligroso es tan vinculante que subsiste hasta que el residuo peligroso sea aprovechado como insumo o dispuesto con carácter definitivo.

Este marco normativo de responsabilidades establece entonces como principales actores los siguientes:

- a) Generador de Respel y el Fabricante o importador de un producto o sustancia química con característica peligrosa.
- b) Receptor que presta los servicios de almacenamiento, aprovechamiento y/o valorización (incluida la recuperación), tratamiento y/o disposición final de Respel.

Es importante que se tenga presente, que de una gestión inadecuada de los Respel en la cual se afecta la salud humana y el ambiente, dan lugar a la imposición de las medidas preventivas y sancionatorias consagradas en el artículo 85 de la Ley 99 de 1993, sin perjuicio de las acciones y civiles a que haya lugar.

Decreto 4741 de 2005: Por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral.

Artículo 16. Obligaciones del transportista de residuos o desechos peligrosos. De conformidad con lo establecido en la ley y en el marco de la gestión integral de los residuos o desechos peligrosos, el transportador debe:

- a) Garantizar la gestión y manejo integral de los residuos o desechos peligrosos que recibe para transportar;
- b) Dar cumplimiento a lo establecido en el Decreto 1609 de 2002 por el cual se reglamenta el manejo y transporte terrestre automotor de mercancías peligrosas por carretera o aquella norma que la modifique o sustituya;
- c) Entregar la totalidad de los residuos o desechos peligrosos recibidos de un generador al receptor debidamente autorizado, designado por dicho generador.
- d) En casos en que el transportador preste el servicio de embalado y etiquetado de residuos o desechos peligrosos a un generador, debe realizar estas actividades de acuerdo con los requisitos establecidos en la normatividad vigente;
- e) Contar con un plan de contingencia actualizado para atender cualquier accidente o eventualidad que se presente y contar con personal preparado para su implementación. En caso de tratarse de un derrame de estos residuos el plan de contingencia debe seguir los lineamientos del Decreto 321 de 1999 por el cual se adopta el Plan Nacional de Contingencia contra Derrames de Hidrocarburos, Derivados y Sustancias Nocivas en aguas Marinas, Fluviales y Lacustres o aquel que lo modifique o sustituya y, en caso de presentarse otro tipo de contingencia el plan deberá estar articulado con el plan local de emergencias del municipio;
- f) En ningún momento movilizar en un mismo vehículo aquellos residuos o desechos peligrosos que sean incompatibles;
- g) Realizar las actividades de lavado de vehículos que hayan transportado residuos o desechos peligrosos o sustancias o productos que pueden conducir a la generación de los mismos, solamente en sitios que cuenten con los permisos ambientales a que haya lugar;
- h) Responsabilizarse solidariamente con el remitente de los residuos en caso de contingencia, por el derrame o esparcimiento de residuos o desechos peligrosos en las actividades de cargue, transporte y descargue de los mismos.

Artículo 17. Obligaciones del receptor. Las instalaciones cuyo objeto sea prestar servicios de almacenamiento, aprovechamiento y/o valorización (incluida la recuperación, el reciclaje o la regeneración), tratamiento y/o disposición final de residuos o desechos peligrosos deberán:

- a) Tramitar y obtener las licencias, permisos y autorizaciones de carácter ambiental a que haya lugar;
- b) Dar cumplimiento a la normatividad de transporte, salud ocupacional y seguridad industrial a que haya lugar;
- c) Brindar un manejo seguro y ambientalmente adecuado de los residuos o desechos recepcionados para realizar una o varias de las etapas de manejo, de acuerdo con la normatividad vigente;
- d) Expedir al generador una certificación, indicando que ha concluido la actividad de manejo de residuos o desechos peligrosos para la cual ha sido contratado, de conformidad con lo acordado entre las partes;
- e) Contar con personal que tenga la formación y capacitación adecuada para el manejo de los residuos o desechos peligrosos;
- f) Indicar en la publicidad de sus servicios o en las cartas de presentación de la empresa, el tipo de actividad y tipo de residuos o desechos peligrosos que está autorizado manejar;
- g) Contar con un plan de contingencia actualizado para atender cualquier accidente o eventualidad que se presente y contar con personal preparado para su implementación. En caso de tratarse de un derrame de estos residuos el plan de contingencia debe seguir los lineamientos del Decreto 321 de 1999 por el cual se adopta el Plan Nacional de Contingencia contra Derrames de Hidrocarburos, Derivados y Sustancias Nocivas en aguas Marinas, Fluviales y Lacustres o aquel que lo modifique o sustituya y estar articulado con el plan local de emergencias del municipio, para atender otro tipo de contingencia;
- h) Tomar todas las medidas de carácter preventivo o de control previas al cese, cierre, clausura o desmantelamiento de su actividad con el fin de evitar cualquier episodio de contaminación que pueda representar un riesgo a la salud y al ambiente, relacionado con los residuos o desechos peligrosos.

Artículo 18. Responsabilidad del Receptor. El receptor del residuo o desecho peligroso asumirá la responsabilidad integral del generador, una vez lo reciba del transportador y haya efectuado o comprobado el aprovechamiento o disposición final del mismo

Decreto 1609 de 2002 “Por el cual se reglamenta el manejo y transporte terrestre automotor de mercancías peligrosas por carretera”, expedido por el Ministerio de Transporte, expone los temas de la responsabilidad que debe asumir cada actor dentro de la cadena de transporte.

El Capítulo IV, del Decreto 1609 de 2002, describe extensamente las obligaciones de los principales actores de la cadena del transporte de mercancías peligrosas, ya que siendo responsables con estas actividades se minimiza el riesgo de accidentes y la contaminación al medio ambiente.

- Remitente o propietario: Rotulación, empaque y embalaje.
- Destinatario de la carga: Licencias y permisos ambientales
- Empresa transportadora: check-list de inspección: kit de derrames, extintores, permisos y licencias, plan de contingencia.
- Conductor del vehículo: Preparar el equipo de carretera (botiquín, equipo contra emergencias, tarjetas de emergencia)
- Propietario o tenedor del vehículo.

4. DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA ACTUAL DE TRATAMIENTO DE RESPEL EN EL VALLE DEL CAUCA

4.1 FUENTES DE GENERACIÓN

Las empresas, de acuerdo con su magnitud y complejidad, realizan actividades y servicios que generan diferentes cantidades y tipos de desechos.

El informe más reciente del año 2016 elaborado por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), sobre el listado de las empresas con licencia ambiental o plan de manejo ambiental de residuos peligrosos, muestra que existen 35 empresas que realizan algún tipo de recolección, transporte, tratamiento y/o disposición final a los residuos peligrosos; encontrándose ubicadas en el Pacífico, el Norte, el Suroccidente y el Suroriente del departamento del Valle del Cauca (ver Tabla 2).

Tabla 2. Listado de empresas con licencia ambiental o plan de manejo ambiental-CVC

EMPRESA	ACTIVIDAD AUTORIZADA	DAR ENCARGADA DE DAR SEGUIMIENTO Y CONTROL
AUSTRALIAN INGENIERIA LTDA	Recepción, almacenamiento y procesamiento de residuos de hidrocarburos	PACIFICO OESTE
ADISTEC LTDA. (Aditivos y soluciones tecnológicas Ltda)	RECEPCIÓN, ALMACENAMIENTO Y TRATAMIENTO CONVENCIONAL DE RESIDUOS DE HIDROCARBUROS	PACIFICO OESTE
Aseo del Suroccidente S.A. ESP	INCINERACION	SUROCCIDENTE
Biolodos de Occidente S.A.S. ESP	Tratamiento de lodos y aguas residuales domésticas e industriales a través de la tecnología de láminas filtrantes	CENTRO SUR
BRONALCO LTDA	ECHAMIENTO, DE RESIDUOS PELIGROSOS (ESCORIAS DE BRONCE, COBRE, ALUMINIO Y ANTIMONIO Y PLOMO) EN PROCESO DE FUNDICION DE METALES	DAR SURORIENTE
BUGUEÑA DE ASEO S.A E.S.P	Construcción y Operación de un Relleno de Seguridad	CENTRO SUR
C.I PETROCCIDENTE LTDA	Almacenamiento y tratamiento de residuos de hidrocarburos y distribución de mezclas y combustibles	PACIFICO OESTE
COMBUSTIBLES JUANCHITO E.S.P.	Recolección, transporte, tratamiento y aprovechamiento de aceites usados proveniente de lubritecas, concesionarios, estaciones de servicio, talleres, industrias y demás establecimientos generadores y acopiadores de éste residuo.	SURORIENTE
COMBUSTIBLES JUANCHITO LTDA	Recolección, transporte, tratamiento, Aprovechamiento, Valorización, Reciclaje	NORTE

Fuente: CVC

Tabla 2. Listado de empresas con licencia ambiental o plan de manejo ambiental-CVC

EMPRESA	ACTIVIDAD AUTORIZADA	DAR ENCARGADA DE DAR SEGUIMIENTO Y CONTROL
PROMETAL (Productora Nacional de Metales)	Fabricación baterías a partir de baterías usadas plomo acido y de Oxido de Plomo	SURORIENTE
R.H. S.A.. E.S.P	Recolección, transporte e incineración de residuos sólidos industriales y patológicos.	SUROCCIDENTE
RECATAM S.A.S	Manufactura y reacondicionamiento de todo tipo de material de empaques contaminados con sustancias peligrosas	SUROCCIDENTE
REDENVASES S.A. - RECONSTRUCTORA DE ENVASES S.A.	almacenamiento y disposicion final de residuos Industriales peligrosos - reacondicionamiento de envases metalicos y plasticos	SUROCCIDENTE
REXCO - SOCIEDAD REPRESENTACIONES J ECHEVERRI CIA LTDA	Almacenamiento y procesamiento de desechos plasticos de envases de plaguicidas usados para la planta recuperadora y recicladora REXCO.	NORTE
Soluciones de Saneamiento Ambiental S.A.-SAAM S. A.	Preparación y blending de materiales con fines de aprovechamiento industrial, el almacenamiento , el tratamiento fisicoquimico y la incineracion de residuos peligrosos y no peligrosos	SUROCCIDENTE
Tecniamsa S.A.. E.S.P. (Tecnologías Ambientales de Colombia)	Recolección e incineración de residuos industriales y hospitalarios. Almacenamiento de residuos o desechos peligrosos en Parcelacion industrial La Nubia corregimiento cauca seco.Candelaria.Valle del Cauca	SURORIENTE
William Mejía Vélez (Establecimiento de Comercio Lubricantes Premier)	Recepción, almacenamiento, aprovechamiento, y fabricación de productos lubricantes a base de aceites usados e hidrocarburos	SURORIENTE

Fuente: CVC

Tabla 2. Listado de empresas con licencia ambiental o plan de manejo ambiental-CVC

EMPRESA	ACTIVIDAD AUTORIZADA	DAR ENCARGADA DE DAR SEGUIMIENTO Y CONTROL
HIDRAULICA SANITARIA LTDA	Almacenamiento y tratamiento de residuos peligrosos de riesgo biológico (vertimientos líquidos generados por hospitales, laboratorios clínicos y procesos relacionados con el sector salud) por medio del biodigestor BIO-D	SUROCCIDENTE
INCINERADORES INDUSTRIALES E.S.P	incineración , manejo integral de residuos sólidos y líquidos industriales en la Parcelación Industrial la Dolores	SURORIENTE
INGENIERÍA PARA SOLUCIONES AMBIENTALES-IPSA LTDA	Fabricación de Productos base solvente a partir de solventes usados y solventes virgenes	SUROCCIDENTE
INNOVACION AMBIENTAL - INNOVA S.A. E.S.P.	Tratamiento químico de residuos y demercurización de residuos peligrosos.	SUROCCIDENTE
LITO S.A.	Recepción, análisis y clasificación, segregación, aprovechamiento , reembalaje y almacenamiento de seguridad de excedentes industriales y residuos peligrosos del sector eléctrico y de telecomunicaciones.	SUROCCIDENTE
MAC JOHNSON CONTROLS COLOMBIA DE COLOMBIA S.A.S	Reciclaje de baterías usadas generadas en el territorio nacional de Colombia, las cuales se reincorporan al ciclo económico productivo mediante mecanismos de aprovechamiento y valorización, constituyéndose en materias prima secundaria mediante el proceso de	SUROCCIDENTE
PETROLEOS DEL VALLE S.A. PETROVALLE - Pacific Fuels Energy SAS	Recepción, transporte, almacenamiento y pulimento de desechos líquidos provenientes de motonaves que atracan en el Terminal marítimo de Buenaventura y el depósito y distribución de combustibles pesados	SUROCCIDENTE
PLASTICOS PENUEL	Procesamiento de bolsas o recipientes que han contenido soluciones para uso intravenoso, intraperitoneal y en hemodiálisis. Licencia ambiental para almacenamiento, tratamiento, acondicionamiento y aprovechamiento de residuos plásticos peligrosos de recipientes de plaguicidas y baterías.	NORTE
Precious Metals Group de Colombia S.A. - PMGROUP DE COLOMBIA S.A.	Proceso Recuperación de metales a partir de desechos de tarjetas impresas de circuitos de computador.	SURORIENTE

Fuente: CVC

Tabla 2. Listado de empresas con licencia ambiental o plan de manejo ambiental-CVC

EMPRESA	ACTIVIDAD AUTORIZADA	DAR ENCARGADA DE DAR SEGUIMIENTO Y CONTROL
COMBUSTIBLES W.D.F LTDA	Recolección, Almacenamiento, Recuperación, Tratamiento y Comercialización de Aceites Usados	SUROCCIDENTE
COMERGROUP S.A.COMBUSTIBLES INDUSTRIALES	Almacenamiento, Recuperación y Tratamiento de residuos peligrosos - Planta de Tratamiento de aceites usados (vehiculares, industriales y portuarios) para la obtención de combustible industrial	SUROCCIDENTE
Compañía Integral de Reciclaje JFJ Ltda.	Almacenamiento, reciclaje, aprovechamiento y fundición aluminio a base de escorias	SURORIENTE
DH ECOAMBIENTAL S.A.S	ALMACENAMIENTO Y TRATAMIENTO DE RESIDUOS PELIGROSOS DE CARÁCTER HOSPITALARIOS	SUROCCIDENTE
COENERGETICOS LTDA	Recepcion, almacenamiento, tratamiento y mezclas de residuos peligrosos (Residuos de sentinas e hidrocarburos).	PACIFICO OESTE
ECO ACCION S.A.S.	Almacenamiento, tratamiento y aprovechamiento, recuperación y/o disposición final de Residuos o desechos peligrosos, así como el almacenamiento, tratamiento, aprovechamiento (recuperación/reciclado) y/o disposición final de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) y de residuos de pilas o acumuladores.	SUROCCIDENTE
FUNDIMETALES	Aprovechamiento de Baterías Usadas Plomo-Acido.	SURORIENTE
Germán Valencia	LMACENAMIENTO, TRATAMIENTO Y APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS PLASTICOS CON CARACTERISTICAS PELIGROSAS	BRUT
Gestion Ambiental Consultoria e Ingenieria S.A.S. GEAM S.A.S.	Almacenamiento, tratamiento, aprovechamiento (recuperación/reciclado) y/o disposición final de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE) y de residuos de pilas y/o acumuladores.	SUROCCIDENTE

4.2 TIPOS DE TRATAMIENTO

Las empresas con licencia ambiental otorgada por la CVC, realizan tipos de tratamiento tales como:

- Físico
- químico
- Fisicoquímicos
- Biológicos
- Térmicos
- Estabilización
- Solidificación

Según la Gestión Integral de Residuos Peligrosos realizada por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de la República de Colombia, la definición para los tipos de tratamiento es la siguiente:

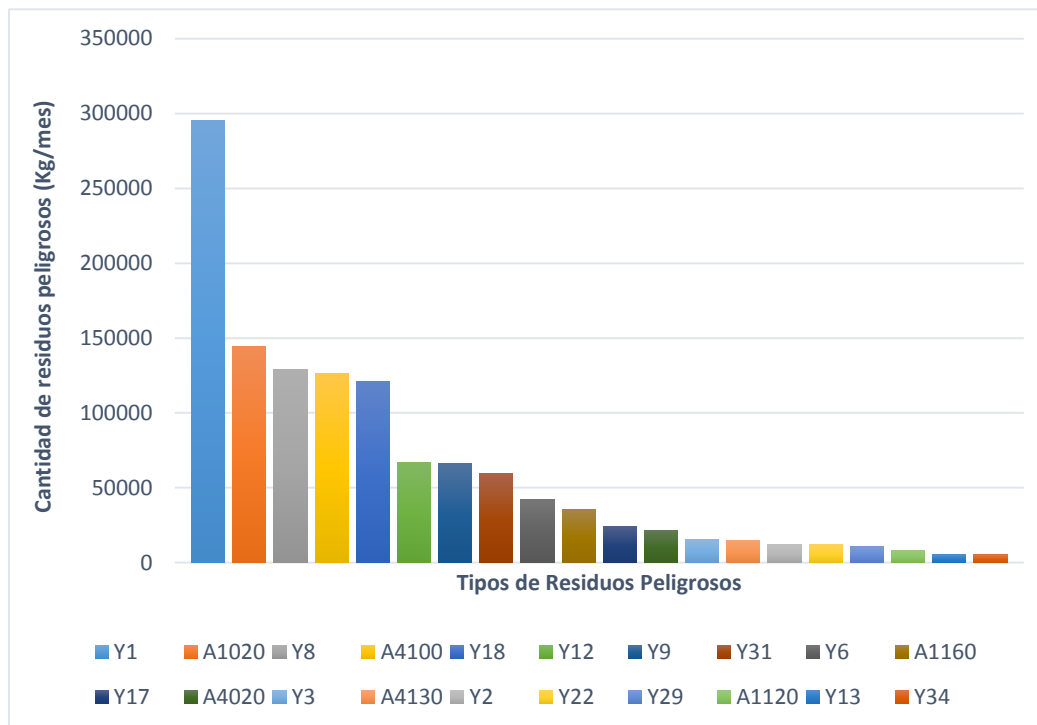
- Físico : tales como procesos de separación y reducción de volumen
- Químico: donde existe un proceso de transformación del residuo mediante solidificación la adición de una serie de compuestos químicos para alcanzar el objetivo deseado
- Fisicoquímicos: que involucran tanto los procesos físicos como los químicos mediante los cuales se modifican las propiedades químicas y físicas de un residuo.
- Biológicos: que consisten en la descomposición de contaminantes por acción de un conjunto de microorganismos
- Térmicos: cuando se utilizan hornos a altas temperaturas para la destrucción de los residuos
- Estabilización: en el que los contaminantes de un residuo son transformados en formas menos tóxicas o menos móviles o solubles
- Solidificación: proceso que genera una masa sólida monolítica de residuos tratados

Las empresas registradas en la tabla 1 que pertenecen a la zona suroccidental del departamento del Valle del Cauca, se caracterizan por ser líderes en la prestación del servicio a nivel departamental y nacional, son de gran tamaño y los tipos de tratamiento que ofrecen son amplios y variados, cuentan con alta tecnología y personal experto. En cambio, en las otras zonas del departamento las empresas realizan tipos de tratamientos físicos, no tienen gran cobertura y se consideran medianas empresas.

En la actualidad, el tratamiento de residuos peligrosos se ha convertido en un tema de gran importancia, tanto para los generadores como para la sociedad que se encuentra inmersa en zonas industriales, debido a que estos residuos son fuentes

de riesgo para el medio ambiente y la salud de las personas. Por esto, también se hace necesario conocer el tipo de residuo peligroso que más generan las empresas del departamento del Valle del Cauca, para ello se utilizó la información proporcionada por el IDEAM. En la figura 4 se muestra que el tipo de residuo peligroso que predomina es el Y1- Desechos clínicos resultantes de la atención médica prestada en hospitales, centros médicos y clínicas.

Figura 5. Cantidad de Desechos generados por cada tipo de Residuo Peligroso

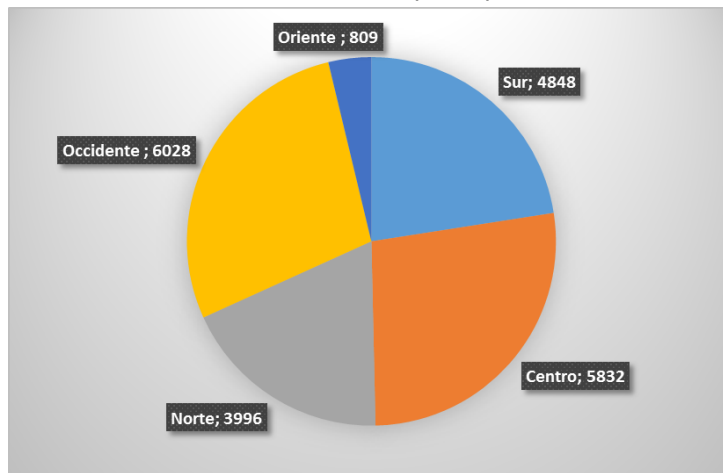


Fuente: Información suministrada por el IDEAM periodo año 2014-Anexo A

4.3 DESCRIPCIÓN DE LA REGIÓN CASO DE ESTUDIO

El departamento del Valle del Cauca se compone de 42 municipios, de los cuales 10 pertenecen a la zona sur, 13 al centro, 16 al norte, 1 al occidente y 2 a la zona oriente, cuya presencia es destacada por la gran extensión territorial que presentan, brindando la oportunidad de localización y creación de empresas públicas y privadas del sector agropecuario, industrial y de servicios quienes a su vez, generan desarrollo y bienestar a la comunidad, permitiendo así lograr un crecimiento económico en la región. Cabe resaltar que el occidente y el centro del departamento son las zonas que tienen más extensión territorial, encontrándose allí los municipios de: Andalucía, Buenaventura, Buga, Bugalagrande, Calima- El Darién, El Cerrito, Ginebra, Guacarí, Restrepo, Riofrío, San Pedro, Trujillo, Tuluá y Yotoco (ver Figura 6).

Figura 6. Extensión Territorial de las Subregiones del Departamento del Valle Del Cauca (Km²)



Fuente: <http://www.valledelcauca.gov.co/publicaciones.php?id=3>

Además, según la agencia de promoción de inversión en el pacífico colombiano (Invest Pacific) esta región posee la mejor infraestructura vial de Colombia; una economía diversa y altamente desarrollada; cadenas productivas con múltiples oportunidades para inversionistas en los diferentes eslabones; servicios públicos de buena calidad y a precios competitivos; oferta inmobiliaria a bajo costo comparada con otras ciudades de Colombia y Latinoamérica; mano de obra joven y calificada; zonas francas con amplia disponibilidad de espacio; un sistema de transporte masivo municipal moderno y efectivo, aeropuertos internacionales, entre otros; lo cual es el ambiente propicio y adecuado para crear empresas.

Cabe destacar que el Valle del Cauca en el año 2016 se convirtió en el departamento pionero al poner en marcha el Parque Tecnológico Ambiental de Occidente dedicado al tratamiento de residuos biológicos peligrosos provenientes de hospitales y laboratorios clínicos, el cual se convierte en un trascendental avance en este campo en Colombia. (Viernes, Abril 29, 2016, Autor: Redacción de El País.)

4.4 ANÁLISIS INTERNO Y EXTERNO DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS PELIGROSOS EXISTENTES EN EL VALLE DEL CAUCA

Analizando la información anterior respecto al diagnóstico del sistema actual, se establecieron de manera interna las fortalezas y debilidades y de manera externa las amenazas y oportunidades, que identifican a las empresas de tratamiento en relación al estudio social, económico y ambiental.

ANÁLISIS INTERNO

❖ FORTALEZAS

Factor Social:

- Ofrecen prestación de servicios de recolección, transporte, tratamiento y disposición final de residuos peligrosos a las industrias generadoras.
- Reconocida ante la comunidad como una alternativa segura frente a la disposición incontrolada de residuos peligrosos.
- Imagen pública de tranquilidad frente al manejo técnico y responsable de las operaciones que realiza.

Factor Ambiental:

- Autorización para realizar sus operaciones mediante licencia ambiental, dada por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca.
- Los tipos de tratamientos utilizados para eliminar o disminuir al máximo, tanto el volumen como la toxicidad del material peligroso cuentan con el respectivo aval de la Autoridad Ambiental.

Factor Económico:

- Las empresas productivas y de servicios del departamento del Valle del Cauca tienen la necesidad por obligatoriedad de realizar un adecuado tratamiento a los residuos peligrosos que estos generen.

❖ DEBILIDADES

Factor Social:

- Las personas que laboren en la instalación están expuestas a contraer enfermedades sino utilizan adecuadamente los elementos de protección y seguridad dispuestos para las etapas de manipulación del residuo; en su almacenamiento, transporte y disposición final.

Factor Ambiental:

- El derrame de residuos peligrosos al ambiente, debido a su recolección y transporte.
- Algunos tipos de tratamiento no son limpios con el medio ambiente, generando más contaminación

Factor Económico:

- Se desconoce la cantidad actual de residuos peligrosos que generan los posibles clientes, perjudicando así, el no tener claridad sobre la demanda que se quiere satisfacer.
- Se requiere capital de trabajo.
- Se requiere emplear una flota de transporte propia especializada para la recolección de residuos peligrosos, lo cual genera costos adicionales de mantenimiento y operación de vehículos.

ANÁLISIS EXTERNO**❖ AMENAZAS****Factor Social:**

- La población que se encuentra alrededor de una instalación indeseable puede propiciar en modo de protesta, el defender los diversos motivos que se oponen a los beneficios que prestaría la instalación.
- Los tipos de tratamiento utilizados por las instalaciones podrían generar efectos negativos en la salud de las personas, las cuales en algún momento podrían llegar a presentar demandas.
- Carencia de personal especializado en el departamento, impidiendo así la planificación, el manejo y la operación de la instalación, como también el control de las regulaciones y leyes inherentes a las actividades realizadas.

Factor Económico:

- La principal amenaza para la planta de tratamiento de residuos peligrosos es la competencia, ya que las instalaciones existentes, están cada vez más en la vanguardia de la tecnología, para así cumplir a cabalidad con todos los requerimientos de las autoridades sanitarias y de sus clientes.
- Creación de nuevas instalaciones dedicadas al tratamiento de residuos peligrosos.

Factor Ambiental

- Accidentes de tránsito ocurridos al transportar residuos peligrosos, causan daños a la vegetación.
- Altos niveles de contaminación atmosférica, sonora, de suelos y aguas, emitidas por la instalación, propician sanciones ambientales e incluso el cierre.
- Ocurrencia de fenómenos naturales que originen desastres

❖ OPORTUNIDADES**Factor Social:**

- Elaboración de Programas de Educación Superior enfocados en el tema de residuos peligrosos.
- Incentivos por la generación de empleo en la zona
- Proyectos de cultura ciudadana y empresarial orientados en el cuidado, manejo y disposición de residuos peligrosos.

Factor Ambiental:

- Nuevas y mejores tecnologías de tratamiento de residuos peligrosos, las cuales permitan la modificación de las propiedades físicas o químicas de los residuos, además de reducir el volumen e inmovilizar componentes tóxicos.

Factor Económico:

- Creciente industrialización en la zona, la cual genera residuos peligrosos a tratar.
- Colaboración público-privada, para la puesta en marcha de instalaciones de tratamiento de residuos peligrosos.
- Beneficios tributarios por el tipo de servicio que prestan.
- Contribución al desarrollo económico del departamento

5. FACTORES CLAVES EN LA LOCALIZACION DE UNA INSTALACION NO DESEABLE

En el presente capítulo se mencionan los criterios de localización de instalaciones no deseables que han planteado diferentes autores, permitiendo así, generar ideas base que contribuyan al desarrollo del presente proyecto.

Santos, Suarez y Dorta (2001) plantean un problema de localización discreta, generalizando el problema de transporte y tratamiento de los residuos sanitarios, en el cual persiguen determinar las mejores ubicaciones de un máximo de p centros de tratamiento nuevos, considerando los centros de tratamiento ya existentes y los generadores de residuos; atendiendo a criterios económicos, factores de riesgo y equidad, donde intervienen costos de operación e inversión, riesgos percibidos debido al transporte, riesgos máximos y desutilidad colectiva. Para resolver el problema multicriterio aplican un modelo de programación por metas, esta técnica es la adecuada ya que las autoridades y técnicos competentes, fijan valores deseables para los costos y las medidas de riesgo y desutilidad.

Las guías ambientales de almacenamiento y transporte por carretera de sustancias químicas peligrosas y residuos peligrosos expedida por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial y el Consejo Colombiano de Seguridad (2003) expone que es ideal que todo lugar de almacenamiento de sustancias y residuos peligrosos debe estar alejado de zonas densamente pobladas, de fuentes de captación de agua potable, de áreas inundables y de posibles fuentes externas de peligro, teniendo siempre presente que la ubicación debe cumplir con lo dispuesto en el plan de ordenamiento territorial del municipio donde se desarrolle la actividad.

Según la Guía para la Gestión Integral de Residuos Peligrosos (2005), la selección del sitio de emplazamiento de una instalación para el tratamiento y/o disposición de residuos peligrosos resulta determinante para la viabilidad técnica, económica, social, política y ambiental del proyecto.

Los principales objetivos perseguidos en la selección del sitio de emplazamiento son:

- Lograr la mejor adecuación entre la actividad que se va a desarrollar y el entorno.
- Asegurar el cumplimiento de los requerimientos legales.
- Minimizar los impactos y riesgos ambientales, sanitarios y sociales.
- Alcanzar una alternativa económicamente viable y socialmente aceptada.

Errores en la selección del sitio pueden traer aparejados mayores costos, tanto de construcción como de operación, además de mayores riesgos de contaminación y conflictos con la comunidad.

La selección del sitio de emplazamiento es un proceso complejo de toma de decisiones, donde se identifican alternativas, utilizando:

- **Criterios de Exclusión:** Introducen restricciones en el proceso de toma de decisión
- **Criterios de Aptitud:** Permiten ponderar las alternativas a efectos de encontrar la mejor solución.

Existen dos tipos de criterios de exclusión:

- Las restricciones de carácter general, que surgen de los criterios aceptados internacionalmente.
- Las restricciones particulares, que surgen de condicionantes propias del lugar.

Las restricciones particulares obedecen a condicionamientos locales y no siempre se corresponden con criterios técnicos. Se trata de zonas definidas que la comunidad ha decidido preservar o destinar a usos que son claramente contrapuestos con este tipo de emprendimientos. Por ejemplo zonas arqueológicas, con valor histórico o paisajístico, de interés turístico, zonas de recreación, etc.

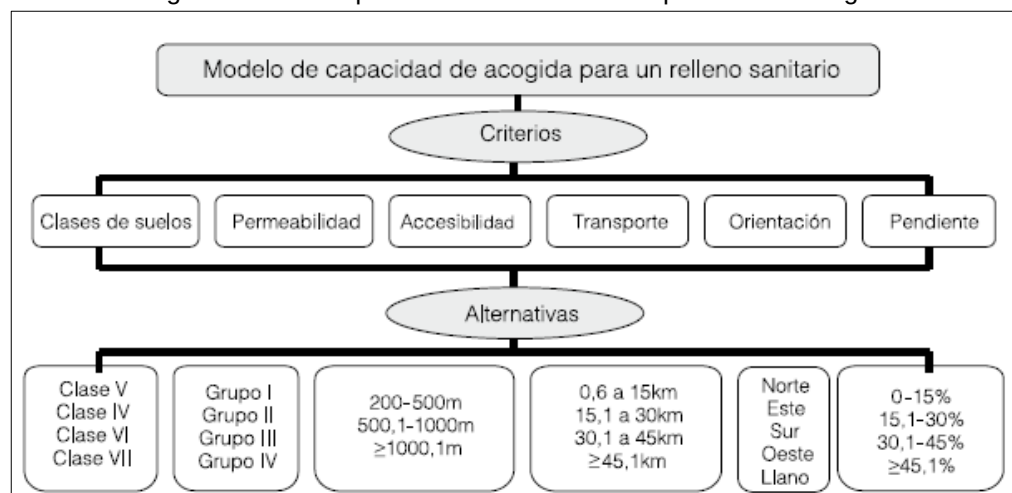
Los criterios de aptitud permiten calificar las alternativas. Si bien estos criterios representan algún tipo de limitación, es posible mitigarlas introduciendo elementos correctivos o compensatorios en el proyecto, por lo que no representan restricciones absolutas y no deben utilizarse como criterios de exclusión. Por ejemplo, en caso que no exista accesibilidad es posible la construcción de vías de acceso, lo que introduce un costo adicional y por lo tanto pesará en forma negativa.

Una herramienta adicional que puede utilizarse como criterio de aptitud es la elaboración de mapas de vulnerabilidad (social y ambiental) del territorio. Esta consiste en establecer una serie de criterios sociales y ambientales (muchos de los cuales pueden coincidir con los ya expresados, además de incorporar otros como cargas contaminantes puntuales o dispersas, la presencia de asentamientos precarios, entre otros). En este caso es necesario establecer una escala de valoración de los diferentes aspectos, así como un criterio de ponderación de los mismos para poder determinar una escala de vulnerabilidad. La forma más conveniente de trabajar es superponer la información en planos, siendo la utilización de un sistema de información geográfica (SIG) una herramienta idónea.

La localización de una instalación donde predominen las externalidades negativas sugiere tener una amplia gama de factores y restricciones inmersos a la sociedad, dado es el caso de Mena et al. (2010) quienes utilizaron el método de las jerarquías analíticas, siendo este una técnica de decisión multicriterio, para elegir la

localización óptima de un relleno sanitario; para esto fue necesario considerar características urbanísticas, económicas y ambientales, de las cuales definieron criterios tales como, el uso actual del suelo, la permeabilidad del suelo, distancia a los caminos y vías de acceso (accesibilidad), distancia al centro productor (transporte), red hidrográfica, vegetación, áreas de conservación, áreas turísticas, pendiente del terreno, y orientación. (Ver figura 7).

Figura 7. Descomposición del modelo de capacidad de acogida



Fuente: Localización De Un Relleno Sanitario En La Comuna De Parral, Chile, A Través De Evaluación Multicriterio (2010)

Para estos criterios se definieron posteriormente rangos de aceptabilidad y exclusión, los cuales fueron necesarios en el análisis. La creación de variables binarias permitió diferenciar áreas con aptitud para la actividad. Por lo tanto, al tratarse de información binaria el código 1 indica aquel lugar candidato para la actividad y el código 0 indica la anulación total de dicho sector para la actividad evaluada. De esta forma, se excluyeron todos aquellos sitios que se encontraran a menos de 1000m de un curso de agua, a menos de 600m de un centro poblado y a menos de 200m de cualquier camino transitable, sitios con suelos considerados altamente productivos (de clase I, II y III), y todos aquellos terrenos cuya vegetación este considerada por la Corporación Nacional Forestal (CONAF) como sensible o protegida.

Giménez y Cardozo (2012) analizan la localización óptima para un relleno sanitario mediante técnicas multicriterio en un SIG (Sistema de Información Geográfica), elaborando un modelo cartográfico donde expresan los datos de entrada, procedimientos espaciales aplicados en el SIG, con la utilización del Software Arc View, y los valores asignados a cada criterio de exclusión, determinando así las áreas óptimas para relleno sanitarios, confeccionando mapas temáticos para mejor observación de las parcelas.

La resolución N°282 dictada por la secretaria de ambiente de Paraguay fue la guía base para Giménez y Cardozo (2012), ya que en esta se definen los criterios para seleccionar el área adecuada para la disposición final de residuos sólidos en rellenos sanitarios, estos son: Criterios de Exclusión, Criterios Técnicos; Económico-Financiero, Político-Social. (Ver Tabla 3).

Tabla 3. Criterios para la selección de áreas para la disposición final de residuos sólidos en rellenos sanitarios.

CRITERIOS		
CRITERIOS DE EXCLUSIÓN		
Distancia de curso hídrico, área inundable, manantiales y bañados	Mayor a 200 metros, distancia medida horizontalmente a partir de la cota máxima de inundación. Este criterio dependerá del tipo de relleno sanitario a ser implementado.	
Distancia de zona urbana	Menor a 5000 habitantes	500 a 2000 metros a partir del perímetro urbano
	5000 a 15000 habitantes:	2000 a 5000 metros a partir del perímetro urbano
	Mayor a 50000 habitantes:	5000 a 10000 metros a partir del perímetro urbano.
Distancia de zona urbana	Menor a 5000 habitantes:	500 a 2000 metros a partir del perímetro urbano
	5000 a 15000 habitantes:	2000 a 5000 metros a partir del perímetro urbano
	Mayor a 50000 habitantes:	5000 a 10000 metros a partir del perímetro urbano.
Distancia de ruta	Nacionales:	de 100 metros a partir de la franja de dominio
	Departamentales:	50 metros a partir de la franja dominio
	Municipales:	20 metros a partir de la franja de dominio
Aeropuertos	Internacionales:	3000 metros
	Nacionales:	1000 metros
	Distancias de área de protección ambiental y cultural:	1000 metros

Fuente: Localización Óptima de Relleno Sanitario Aplicando Técnicas Multicriterio en Sistemas de Información Geográfica (SIG) en el Área Metropolitana del Alto Paraná (2012).

Tabla 3. Criterios para la selección de áreas para la disposición final de residuos sólidos en rellenos sanitarios (Continuación).

CRITERIOS TÉCNICOS	
Tamaño del área:	De acuerdo con la vida útil pretendida
Vida útil mínima:	Igual o mayor a 5 años.
Facilidad de acceso:	El acceso al terreno debe tener buena condiciones de transito de manera que permita el ingreso de los vehículos recolectores inclusive en día de lluvia
Profundidad de la napa freática:	*Para relleno sanitario con impermeabilización de base a través de membrana plástica, la distancia de la napa freática a la base no podrá ser inferior a 1,5 metros. *Para rellenos sanitarios con impermeabilización de base a través de canchales de arcilla, la distancia de la napa freática a la base de más de 3,0 metros y la canchales impermeabilizante deberá tener un coeficiente de permeabilidad de 1×10^{-10} cm/s.
Coeficiente de permeabilidad del suelo:	Para el uso de un área como sitio de disposición final de residuo sólidos urbanos, es importante que el suelo del terreno seleccionado tenga una cierta impermeabilidad natural, con vista a reducir las posibilidades de contaminación de las aguas subterráneas.
Pendiente del terreno:	La importancia de este criterio es en relación a la preservación del suelo, siendo las áreas con declividad menor a 3% la más adecuada para el uso pretendido. Observación: La declividad es una característica no restrictiva para la construcción de rellenos sanitarios, apenas es deseable siendo el intervalo considerado entre 1 y 15% de declive.
Uso y ocupación del terreno:	Las áreas se deben localizar en una región donde el uso de suelo sea rural o industrial y fuera de cualquier área de Conservación Ambiental.
Tipo de suelo:	Preferiblemente arcilloso
Disponibilidad de material de cobertura:	Preferentemente el terreno debe contar o encontrarse a menos de 1000 metros de zonas de préstamo de material para la cobertura diaria de los residuos.

Fuente: Localización Óptima de Relleno Sanitario Aplicando Técnicas Multicriterio en Sistemas de Información Geográfica (SIG) en el Área Metropolitana del Alto Paraná (2012)

Tabla 3. Criterios para la selección de áreas para la disposición final de residuos sólidos en rellenos sanitarios (Continuación).

CRITERIO ECONÓMICO-FINANCIERO	
Distancia al centro de recolección:	Es deseable que la distancia hasta el relleno sanitario, sea el menor posible, con vista a reducir los costos relacionados con el transporte.
CRITERIO POLÍTICO-SOCIAL	
Distancia de vivienda más próxima:	500 metros
Distancia de pozos de abastecimiento de agua:	500 metros
Distancia a centro educativo:	500 metros
Distancia a centro de salud:	500 metros
Acceso al área:	El tráfico de los vehículos transportando los residuos a los rellenos sanitarios puede causar trastornos a los pobladores ubicados a las vías de acceso, por tal motivo es deseable que el acceso al área se realice por vías con baja densidad demográfica.

Fuente: Localización Óptima de Relleno Sanitario Aplicando Técnicas Multicriterio en Sistemas de Información Geográfica (SIG) en el Área Metropolitana del Alto Paraná (2012)

Según el curso de manejo seguro de residuos peligrosos tóxicos o peligrosos (s.f), dictado por la Universidad de Concepción; todo lugar de almacenamiento de sustancias peligrosas deberá estar ubicado alejado de zonas densamente pobladas, de fuentes de aguas potables, de áreas con posibilidad de anegamiento y de posibles fuentes externas de peligro.

La localización de instalaciones de este tipo, debe de tener un fácil acceso a los servicios de transporte y emergencia sobre terrenos estables y que soporten edificios y caminos seguros. Se deben proveer servicios adecuados tales como electricidad con suministro de emergencia si es necesario, agua potable y red de agua contra incendio, sistemas de drenajes segregados de los públicos y de aguas lluvias para evitar toda posible contaminación. (Ver Tabla 4).

Tabla 4. Factores de elección de lugares de disposición

RESTRICCIONES FISICAS	RESTRICCIONES ECOLOGICAS
Tipos de Suelos	Flora y Fauna
Geología y acuíferos	Valor de Conservación
Topografía	Valor Habitacional
Aguas Superficiales	Valor Paisajista
Inundaciones	
Estabilidad Sísmica	
Estabilidad Terreno	
Dirección de vientos	
Caminos y Accesos	
USO DE LA TIERRA	VALORES HUMANOS
Valor Agrícola	Estética
Industria Minera	Valor Recreacional
Suministro de Agua	Historico/Arqueológico
(Superficial o Subterránea)	Cultural
Desarrollos Potenciales	Densidad Población
Servidumbres/ Transporte	Empleos
Uso residencial/industrial	
DISPOSICION DE RESIDUOS	
Proximidad a usuarios	
Acceso a Transporte	
Disponibilidad de Servicios	
Zonas Adyacentes	
Modificaciones de Terrenos	

Fuente: Curso Manejo Seguro De Residuos Tóxicos o Peligrosos
(s.f)

Por tanto, este tipo de instalaciones deben ser ubicadas de acuerdo a una planificación que incluya restricciones técnicas, de seguridad, ambiente, sociedad y política.

El documento desarrollado por Paralera (2006) pretende encontrar la localización de incineradoras de materiales específicos de riesgo en Andalucía España, bajo un enfoque multiobjetivo; para esto, recoge criterios económicos y sociales, debido a las consecuencias que debe afrontar cuando realiza la actividad de tratamiento de estos materiales mediante incineración, el cual es considerado el más adecuado y estaría enmarcado dentro del marco del desarrollo sostenible, sin embargo la opinión de los futuros vecinos de una incineradora no siempre es positiva. En muchas ocasiones, propugnan diversos motivos que se oponen a los supuestos beneficios de estas centrales. Esto hace que no siempre sea fácil decidir en qué lugares se deben localizar.

Para resolver el problema multicriterio cuando se toma de forma discreta, Paralera, aborda dos técnicas de solución. En primer lugar se utiliza PROMETHEE y en segundo lugar y con el fin de realizar un análisis más consistente, la Teoría de la Utilidad Multiatributo (MAUT), con el fin de expresar las preferencias del decisor en términos de la utilidad que le reporta; y cuando el problema multicriterio se toma de forma continua, se opta por un algoritmo metaheurístico basado en búsqueda tabú, en lugar de utilizar un algoritmo exacto con el que sería inviable su resolución.

Finalmente, Manyoma, Torres y Vidal (2015) proponen una investigación la cual tiene como objetivo general desarrollar una metodología para localizar rellenos sanitarios, teniendo en cuenta los múltiples objetivos que se deben cumplir en un esquema regional de disposición final de Residuos Sólidos Municipales en áreas urbanas de rápido crecimiento, tales como minimizar los costos del sistema y el riesgo ambiental, teniendo en cuenta restricciones de capacidad, expansión del terreno y medio ambiente.

En síntesis cada uno de los artículos estudiados menciona los factores que se consideran más relevantes al ubicar una instalación no deseable, sin embargo solamente algunos consideran modelos matemáticos para dar solución a problemas de localización multiobjetivo. Las características propias de cada problema multiobjetivo, así como sus restricciones hacen posible que se genere una comparación entre ellos de tal forma que se pueda identificar el modelo matemático que más se adecue a los factores claves de interés para la realización del caso de estudio (ver Tabla 5).

Tabla 5. Evaluación de artículos de referencia asociados con factores claves en la localización de instalaciones no deseables.

Autor /Criterio	Santos, Suarez y Dorta (2001)	MAVD (2003)	Guía Gestión Integral de Residuos Peligrosos (2005)	Mena et al. (2010)	Gimenez y Cardozo (2012)	Manyoma, Torres y Vidal (2015)	Paralera (S.f)	curso de manejo seguro de RP(s.f),
Economico	X		X	X	X	X	X	
Rechazo social	X	X	X		X		X	X
Distribucion del Riesgo	X						X	
Ambiental		X	X	X		X		X
Urbanistico				X				
Desutilidad colectiva	X						X	
De Exclusion					X			X
Tecnicos					X	X		
Político					X			
Modelo matematico	X					X	X	

Fuente: Elaboración propia

Con base en lo anterior, enmarcados dentro del concepto de sostenibilidad, el cual la revista Ecoambiental, la define como: “atender a las necesidades actuales sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para atender sus propias necesidades, garantizando el equilibrio entre crecimiento económico, cuidado del medio ambiente y bienestar social”; se logró identificar los documentos que se tomarían tomaron como referencia para la definición y formulación del modelo matemático, estos fueron, el modelo formulado por Paralera (2006) el cual consta de cinco objetivos relacionados con criterios económicos y sociales; como también de restricciones de capacidad y cantidad de instalaciones a abrir; y el modelo formulado por Manyoma, Torres y Vidal (2015), en el cual se identifican dos funciones objetivo que involucran criterios económicos y ambientales, teniendo en cuenta restricciones de capacidad, extensión de terreno y medio ambiente.

6. PROPUESTA METODOLÓGICA

El presente capítulo expone la propuesta metodológica planteada, la cual describe las actividades que se llevaron a cabo para el cumplimiento de los objetivos específicos definidos para el proyecto.

Para el cumplimiento del primer objetivo específico, que concierne a realizar un diagnóstico del sistema actual de tratamiento de residuos sólidos peligrosos en el departamento del Valle del Cauca, se debe consultar el listado de empresas con licencia ambiental o plan de manejo ambiental de residuos peligrosos, por medio de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), la cual permitirá identificar la cantidad de empresas que prestan algún tipo de servicio relacionado con residuos peligrosos, los tipos de tratamiento que se realizan, como también las características que definen a este tipos de empresas. Posteriormente, se realizará un análisis DOFA (Debilidades, Oportunidades, Fortalezas y Amenazas) que involucrara el factor económico, social y ambiental. También se debe solicitar información actual al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), en relación a la cantidad de residuos peligrosos generados en el departamento del Valle del Cauca discriminado por municipios, lo cual permitirá realizar una identificación de los municipios del Valle del Cauca que presentaron mayor registro de residuos peligrosos, identificando allí, posibles localizaciones para la planta de tratamiento.

El cumplimiento del segundo objetivo específico busca identificar los factores claves que inciden en la localización de instalaciones no deseadas, con el propósito de definir los objetivos de la función de desempeño para el modelo y las limitaciones propias del sistema. Para ello, es necesario consultar por medio de bases de datos de la Universidad y demás fuentes fidedignas, los factores claves considerados por diversos autores para la localización de éste tipo de instalaciones.

El cumplimiento del tercer objetivo específico implica formular un modelo de localización que integre el concepto de sostenibilidad. Tomando como base los modelos de localización con múltiples objetivos y la información de los datos recolectados en la formulación del problema, se definió un modelo matemático con enfoque multiobjetivo.

Finalmente, tomando como referencia el modelo de localización multiobjetivo diseñado en el capítulo anterior y su ejecución, incluyendo el método de evaluación y decisión multicriterio Proceso Analítico Jerárquico (AHP), para definir las ponderaciones en cada una de las funciones de desempeño; dando cumplimiento al cuarto objetivo específico, se realizará un análisis de sensibilidad del modelo, en el cual se asignen diferentes ponderaciones que reflejen la relevancia y preferencia que se proporciona a cada criterio en el proceso de optimización. Esto con el fin de analizar el impacto respecto a la selección del lugar adecuado para la ubicación de

la planta de tratamiento de residuos peligrosos y en la función de desempeño agregada del modelo.

7. FORMULACIÓN DEL MODELO

7.1 MODELO VERBAL

7.1.1 Supuestos:

- El modelo se considera mono-periodo enmarcado en un horizonte fijo de planeación; es decir; solo se planea un período a la vez.
- La cantidad de residuos peligrosos generados por los municipios del Valle del Cauca, se tomaron con frecuencia semanal(Kg/semana)
- Los vehículos asociados a cada generador de residuos, solamente pueden recoger los residuos de este y transportarlos a la planta de tratamiento.
- Se realiza tratamiento al total de residuo peligroso generado semanalmente por los generadores de residuos.

7.1.2 Función objetivo:

- Minimizar los costos totales (Costos fijos y costos de transporte)
- Minimizar el rechazo social
- Minimizar el riesgo ambiental

Asociados a una planta de tratamiento de residuos peligrosos a ubicar.

7.1.3 Conjuntos

I = Conjunto de Generadores de residuos, indexado por i

J = Conjunto de localizaciones candidatas para la instalación de la planta de tratamiento de residuos peligrosos, indexado por j

7.1.4 Variables de decisión:

X_j = 1. Si se instala una planta de tratamiento en la localización j

0. En caso contrario

Y_{ij} = 1. Si se asigna el municipio generador i a la planta de tratamiento j

0. En caso contrario

R_j =Riesgo ambiental generado por la planta de residuos peligrosos ubicada en la localización j (Kg/sem).

Rg_i =Rechazo social medido por el número de vehículos asociados al generador de residuos i y el número de habitantes que están en la ruta de recolección desde la planta de tratamiento hasta el generador. Es decir la magnitud de esta variable

se expresa como el número de habitantes que se ven afectados por el paso de los vehículos recolectados.

7.1.5 Parámetros

CF_j = Costos fijos, de apertura y mantenimiento de una planta de tratamiento de residuos peligrosos en la localización j (\$/semana).

C = Costo imputado por kilogramo Kilometro Vehículo (\$/ (Kg * Km*Vehículo))

D_{ji} = Distancia recorrida desde la planta de tratamiento j hasta el generador de residuos i, retornando nuevamente hacia la planta de tratamiento (Km)

r_i = Indica el número de vehículos asociados al generador de residuos i a la semana

W_{ji} = Indica el número de habitantes que están en la ruta de recolección desde la planta de tratamiento j hasta el generador i

Cap = Capacidad de la planta de tratamiento de residuos peligrosos por mes (Kg/sem)

$Cant_i$ = Cantidad de residuos peligrosos emitidos por los generadores de residuos peligrosos i (kg/sem).

$Delta_j$ = Porcentaje obtenido de la diferencia entre el 100% de los residuos que recibirán tratamiento y el porcentaje de reducción del peso de los residuos peligrosos tratados en la localización j.

7.1.6 Restricciones

- 1) La cantidad de residuos peligrosos emitidos por los generadores de residuos i no puede exceder la capacidad de la planta de tratamiento.
- 2) El riesgo ambiental generado por la planta de residuos peligrosos ubicada en la localización j es igual a la cantidad de Kg de producto final o residuos ordinarios, que resultan, luego de haber realizado el tratamiento físico y químico con la tecnología empleada y que por consiguiente deben ser llevados a un relleno sanitario común.
- 3) Número de plantas de tratamiento a abrir
- 4) El rechazo social presente en cada ruta hacia el generador i es igual al riesgo individual multiplicado por el número de habitantes que están en la ruta de recolección desde la planta de tratamiento hasta el generador. El riesgo

individual es medido por la cantidad de vehiculos de transporte asociados al generador de residuos i a la semana, estén llenos o vacíos.

- 5) La restricción expresa que un municipio generador sólo puede asignarse a una planta de tratamiento.
- 6) No negatividad

7.2 MODELO MATEMÁTICO

FUNCIÓN OBJETIVO:

$$\text{Min} = w_1 * \text{fobj1} + w_2 * \text{fobj2} + w_3 * \text{fobj3}$$

Fobj1=Min(costos)=

$$\sum_{j=1} (CF_j * X_j) + \sum_{i=1} \sum_{j=1} (C * r_i * D_{ji} * Cant_i * Y_{ij})$$

Fobj2= Min(Riesgo Ambiental)=

$$R_j = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (Delta_j * Cant_i * X_j)$$

Fobj3= Min(Rechazo Social)=

$$\sum_{j \in J} Rg_j$$

$$Rg_j = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (r_i * W_{ji} * Y_{ij})$$

RESTRICCIONES

$$1) \sum_{i \in I} Cant_i * Y_{ij} \leq Cap * X_j \quad \forall j \in J$$

$$2) R_j = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (Delta_j * Cant_i * X_j)$$

$$3) \sum_{j \in J} X_j = 1$$

$$4) Rg_i = \sum_{j \in J} (r_i * W_{ji} * Y_{ij}) \quad \forall i \in I$$

$$5) \sum_{j \in J} Y_{ij} = 1 \quad \forall i \in I$$

6) No negatividad

$$X_j \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in J$$

$$Y_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I, j \in J$$

$$R_j \geq 0 \quad \forall j \in J$$

$$Rg_i \geq 0 \quad \forall i \in I$$

8. CASO DE ESTUDIO

En este apartado se presenta los datos requeridos para el desarrollo del modelo matemático planteado en el capítulo anterior.

Cabe especificar que los generadores de residuos peligrosos que se tomaron para el caso de estudio son los municipios del Valle del Cauca que reportaron residuos peligrosos hospitalarios (Y1 - Desechos clínicos resultantes de la atención médica prestada en hospitales, centros médicos y clínicas), ante el IDEAM en el informe más reciente correspondiente al año 2014.(ver tabla 6)

Tabla 6. Cantidad de residuos peligrosos tipo Y1 generada en el Valle del Cauca, según municipio (RPGM). 2014.

VALLE DEL CAUCA		Ton /año
BUGA		20,59
BUGALAGRANDE		0,03
CALI		3.284,33
CANDELARIA		0,65
CARTAGO		48,51
DAGUA		5,80
EL AGUILA		0,97
EL CAIRO		0,89
EL CERRITO		7,20
EL DOVIO		1,23
FLORIDA		14,43
GINEBRA		2,62
GUACARI		4,17
JAMUNDI		14,29
LA UNION		6,70
LA VICTORIA		2,28
OBANDO		1,66
PALMIRA		113,05
PRADERA		0,48
RIOFRIO		0,03
ROLDANILLO		0,33
TORO		0,15
TRUJILLO		2,88
TULUA		0,09
ULLOA		0,85
VERSALLES		1,53
YUMBO		2,43
ZARZAL		2,29

Fuente: Información suministrada por el IDEAM periodo año 2014- Anexo A

Para efectos del modelo, la información se contempló en kilogramos por semana.

Los sitios de localización de la planta de tratamiento de residuos peligrosos considerados, son los municipios de Yumbo, Buga y Tuluá; con base en información proporcionada por la empresa DH ECOAMBIENTAL S.A.S de la ciudad de Cali, la cual estuvo enmarcada en los conceptos del Plan de ordenamiento territorial (POT), ventajas logísticas y cobertura de mercado.

Según el POT del municipio de Buga, el ordenamiento del territorio tiene por objeto dar a la planeación económica y social su dimensión territorial, racionalizar la intervención sobre el territorio y propiciar su desarrollo y aprovechamiento sostenible. Esto se puede lograr a partir de la definición de las estrategias territoriales de uso, ocupación y manejo del suelo, en función de los objetivos económicos, sociales, urbanísticos y ambientales.

Por esto, la función pública del ordenamiento del territorio municipal se ejerce mediante la acción urbanística de las entidades municipales, referida a las decisiones administrativas y a las actuaciones urbanísticas que les son propias, relacionadas con el ordenamiento del territorio y la intervención en los usos del suelo, como lo es localizar y señalar las características de la infraestructura para el transporte, los servicios públicos domiciliarios, la disposición y tratamiento de los residuos sólidos, líquidos, tóxicos y peligrosos y los equipamientos de servicios de interés público y social, tales como centros docentes y hospitalarios, y lugares análogos.

Además el POT del municipio de Yumbo, también contempla dentro de sus estrategias en el artículo 31, fortalecer el saneamiento ambiental, promoviendo la aplicación de las normas sanitarias y ambientales, e impulsando la búsqueda de soluciones en asocio con la iniciativa privada, la cofinanciación regional y nacional y la cooperación internacional, para el desarrollo y construcción de sistemas de tratamiento de residuos industriales y sistemas de tratamiento y disposición final de residuos peligrosos industriales.

Por otro lado, la cámara de comercio de Tuluá, define a Tuluá como un municipio que presenta una gran influencia socioeconómica que se extiende sobre un número representativo de municipios vecinos, a la que acude una población flotante que asciende a los 500 mil habitantes, provenientes principalmente de los municipios de Andalucía, Bolívar, Bugalagrande, Riofrío, Roldanillo, San Pedro, Sevilla, Trujillo y Zarzal entre otras, quienes ven en esta ciudad un ejemplo de desarrollo y dinamismo comercial.

También, es necesario señalar que el municipio de Buga según la guía inversionista (2014), este es un municipio nodo de articulación de los tres sistemas viales más importantes del suroccidente de Colombia que son el corredor vial Bogotá – Buenaventura, la vía Buga – Eje Cafetero – norte/ centro del País y la vía Buga – Cali – sur del País. Esta localización estratégica se refuerza por las óptimas

condiciones de las vías nacionales, la disponibilidad de una red férrea, la conexión con el puerto sobre el Pacífico y la cercanía al aeropuerto internacional Alfonso Bonilla Aragón, los cuales facilitan la integración de la subregión con el resto del país y con el mundo.

La localización geográfica, las condiciones climáticas, las infraestructuras de conectividad, la articulación de diferentes modos de transporte, la oferta de servicios empresariales y financieros en la región y la accesibilidad a mercados convierten a Buga en una excelente alternativa para el asentamiento de empresas.

De acuerdo a lo anterior se tienen argumentos que validan la decisión de proponer los municipios de Yumbo, Buga y Tuluá, como la posible localización de la planta de tratamiento de residuos peligrosos.

La empresa DH ECOAMBIENTAL S.A.S inicio sus labores desde hace 15 años en el pacífico colombiano con sede en Buenaventura, donde operaban todo lo relacionado con recolección, barrido, transporte y disposición final de las basuras Municipales. Años más tarde en el 2005 se dedicaron al proceso de desechos hospitalarios y a buscar una tecnología limpia que no contaminara, es decir que no tuviera emisiones de gases perjudiciales para la salud y fue así que en el 2008 encontraron la única tecnología que cumple totalmente con las leyes Colombianas y de todo el mundo.

Esta tecnología está conformada por un proceso físico-químico, la parte física la reduce en un 80% el volumen de los residuos, mientras que el peso se reduce en un 96%, constituyendo con esto un primer alivio ambiental y la parte química lo deja totalmente inerte a tal punto que puede disponerse de forma directa a un relleno sanitario normal, todo lo anterior es controlado mediante un software que indica vía ON LINE el PH según como se va procesando hasta su salida como residuo de la máquina, en donde se indica el PH final con que fue procesado. El sistema es digital es decir que el operario o auxiliar no interviene en este resultado y la maquina en su complejo total se comporta como un laboratorio químico

DH Ecoambiental cuenta con la licencia ambiental otorgada por la C.V.C (Corporación Autónoma del Valle), con los permisos internacionales del químico único en el mundo otorgado por la E.P.A (Agencia de Protección Ambiental del Planeta) y también con una certificación del Ministerio del Medio Ambiente donde avala la tecnología como una alternativa limpia y sana que favorece a la humanidad y hace que por primera vez se cumpla el 100% de eficiencia para evitar las emisiones y las afluentes de otras tecnologías. Así también llena los parámetros exigidos para el ISO 14001 y cumple con el tercer mandamiento de la Red Global de hospitales y clínicas verdes.

8.1 DESCRIPCIÓN DE PARÁMETROS:

8.1.1 COSTOS FIJOS

Para el caso de estudio, en los costos fijos se tendrán en cuenta los costos de instalación y mantenimiento de las mismas (ver Anexo B), los cuales se detallan a continuación:

Costos de instalación: Encontrar la ubicación óptima para una planta de tratamiento de residuos peligrosos, que minimice costos, sugiere considerar los gastos que se ocasionan en su instalación; para esto, es importante conocer el tamaño aproximado del terreno donde se llevara a cabo su funcionamiento, ya que esto permitirá estimar el costo en cada una de las posibles ubicaciones.

Además, se debe añadir el costo de adecuación de la instalación según las especificaciones que la planta requiera, el costo de la maquinaria y/o equipo que realizara el tratamiento, los costos correspondientes al mobiliario del área operativa y administrativa, los Costos de licencias ambientales y los costos asociados a la nómina de los colaboradores de planta.

Dado que las tres localizaciones candidatas se encuentran, dos en el centro del departamento del Valle del Cauca y una en el sur, los precios varían entre unas localizaciones y otras.

Costo de mantenimiento: Aquí se consideran los costos atribuidos al mantenimiento del equipo industrial y a la edificación, donde se incluyen las revisiones periódicas, las piezas, entre otras; de tal forma que se cumpla en todo momento con la normativa ambiental.

8.1.2 COSTOS DE TRANSPORTE

Para calcularlo, se consideró el costo que supondría el transporte de los residuos peligrosos desde los generadores de residuos hasta la planta de tratamiento ubicada en la localización que ha sido seleccionada; se asume que los furgones parten de la planta y concluyen su recorrido en ella.

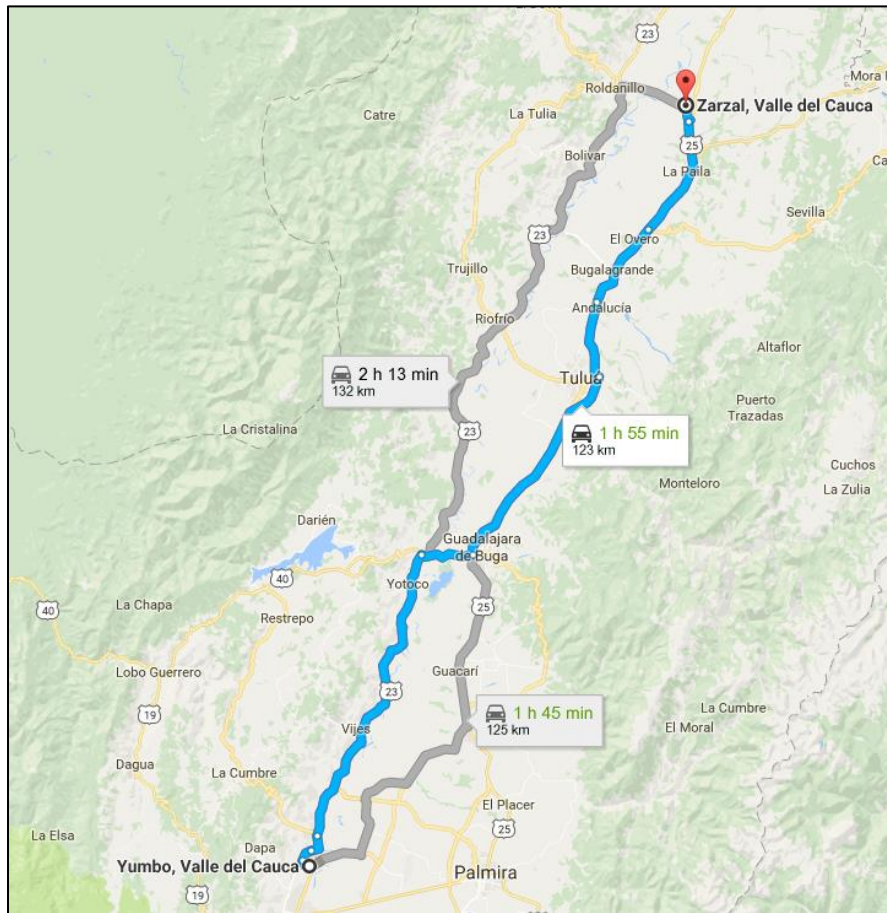
Además, fue necesario tener en cuenta la cantidad de furgones que van a ser necesarios en cada ruta, dependiendo del volumen de residuos que en estos se genere. El número de furgones varía también dependiendo de la capacidad de este, para el caso de estudio se tomaron furgones con una capacidad bruta de 3000 Kg sin embargo el análisis se efectuó con la capacidad efectiva la cual es de 1500 Kg.

$$\sum_{i=1} \sum_{j=1} (C * r_i * D_{ji} * Y_{ij} * Cant_i)$$

También, se considera la distancia recorrida recogiendo los residuos peligrosos en el generador, partiendo desde la planta de tratamiento y terminando en ella.

Las distancias D_{ji} desde cada una de las posibles localizaciones de la planta hasta cada generador de residuos i (Ver anexo), se calcularon mediante el servidor de aplicaciones de mapas en la web GOOGLE MAPS (<https://www.google.es/maps>), eligiendo el trayecto que proporcione la distancia más corta en kilómetros. La Figura 8, muestra la forma como se obtuvo el tiempo y la distancia en las posibles rutas arrojadas por google maps; en este caso particular desde la posible localización en Yumbo hasta el municipio generador de residuos Zarzal.

Figura 8. Distancia más corta desde una posible localización de la planta hasta un generador de residuos peligrosos



Fuente: <https://www.google.es/maps>

7.1.3 RIESGO AMBIENTAL

Para medir el riesgo ambiental que genera la ubicación de la planta de tratamiento de residuos peligrosos en cada una de las localizaciones candidatas, se recurrió al análisis de la tecnología utilizada para el tratamiento de estos. En este caso, la empresa objeto de estudio utiliza una tecnología conformada por un proceso físico-químico, en la cual, el peso se reduce en un 96%. Por esto, se tomó la decisión de trabajar con el 4% restante, debido a que este, es el porcentaje que permitirá observar la cantidad de producto final que debe ser llevado a un relleno sanitario.

7.1.4 RECHAZO SOCIAL:

Para el cálculo del rechazo social, se tomó la definición del riesgo individual expuesta por Giannikos (1998), la cual sugiere medir el riesgo individual mediante la cantidad de residuos peligrosos que se transportarán en furgones desde el generador de residuos peligrosos *i* a la planta de tratamiento ubicada en la localización *j*. Sin embargo, para el presente proyecto se consideró el enfoque de Paralera (2006), en el cual el riesgo individual es medido por la cantidad de vehículos de transporte asociados al generador de residuos *i* a la semana, estén llenos o vacíos. Para luego, dicho riesgo individual multiplicarlo por el número de habitantes que están en la ruta de recolección desde la planta de tratamiento *j* hasta el generador *i*; y así calcular el rechazo social.

El parámetro asociado al número de habitantes que están inmersos en la ruta de recolección, se halló, calculando el recorrido desde la planta de tratamiento, hasta el generador de residuos. La ruta se determinó mediante el servidor Google Maps que, además de proporcionar la ruta más corta en kilómetros desde la posible localización de la planta de tratamiento hasta el generador de residuos, indica cuál es el camino que sigue y los municipios que atraviesa. Cabe notar que se consideró la cantidad total de habitantes de cada municipio que estaba en la ruta (ver tabla 7).

Tabla 7. Cantidad de habitantes en los municipios del Departamento del Valle del Cauca

Nombre	Cant. Habitantes
Alcalá	21779
Andalucía	17789
Ansermanuevo	19450
Argelia	6421
Bolívar	13302
Buenaventura	407539
Buga	115028
Bugalagrande	21127
Caicedonia	29726
Cali	2394870
Calima - El Darién	15794
Candelaria	82898
Cartago	132966
Dagua	36524
El Águila	11115
El Cairo	10050
El Cerrito	57749
El Dovio	8407
Florida	58342
Ginebra	21241
Guacarí	34796

Fuente: Proyecciones Población DANE 1985-2020-Gobernacion Valle del Cauca-Anexo C

Tabla 7. Cantidad de habitantes en los municipios del Departamento del Valle del Cauca
(Continuación)

Nombre	Cant. Habitantes
Jamundí	122030
La Cumbre	11562
La Unión	38351
La Victoria	13167
Obando	15059
Palmira	306727
Pradera	55831
Restrepo	16272
Riofrío	14489
Roldanillo	32597
San Pedro	18383
Sevilla	44876
Toro	16458
Trujillo	18041
Tuluá	214081
Ulloa	5421
Versalles	7118
Vijes	11147
Yotoco	16345
Yumbo	119889
Zarzal	45681

Fuente: Proyecciones Población DANE 1985-2020-Gobernacion Valle del Cauca-Anexo C

7.2 DEFINICIÓN DE PONDERACIONES

Los objetivos que se pretenden minimizar con el modelo matemático propuesto, están acompañados por unos pesos que se definieron al utilizar el método de evaluación y decisión multicriterio llamado AHP (Analytical Hierachy Process), luego de haber analizado cada uno de los métodos anteriores.

Se eligió la herramienta AHP porque los juicios son su base. González y Ordoñez (2012) exponen que los juicios son establecidos por información científica y técnica y por la experiencia y conocimientos del grupo decisor. Tomar en cuenta las opiniones de cada uno de los analistas y/o grupos de interés en la evaluación del

modelo, por medio de las comparaciones pareadas que realiza cada uno de los involucrados, hace del AHP un método diferente a los demás. Las comparaciones pareadas permiten conocer sus preferencias respecto a los diferentes componentes del modelo (criterios, subcriterios y alternativas), en términos de su importancia, preferencia o probabilidad. La preferencia se cuantificará mediante un valor numérico.

Inicialmente, se exponen los criterios que más intervienen en la localización de instalaciones no deseables y que están inmersos dentro del concepto de sostenibilidad, los cuales son: Costo total, impacto ambiental y rechazo social. Seguidamente se tomó en consideración la información proporcionada por tres tipos de decisores, representantes del sector empresarial y ambiental; los cuales fueron aptos por su formación académica, experiencia laboral y conocimientos acerca de tratamientos de residuos peligrosos y legislación correspondiente.

Para comparar entre sí las tres posturas, se siguieron los procedimientos desarrollados por Saaty (2001, 2009) y Davis y Williams (1994), quienes proponen en primera instancia corroborar la consistencia de las respuestas de los decisores.

Para el efecto, se siguieron cuatro etapas:

Etapas 1: Construcción de la matriz de decisión

Cada decisor realizó el análisis por pares, de acuerdo a la escala de Saaty (ver Tabla 8). Es decir, compara la importancia de cada uno de los criterios de manera par a par los criterios establecidos verticalmente contra los criterios establecidos horizontalmente.

Tabla 8. Escala de Saaty

ESCALA DE VALORACION	
1	Igualmente preferida
3	Moderadamente preferida
5	Fuertemente preferida
7	muy fuertemente preferida
9	Extremadamente Preferida

Fuente:

Tomado de González y Ordoñez (2012)

Para la elaboración de la matriz de comparaciones pareadas, se tomó en cuenta la información de los evaluadores respecto a cada uno de los criterios en conflicto (Ver Tabla 9, Tabla 10, Tabla 11).

Tabla 9. Matriz de comparación por pares de criterios-Evaluador 1

	C1:Costo Total	C2:Riesgo Ambiental	C3:Rechazo Social
C1:Costo Total	1	1/7	3
C2:Riesgo Ambiental	7	1	3
C3:Rechazo Social	1/3	1/3	1
Total	8,33	1,48	7

Fuente: Elaboración propia

Tabla 10. Matriz de comparación por pares de criterios-Evaluador 2

	C1:Costo Total	C2:Riesgo Ambiental	C3:Rechazo Social
C1:Costo Total	1	5	3
C2:Riesgo Ambiental	1/5	1	3
C3:Rechazo Social	1/3	1/3	1
Total	1,53	6,33	7

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11. Matriz de comparación por pares de criterios-Evaluador 3

	C1:Costo Total	C2:Riesgo Ambiental	C3:Rechazo Social
C1:Costo Total	1	1	3
C2:Riesgo Ambiental	1	1	3
C3:Rechazo Social	1/3	1/3	1
Total	2,33	2,33	7

Fuente: Elaboración propia

Debido a que no hubo consenso de las calificaciones entre los evaluadores, se recurrió a la media geométrica, ya que esta permite unificar las relaciones entre cada par de criterios en una sola matriz de comparación por pares. (Ver Tabla 12).

Tabla 12. Matriz de comparación por pares de criterios- Unificada

	C1:Costo Total	C2:Riesgo Ambiental	C3:Rechazo Social
C1:Costo Total	1,00	0,89	3,00
C2:Riesgo Ambiental	1,12	1,00	3,00
C3:Rechazo Social	0,33	0,33	1,00
Total	2,45	2,23	7

Fuente: Elaboración propia

Etap 2. Normalización de las decisiones

Después de haber realizado la comparación por pares de criterios unificada, las calificaciones otorgadas por los decisores se tratan matemáticamente como una matriz, para lo cual se suman todos los valores de cada una de las columnas y se

divide cada uno de los elementos de esa columna entre ese valor, quedando una matriz normalizada. (Ver Tabla 13).

Tabla 13. Matriz Normalizada

	C1:Costo Total	C2:Riesgo Ambiental	C3:Rechazo Social
C1:Costo Total	0,41	0,40	0,43
C2:Riesgo Ambiental	0,46	0,45	0,43
C3:Rechazo Social	0,14	0,15	0,14

Fuente: Elaboración propia

Etap 3. Cálculo del vector de prioridad o vector característico

Con la matriz de la Tabla 13, se calcula el vector de prioridad o vector característico de cada criterio, el cual es el promedio de la suma de las filas de los valores normalizados de cada uno de los criterios, es decir, dividir la suma de cada fila entre el número de criterios comparados en la matriz. Ver la columna de cada criterio en evaluación en la Tabla 14. La suma de estos vectores debe ser igual a 1.00.

Tabla 14. Matriz Normalizada con el vector característico

	C1:Costo Total	C2:Riesgo Ambiental	C3:Rechazo Social	Suma	Vector Característico
C1:Costo Total	0,41	0,40	0,43	1,24	0,41
C2:Riesgo Ambiental	0,46	0,45	0,43	1,33	0,45
C3:Rechazo Social	0,14	0,15	0,14	0,43	0,14

Fuente: Elaboración propia

Etap 4. Consistencia de las decisiones.

Una vez obtenido el vector característico de la matriz de comparación por pares, tiene que verificarse que sean consistentes, multiplicando el vector característico por la matriz de comparación por pares sin normalizar, para obtener un vector nuevo, después dividir cada uno de los valores del vector nuevo entre el valor del vector característico correspondiente, de tal modo que al obtener un promedio de los valores de la columna del vector resultante, se obtiene el λ .

Donde $\lambda_{Max} \geq n$ (Número de elementos). Entre más cercana sea λ_{Max} a n , más consistente será la matriz de comparaciones pareadas.

Tabla 15. Máximo valor propio λ_{max}

	C1:Costo Economico	C2:Riesgo Ambiental	C3:Rechazo Social	Vector Caracteristico	Vector nuevo	
C1:Costo Economico	1	8/9	3	0,41	1,23	3,01
C2:Riesgo Ambiental	1 1/8	1	3	0,45	1,33	2,95
C3:Rechazo Social	1/3	1/3	1	0,14	0,43	3,05
					$\lambda_{max}=$	3,00

Fuente: Elaboración propia

Una vez obtenido el valor de λ_{Max} , el siguiente paso es determinar si los decisores han sido consistentes en sus evaluaciones. Entonces, siguiendo a Saaty (2001, 2009), con los valores de la Tabla 15, se calculan los indicadores de la Tabla 15.

Tabla 16. Indicadores de los criterios

Indice de consistencia geometrico (IC)	$IC = \frac{N_{max} - n}{n - 1}$	$IC = \frac{3 - 3}{3 - 1} = 0.00095$
Indice de consistencia aleatorio (IA)	$IA = \frac{1.98(n - 2)}{n}$	$IA = \frac{1.98(3 - 2)}{3} = 0.66$
Razon de consistencia (RC)	$RC = \frac{IC}{IA}$	$RC = \frac{0.00095}{0.66} = 0.00144$

Fuente: Ecuaciones tomadas de Saaty

En la Tabla 16, el resultado a resaltar es la razón de consistencia (RC), Saaty (2001) argumenta que cuando la razón de consistencia es inferior a 0.1, indica que los juicios están dentro de los límites recomendados, son consistentes y se debe continuar con el proceso. Para este trabajo, la razón de consistencia (RC) fue de 0,00144 y, como es inferior a 0.1, se continúa con el desarrollo del trabajo, tomando los valores del vector característico en el modelo multiobjetivo.

9. SOLUCIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

El modelo fue programado en AMPL (A Modeling Language for Mathematical Programming) y en el servidor NEOS SERVER con el fin de conocer la localización óptima para la planta de tratamiento.

NEOS SERVER, se dio a conocer en 1995 como resultado de un esfuerzo por desarrollar servidores computacionales y Tecnologías colaborativas. Hoy, el servidor NEOS (<http://www.neos-server.org>) es un esfuerzo de investigación multiinstitucional que brinda acceso a más de cincuenta paquetes de optimización académica y comercial a través de un surtido de interfaz de Internet. (Dolan et al., 2002)

NEOS Server es un servicio gratuito de Internet para resolver problemas de optimización numérica. El servidor NEOS proporciona acceso a más de 60 solucionadores de última generación en más de una docena de categorías de optimización. Para este caso en particular se usó el solucionador Cplex, el cual permite optimizar modelos de programación lineal.

El planteamiento de un modelo matemático desarrollado en el lenguaje AMPL debe de contener tres archivos (Bloc de notas), el modelo, los datos y los comandos propios de Neos Solver.

El archivo “Modelo”, es un bloc de notas (ver Anexo D) donde la función objetivo **minimice costo_total_riesgo_ambiental_rechazo_social** buscar minimizar el costo total de apertura de una planta de tratamiento de residuos peligrosos, minimizar el riesgo ambiental causado por el tipo de tratamiento a utilizar y minimizar el rechazo social generado en la población, cuando este, observa el vehículo de recolección realizando las rutas, se encuentre lleno o vacío. En este además, se contempla un grupo de variables de decisión que satisfagan el conjunto de restricciones y optimice la función objetivo. Posteriormente, se realizó el archivo de “datos” (ver Anexo E), donde se ingresa la información necesaria para brindar la solución al problema. Por último se elabora el archivo de “comandos”, que se puede observar en el Anexo F.

Al interactuar el modelo con el software NEOS Solver, se genera un total de: 118 variables, de las cuales 87 son binarias y 31 lineales; 63 restricciones, de las cuales 60 son restricciones de igualdad y 3 de desigualdad.

Los resultados obtenidos al modelar el problema de localización con las ponderaciones arrojadas por la herramienta AHP, señalan que la planta de tratamiento de residuos peligrosos se debe localizar en el municipio de Yumbo, ya que en este se están optimizando los tres objetivos en conflicto. (Ver anexo G).

Para evidenciar de manera gráfica la localización óptima arrojada por el modelo, se recurrió a la plataforma Google Maps®. La región sombreada es el municipio donde se debe localizar la planta de tratamiento. (Ver figura 9).

Figura 9. Ubicación geográfica de la planta de tratamiento de residuos peligrosos



Fuente: <https://www.google.es/maps>

A continuación en la Tabla 16 se realiza un resumen de los resultados arrojados por el Neos Solver. Además, también se llevará a cabo un análisis de los resultados.

Tabla 17. Resultados del modelo

Función Objetivo	X	R	Rg
78769355,1	YUMB	2723,4	BUGA 533189.0 GINE 198879.0 ROLD 207769.0
			CALI 7544277.0 GUAC 212434.0 TORO 262578.0
			CAND 509514.0 GUBU 327462.0 TRUJ 179911.0
			CART 740062.0 JAMU 2636789.0 TULU 494873.0
			DAGU 156413.0 LAUN 246120.0 ULLO 745483.0
			ELAG 696841.0 LAVI 592037.0 VERS 223294.0
			ELCA 284010.0 OBAN 607096.0 YUMB 119889.0
			ELCE 177638.0 PALM 853232.0 ZARZ 578870.0
			ELDO 216176.0 PRAD 482447.0
			FLOR 567856.0 RIOF 161870.0

Fuente: Elaboración propia

También, es importante tener presente que los habitantes que se van a ver afectados en cada una de las rutas desde la planta hacia cada generador, en algún momento podrían provocar y generar fenómenos de oposición al servicio prestado por la planta de tratamiento.

El modelo multiobjetivo de localización permitió seleccionar el municipio más idóneo para la planta de tratamiento, permitiendo con esto, tener bases sólidas al momento de decidir emprender este tipo de industrias.

10. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

En este apartado, se llevará a cabo un análisis de sensibilidad, el cual consiste en la asignación de diferentes ponderaciones a los criterios establecidos en la función objetivo. Estas ponderaciones reflejarán la relevancia y preferencia que se proporciona a cada criterio en el proceso de optimización, esto con el fin de analizar el impacto de los cambios efectuados y conocer la variable más sensible a modificaciones.

Para el presente análisis se van a ejecutar cuatro escenarios respecto a las ponderaciones de los criterios, como se observa a continuación:

Tabla 18. Escenarios análisis de sensibilidad

	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
Alpha 1	0,33	1	0	0
Alpha 2	0,33	0	1	0
Alpha 3	0,33	0	0	1

Fuente: Elaboración propia

En el primer escenario, se optó por asignar pesos iguales a cada uno de los Alphas, los cuales representan a cada criterio ya establecido, de este modo, Alpha1 es el criterio de costos, Alpha2 criterio de impacto ambiental y Alpha3 criterio de rechazo social; con esta variación, el modelo arrojó que la localización que optimiza los tres objetivos en conflicto, es el municipio de Yumbo, siendo este, el mismo municipio que arrojó la primera ejecución del modelo con las ponderaciones asignadas mediante la herramienta AHP. (Ver Anexo H)

En el segundo y tercer escenario, se asignó el 100% al criterio de costos y 100% al criterio de impacto ambiental, respectivamente, arrojando como solución, nuevamente el municipio de Yumbo, como el adecuado y óptimo para localizar la planta de tratamiento. (Ver Anexo I, Anexo J)

En el cuarto escenario, se asignó el 100% al criterio de rechazo social, en donde solo se estaría minimizando el riesgo percibido por el paso de los vehículos. Al ejecutar el modelo, este arrojó que la localización óptima es el municipio de Guadalajara de Buga. Cabe notar que este municipio pertenece a la zona centro del departamento por consiguiente desde allí los recorridos se podrían distribuir de una forma más uniforme. (Ver Anexo K).

Tabla19. Resultados del análisis de sensibilidad

	Función Objetivo	X
Escenario 1	67867026,2	YUMB
Escenario 2	185097922,8	YUMB
Escenario 3	2723,4	YUMB
Escenario 4	19135904	GUBU

Fuente: Elaboración Propia

Al realizar este análisis, se logra concluir que el criterio de rechazo social es sensible a variaciones, ya que cuando se asignó todo el total del porcentaje, este arrojó una localización distinta al modelo con las ponderaciones definidas con la herramienta AHP.

También, cabe especificar que el criterio de impacto ambiental en los 4 escenarios, arroja el mismo valor, ya que en las posibles localizaciones se va a utilizar el mismo tipo de tratamiento.

11. CONCLUSIONES

La localización de instalaciones no deseables se convirtió en una decisión de gran importancia para los empresarios, debido a los efectos adversos que atrae las operaciones que allí se traten, tanto para la comunidad incluyente en la zona, como para el medio ambiente. Por esto, es necesario llevar a cabo modelos multiobjetivos que permitan obtener un conjunto de soluciones óptimas, logrando con esto definir la localización idónea para la instalación.

Para el presente proyecto se abordó la construcción de un modelo multiobjetivo para la localización de una instalación indeseable, considerando la herramienta AHP en las ponderaciones asignadas a los objetivos en conflicto, permitiendo con esto exponer juicios basados en la experiencia y el conocimiento del grupo decisor.

En el diagnóstico del sistema actual de tratamiento de residuos sólidos peligrosos en el departamento del Valle del Cauca, se logró obtener información del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, la cual fue un parámetro base utilizado en la construcción del modelo, debido a que allí se especificaba la cantidad de residuos peligrosos que reportaron algunos municipios del departamento del Valle del Cauca.

Además, al realizar consultas sobre las empresas con licencia ambiental o plan de manejo ambiental de residuos peligrosos, por medio de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), se logró identificar la empresa objeto de estudio, quien más adelante proporcionaría datos necesarios para el desarrollo del modelo.

Por medio de la consulta de bases de datos y demás fuentes de búsqueda referente al tema de localizaciones indeseables, se identificaron tres factores claves enmarcados dentro del concepto de sostenibilidad. Además, la búsqueda hizo posible encontrar los modelos matemáticos que más se adecuaban a los factores claves identificados, estos fueron, el modelo matemático formulado por Paralera (2006) y el modelo matemático formulado por Manyoma, Torres y Vidal (2015).

Para la formulación del modelo multiobjetivo, se hizo una revisión de los artículos identificados en el capítulo anterior, analizando sus funciones objetivo, sus parámetros y restricciones.

Los tres criterios enmarcados bajo el concepto de sostenibilidad, son los siguientes: uno de ellos es el económico, el cual involucra los costos fijos (costos de instalación y mantenimiento de la planta) y el costo de transporte que supone el traslado de los residuos de los generadores hacia la planta de tratamiento. Otro criterio, es el ambiental, el cual se analizó respecto a la tecnología empleada por la instalación,

ya que de acuerdo a está, la cantidad de producto final que se debe arrojar a un relleno sanitario, es necesaria minimizarla, logrando con esto reducir el impacto de la contaminación. Y por último, se consideró el criterio social, minimizando allí, el riesgo percibido por el paso de los vehículos de recolección estén llenos de residuos o vacíos.

Una vez formulados los tres criterios y las restricciones necesarias se procedió a utilizar la herramienta de evaluación y decisión multicriterio AHP la cual permitió obtener las ponderaciones que fueron asignadas a cada criterio de la función objetivo. Estas ponderaciones fueron producto de la evaluación de tres agentes pertenecientes al sector empresarial y ambiental.

Los parámetros necesarios para llevar a cabo el modelo multiobjetivo diseñado, fueron proporcionados por la empresa DH Ecoambiental la cual se dedica al tratamiento de desechos hospitalarios haciendo uso de una tecnología limpia con el medio ambiente.

Luego de esto, el modelo fue programado en AMPL (A Modeling Language for Mathematical Programming) y en el servidor Neos Server, donde arrojo como localización óptima para la planta de tratamiento, el municipio de Yumbo; ya que en este se están optimizando los tres objetivos en conflicto.

Para validar el modelo multiobjetivo diseñado, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad, en el cual se plantearon 4 escenarios de asignación de pesos. En estos escenarios se dio importancia a cada criterio y a todos por igual. El análisis permitió observar que al asignar todo el peso al criterio de rechazo social, este arroja una localización distinta a la planteada por el modelo multiobjetivo con las ponderaciones calculadas con la herramienta AHP, lo que quiere decir que este criterio es sensible a modificaciones.

La nueva localización arrojada por el escenario donde se asignó el 100% al criterio de rechazo social podría deberse a que las rutas desde la planta de tratamiento hasta cada generador se distribuya de forma más uniforme, ya que la nueva ubicación pertenece al centro del departamento del Valle del Cauca.

En resumen, el objetivo principal de este trabajo es diseñar un modelo de localización para una planta de tratamiento de residuos peligrosos, resuelto bajo un enfoque multiobjetivo. Partiendo de un modelo base, se resolvió el problema de localización discreta, con el plus de involucrar la herramienta AHP en la definición de ponderaciones requeridas en cada uno de los objetivos de la función de desempeño.

Para futuras investigaciones, se recomienda utilizar otros métodos de evaluación y decisión multicriterio alternativos, que permitan expresar las preferencias del decisor en términos de la utilidad que reporte cada criterio definido en el modelo de localización. También se recomienda contemplar el problema de ruteo de vehículos, ya que permiten programar las rutas de recolección de residuos. Además, se sugiere analizar la consideración de instalar más de una instalación en el departamento del Valle del Cauca o en algunos de los departamentos suroccidente colombiano y del eje cafetero.

Finalmente, se recomienda contemplar el impacto ambiental de manera más específica, desde las perspectivas del aire y el agua; como también, realizar un profundo análisis sobre la selección de sitios candidatos, dado que, cuando se contempló el municipio de Yumbo, no se tuvo en cuenta que allí, existían empresas de alimentos, las cuales pueden propiciar fenómenos de oposición ante la ubicación de la planta en sus alrededores.

12. BIBLIOGRAFÍA

- Barredo Cano, J. I. (1996). Sistemas de Información Geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio. Madrid, Ra-Ma.
- Bosque S.J & Franco M.S. Modelos De Localizacion-Asignacion Y Evaluación Multicriterio Para La Localización De Instalaciones No Deseables. Serie Geográfica, 1995, N° 5, pp. 97-112.
- Bosque S. J, Gómez D. M, Rodríguez E.V, Díaz M. M, Rodríguez D. A & Vela G. A. (1999). Localización De Centros De Tratamiento De Residuos: Una Propuesta Metodológica Basada En Un SIG. Luna Azul ISSN 1909-2474 No. 41, julio - diciembre 2015.
- Bosque S. J, Gómez D. M & Palm R.F. "Un Nuevo Modelo Para Localizar Instalaciones No Deseables: Ventajas Derivadas De La Integración De Modelos De Localización-Asignación Y SIG". Cuadernos Geográficos 39, 2007, pp.53-68.
- Bronfman, C. A y Garrido, R. A. (2003) "Modelo multiobjetivo de distribución y localización de centros de tratamiento de residuos peligrosos." Departamento de Ingeniería de Transporte, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Cámara de Tuluá. Recuperado de http://camaratulua.org/area_influencia/tulua/
- Colebrook M, Gutiérrez J.M & Sicilia J (2003). Localización De Un Servicio No Deseado En Redes Usando El Criterio Anti-Cent-Dian. Research Gate. 27 Congreso Nacional De Estadística E Investigación Operativa Lleida.
- CVC. Dirección técnica ambiental (2014).Informe gestión de residuos o desechos peligrosos registro RESPEL de balance del año 2012.
- Daskin, M., Snyder, L., & Berger, R (2003). Facility Location In Supply Chain Design. Working Paper, No. 03-010. Northwestern University.
- Davis, L. y Willians, G (1994). Evaluation and selecting simulation software using the analytic hierarchy process. In: Integrated Manufacturing Systems. Vol. 51, No.1, p. 23-32.
- Dolan E, Fourer R, Moré J and Munson T (2002). Optimization on the NEOS Server.SIAM News, Vol.35, N°6.
- Erkut E., Neuman S (1992). A Multiobjective Model For Locating Undesirable Facilities. Annals Operational Research 40, pp.209-227.

Gimenez M, Cardozo C. (2012). Localización óptima de relleno sanitario aplicando técnicas de Multicriterio en sistemas de información geográfica (SIG) en el área metropolitana del Alto Paraná. Recuperado de <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/26832>.

Gerard B. Toskano H. "El proceso de análisis jerárquico (AHP) como herramienta para la toma de decisiones en la selección de proveedores". Tesis de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, Perú. 2005.

Gobernación del Valle del Cauca. Boletines Socioeconómicos Subregión Norte, N°3, 2013.

Guerrero G. C (2007). Un Modelo Multicriterio De Localización De Centros No Deseados Con Pesos. Publicaciones Consejo Económico y Social de Andalucía. Colección premio de investigación.

Guerrero C., Saameño J.J, Muñoz J. Un Modelo General Para El Problema De Localización De Centros Peligrosos Con Cualquier Norma. 27 Congreso Nacional de Estadística e Investigación Operativa Lleida, 2003.

Guía de inversiones. Recuperado de http://www.ccbuga.org.co/guia_de_inversiones/

Giannikos, I. (1998): A Multiobjective Programming Model for Locating Treatment Sites and Routing Hazardous Wastes. *European Journal of Operational Research*, 104, pp. 333-342.

Habitantes de los municipios del Departamento del valle del Cauca. Recuperado de <http://www.valledelcauca.gov.co/salud/publicaciones.php?id=2517>.

Invertir en el Valle del Cauca. Recuperado de <http://www.investpacific.org/es/invierta.php>

Manejo seguro de residuos Tóxicos o Peligrosos. Universidad de Concepción. Recuperado de <http://www.ingenieroambiental.com/4014/seguro.pdf>

Manyoma V. P, Pardo C. M & Torres L. P (2013). Localización De Depósitos Internos Para Residuos Sólidos Hospitalarios Utilizando Técnicas Multicriterio. Recuperado de <http://revistas.javeriana.edu.co/index.php/iyu/article/viewFile/2426/5225>.

Martínez, Eduardo y Escudey, Mauricio (1997), Evaluación y decisión Multicriterio: reflexiones y experiencias, Santiago, USACH, UNESCO.

Medina T. M, Cerda T. J. (2007) “Modelo De Localización Óptima De Actividades No Deseadas Aplicado A Los Residuos Sólidos En La Región Metropolitana”. Ingeniare. Revista chilena de ingeniería, vol. 16 N° 1, 2008, pp. 211-219.

Mehrez A, Sinuany-Stern Z & Stulman A. The One-Dimensional Single Facility Maximin Distance Location Problem. Journal Regional Science, Vol. 23, N° 2, 1983.

Mena F. C, Morales H.Y, Ormazábal R.Y & Gajardo V.J. Localización De Un Relleno Sanitario En La Comuna De Parral, Chile, A Través De Evaluación Multicriterio. Interciencia, vol. 35 N° 9, 2010.

Ministerio Del Medio Ambiente, Vivienda Y Desarrollo Territorial Colombiano. Decreto 4741 de 2005. República de Colombia.

Paralera C. (2006). Localización de incineradoras de materiales específicos. Universidad Pablo de Olavide. Revista Electronica de comunicaciones y trabajos de ASEPUMA, ISSN-e 1575-605X, N°7. pp.5-53.

Plastria A.F, Carriboza B. E. (1999). Undesirable Facility Location With Minimal Covering Objectives. European Journal of Operational Research 119, 158-180.

Romero, C. (1993) Análisis de las Decisiones Multicriterio. Series Monográficas de Ingeniería de Sistemas, Isdefe 4º Edición.

Song B. D, Morrison A. J, Dae Ko J. Efficient Location And Allocation Strategies For Undesirable Facilities Considering Their Fundamental Properties. Computers & Industrial Engineering 65, 2013, pp. 475–484.

Steuer, E. (1986) Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation, and Application. John Wiley & Sons, Inc., New York.

Tuzkaya G, Onüt S, Tuzkaya UR, Gülsün B. An Analytic Network Process Approach For Locating Undesirable Facilities: An Example From Istanbul, Turkey. Science Direct. Journal of Environmental Management Vol 88, Issue 4, September 2008, pp. 970–983.

Saaty, T. The Analytic Network Process. In: Decision Making with the Analytic Network Process. Pittsburg University Press, 2001, p. 1-26. 38.

Saaty, T. Extending the Measurement of Tangibles to Intangibles. In: International Journal of Information Technology & Decision Making, 2009, Vol. 8, no.1, pp.7-27

Urbanística y ordenación del territorio (2012-2013).Recuperado de:
http://www.urbanismogranada.com/administrador/archivos/28_11_13_gvSIG_TALLER_5.pdf

Varón B. K, Orejuela C. J P, Manyoma V. P C. Modelo matemático para la ubicación de estaciones de transferencia de residuos sólidos urbanos. Revista EIA, ISSN 1794-1237.Año XII, Vol.12, N°23,2015, pp. 61-70.

Yapicioglu H, Smith A & Dozier G. Solving The Semi-Desirable Facility Location Problem Using Bi-Objective Particle Swarm. European Journal of Operational Research 177, 2007, pp.733–749.

13. ANEXOS

[Anexo A. Datos Cantidad de residuos peligrosos](#)

[Anexo B. Datos parámetros Costos](#)

[Anexo C. Datos población de los municipios del Valle del Cauca](#)

[Anexo D. Archivo Modelo AMPL](#)

[Anexo E. Archivo de datos para la solución del modelo](#)

[Anexo F. Archivo de comandos](#)

Anexo G. Solución de modelo original

```

FUNCION OBJETIVO =      86173272.1

CONFIGURACION DEL SISTEMA (PLANTAS DE TRATAMIENTO ABIERTAS) =

X [*] :=
YUMB  1.0
;

CONFIGURACION DEL SISTEMA (ASIGNACION) =

Y [*,*]
:      YUMB      :=
BUGA   1.0
CALI   1.0
CAND   1.0
CART   1.0
DAGU   1.0
ELAG   1.0
ELCA   1.0
ELCE   1.0
ELDO   1.0
FLOR   1.0
GINE   1.0
GUAC   1.0
GUBU   1.0
JAMU   1.0
LAUN   1.0
LAVI   1.0
OBAN   1.0
PALM   1.0
PRAD   1.0
RIOF   1.0
ROLD   1.0
TORO   1.0
TRUJ   1.0
TULU   1.0
ULLO   1.0
VERS   1.0
YUMB   1.0
ZARZ   1.0
;

RIESGO AMBIENTAL =

R [*] :=
YUMB  2723.4
;

RECHAZO SOCIAL =

Rg [*] :=
BUGA  533189.0  GINE  198879.0  ROLD  207769.0
CALI  7544277.0 GUAC  212434.0  TORO  262578.0
CAND  509514.0  GUBU  327462.0  TRUJ  179911.0
CART  740062.0  JAMU  2636789.0  TULU  494873.0
DAGU  156413.0  LAUN  246120.0  ULLO  745483.0
ELAG  696841.0  LAVI  592037.0  VERS  223294.0
ELCA  284010.0  OBAN  607096.0  YUMB  119889.0
ELCE  177638.0  PALM  853232.0  ZARZ  578870.0
ELDO  216176.0  PRAD  482447.0
FLOR  567856.0  RIOF  161870.0
;

```


Anexo H. Solución de escenario 1 del análisis de sensibilidad

```

FUNCION OBJETIVO =          68545696.5

CONFIGURACION DEL SISTEMA (PLANTAS DE TRATAMIENTO ABIERTAS) =

X [*] :=
YUMB  1.0
;

CONFIGURACION DEL SISTEMA (ASIGNACION) =

Y [*,*]
:      YUMB      :=
BUGA   1.0
CALI   1.0
CAND   1.0
CART   1.0
DAGU   1.0
ELAG   1.0
ELCA   1.0
ELCE   1.0
ELDO   1.0
FLOR   1.0
GINE   1.0
GUAC   1.0
GUBU   1.0
JAMU   1.0
LAUN   1.0
LAVI   1.0
OBAN   1.0
PALM   1.0
PRAD   1.0
RIOF   1.0
ROLD   1.0
TORO   1.0
TRUJ   1.0
TULU   1.0
ULLO   1.0
VERS   1.0
YUMB   1.0
ZARZ   1.0
;

RIESGO AMBIENTAL =

R [*] :=
YUMB  2723.4
;

RECHAZO SOCIAL =

Rg [*] :=
BUGA  533189.0  GINE  198879.0  ROLD  207769.0
CALI  7544277.0 GUAC  212434.0  TORO  262578.0
CAND  509514.0  GUBU  327462.0  TRUJ  179911.0
CART  740062.0  JAMU  2636789.0  TULU  494873.0
DAGU  156413.0  LAUN  246120.0  ULLO  745483.0
ELAG  696841.0  LAVI  592037.0  VERS  223294.0
ELCA  284010.0  OBAN  607096.0  YUMB  119889.0
ELCE  177638.0  PALM  853232.0  ZARZ  578870.0
ELDO  216176.0  PRAD  482447.0
FLOR  567856.0  RIOF  161870.0
;

```

Anexo I. Solución de escenario 2 del análisis de sensibilidad

```

FUNCION OBJETIVO =          185097922.8

CONFIGURACION DEL SISTEMA (PLANTAS DE TRATAMIENTO ABIERTAS) =

X [*] :=
YUMB  1.0
;

CONFIGURACION DEL SISTEMA (ASIGNACION) =

Y [*,*]
:      YUMB      :=
BUGA   1.0
CALI   1.0
CAND   1.0
CART   1.0
DAGU   1.0
ELAG   1.0
ELCA   1.0
ELCE   1.0
ELDO   1.0
FLOR   1.0
GINE   1.0
GUAC   1.0
GUBU   1.0
JAMU   1.0
LAUN   1.0
LAVI   1.0
OBAN   1.0
PALM   1.0
PRAD   1.0
RIOF   1.0
ROLD   1.0
TORO   1.0
TRUJ   1.0
TULU   1.0
ULLO   1.0
VERS   1.0
YUMB   1.0
ZARZ   1.0
;

RIESGO AMBIENTAL =

R [*] :=
YUMB  2723.4
;

RECHAZO SOCIAL =

Rg [*] :=
BUGA  533189.0  GINE  198879.0  ROLD  207769.0
CALI  7544277.0 GUAC  212434.0  TORO  262578.0
CAND  509514.0  GUBU  327462.0  TRUJ  179911.0
CART  740062.0  JAMU  2636789.0 TULU  494873.0
DAGU  156413.0  LAUN  246120.0  ULLO  745483.0
ELAG  696841.0  LAVI  592037.0  VERS  223294.0
ELCA  284010.0  OBAN  607096.0  YUMB  119889.0
ELCE  177638.0  PALM  853232.0  ZARZ  578870.0
ELDO  216176.0  PRAD  482447.0
FLOR  567856.0  RIOF  161870.0
;

```

Anexo J. Solución de escenario 3 del análisis de sensibilidad

```

FUNCION OBJETIVO =                2723.4

CONFIGURACION DEL SISTEMA (PLANTAS DE TRATAMIENTO ABIERTAS) =

X [*] :=
GUBU  1.0
;

CONFIGURACION DEL SISTEMA (ASIGNACION) =

Y [*,*]
:      GUBU      :=
BUGA   1.0
CALI   1.0
CAND   1.0
CART   1.0
DAGU   1.0
ELAG   1.0
ELCA   1.0
ELCE   1.0
ELDO   1.0
FLOR   1.0
GINE   1.0
GUAC   1.0
GUBU   1.0
JAMU   1.0
LAUN   1.0
LAVI   1.0
OBAN   1.0
PALM   1.0
PRAD   1.0
RIOF   1.0
ROLD   1.0
TORO   1.0
TRUJ   1.0
TULU   1.0
ULLO   1.0
VERS   1.0
YUMB   1.0
ZARZ   1.0
;

RIESGO AMBIENTAL =

R [*] :=
GUBU  2723.4
;

RECHAZO SOCIAL =

Rg [*] :=
BUGA  385808.0  GINE  171065.0  ROLD  464086.0
CALI  7807329.0 GUAC  149824.0  TORO  534261.0
CAND  539449.0  GUBU  115028.0  TRUJ  147558.0
CART  592681.0  JAMU  719228.0  TULU  347492.0
DAGU  151552.0  LAUN  483007.0  ULLO  598102.0
ELAG  610079.0  LAVI  444656.0  VERS  479611.0
ELCA  535386.0  OBAN  459715.0  YUMB  327462.0
ELCE  207573.0  PALM  1028600.0  ZARZ  431489.0
ELDO  472493.0  PRAD  512382.0
FLOR  290471.0  RIOF  129517.0
;

```

Anexo K. Solución escenario 4 del análisis de sensibilidad

```

FUNCION OBJETIVO =          19135904.0

CONFIGURACION DEL SISTEMA (PLANTAS DE TRATAMIENTO ABIERTAS) =

X [*] :=
GUBU  1.0
;

CONFIGURACION DEL SISTEMA (ASIGNACION) =

Y [*,*]
:      GUBU      :=
BUGA   1.0
CALI   1.0
CAND   1.0
CART   1.0
DAGU   1.0
ELAG   1.0
ELCA   1.0
ELCE   1.0
ELDO   1.0
FLOR   1.0
GINE   1.0
GUAC   1.0
GUBU   1.0
JAMU   1.0
LAUN   1.0
LAVI   1.0
OBAN   1.0
PALM   1.0
PRAD   1.0
RIOF   1.0
ROLD   1.0
TORO   1.0
TRUJ   1.0
TULU   1.0
ULLO   1.0
VERS   1.0
YUMB   1.0
ZARZ   1.0

RIESGO AMBIENTAL =

R [*] :=
GUBU  2723.4
;

RECHAZO SOCIAL =

Rg [*] :=
BUGA  385808.0  GINE  171065.0  ROLD  464086.0
CALI  7807329.0 GUAC  149824.0  TORO  534261.0
CAND  539449.0  GUBU  115028.0  TRUJ  147558.0
CART  592681.0  JAMU  719228.0  TULU  347492.0
DAGU  151552.0  LAUN  483007.0  ULLO  598102.0
ELAG  610079.0  LAVI  444656.0  VERS  479611.0
ELCA  535386.0  OBAN  459715.0  YUMB  327462.0
ELCE  207573.0  PALM  1028600.0  ZARZ  431489.0
ELDO  472493.0  PRAD  512382.0
FLOR  290471.0  RIOF  129517.0
;

```