

**Diseño de un modelo de Recolección de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos
(RAEE) en el Área Metropolitana de Bucaramanga**

Rubén Darío Ríos Mercado, Ingrid Dayanna Tamayo Morantes

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Industrial

Director

Javier Eduardo Arias Osorio

Magister en Administración

Universidad Industrial de Santander

Facultad De Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela De Estudios Industriales Y Empresariales

Bucaramanga

2019

Agradecimientos

A nuestro director de proyecto, el profesor Javier Arias, por toda la asesoría y apoyo brindado durante la realización de este proyecto.

Al Área Metropolitana de Bucaramanga, por brindarnos la información necesaria para la ejecución de este trabajo.

A LITO S.A, por la información brindada sobre el manejo del RAEE en Colombia.

A la Universidad Industrial de Santander y la Escuela de Estudios Industriales y Empresariales por la formación académica adquirida durante el transcurso de nuestra carrera.

Dedicatoria

A Dios padre todopoderoso por su amor y su ayuda para realizar este proyecto.

A mis padres Lourdes Mercado y Víctor Ríos por todo el apoyo que me han brindado durante la carrera.

A todos los gestores y emprendedores en el área de gestión de residuos, cuyas iniciativas hacen creer en que se puede lograr un mundo mejor y más sostenible.

A todos los amigos y familiares que creyeron en mi desde que inicié mis estudios.

Rubén Darío Ríos Mercado

A Dios por la sabiduría y el entendimiento, por cuidarme y guiarme siempre como la niña de sus ojos

A mis padres Mauricio Tamayo y Maribel Morantes por darme alas para valor, por su esfuerzo y su amor. Por ayudarme a alcanzar todos mis sueños.

A mi hermano menor Daniel Tamayo por ser luz y motivación.

A mi nonita Odilia Barajas por sus sabios consejos, por su amor incondicional y por ser ejemplo de valentía.

A todas esas personas que han sembrado en mi conocimiento, fe y amor.

A todos aquellos que creen en que se pueden hacer un mundo mejor

Ingrid Dayanna Tamayo Morantes

Tabla de contenido

Introducción	17
1. Generalidades del proyecto	21
1.1. Justificación	21
1.2. Objetivos.....	25
1.2.1. Objetivo general	25
1.2.2. Objetivos específicos.....	25
1.3. Metodología.....	26
2. Revisión de literatura.....	27
3. Marco referencias	36
3.1. Marco de antecedentes.....	37
3.2. Marco teórico.....	39
3.2.1. Definiciones de RAEE	39
3.2.2. Clasificación de los RAEE	41
3.2.3. Características de los RAEE.....	44
3.2.4. Marco normativo nacional.....	47
3.2.5. Marco normativo internacional	51
3.2.6. Generación de RAEE en Colombia.....	55
3.2.7. Logística Inversa	61

3.2.8.Optimización Combinatoria	62
3.2.9.Complejidad Computacional	63
3.2.10.Problema de Localización de Instalaciones (Facility Location Problem)	64
3.2.11.Problema de Ruteo de Vehículos (Vehicle Routing Problem VRP).....	64
3.2.12.Problema de Localización – Ruteo (Location- Routing Problem LRP)	65
3.2.13.Métodos de solución	66
3.2.13.1.Métodos exactos.....	¡Error! Marcador no definido.
3.2.13.2.Métodos aproximados	67
3.2.13.3.Métodos Metaheurísticos	68
4. Caso de estudio: Recolección de RAEE en las comunas 6, 7 y 8	68
4.1. Descripción del problema de optimización	69
4.2. Análisis de la zona objetivo	72
5. Diseño del modelo matemático de localización	74
5.1. Características del modelo	74
5.2. Contenedores	76
5.3. Estimación de la generación de RAEE en la zona objetivo.....	77
5.4. Construcción de la matriz de distancias.....	78
5.5. Formulación del modelo de localización	81
5.6. Herramienta de solución del modelo	84
5.7. Experimentación del modelo de localización	84

5.8. Solución modelo matemático de localización	85
6. Diseño del modelo matemático de ruteo de vehículos	89
6.1. Características de modelo	89
6.2. Problema de ruteo de vehículos capacitados CVRP	90
6.3. Formulación de modelo matemático CVRP	91
7. Descripción de la técnica de optimización a utilizar para el CVRP	94
7.1. Algoritmo GRASP	96
7.1.1. Construcción de la Lista restringida de candidatos (RLC).....	97
7.1.2. Búsqueda local.....	99
7.1.2.1. Operadores intra-route	99
7.1.2.2. Operadores inter-route	101
8. Solución del CVRP usando el algoritmo GRASP	102
8.1. Fase de construcción.....	103
8.2. Fase de búsqueda local	107
8.2.1. Intercambio 1-1	107
8.2.2. Operador 2-opt	108
8.3. Comparación de resultados.....	109
9. Validación del algoritmo	109
9.1. Ajuste del parámetro α	109
9.2. Validación con instancias	114

10.	CVRP en caso de estudio	117
10.1.	Características del modelo	117
10.2.	Características del vehículo	118
10.3.	Segmentación del territorio objetivo.....	120
10.3.1.	Aplicación del algoritmo K-means	121
10.3.2.	Selección de la mejor opción	122
10.3.3.	Segmentación final.....	124
11.	Resultados computacionales para caso de estudio	125
11.1.	Presupuesto del proceso de recolección.....	130
12.	Conclusiones	132
13.	Recomendaciones	134
	Referencias Bibliográficas	135

Lista de tablas

Tabla 1. Cantidad de residuos recolectados en el punto limpio.....	23
Tabla 2. Categorización de los aparatos eléctricos y electrónicos (AEE) en la UE	42
Tabla 3. Composición porcentual de materiales presentes en los RAEE.	45
Tabla 4. Estudios previos en Colombia sobre generación de RAEE	55
Tabla 5. Volumen de importaciones netas por subcategoría de AEE en el periodo 2002-2012...	58
Tabla 6. Simbología de los sitios representativos del modelo	75
Tabla 7. Contenedores seleccionados para el modelo	77
Tabla 8. Producción quincenal de RAEE por tipos	78
Tabla 9 Resultados modelo de localización.....	86
Tabla 10. RAEE recolectado por punto asignado	88
Tabla 11. Evaluación del parámetro α	111
Tabla 12. Comparación de resultados por instancia	115
Tabla 13 Características del Vehículo	118
Tabla 14. Cambios de nodos entre clústeres	124
Tabla 15. Rutas clúster 1.....	126
Tabla 16. Rutas clúster 2.....	127
Tabla 17. Rutas clúster 3.....	128
Tabla 18. Rutas clúster 4.....	129
Tabla 19. Cronograma de recolección propuesto	130
Tabla 20. Presupuesto total del modelo de recolección.....	131

Lista de figuras

Figura 1. Componentes de un sistema de gestión y recolección de RAEE.	29
Figura 2. Marco de referencia normativo considerado en la formulación de la Política.	51
Figura 3. Mapa comunas objetivo.....	73
Figura 4. Posibles puntos de recolección.....	76
Figura 5. Centroides de generación de demanda	79
Figura 6. Puntos de recolección abiertos	87
Figura 7. Pseudo código de la fase de construcción.	98
Figura 8. Operador de movimiento.....	99
Figura 9. Operador de canje.....	100
Figura 10. Operador de inversión	100
Figura 11. Operador 2-opt intra-route.....	101
Figura 12. Operador intercambio 1-0.....	101
Figura 13. Operador de intercambio 1-1.....	102
Figura 14. Operador 2-opt inter-route.....	102
Figura 15. Diagrama de la fase de construcción algoritmo GRASP.....	105
Figura 16. Diagrama de la fase de búsqueda del algoritmo	106
Figura 17. Diagrama de cajas y bigotes para la instancia A-n33-k5	112
Figura 18. Diagrama de cajas y bigotes para la instancia A-n45-k6	113
Figura 19. Diagrama de cajas y bigotes para la instancia A-n64-k9	113
Figura 20. Segmentación de la zona objetivo	123

Lista de Apéndices

**(Ver apéndices adjuntos en el CD y pueden visualizarlos en la Base de Datos de la
Biblioteca UIS))**

Apéndice A. Posibles puntos de recolección

Apéndice B. Generación de RAEE por agrupación de hogares

Apéndice C. Asignación de centroides a puntos de recolección

Apéndice D. Generación de RAEE en los conjuntos residenciales

Apéndice E. Programación del algoritmo K-means

Apéndice F. Selección para segmentación de territorio

Apéndice G. Segmentación final

Apéndice H. Datos de entrada CVRP

Apéndice I. Programación del algoritmo GRASP en Matlab

Apéndice J. Artículo publicable

Resumen

TÍTULO: DISEÑO DE UN MODELO DE RECOLECCIÓN DE RESIDUOS DE APARATOS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS (RAEE) EN EL ÁREA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA*

AUTORES: RUBÉN DARÍO RÍOS MERCADO**

INGRID DAYANA TAMAYO MORANTES**

PALABRAS CLAVE: LOCALIZACIÓN, RUTEO, RAEE, RECOLECCIÓN DE RESIDUOS

DESCRIPCIÓN:

En el presente trabajo de investigación, se diseña un modelo de recolección de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos a partir de un problema de localización y ruteo de vehículos. Para realizar el proyecto se llevan a cabo dos fases principales: la fase de localización, en la cual se definen los puntos de recolección de RAEE a partir de una serie de puntos potenciales y una fase de ruteo en la cual, a partir de los resultados obtenidos en la primera fase, se diseñan las rutas de recolección que minimicen los costos asociados. Se analiza un caso de estudio para la recolección de RAEE en las comunas 6,7 y 8 de Bucaramanga.

Para la primera fase se desarrolla un modelo de programación lineal entera mixta, el cual se soluciona con el software GAMS, con lo cual se definen los puntos de recolección de residuos en la zona objetivo, asignándoles usuarios y contenedores de acuerdo con la demanda asignada.

En la segunda fase, se presenta el proceso de segmentación de territorio con el algoritmo K-means programado en Matlab, lo cual permite hacer 4 secciones o clústeres de división de la zona para cumplir con las restricciones de capacidad del vehículo y el horizonte de recolección de 4 rutas quincenales. Se aborda el problema de ruteo de vehículos capacitados CVRP con el objetivo de minimizar los costos asociados a la distancia recorrida por el vehículo para cada uno de los puntos de recolección asignados. Debido a la naturaleza NP-Hard del problema se propone el uso de la metaheurística GRASP con operadores de búsqueda local para lograr las mejores soluciones posibles. El algoritmo fue programado en Matlab y validado con instancias de la literatura, mostrando buenos resultados para el caso de estudio definido.

*Trabajo de grado

**Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales.

Abstract

TITLE: DESIGN OF A MODEL FOR THE COLLECTION OF WASTE ELECTRICAL AND ELECTRONICAL EQUIPMENT (WEEE) IN THE METROPOLITAN AREA OF BUCARAMANGA*

AUTHORS: RUBÉN DARÍO RÍOS MERCADO**
INGRID DAYANA TAMAYO MORANTES**

KEYWORDS: LOCATION, ROUTING, WEEE, WASTE COLLECTION

DESCRIPTION:

In the present research work, a model for the collection of waste electrical and electronic equipment is designed based on a problem of location and vehicle routing. Two main phases are carried out for the project: the localization phase, in which the WEEE collection points are defined from a series of potential points and a routing phase in which, based on the results obtained in the first phase, the collection routes are designed to minimize the associated costs. A case study is analyzed for the collection of WEEE in communes 6, 7 and 8 of Bucaramanga.

For the first phase, a mixed integer lineal programming model is developed, which is solved with the GAMS software, which defines the waste collection points in the target zone, assigning them users and containers according to the assigned demand.

In the second phase, the process of territory segmentation is presented with the K-means algorithm programmed in Matlab, which allows making 4 sections or clusters of division of the zone to fulfill the capacity restrictions of the vehicle and the collection horizon of 4 fortnightly routes. The capacitated vehicle routing problem CVRP is addressed with the objective of minimizing the costs associated with the distance traveled by the vehicle for each of the assigned collection points. Due to the NP-Hard nature of the problem, it is proposed to use GRASP metaheuristics with local search operators to achieve the best possible solutions. The algorithm was programmed in Matlab and validated with instances of the literature, showing good results for the specific case study.

* Bachelor Thesis

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Industrial and Business Studies.
Director: MA. Javier Arias Osorio

Introducción

Hoy en día nos encontramos rodeados de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (AEE) que hacen más fácil el desempeño de labores cotidianas, estos están conformados por una combinación de piezas y elementos que operan con energía eléctrica y realizan un sinnúmero de trabajos y funciones determinadas. Cuando el dueño considera que su vida útil ha terminado estos son desechados y se convierten en Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE).

Con los actuales avances científicos y tecnológicos la fabricación y consumo de productos eléctricos y electrónicos aumenta como consecuencia del actual modelo socioeconómico de crecimiento ilimitado y del consumismo. Sumado a esto la rápida innovación tecnológica y el acortamiento del tiempo de vida de los aparatos, entre otros factores, contribuyen a que estos residuos sean una de las corrientes de mayor crecimiento en el mundo, tanto en los países industrializados como no industrializados, con una tasa de crecimiento anual y global del 4% (UNU; ISWA, 2017).

El aumento en la generación de estos residuos pone en riesgo la sostenibilidad ambiental del planeta y puede afectar la salud y la vida de todos sus habitantes, por lo tanto, a nivel mundial se han tomado iniciativas para mitigar su impacto, como se reflejó en la 8ª Conferencia de las Partes realizada en 2006 en Nairobi, donde se declaró los residuos electrónicos un tema prioritario y se subrayó la necesidad de soluciones creativas e innovadoras para una gestión ambientalmente adecuada.

En Colombia a partir de la aprobación de Ley 1672 de 2013 y de la Política Nacional de Gestión Integral de RAEE, que se aprobó en el 2017, se busca darle un trato diferenciado e integral a estos residuos y se establece como meta para el año 2032 contar con un sistema de recolección de RAEE para el 90% de tipos de aparatos eléctricos y electrónicos como una solución a las aproximadamente 275.000 toneladas de basura electrónica que se producen anualmente (UNU; ISWA, 2017) y que en su mayoría no están siendo gestionadas adecuadamente.

Según información suministrada por el Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB), ente encargado, a nivel local la situación es alarmante y del RAEE generado solo el 1% esta siendo gestionado como corresponde por un único centro de recolección municipal (El Punto Limpio Metropolitano).

El presente trabajo de grado busca desarrollar desde la optimización matemática, un modelo de recolección de RAEE, el cual puede ser modelado como un problema de localización y ruteo, dividido en dos fases. En la primera fase se buscan ubicar puntos estacionarios en las comunas, de tal forma que los usuarios puedan acceder a ellos de forma fácil y rápida para depositar los residuos correspondientes en contenedores especiales.

En la segunda fase se establecen las rutas de recolección correspondientes para los puntos hallados, con el objetivo de minimizar los costos de transporte cumpliendo con la demanda actual. Para la solución del problema de ruteo de la Fase II, se implementará un algoritmo GRASP para obtener buenas soluciones que permitan la creación de una red de recolección de RAEE minimizando los costos asociados.

El modelo como un plan piloto inicialmente se enfoca en dar solución al problema de recolección de RAEE en las comunas 6, 7, 8 escogidas a sugerencia por el AMB dado que estas

comunas son las que están siendo influenciadas principalmente por el punto limpio. Los resultados de este trabajo permitirán a los productores de AEE, al AMB y demás entes encargados de la gestión de RAEE contar con un punto de partida para una futura implementación y expansión del proyecto a toda el área, y así empezar a dar cumplimiento a las metas de la Política Nacional de Gestión Integral de RAEE correspondientes a la recolección.

Tabla de cumplimiento de objetivos

Objetivo específico	Cumplimiento
Realizar una revisión de literatura de los modelos de operación para el problema de recolección de RAEE y de los métodos de solución del problema de localización y ruteo de este.	Capítulo 2
Formular el modelo matemático de localización para encontrar los puntos óptimos de recolección de RAEE estacionarios en áreas residenciales (comunas).	Capítulo 5
Formular un modelo matemático de ruteo para la recolección de RAEE en los puntos localizados.	Capítulo 6
Desarrollar un método de solución para el modelo de ruteo planteado para la recolección de RAEE usando una metaheurística.	Capítulos 7, 8 Apéndice I
Evaluar el desempeño del método desarrollado para la recolección de RAEE.	Capítulo 9 y 10
Elaborar un artículo de carácter publicable con base en los resultados obtenidos en la investigación	Apéndice J

1. Generalidades del proyecto

1.1. Justificación

En la actualidad el cambio climático y las diferentes reacciones de la tierra al daño causado por el ser humano que atenta contra el bienestar de este, han empezado a generar conciencia y cuidado ambiental donde el interés mundial crece cada día por temas como el manejo y gestión de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE). Según el informe realizado por el Instituto para el estudio avanzado de la sostenibilidad de la Universidad de las Naciones Unidas (ONU) para el 2018 se espera que, a nivel global, haya alrededor de 50 millones de toneladas de RAEE. Varios países europeos han desarrollado diferentes metodologías para la gestión integral de estos que parten desde el diseño de una normativa y terminan siendo negocio rentable para las naciones.

Se estima que el trato adecuado de estos residuos ha generado que en Europa se empleen unas 20.000 personas que recogen y reparan unas 300.000 toneladas de equipos (“RREUSE | Putting Secondhand First,” 2018). Es evidente que la gestión integral de RAEE tiene un impacto directo sobre la sociedad, creando oportunidades de negocio y/o creación de empleo, pero también un impacto sobre la salud de las personas y sobre el ambiente.

Colombia ha tomado partido sobre el tema y se ve reflejado en la aprobación de Ley 1672 de 2013, que le da carácter de manejo especial a los RAEE, prohíbe su disposición final en los rellenos sanitarios y los restringe a rellenos de seguridad para que sean retomados por los productores de aparatos eléctricos y electrónicos mediante sistemas de recolección y gestión ambiental segura y en la Política Nacional de Gestión Integral de RAEE que se aprobó en el 2017. También cabe resaltar que según el decreto 1076 de 2015, aprobado en febrero de 2018, los departamentos, municipios y distritos, en el marco de la gestión integral de los residuos sólidos deberán incorporar

en los planes de desarrollo territoriales acciones encaminadas a facilitar y apoyar la gestión diferenciada de los RAEE.

A nivel local el Área Metropolitana de Bucaramanga, ente encargado de controlar y vigilar el funcionamiento de los sistemas de recolección, declaró que no existe ningún modelo de gestión masivo efectivo para el trato diferenciado de estos residuos, sólo diferentes campañas que se realizan a lo largo del año y los programas posconsumo. Por tal motivo el AMB se encuentra interesada en esta investigación y a través de un trabajo colaborativo y acordado, se espera como resultado poder plantear un modelo de recolección de RAEE que permita darle una solución óptima a esta problemática a nivel local.

Actualmente el Área Metropolitana de Bucaramanga cuenta con un centro de recolección municipal permanente conocido como el Punto Limpio, ubicado en Real de Minas donde se realiza la recepción de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, lámparas, fluorescentes y baterías pilas o acumuladores, para lo cual cuenta con una ventanilla para que el usuario los deposite en un contenedor dispuesto para tales efectos y no obstante, son reclasificados posteriormente por el gestor (LITO S.A) que realiza el tratamiento y disposición final de los mismos.

La operación del punto limpio le cuesta al Área Metropolitana \$48.395.380 anuales, de acuerdo con el contrato de prestación de servicios del año 2018.

Las estadísticas de recolección de RAEE en el punto limpio, suministradas por el AMB se relacionan a continuación en la tabla 1:

Tabla 1.

Cantidad de residuos recolectados en el punto limpio

Año	Tipo de residuo	Cantidad Recolectada (Kg)
2017	RAEE	4628
	Luminarias	1729
2018	RAEE	1403
	Luminarias	315
	Baterías, pilas y acumuladores	761

Nota: Informe de recolección Punto Limpio hasta marzo 2018. Adaptado de: Área Metropolitana de Bucaramanga.

Según el Global E-Waste Monitor de (UNU; ISWA, 2017), en Colombia se reporta una generación de 275.000 Toneladas de RAEE para el año 2017, equivalente a 5,6 Kg por habitante sobre una base 48'750.000 habitantes.

En Bucaramanga para el año 2017 la población se estimaba en 521.857 habitantes, lo cual equivale aproximadamente a 2922 toneladas de RAEE generados ese año.

Teniendo en cuenta que el punto limpio de Bucaramanga es el único centro de recolección municipal masivo de la ciudad, las cantidades recogidas de RAEE en el 2017 por el centro no alcanzan el 1% del RAEE generado, lo cual constituye un problema real, teniendo en cuenta que el RAEE que no es recogido por el punto probablemente no siga un proceso adecuado de

disposición final de acuerdo con las normativas vigentes, ocasionando daños a la salud humana y el medio ambiente.

Cabe resaltar que además del punto limpio se cuenta con programas posconsumo como Ecocomputo, Pilas con el Ambiente, Red Verde, entre otros, que tienen puntos satélites en algunas zonas como universidades y centros comerciales, pero su alcance es limitado dado que en su mayoría solo recogen una categoría específica de RAEE ya sean pilas, baterías o bombillos. Según datos suministrados por la Autoridad Nacional de licencias Ambientales ANLA para el 2016 estos programas posconsumo y demás gestores solo procesaron el 1.5% de RAEE generado a nivel nacional.

Según (Nowakowski & Mrówczyńska, 2018), actualmente existen tres enfoques para abordar el problema de recolección de RAEE, los cuales son:

- Recolección en grandes centros municipales
- Recolección en puntos estacionarios en vecindades
- Vehículos de recolección móvil bajo demanda

La principal problemática de contar solo con puntos de recolección en centros municipales es el acceso limitado de las personas, debido a que en su mayoría deben desplazarse grandes distancias y por condiciones de tamaño y peso de algunos tipos de RAEE, las personas no están dispuestas a trasladarlos teniendo que asumir los costos de transporte (Sabbaghi, Behdad, & Zhuang, 2016).

Por tal motivo con el presente trabajo se busca atender esta problemática y aumentar la cantidad de RAEE recogido a través de un modelo de recolección con puntos estacionarios en vecindades, los cuales se ubican en puntos estratégicos dentro los barrios o localidades de tal forma que se

facilita el acceso de las personas al punto de recolección y se disminuyen los costos de transporte asumidos por el usuario (Ibanescu, et al., 2017).

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Diseñar un modelo para la recolección de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), en el Área Metropolitana de Bucaramanga.

1.2.2. Objetivos específicos

- Realizar una revisión de literatura de los modelos de operación para el problema de recolección de RAEE y de los métodos de solución del problema de localización y ruteo de este.
- Formular el modelo matemático de localización para encontrar los puntos óptimos de recolección de RAEE estacionarios en áreas residenciales (comunas).
- Formular un modelo matemático de ruteo para la recolección de RAEE en los puntos localizados.
- Desarrollar un método de solución para el modelo de ruteo planteado para la recolección de RAEE usando una metaheurística.
- Evaluar el desempeño del método desarrollado para la recolección de RAEE.
- Elaborar un artículo de carácter publicable con base en los resultados obtenidos en la investigación.

1.3. Metodología

Para alcanzar los objetivos establecidos en el presente proyecto en el capítulo 2 se realiza una revisión de literatura que permite detectar, obtener y recopilar información, relevante y necesaria sobre modelos de recolección RAEE.

Seguidamente en el capítulo 3 se encuentra el Marco teórico donde se hace un estudio de antecedentes, se afianzan las bases teóricas y conceptuales de la investigación, permitiendo el correcto direccionamiento de esta y descripción acertada del problema.

En los capítulos 4 y 5 se inicia con la descripción del problema de optimización. Allí se establece como se va a abordar el problema, las características de la población objetivo, los tipos de RAEE a recolectar y las características de los contenedores, entre otros. Consecutivamente se hace la formulación del modelo para la fase de localización y se presentan los resultados obtenidos mediante el software GAMS.

En el capítulo 6 se presentan las características principales para la fase de ruteo de vehículos y posteriormente se hace la formulación matemática como un problema de ruteo de vehículos capacitados (CVRP).

Posteriormente, en el capítulo 7 se hace una descripción detallada de las técnicas de optimización a utilizar para el modelo de ruteo, su desempeño y como se programan para dar solución al modelo planteado. Para resolver el problema de enrutamiento de vehículos capacitados (CVRP) se utiliza un algoritmo GRASP.

El capítulo 8 consta de experimentación y resultados. Inicialmente se corre el modelo de ruteo con problemas pequeños, se modifican, se agregan y se quitan parámetros para estudiar el

funcionamiento estos. Se definen las fases de construcción y búsqueda local con los operadores de intercambio 1-1 y 2-opt con el fin de mejorar las rutas halladas en la primera fase.

La validación del algoritmo se realiza en el capítulo 9, donde se hacen pruebas para ajustar el parámetro alfa del algoritmo GRASP. Posteriormente se realizan pruebas con instancias de la literatura para evaluar la eficiencia del algoritmo desarrollado.

El capítulo 10 contiene las características del modelo de ruteo y el vehículo seleccionado. En primera instancia se realiza la segmentación del territorio de estudio para cumplir las restricciones de capacidad de vehículo y el horizonte de planeación del proyecto.

Luego en el capítulo 11 se muestra la implementación del modelo de ruteo de vehículos para el caso de estudio de las comunas 6, 7 y 8 de Bucaramanga. Se detallan las rutas de recolección definidas para la zona objetivo y los costos asociados a la implementación.

Finalmente, en los capítulos 12 y 13 se encuentran las conclusiones y recomendaciones del presente trabajo de investigación.

2. Revisión de literatura

A nivel mundial la generación de RAEE se ha convertido en una problemática de proporciones cada vez más alarmantes. Según (Islam et al., 2016) “Los RAEE son una de las corrientes de mayor crecimiento debido a sus cortos ciclos de vida de producto (PLC) y a los rápidos cambios en las preferencias de los consumidores con respecto a su disposición”.

Este crecimiento incontrolado trae severas consecuencias medio ambientales y a la salud humana debido a la presencia de sustancias toxicas en algunos de sus componentes, tales como metales pesados, contaminantes orgánicos permanentes (POP's), retardantes de llama y otras sustancias potencialmente peligrosas (Lundgren, 2012).

Por otra parte, en el ciclo de vida de los RAEE se utilizan materias primas y energías no renovables a una alta tasa, que ponen en riesgo la sostenibilidad ambiental del planeta. Por lo tanto, la gestión inadecuada de estos residuos no solo desencadena problemas ambientales y de salud, sino que además se desaprovecha el potencial económico que puede generar la recuperación de partes valiosas que componen algunos de los RAEE (Achillas et al., 2013) y la consecuente generación de empleo que sigue a la creación de plantas de tratamiento y sistemas de recolección y gestión de residuos a nivel mundial (Liu, Tang, Li, & Wang, 2018).

Por lo descrito anteriormente, los gobiernos decidieron trabajar de forma progresiva para abordar esta problemática (Europeo, Consejo, & Uni, 2003). Primeramente decidieron fortalecer las normativas con respecto al tratamiento de RAEE, definiendo las categorías en las cuales se divide y ampliando el concepto de Responsabilidad Extendida del Productor (EPR), que “es una política bajo la cual a los productores se les da una significativa responsabilidad financiera y/o física para el tratamiento o disposición de productos posconsumo” (*Extended Producer Responsibility*, 2001).

Con esta normativa se obliga al productor y/o distribuidor de *Aparatos Eléctricos y Electrónicos (AEE)* a hacerse responsables y en conjunto con autoridades gubernamentales desarrollar sistemas integrados de gestión de RAEE para cerrar el ciclo de vida de esos productos de manera adecuada tanto ambiental como económicamente.

A nivel nacional, Colombia ha avanzado en la formulación de normativas en la última década desde la aprobación de la Ley 1672 de 2013, donde se establecen los lineamientos para la posterior formulación de la Política Nacional de Gestión de Aparatos Eléctricos y Electrónicos. Esta define el sistema de recolección y gestión de RAEE como una estructura legal y logística compuesta por cuatro componentes como lo muestra la figura 1:

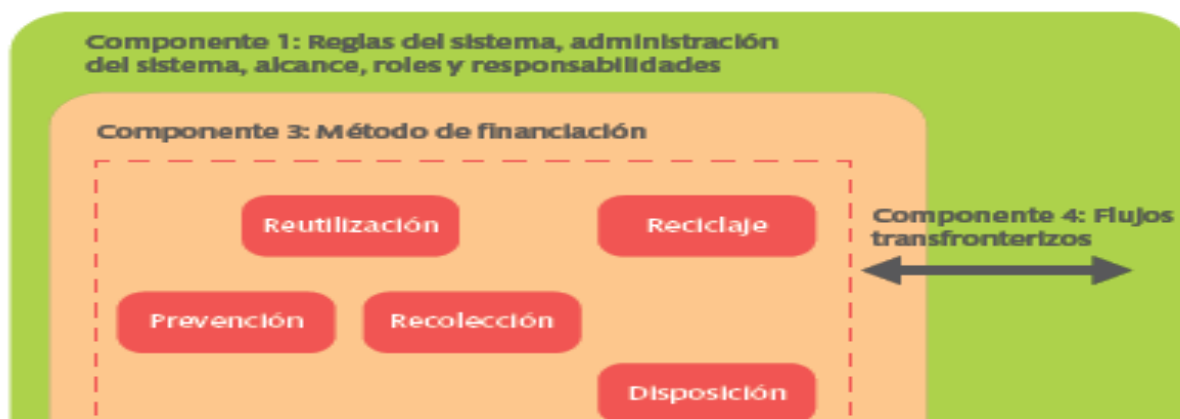


Figura 1. Componentes de un sistema de gestión y recolección de RAEE. Adaptado de Política Nacional de Gestión Integral de RAEE.

Actualmente el Componente 1 ya está desarrollado y en implementación, por lo tanto, los esfuerzos actuales se concentran en el componente de operaciones, donde la actividad de recolección toma vital importancia para poder seguir con las actividades de disposición, reutilización y reciclaje, así como mitigar el impacto ya generado por los RAEE.

En la literatura se ha estudiado el problema desde varios enfoques. Diversos autores como (Sabbaghi et al., 2016) aseguran que el éxito de un modelo de recolección eficiente de RAEE depende en gran manera de la percepción de valor que tiene el usuario con respecto al aparato eléctrico o electrónico (AEE) que posee. Así mismo, los usuarios tienden a almacenar los dispositivos eléctricos y electrónicos por mucho tiempo, incluso después que ha cumplido su ciclo o el aparato ha dejado de funcionar. Los autores diseñaron un modelo aplicado de Teoría de Juegos para explicar el comportamiento de los usuarios con respecto a las decisiones sobre los AEE desde

su adquisición hasta su reemplazo y su posterior disposición final, así como la percepción de las personas sobre cuando un producto es obsoleto y necesita cambiarlo. Este estudio permitió comprobar los tiempos promedio de cambio y reemplazo de los AEE, lo cual permitirá a los tomadores de decisiones diseñar estrategias de divulgación y socialización más efectivas para que las personas dejen de acumular RAEE en sus hogares y les den una disposición final adecuada.

Recientemente (Nowakowski, 2016) publicó un artículo, donde asegura que la divulgación y socialización de programas de gestión de RAEE por parte de los entes gubernamentales, empresas privadas y organizaciones ambientales, es fundamental para que el sistema de recolección sea eficaz. En su artículo, el autor se enfoca en estudiar los comportamientos de los usuarios con respecto al uso, mantenimiento y disposición final de los AEE de su hogar. Asegura que la falta de información con respecto a los programas existentes a la población reduce en gran medida la tasa de recolección de RAEE, dado que los usuarios los desechan de forma incorrecta con la basura doméstica o los abandonan en espacios públicos, causando diversos problemas ambientales. El autor menciona el caso de estudio de Polonia donde luego de diversas campañas de socialización lograron aumentar la tasa de recolección de 42% en 2012 al 68% en 2014 y actualmente esta tasa se encuentra cercana al 90% del total de RAEE generado, mostrando el gran beneficio que se obtiene al coordinar el diseño de redes de recolección con una correcta socialización a los usuarios sobre la disposición final de los residuos eléctricos y electrónicos.

Otros autores como (W. Wang, et al, 2017) aseguran que además de la poca información de la gente, otra de las principales barreras para la implementación de una red eficiente de gestión de RAEE es el hábito de algunas personas de vender los aparatos eléctricos y electrónicos que ya no usan o no funcionan, a vendedores ambulantes, los cuales en su mayoría no le dan una adecuada disposición a los residuos, dado que extraen los componentes que consideran valiosos y desechan

el resto en sitios no adecuados, generando no solo más contaminación, sino también impiden que esos residuos lleguen a un sitio de disposición adecuado donde se recupere aún más componentes valiosos con el uso de técnicas especializadas que los ambulantes no implementan. En este sentido los autores usaron el método *DEMATEL* (Decision Making Trial and Evaluation Laboratory) para evaluar las barreras que enfrenta la implementación de un modelo de recolección de RAEE en la Provincia de Liaoning, China. Consideran que los gobiernos deben ofrecer incentivos a las empresas que gestionen residuos, tales como reducción de impuestos y subsidios que ayuden a mejorar los procesos de recolección.

Con respecto al tratamiento de los residuos electrónicos, en la literatura hay una tendencia al diseño de cadenas de suministro inversas para la recolección y gestión de los RAEE (Islam & Huda, 2018). El número de artículos con respecto a la recolección ha venido aumentando desde el año 2005, donde (Nagurney & Toyasaki, 2005) modelaron la cadena de suministros inversa de residuos eléctricos y electrónicos buscando integrar los diversos actores que la componen.

En el 2006 (Chang, Huo, & Chen, 2006) abordaron el problema de forma matemática al desarrollar un modelo de programación entera mixta que buscaba optimizar la estructura de la red de recolección minimizando los costos de recogida, transporte, operación diaria y almacenamiento de los residuos eléctricos y electrónicos, logrando minimizar los costos al seleccionar la localización óptima de las plantas de desensamble en la red.

Diversos autores se dedicaron a estudiar el problema desde el punto de vista de la localización de los puntos de recogida. Entre estos se encuentran (I.-L. Wang & Yang, 2007) quienes desarrollaron un modelo de localización el cual encontraba la ubicación óptima de las plantas de tratamiento y un análisis de capacidad de tratamiento. (Grunow & Gobbi, 2009) quienes

desarrollaron un estudio aplicado en Dinamarca donde evaluaron la localización de puntos de recolección municipales y la integración de estos con las empresas productoras. (X. Wang, et al, 2011) desarrollaron un modelo estocástico para evaluar la mejor ubicación de puntos de recolección y almacenamiento, añadiendo la posibilidad de transferencias de residuos entre dichos puntos.

Por otra parte, algunos autores orientaron su estudio al análisis de las rutas de recolección entre los puntos disponibles y las plantas de disposición final o desensamble:

(Gamberini, et al, 2010) presentaron un modelo de optimización de la red de transporte de RAEE teniendo en cuenta la capacidad vehicular y los costos asociados al consumo de combustible buscando minimizar los costos y la emisión de dióxido de carbono. Para la región norte de Italia buscaron brindar una solución integrada partiendo desde la recolección de datos sobre puntos de recolección disponibles, tasas de generación por persona e iniciativas o programas existentes para la recolección y gestión de los RAEE. Para esto propusieron la creación de una red de recolección en la cual se deposite el RAEE por parte de los clientes en contenedores ubicados en sitios estratégicos y luego sean llevados a una única planta de tratamiento para su disposición final. Posteriormente diseñaron un modelo de simulación con las proyecciones hechas a partir de los datos recolectados, haciendo uso del esquema de recolección propuesto por ellos y de acuerdo con los resultados obtenidos, el desempeño del modelo de recolección propuesto permite no solo reducir los costos asociados, sino permite también aumentar la cantidad de residuos recolectados.

(Georgiadis & Besiou, 2008) expusieron una metodología para analizar los tiempos de procesamiento y transporte desde los puntos de recolección a la disposición final. Para esto analizaron los flujos residuos en la zona objetivo y el impacto ambiental que estos generaban.

Luego desde un enfoque de Dinámica de Sistemas aplicado en Grecia, analizaron la influencia de varios actores del sistema tales como: productores, autoridades, clientes, distribuidores, entre otros. De acuerdo con los resultados obtenidos del análisis, los autores concluyen que la integración de los actores del sistema permite un mejor desempeño de las redes de recolección de RAEE y el uso de estas herramientas basadas en la dinámica de sistema puede ayudar a los tomadores de decisiones a diseñar mejores políticas y redes de recolección más eficientes.

Posteriormente (Manzini, et al, 2008) propusieron un modelo de ruteo de vehículos donde introdujo el concepto de vehículos de recolección bajo demanda en el cual se recoge directamente del usuario usando varios medios de transporte. Este modelo de recolección se apoya en el uso de aplicaciones móviles por parte de los usuarios, quienes informan cuando poseen un RAEE de grandes dimensiones, para que la entidad encargada recoja el aparato en el sitio indicado por el usuario. El modelo optimiza las rutas de tal forma que se minimicen los costos de recolección asociados a la operación.

Recientemente, (Julio Mar et al., 2013) diseñaron un algoritmo codicioso adaptativo de búsqueda aleatoria (GRASP) con el fin de determinar la capacidad y los tiempos de procesamiento de una flota de vehículos heterogénea con el fin de desarrollar una ruta de recolección de RAEE. Los resultados obtenidos por los autores muestran que el uso de algoritmos metaheurísticos permite soluciones factibles en un tiempo computacional aceptable.

En la literatura pocos autores han abordado el problema de localización y ruteo de recolección de RAEE como un LRP, debido a que la cantidad de variables a tener en cuenta y las decisiones que deben tomarse en cada etapa son muy diferentes entre sí y por lo tanto la complejidad del modelo LRP impediría obtener soluciones validas en un tiempo computacional aceptable

(Nowakowski & Mrówczyńska, 2018). Este autor recomienda dividir el estudio en dos fases diferentes: una es la localización de los centros de recolección y plantas de tratamiento considerando una distancia optima a los usuarios y la otra consiste en diseñar el ruteo de vehículos entre los puntos hallados en la fase anterior con el fin de transportar todo el residuo recogido hasta su disposición final minimizando los costos asociados.

En este sentido diferentes autores han trabajado para dar solución al problema conjunto. Por ejemplo (Grunow & Gobbi, 2009) en su trabajo localizaron los mejores puntos de recolección de RAEE y diseñaron un piloto de cómo debe ser el funcionamiento de la cadena inversa desde la recolección y el transporte de los residuos hasta las plantas de tratamiento para Dinamarca. Para solucionar este problema partieron de un modelo de programación lineal entera mixta (MILP), en el cual partiendo de posibles puntos de recolección y algunos ya instalados, diseñaron un modelo de localización de instalaciones y asignación de clientes, de tal forma que se minimicen los costos de instalación y los costos de transporte asociados a las distancias recorridas por los clientes a los puntos creados. Para dar solución al modelo se hizo uso del software CPLEX obteniendo resultados favorables para una futura ejecución.

Para el caso de Portugal (Gomes, et al, 2011) propusieron una red nacional de gestión de RAEE, donde buscaron la localización óptima de puntos de recolección de diferentes capacidades y la posterior operación logística de la cadena inversa teniendo en cuenta los costos de transporte, emisiones de CO₂, capacidad de carga entre otras consideraciones.

Ese mismo año en España (J. Mar-Ortiz, et al, 2011) diseñaron para la región de Galicia un trabajo dividido en dos fases: En la primera fase, a partir de los almacenes y tiendas de AEE que funcionan como puntos de recolección de RAEE, seleccionaron las mejores ubicaciones para la

recogida masiva de residuos y posteriormente diseñaron las rutas de recolección para cubrir los puntos de mayor demanda con el objetivo de reducir los costos de transporte.

Para la solución de los problemas de localización, en la literatura suele haber un consenso en que dichos problemas pueden ser solucionados de forma exacta mediante el uso de software comercial de optimización cuando se trata de problemas de programación entera mixta cuyo objetivo es minimizar el costo total aplicando una penalización de costo a la distancia que hay que recorrer entre los posibles puntos de recolección (J. Mar-Ortiz et al., 2011).

Sin embargo, para el problema de ruteo de vehículos entre los puntos de recolección ubicados se hace necesario el uso de técnicas aproximadas de solución debido a que se trata de un problema de categoría NP-hard. Por lo tanto, en la literatura se hace uso de diversas heurísticas y metaheurísticas para dar solución al problema. Por ejemplo (Lin et al., 2014) desarrollaron un algoritmo genético para diseñar una red de transporte verde evaluando los costos tanto económicos como ambientales. En su trabajo, aplicando el concepto de *logística verde* diseñaron un modelo de ruteo de vehículos cuyo objetivo era minimizar la emisión de gases en la operación de recogida de residuos para llevarlos a plantas recicladoras especializadas.

Similarmente (Nowakowski, et al, 2017) diseñaron un algoritmo genético para solucionar el problema de ruteo multicriterio de recolección móvil de RAEE bajo demanda, teniendo en cuenta la capacidad de los vehículos y los costos asociados. El algoritmo diseñado además selecciona la cantidad de vehículos a utilizar de una flota heterogénea y los tiempos de carga y descarga asociados a la operación de recolección. El modelo fue aplicado como un caso de estudio en la ciudad de Opole, Polonia. Los resultados obtenidos muestran que el uso de herramientas

metaheurísticas permite obtener soluciones factibles en un tiempo computacional aceptable, en especial en problemas de gran magnitud con un amplio número de parámetros a tener en cuenta.

Otros autores como (Xie et al., 2013) desarrollaron un *Algoritmo de Cancelación Extensiva (ECA)* para optimizar la cadena de suministros inversa de RAEE en China. El modelo desarrollado busca reducir los costos de transporte desde los puntos de recolección hasta las plantas de tratamiento. Diseñaron un modelo de programación entera mixta para optimizar la recolección y aplicaron el algoritmo de cancelación para solucionarlo, obteniendo soluciones factibles.

(Nowakowski et al., 2017) utilizaron un algoritmo de búsqueda tabú y un algoritmo codicioso (GREEDY) para el diseño y evaluación de una red de recolección de RAEE en Polonia. Para el diseño de las rutas de recolección incorporaron al modelo consideraciones de carga y descarga de vehículos y restricciones de capacidad.

Se destacan los resultados obtenidos por (Julio Mar-Ortiz et al., 2013), en el cual para el diseño de una red de recolección de RAEE desarrollaron dos tipos de algoritmos para evaluar el desempeño en instancias reales. Los autores diseñaron un *Algoritmo de Clarke and Wright* y un *Algoritmo GRASP* para comparar las soluciones obtenidas. Los resultados obtenidos muestran mejores soluciones al aplicar el método GRASP para el diseño de las rutas de recolección.

3. Marco referencias

3.1 Marco de antecedentes

La gestión y tratamiento de los RAEE es un tema de investigación relativamente nuevo para Colombia. Desde la aprobación de la Ley 1672 de 2013, ha venido creciendo el interés por la formulación de modelos de negocio para plantas de tratamiento de residuos eléctricos y electrónicos, así como se han realizado estudios respecto a la situación actual del tratamiento de los RAEE a nivel nacional.

(MENDOZA, 2016) realizó un estudio para determinar la viabilidad de crear una empresa gestora de aparatos eléctricos y electrónicos en la ciudad de Cúcuta, Norte de Santander. En este trabajo el autor define la etapa de recolección como clave y decisiva para un sistema de gestión de RAEE debido a que brinda la disponibilidad de materia prima para la planta de tratamiento e influye en la rentabilidad del proyecto. Considera que dicho sistema debe ser eficaz y accesible para el usuario. Adicionalmente recalca que esta etapa es una de las más costosas debido al tratamiento especial que debe darse a estos residuos.

Por otra parte con respecto a los estudios diagnósticos (Bartolo Pinzón, Kimberly, & Guerra, 2015) a partir de un análisis comparativo entre marco internacional de convenios y las normativas internacionales con la situación actual de Colombia, construyeron un estado del arte de la gestión de RAEE en Colombia, donde identificaron que en el país el sector informal tiene una participación representativa en la gestión de RAEE y aclaran que esto no es un buen indicador dado que en este sector las prácticas realizadas como el reciclaje rudimentario aprovechan solo algunas partes valiosas y desechan de forma inadecuada los residuos sin valor, generando efectos adversos para la salud humana y el medio ambiente. Recalcan en la necesidad de la creación de un sistema organizado y reglamentado de recolección y gestión de RAEE para reducir el impacto ambiental de estos residuos.

Una aproximación a un modelo de recolección de RAEE se encuentra en el trabajo “Propuesta de un proceso de recolección de residuos electrónicos para motivar la participación en poblaciones definidas” realizado por (ROSAS PÉREZ, 2012), en el cual formula desde una perspectiva administrativa un proceso para motivar a las personas a participar en los programas de recolección de residuos eléctricos y electrónicos, evalúa la viabilidad técnica y económica del proyecto, teniendo en cuenta los actores involucrados y su interacción, hace un plan piloto y emite recomendaciones para el establecimiento de programas similares a mayor escala. El trabajo destaca la importancia de la ubicación estratégica de los Stand o puntos de recolección a los usuarios para facilitar la entrega de los RAEE ya que en algunos casos estos residuos pueden tener un peso y volumen significativos, lo que hace necesario que la distancia que debe recorrer el usuario al punto de recolección no se grande.

Por otra parte, en la Escuela de Estudios Industriales y Empresariales (Cabrales Navarro & Galeano Rios, 2017) realizaron un trabajo de grado titulado “Diseño de un modelo de recolección de residuos de aceites y grasas de origen animal y vegetal en las comunas 9, 10 y 11 de Bucaramanga”, donde desarrollaron un modelo dividido en dos fases, una fase de localización donde hallaron los mejores puntos para ubicar los centros de recolección y una fase de ruteo en la cual modelaron la operación de recogida y transporte de los residuos hasta el centro de acopio, mediante un modelo de programación entera mixta solucionado con la ayuda de un *Algoritmo de Colonia de Hormigas Evolutivo* programado en el software Go.

El desarrollo metodológico usado por estos autores es similar a la metodología que se utilizará en el presente trabajo, dado que se afronta el estudio en dos fases: localización de puntos de recolección en comunas de la ciudad y ruteo de vehículos adaptados para transporte de residuos.

Por lo tanto el trabajo de (Cabrales Navarro & Galeano Rios, 2017) sirve como referente para abordar la problemática de recolección de RAEE en el Área Metropolitana.

Finalmente, los autores sugieren realizar más estudios en la línea de gestión de residuos, dado que afecta considerablemente los recursos renovables de la región y consideran necesario tomar conciencia y desarrollar estrategias desde el punto de vista ambiental y económico.

3.2 Marco teórico

3.2.1 Definiciones de RAEE. En Colombia según lo establecido en el artículo 4 de la Ley 1672 de 2013 se definen los Aparatos Eléctricos y Electrónicos como “Todos los aparatos que para funcionar necesitan corriente eléctrica o campos electromagnéticos, así como los aparatos necesarios para generar, transmitir y medir dichas corrientes”. Por lo tanto, los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE) son “los aparatos eléctricos o electrónicos en el momento en que se desechan o descartan. Este término comprende todos aquellos componentes, consumibles y subconjuntos que forman parte del producto en el momento en que se desecha, salvo que individualmente sean considerados peligrosos, caso en el cual recibirán el tratamiento previsto para tales residuos”.

Por otra parte, según el (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2013) para la adopción de una Política Nacional de Gestión Integral de RAEE se establecen las siguientes definiciones:

Comercializador. Persona natural o jurídica encargada, con fines comerciales, de la distribución mayorista o minorista de aparatos eléctricos y electrónicos.

Disposición final. Es el proceso de aislar y confinar los residuos sólidos en especial los no aprovechables, en forma definitiva, en lugares especialmente seleccionados y diseñados para evitar la contaminación, y los daños o riesgos a la salud humana y al ambiente. En todo caso, quedará prohibida la disposición de residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE) en rellenos sanitarios.

Generador. Cualquier persona natural o jurídica, cuya actividad implique la producción o comercialización residuos o desechos eléctricos y electrónicos; sin perjuicio de que recaigan en la misma persona las calidades de productor o comercializador.

Gestión integral. Conjunto articulado e interrelacionado de acciones política, normativas, operativas, financieras, de planeación, administrativas, sociales, I educativas, de evaluación, seguimiento y monitoreo desde la prevención de la ' generación hasta la disposición final de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, a fin de lograr beneficios ambientales, la optimización económica de su manejo y su aceptación social, respondiendo a las necesidades y circunstancias de cada localidad o región.

Gestor. Persona natural o jurídica que presta en forma total o parcial los servicios de recolección, transporte, almacenamiento, tratamiento, aprovechamiento y/o disposición final de los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE), dentro del marco de la gestión integral y cumpliendo con los requerimientos de la normatividad vigente. El Ministerio del Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, implementará un Registro de aquellas personas naturales o jurídicas que presten los servicios definidos.

Productor. Cualquier persona natural o jurídica que, con independencia de la técnica de venta utilizada, incluídas la venta a distancia o la electrónica:

- Fabrique aparatos eléctricos y electrónicos.
- Importe aparatos eléctricos y electrónicos, o
- Arme o ensamble equipos sobre la base de componentes de múltiples productores;
- Introduzca al territorio nacional aparatos eléctricos y electrónicos.
- Remanufacture aparatos eléctricos y electrónicos de su propia marca o remanufacture marcas de terceros no vinculados con él, en cuyo caso estampa su marca, siempre que se realice con ánimo de lucro o ejercicio de actividad comercial.

3.2.2 Clasificación de los RAEE. La Directiva de la Unión Europea 2012/19/UE estableció una categorización de los aparatos eléctricos y electrónicos, que comenzó a regir a partir del 15 de agosto de 2018 y clasifica los AEE en seis categorías considerando las posibles fracciones de recolección y separación de los RAEE.

En la tabla 2 se presentan las seis categorías con el listado no exhaustivo de AEE considerados en cada una:

Tabla 2.

Categorización de los aparatos eléctricos y electrónicos (AEE) en la UE

Categorías	AEE considerados en la categoría
1. Aparatos de intercambio de temperatura	Neveras, congeladores, aparatos que suministran automáticamente productos fríos, aparatos de aire acondicionado, equipos de deshumidificación, bombas de calor, radiadores de aceite y otros aparatos de intercambio de temperatura que utilicen fluidos diferentes al agua.
2. Monitores, pantallas, y aparatos con pantallas de superficie superior a los 100 cm ²	Pantallas, televisores, marcos digitales para fotos con tecnología LCD, monitores, computadores portátiles, incluidos los de tipo notebook y tabletas.
3. Lámparas	Lámparas fluorescentes rectas, fluorescentes compactas y fluorescentes; lámparas de descarga de alta intensidad, incluidas las de sodio de presión y las de haluros metálicos; lámparas de sodio de baja presión y lámparas LED.

Continuación tabla 2. Categorización de los aparatos eléctricos y electrónicos (AEE) en la UE

4. Grandes aparatos (con una dimensión exterior superior a 50 cm)	Lavadoras, secadoras, lavavajillas, cocinas, cocinas y hornos eléctricos, hornillos eléctricos, placas de calor eléctricas, luminarias; aparatos de reproducción de sonido o imagen, equipos de música (excepto los órganos de tubo instalados en iglesias), máquinas de hacer punto y tejer, grandes ordenadores, grandes impresoras, copiadoras, grandes máquinas tragamonedas, productos sanitarios de grandes dimensiones, grandes instrumentos de vigilancia y control, grandes aparatos que suministran productos y dinero automáticamente, paneles fotovoltaicos.
5. Pequeños aparatos (sin ninguna dimensión exterior superior a 50 cm)	Aspiradoras, máquinas de coser, luminarias, hornos microondas, aparatos de ventilación, planchas, tostadoras, cuchillos eléctricos, hervidores eléctricos, relojes, maquinillas de afeitarse eléctricas, básculas, aparatos para el cuidado del pelo y el cuerpo, calculadoras, aparatos de radio, videocámaras, aparatos de grabación de vídeo, cadenas de alta fidelidad, instrumentos musicales, aparatos de reproducción de sonido o imagen, juguete eléctricos y electrónicos.

Continuación tabla 2. Categorización de los aparatos eléctricos y electrónicos (AEE) en la UE

6. Aparatos de informática y de telecomunicaciones pequeños (sin ninguna dimensión exterior superior a los 50 cm)	Teléfonos móviles, GPS, calculadoras de bolsillo, encaminadores, ordenadores personales, impresoras, teléfonos.
---	---

Nota: Directiva de Unión Europea sobre RAEE. Adaptado de: Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea. (Parlamento Europeo, 2012)

3.2.3 Características de los RAEE. La composición de los RAEE es diversa, lo que puede generar un problema u oportunidad debido a que en su composición tienen la mayor parte de los elementos existentes e incluye elementos y compuestos químicos muy tóxicos como muy valiosos también.

Según (Greenpeace Argentina, 2011) en promedio los aparatos eléctricos y electrónicos están compuestos por un 25% de componentes reutilizables, un 72% de materiales reciclables (plásticos, metales ferrosos, aluminio, cobre, oro, níquel, estaño de las placas, etc.) y un 3% de elementos potencialmente tóxicos: plomo, mercurio, berilio, selenio, cadmio, cromo, sustancias halogenadas, clorofluocarbonos, bifenilos policlorados, policloruros de vinilo, ignífugos como el arsénico y el amianto, entre otros.

En la tabla 3 se presenta la composición de algunas de las categorías de aparatos eléctricos y electrónicos más representativas del flujo de RAEE:

Tabla 3.

Composición porcentual de materiales presentes en los RAEE.

Material	Grandes electrodomésticos	Pequeños electrodomésticos	TIC y electrónica de consumo	Lámparas
Metal ferroso	43	29	36	-
Aluminio	14	9,3	5	14
Cobre	12	17	4	0,22
Plomo	1,6	0,57	0,29	-
Cadmio	0,0014	0,0068	0,018	-
Mercurio	0,000038	0,000018	0,00007	0,02
Oro	0,00000067	0,00000061	0,00024	-
Plata	0,0000077	0,000007	0,0012	-
Paladio	0,0000003	0,00000024	0,00006	-
Indio	0	0	0,0005	0,0005

Continuación Tabla 3. Composición porcentual de materiales presentes en los RAEE.

Material	Grandes electrodomésticos	Pequeños electrodomésticos	TIC y electrónica de consumo	Lámparas
Plásticos bromados	0,29	0,75	18	3,7
Plásticos	19	37	12	0
Vidrio con plomo	0	0	19	0
Vidrio	0,017	0,16	0,3	77
Otros	10	6,9	5,7	5
Total	100	100	100	100

Nota: Composición, peligrosidad y potencial de reciclaje de los RAEE. Adaptado de: Política Nacional de Gestión Integral de RAEE (Desarrollo, 2016).

3.2.4 Marco normativo nacional. En Colombia la gestión integral de RAEE empezó a tomar partido constitucional el 19 de julio de 2013 cuando se firmó la Ley 1672 “por la cual se establecen los lineamientos para la adopción de una *política pública de gestión integral de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE)* y se dictan otras disposiciones”, esta Ley “le da carácter de manejo especial a los RAEE, prohíbe su disposición final en los rellenos sanitarios y los restringe a rellenos de seguridad para que sean retomados por los productores de aparatos eléctricos y electrónicos mediante sistemas de recolección y gestión ambiental segura”.

Dando cumplimiento a la Ley 1672 de 2013 el Gobierno Nacional en cabeza del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) formuló y promulgó la Política Nacional de Gestión Integral de RAEE en el año 2017. Esta Política recoge los principios, objetivos, componentes y acciones que establecieron en la Ley y considera la situación y dinámicas actuales de los RAEE en Colombia y el resto del mundo.

La Política Nacional de Gestión Integral de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos está orientada bajo los siguientes principios generales:

Responsabilidad Extendida del Productor (REP). Es el deber que tiene el productor (fabricante e importador) de AEE, a lo largo de las diferentes etapas del ciclo de vida del producto. La REP es un principio emergente, en una nueva generación de políticas focalizadas en el producto, que fue acuñado por primera vez en Suiza por Lindhqvist en los 90s.

En un sentido amplio, la REP es el principio a través del cual los productores mantienen un grado de responsabilidad por todos los impactos ambientales de sus productos a lo largo del ciclo de vida de estos (desde la producción hasta la disposición final del producto como residuo en la etapa posconsumo).

Este principio, es a su vez, la máxima aplicación de los principios de Prevención de la Contaminación y el que Contamina Paga.

Ciclo de vida de los AEE. Es el principio que orienta la toma de decisiones, considerando las relaciones y efectos que cada una de las etapas del ciclo de vida de un AEE tiene sobre el conjunto de todas ellas. El ciclo de vida de un AEE comprende las etapas de diseño y de desarrollo del AEE, fabricación de materias primas, producción, distribución, uso y gestión posconsumo.

Prevención. Este principio comprende las estrategias orientadas a lograr la optimización del consumo de materias primas, la sustitución de sustancias o materiales peligrosos y la adopción de prácticas, procesos y tecnologías más limpias con el fin de prevenir la generación de los residuos.

Producción y consumo sostenibles. Este principio está orientado a privilegiar las decisiones que se orientan a la reducción de la cantidad de materiales peligrosos utilizados y residuos peligrosos generados respectivamente por unidad de producción de bienes y servicios. Lo anterior, con el fin de aliviar la presión sobre el ambiente, aumentar la productividad y competitividad empresarial y simultáneamente crear conciencia en los consumidores respecto del efecto que los productos y sus desechos tienen sobre la salud y el ambiente.

Gradualidad. La implementación de la presente política se realizará a mediano y largo plazo, atendiendo la implementación progresiva de los programas y estrategias que se adopten.

Participación. Este principio promueve el desarrollo de mecanismos de participación necesarios para que los productores, comercializadores, consumidores y usuarios de los AEE, participen en el diseño, elaboración y ejecución de programas y proyectos que traten sobre la gestión integral de los residuos de estos productos.

Descentralización. Las entidades territoriales y ambientales enmarcarán su gestión en el marco de lo establecido en la presente Política y las demás disposiciones que para tal efecto establezca el MADS. Así mismo apoyarán la consecución de los objetivos y estrategias que contribuyan al a gestión integral de los RAEE, de acuerdo con lo establecido en el presente marco de política.

Innovación, ciencia y tecnología. El Gobierno Nacional a través de las instituciones educativas públicas y privadas en asocio con la empresa pública y privada, fomentará la formación, la investigación y el desarrollo tecnológico, orientados a una gestión integral de RAEE

La Política nacional desarrolla un objetivo general y cuatro objetivos específicos a través de un plan de acción a quince años, que cuenta con cuatro estrategias:

- Sensibilización y educación hacia la producción y el consumo responsable de aparatos eléctricos y electrónicos, para la extensión de su vida útil y para la promoción de medidas orientadas al ecodiseño.
- Desarrollo y establecimiento de instrumentos para la recolección y gestión de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE).
- Transferencia tecnológica y desarrollo de infraestructura ambientalmente segura para el aprovechamiento de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE).
- Conformación de esquemas de trabajo conjunto entre el sector privado y el desarrollo de alianzas público-privadas para promover la gestión integral de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE).

Por otra parte, en 2015 se firmó el decreto 1076 donde se involucran a los departamentos, municipios y distritos en el marco de la gestión integral de los residuos sólidos y se les exige

incorporar en los planes de desarrollo territoriales acciones encaminadas a facilitar y apoyar la gestión diferenciada de los RAEE.

Finalmente, como se establece en la legislación colombiana, en la gestión de los RAEE los sistemas de recolección y gestión son responsabilidad de los Productores (fabricantes e importadores de los AEE) con el apoyo de los comercializadores y la participación de los consumidores. Por lo tanto, hasta el momento se han regulado 3 categorías de RAEE bajo sistemas de recolección selectiva:

- Computadores y periféricos (Resolución 1512 de 2010)
- Lámparas/bombillas ahorradoras (Resolución 1511 de 2010)
- Pilas y acumuladores portátiles (Resolución 1297 de 2010)

Los programas de posconsumo a nivel nacional son una estrategia creada por el Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible con el fin de garantizar la gestión y manejo de residuos que han sido establecidos como de interés prioritario. Es una labor ambiental que consiste en entregar residuos peligrosos a los fabricantes a fin de garantizar su recolección, tratamiento y disposición final. Para el caso de los RAEE, en el país existen diferentes iniciativas para el manejo de las 3 categorías de RAEE reguladas:

- Ecocomputo (manejado por la Asociación de empresarios de Colombia ANDI). Se encarga de la disposición final de computadores y periféricos.
- Pilas con el ambiente (ANDI) se encarga de la disposición de pilas, baterías y acumuladores.
- Programa Lumina, que se encarga del manejo y gestión de lámparas y bombillas fluorescentes.

3.2.5 **Marco normativo internacional.** A nivel mundial los RAEE han tomado carácter prioritario por los retos y oportunidades que representan, dando como resultados diferentes normas, políticas, tratados y convenios entre países, que buscan mitigar el impacto que estos generan. Entre estas normativas, las que han sido influencia para la creación de la Política en Colombia están la Directiva RAEE EU, El Convenio Basilea, El Tratado de Montreal, El Convenio de Estocolmo y El Convenio de Minamata.



Figura 2. *Marco de referencia normativo considerado en la formulación de la Política.*
Adaptado de: Política Nacional de Gestión Integral de RAEE

Según el (Parlamento Europeo, 2012) La Directiva RAEE de la Unión Europea tiene como objetivos, en particular, la conservación, la protección y la mejora de la calidad del medio ambiente, la protección de la salud de las personas y la utilización prudente y racional de los recursos naturales. Esta política se basa en el principio de cautela, en el principio de acción preventiva, en el principio de corrección de daños al medio ambiente, preferentemente en la fuente misma, y en el principio de que quien contamina paga. También busca contribuir a la producción y consumo sostenibles mediante, de forma prioritaria, la prevención de la generación de RAEE y, además, la reutilización, el reciclado y otras formas de valorización de dichos residuos, a fin de

reducir su eliminación y contribuir al uso eficaz de los recursos y a la recuperación de materias primas secundarias valiosas. Asimismo, pretende mejorar el comportamiento medioambiental de todos los agentes que intervienen en el ciclo de vida de los AEE, como, por ejemplo, productores, distribuidores y consumidores, y, en particular, de aquellos agentes directamente implicados en la recogida y tratamiento de los RAEE.

Esta directiva busca, por una parte, que la responsabilidad extendida del productor sea un medio para estimular el diseño y producción de los aparatos eléctricos y electrónicos que tengan en cuenta plenamente y faciliten su reparación, su posible actualización y su reutilización, desmontaje y reciclado; y, por otra parte, que los usuarios de los aparatos eléctricos y electrónicos de consumo masivo tengan la posibilidad de devolver los RAEE sin costo alguno. Igualmente establece que los productores deben financiar la recolección de los residuos y el tratamiento, la valorización y la eliminación de los RAEE.

Por otra lado, El Convenio de Basilea (PNUMA, 2006) es un tratado internacional que controla los movimientos transfronterizos de desechos peligrosos y su eliminación, fue suscrito en 1989, entró en vigor en 1992 y se adoptado en Colombia en 1996. Es el acuerdo ambiental mundial más exhaustivo en materia de desechos peligrosos y otros desechos. Cuenta con 181 Partes (al 18 de julio de 2014), lo cual confiere a su composición carácter casi universal. El objetivo del Convenio es proteger la salud de las personas y el medio ambiente frente a los efectos nocivos resultantes de la generación, los movimientos transfronterizos y la gestión de desechos peligrosos y otros desechos.

El Convenio de Basilea reglamenta los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y otros desechos y obliga a sus Partes a asegurar que esos desechos se gestionen y eliminen de

manera ambientalmente racional. El Convenio abarca desechos tóxicos, venenosos, explosivos, corrosivos, inflamables, eco tóxicos e infecciosos. Las Partes también tienen la obligación de reducir al mínimo las cantidades que se transportan, tratar y eliminar los desechos lo más cerca posible de su lugar de generación, y prevenir o reducir al mínimo la generación de desechos en su fuente.

La corriente de desechos A1180 del anexo VIII del Convenio es la que más se identifica con los RAEE que pueden ser clasificados como peligrosos y también clasifica en la corriente de desechos B1110 del Anexo IX los RAEE no caracterizados como peligrosos.

El Protocolo de Montreal se suscribió el 16 de septiembre de 1987, entró en vigor el primero de enero de 1989 y fue adoptado por Colombia mediante la Ley 29 de 1992 "Por medio de la cual se aprueba el Protocolo de Montreal relativo a las sustancias agotadoras de la capa de ozono (SAO)". Este tratado global que tiene como objetivo proteger la capa de ozono mediante el control del consumo y la producción de las SAO. Para tales fines este protocolo ha establecido en sus anexos, listados de SAO por controlar y un listado indicativo de equipos que pueden llegar a contener sustancias agotadoras de la capa de ozono.

En relación con la gestión y el manejo de los RAEE, los objetivos perseguidos por el Protocolo de Montreal se deben considerar tanto en la etapa de manufactura de aparatos eléctricos y electrónicos que requieren para su funcionamiento SAO, como también al final de la vida útil de estos equipos, para lograr una gestión ambientalmente segura de las SAO contenidas en ellos. Los principales sectores de manufactura de aparatos eléctricos y electrónicos involucrados con la gestión de SAO son refrigeración y acondicionamiento de aire, que contienen estas sustancias

concentradas como fluidos refrigerantes en los circuitos de refrigeración y en forma diluida en las espumas de poliuretano utilizadas como aislamiento térmico.

Por su parte, El Convenio de Estocolmo, se suscribió el 22 de mayo de 2001 en Estocolmo y se encuentra vigente desde el 17 de mayo de 2004 y fue adoptado por Colombia mediante la Ley 1196 de 2008. El convenio se compromete a eliminar el uso de Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP) en el país, como lo son los bifenilos polibromados (BPB) y éteres bifenilos polibromados (PBDE), entre otros, los cuales se encuentran en ciertos los aparatos eléctricos y electrónicos.

Finalmente, el Convenio de Minamata sobre el mercurio, aprobado en el 2013, incluye en su artículo 4°, una serie de medidas sobre los “productos con mercurio añadido” dentro de los cuales se encuentran, con algunas excepciones y límites de contenido de mercurio, las lámparas fluorescentes compactas y lineales, las lámparas de vapor de mercurio de alta presión, los interruptores y relés y las baterías. Estas medidas contemplan la prohibición – adoptando las medidas pertinentes– de la fabricación, la importación y la exportación de tales productos después del 2020.

3.2.6 Generación de RAEE en Colombia. En Colombia en aras de diagnosticar la problemática de RAEE desde el 2007 se iniciaron estudios liderados por el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible y otras entidades nacionales e internacionales para estimar las cantidades de generación de algunas corrientes de RAEE, incluyendo computadores, teléfonos celulares, electrodomésticos, pilas y bombillas. En la tabla 4 se presenta un resumen de estas estimaciones para corrientes de procedencia doméstica.

Tabla 4.

Estudios previos en Colombia sobre generación de RAEE

Título del estudio	Corriente	Año base de proyección	Estimado año base (Ton)	Estimado año 2014 (Ton)	Ultimo año de proyección	Estimado último año (Ton)
Diagnóstico de computadores y teléfonos celulares (Ott-EMPA,2008)		2005	6000	No disponible	2013	19000
Análisis de flujos de residuos de computadores en el sector formal e informal en Colombia (EMPA-León, 2010)	Computadores	2005	8500	19000	2020	43000

Continuación de la tabla 4. Estudios previos en Colombia sobre generación de RAEE

Diagnóstico de Computadores y Teléfonos Celulares (EMPA-Ott,2008)	Teléfonos	2005	500	No disponible	2013	26000
	Celulares					
Diagnóstico de Electrodomésticos y Aparatos Electrónicos de Consumo (EMPA-Blaser, 2009)	Neveras	2004	9000	18000	2018	19000
	Lavadoras	2004	3000	13000	2018	22000
	Televisores	2004	6000	28000	2018	38000
	Equipos de video	2004	1000	6000	2018	8000
	Equipos de audio	2004	5000	17000	2018	14000
	Subtotal	2004	24000	82000	2018	101000
Gestión de los residuos posconsumo de fuentes de Iluminación, pilas primarias y secundarias (MAVDT-UNAL, 2008).	Bombillos	2003	4142	16248	2015	17195
	Pilas	9778	9685	2014	2014	9685
	Total		52920	126933		192480

Nota: En las proyecciones de varios escenarios se tuvo en cuenta el valor del escenario mayor. Adaptado de: Política Nacional de Gestión Integral de RAEE.

Se resalta que los valores reportados en los estudios mencionados, para el año 2014, la generación agregada de estas corrientes RAEE se estima en 127.000 toneladas por año, cifra que difiere de la presentada por el estudio de la UNU, debido a que en los diagnósticos realizados en Colombia no fueron analizadas todas las categorías que el estudio de la UNU contempla, además de una posible diferencia en la metodología de estimación de la generación de RAEE.

Por otra parte, según (Desarrollo, 2016) para los Sistemas de Recolección y Gestión de RAEE de computadores e impresoras, pilas y acumuladores y bombillas, desde el año 2012 cuando se ponen en marcha, los productores han presentado un total de 97 sistemas, de los cuales 60 han sido aprobados por la Autoridad Nacional de Licencias (a diciembre de 2015). De estos sistemas 89 son individuales y 8 son colectivos e involucran a 179 productores, para un total de 268 productores de estos AEE implementando tales sistemas. Los resultados obtenidos por estos sistemas, en el periodo 2012-2014 presentaron un total de 5.126 toneladas recolectadas y gestionadas a través de gestores licenciados.

Una causa del bajo volumen de recolección de RAEE es que los sistemas al estar aún en proceso de consolidación solo tienen cobertura geográfica en las principales capitales del país, quedando sin atención los medianos y pequeños municipios.

En un estudio contratado por MADS realizado en 2013, se realizaron estimaciones más amplias basadas en la información de importaciones por subpartida arancelaria y peso neto en el periodo 2002 a 2012, de donde se estima que en una década ingresaron al país alrededor de 2 millones cien mil toneladas de Aparatos Eléctricos y Electrónicos correspondientes a 28 tipos o subcategorías. En la Tabla 5 se presenta la información del volumen neto de importaciones, por subcategorías de

AEE propuestas por el estudio, su participación individual con respecto al volumen total importado y la participación acumulada.

Tabla 5.

Volumen de importaciones netas por subcategoría de AEE en el periodo 2002-2012

Subcategoría	Importaciones en Toneladas	Participación Individual (%)	Participación Acumulada (%)
Enseres mayores de hogar	283.488	13,5%	13,5%
Cables y conductores	222.752	10,6%	24,1%
Computadores y equipos para tratamiento de datos	148.177	7,1%	31,2%
Equipos de telecomunicaciones	127.150	6,1%	37,2%
Enseres menores de hogar	123.092	5,9%	43,1%
Enseres de audio y Video	109.765	5,2%	48,3%
Electrónica de consumo	101.514	4,8%	53,1%
Refrigeración doméstica	100.903	4,8%	58,0%
Motores y generadores	100.213	4,8%	62,7%
Pilas y Acumuladores	91.712	4,4%	67,1%

Continuación Tabla 5 Volumen de importaciones netas por subcategoría de AEE en el periodo 2002-2012

Subcategoría	Importaciones en Toneladas	Participación Individual (%)	Participación Acumulada (%)
Grupos electrógenos	86.374	4,1%	71,2%
Equipos de iluminación	72.349	3,4%	74,7%
Equipos de control y protección	69.506	3,3%	78,0%
Enseres menores de cocina	68.412	3,3%	81,2%
Equipo industrial	60.576	2,9%	84,1%
Cocinas y hornos	57.220	2,7%	86,8%
Partes y tarjetas para computador	40.971	2,0%	88,8%
Transformadores	37.511	1,8%	90,6%
Refrigeración comercial	34.615	1,6%	92,2%
Enseres menores de calentamiento	30.832	1,5%	93,7%
Piezas eléctricas	25.452	1,2%	94,9%
Enseres menores personales	22.661	1,1%	96,0%

Continuación Tabla 5 Volumen de importaciones netas por subcategoría de AEE en el periodo 2002-2012

Subcategoría	Importaciones en Toneladas	Participación Individual (%)	Participación Acumulada (%)
Equipos de instrumentación y control	21.629	1,0%	97,0%
Componentes electrónicos	18.889	0,9%	97,9%
Antenas para telecomunicaciones	18.149	0,9%	98,8%
Equipos de electrónica de potencia	13.776	0,7%	99,4%
Otros aparatos y sistemas	9.211	0,4%	99,9%
Circuitos electrónicos	2.029	0,1%	100,0%
Electromédicos	698	0,0%	100,0%
Total general	2.099.625	100%	

Nota: Estudio realizado por PRONET-ISE, revisado por el MADS. Adaptado de: Política Nacional de Gestión Integral de RAEE.

Se puede observar de la tabla anterior, que existe una gran diversidad de corrientes de AEE que se convertirán en residuos al final de su vida útil, de las cuales en la actualidad solo 3 subcategorías están reguladas y gestionadas a través de los Sistemas de Recolección y gestión de RAEE, y que representan apenas el 14,9% del total de importaciones de AEE. Lo anterior conlleva a concluir que es necesario incluir las subcategorías de consumo masivo de RAEE que se deben regular prioritariamente en las siguientes: enseres mayores de hogar, equipos de telecomunicaciones, enseres menores de hogar, enseres de audio y video, refrigeración comercial y doméstica, las

cuales representan el 41,9% del volumen total de importaciones de AEE, que sumadas a las corrientes ya reguladas daría una cobertura del 56,8% del total teórico generado.

3.2.7 **Logística Inversa.** Existen diferentes definiciones de logística inversa, (Dr. Dale S. Rogers & Tibben-Lembke, 1998) la definen como “el proceso de planificar, implementar y controlar eficientemente el flujo efectivo de materias primas, inventario semiprocesado, bienes terminados e información referida a estos, desde el punto de consumo al punto de origen, con la finalidad de obtener valor o su correcta descomposición.”

Según (Ellram, n.d.) La logística inversa es un proceso por el cual las empresas pueden llegar a ser más eficientes ambientalmente por medio del reciclaje la reutilización y la reducción de la cantidad de material que utilizan. Visto en sentido estricto, se puede considerar como la distribución inversa de materiales entre los miembros del canal.

(Quesada, 2003) en una revisión de literatura sobre el concepto de logística inversa propone que esta se defina como: “La gestión de cualquier tipo de elementos (usados o no, productos terminados o solo componentes, partes o materiales), que, por diferentes razones, son enviados por un miembro de la cadena de suministro a cualquier otro miembro anterior de la misma cadena. Además, los flujos ocurridos fuera de la cadena original, cuyo origen está ubicado en la cadena de suministro original, también se incluyen siempre que sean consecuencia de actividades de reparación o recuperación de valor o material adicional”.

Finalmente, una definición más completa, donde se tiene en cuenta el máximo valor económico de la logística inversa la brinda (Cabeza, 2012): “La logística inversa abarca el conjunto de actividades logísticas de recogida, desmontaje y desmembramiento de productos ya usados o sus

componentes, así como de materiales de distinto tipo y naturaleza con el objeto de maximizar el aprovechamiento de su valor, en sentido amplio de su uso sostenible y, en último caso, su destrucción”.

3.2.8 Optimización Combinatoria. La optimización combinatoria es una rama de las matemáticas aplicadas a la investigación de operaciones y demás ciencias afines cuyo objetivo es tratar problemas con soluciones discretas. Por lo tanto la optimización combinatoria consiste en encontrar mediante algoritmos definidos la mejor solución posible dentro de un conjunto finito de soluciones alternativas (Papadimitriou & Steiglitz, 1982).

Los problemas de optimización combinatoria son definidos según (Blum & Roli, 2003) como $P = (S, f)$ donde se define:

- Un conjunto de variables $X = \{X_1, \dots, X_n\}$;
- Dominios de las variables $D_1, \dots, D_n$;
- Restricciones entre las variables;
- Una función objetivo f a ser minimizada (o maximizada), donde $f: D_1 \times \dots \times D_n \rightarrow \mathbb{R}^+$;

El conjunto de todas las soluciones que satisfacen las restricciones entre las variables constituye el llamado espacio de búsqueda o espacio de soluciones F . Formalmente, $F = \{s = \{(x_1, u_1), \dots, (X_n, u_n)\} \text{ con } u_i \in D_i, i=1, \dots, n \text{ tal que } s \text{ satisface todas las restricciones del problema}\}$.

Algunos ejemplos clásicos de problemas de optimización combinatoria son el *problema del agente viajero (TSP)* y el *problema de la asignación cuadrática (QAP)*, lo cuales debido a su importancia práctica han impulsado el desarrollo de múltiples algoritmos, tanto completos como aproximados de acuerdo con la complejidad del problema.

3.2.9 Complejidad Computacional. Matemáticamente, los problemas pueden caracterizarse atendiendo a la dificultad que entraña su resolución por un ordenador. La complejidad algorítmica se rige principalmente por criterios de espacio (cuanta memoria se necesita para resolver un problema) y tiempo (cuantos pasos se requieren para resolverlo). Según (Vidal, 2013), los problemas se pueden clasificar según su complejidad computacional así:

Clase P: Dado un problema, decimos que pertenece a la clase de complejidad P si existe un algoritmo que resuelve cualquier ejemplo de su problema en tiempo polinomial.

Clase NP: Dado un problema, decimos que pertenece a la clase de complejidad NP si existe un algoritmo que puede verificar cualquier solución a un ejemplo de esta clase en tiempo polinomial.

Clase NP-completa: Sea P' un problema en la clase NP. Entonces P' es NP-completo si cualquier problema en clase NP se puede reducir a P' en tiempo polinomial.

Clase NP-duro: Un problema es NP-duro si cualquier problema en clase NP se puede reducir a él en tiempo polinomial.

3.2.10 Problema de Localización de Instalaciones (Facility Location Problem). El problema de localización de instalaciones es otro de los problemas clásicos de la investigación de operaciones que ha venido siendo estudiado en gran medida debido a la gran cantidad de aplicaciones prácticas del mismo. En este problema se busca determinar la cantidad óptima de sitios a instalar y la ubicación de los mismos, de tal manera que con cada sitio ubicado se logre que la totalidad de los clientes sea asignada a una instalación abierta, minimizando los costos de apertura y distancia de conexión (Meira, Miyazawa, & Pedrosa, 2017).

Para la construcción del modelo se cuenta con un conjunto de ubicaciones posibles en los cuales se puede ubicar una instalación y la complejidad del modelo puede variar de acuerdo a la cantidad de clientes y ubicaciones posibles y de las consideraciones de capacidad de los puntos posibles.

3.2.11 Problema de Ruteo de Vehículos (Vehicle Routing Problem VRP). El problema de ruteo de vehículos (VRP) es otro problema clásico en la literatura cuyo estudio ha incrementado en las últimas décadas debido a su aplicabilidad a problemas de la vida real. Se trata de un problema de optimización combinatoria, normalmente de la clase NP-hard, razón por la cual se han desarrollado una amplia variedad de algoritmos para dar soluciones a dichos problemas.

Generalmente el problema consiste en, dado un conjunto de clientes y depósitos dispersos geográficamente y una flota de vehículos, determinar un conjunto de rutas de costo mínimo que comiencen y terminen en los depósitos, para que los vehículos visiten a los clientes (Olivera, 2004).

La red de transporte por la que circulan los vehículos se modela mediante un grafo ponderado $G = (V, E, C)$. Los nodos del grafo representan a los clientes y depósitos. En problemas con un

depósito y n clientes, el nodo 0 representa al depósito y los nodos 1, . . . , n a los clientes. En algunos casos se agrega una copia del depósito etiquetada con $n+1$ para simplificar la formulación.

Cada arco $(i, j) \in E$ representa el mejor camino para ir desde el nodo i hacia el nodo j en la red de transporte y tiene asociado un costo c_{ij} y un tiempo de viaje t_{ij} . Según la estructura de los costos y los tiempos y las características de la red, el grafo puede ser simétrico o asimétrico.

3.2.12 Problema de Localización – Ruteo (Location- Routing Problem LRP). El problema de Localización – Ruteo es una versión combinada en el que no solo se determina el ruteo de los vehículos, sino que además incluye la localización de los almacenes y depósitos. Por lo tanto implica la localización de las instalaciones simultáneamente con la definición de las rutas de entrega a los conjuntos de clientes de tal forma que el costo total de la operación sea el mínimo posible (Ting & Chen, 2013). Este problema ha sido de amplio interés en la literatura debido a sus aplicaciones prácticas en diseño de redes de distribución y recolección móvil (Nowakowski, 2017).

Una variación del modelo general es el *Problema de localización – ruteo capacitado (CLRP)* en el cual se tiene en cuenta restricciones de capacidad de carga, por lo tanto, se diseña la ruta de tal forma que inicia en punto dado y debe recorrer todos los puntos correspondientes sin exceder la capacidad del vehículo. El CLRP por lo tanto es uno de los problemas de mayor complejidad debido a que combina dos problemas de categoría NP- Hard (problema de localización de instalaciones y problema de ruteo de vehículos con restricciones de capacidad) en el cual las decisiones de localización – asignación influenciará en el costo total de las rutas vehiculares y las rutas diseñadas afectara la localización de depósitos y la asignación de clientes, esta interdependencia entre decisiones es un desafío importante a la hora de dar buenas soluciones al problema (Ting & Chen, 2013).

3.2.13 **Métodos de solución.** En la literatura se definen principalmente dos categorías de métodos de solución de problemas de optimización combinatoria: métodos exactos y métodos aproximados. La utilización de uno u otro depende de la naturaleza del problema a resolver y las instancias evaluadas. Dado que para muchos problemas de interés en este campo no existen algoritmos exactos que puedan solucionar estos problemas en un tiempo computacional razonable (como en los problemas de categoría NP-hard) es necesario desarrollar métodos de solución aproximados con el objetivo de dar buenas soluciones en un tiempo computacional aceptable (Vidal, 2013).

Los algoritmos exactos resuelven el problema ofreciendo una solución óptima al problema al tener en cuenta todo el campo de soluciones posibles. Generalmente dividen el problema en subproblemas con sus correspondientes restricciones para finalmente llegar a una solución final.

Sin embargo la mayoría de ordenadores no cuentan con la velocidad suficiente para realizar una búsqueda exhaustiva de más de 100 elementos (Vidal, 2013). Además, un algoritmo exacto es dependiente de las instancias del problema que resuelve, de tal forma que cuando se cambia el problema es necesario construir un nuevo algoritmo exacto y demostrar su optimalidad.

Uno de los métodos exactos más comunes es el *Método Simplex*, diseñado como un método repetitivo para resolver problemas de programación lineal en los cuales la función objetivo y las restricciones son estrictamente lineales.

Otro método exacto conocido es el método de *Branch and Bound*, propuesto en el año 1960 el cual fue diseñado para dar soluciones exactas a problemas de optimización combinatoria, la cual a partir de unos subproblemas o nodos evalúa soluciones parciales hasta encontrar la mejor solución luego de explorar todas las ramificaciones posibles.

3.2.13.1 **Métodos aproximados.** Debido a que algunos problemas tienen un espacio de búsqueda muy grande, los algoritmos exactos no pueden resolver el problema en un tiempo computacional aceptable. Por esta razón se desarrollaron los métodos aproximados o heurísticos, cuya característica es que permiten obtener una solución de calidad en un tiempo computacional aceptable (Vidal, 2013).

Dentro de los métodos heurísticos se pueden identificar dos clases:

Heurísticas Constructivas: Son técnicas que construyen la solución a un problema dado por una serie de etapas definidas que dependen de la estrategia utilizada por el algoritmo. Algunas de las estrategias más conocidas son *la estrategia voraz*, la cual partiendo de una semilla construye paso a paso la solución factible, en cada paso se agrega un elemento de dicha solución y *la estrategia de descomposición* que divide el problema en subproblemas más pequeños hasta reducir el tamaño del problema a punto en el que los subproblemas tengan una solución trivial y luego se combinan las soluciones hasta dar una buena solución al problema original.

Métodos de búsqueda local: Estos métodos parten de una solución factible y a partir de la misma buscan mejorarla siguiendo una estrategia definida. Según (Vidal, 2013) las estrategias a seguir son:

- **Estrategia de búsqueda local 1:** Parte de una solución factible y la mejora progresivamente. Para ello examina su vecindad y selecciona el primer movimiento que produce una mejora en la solución actual (first improvement).
- **Estrategia de búsqueda local 2:** Parte de una solución factible y la mejora progresivamente. Para ello examina su vecindad y todos los posibles movimientos

seleccionando el mejor movimiento de ellos, es decir aquel que produzca un incremento (en el caso de maximización) más elevado en la función objetivo (best improvement).

- **Estrategia Aleatorizada:** Para una solución factible dada y una vecindad asociada a esa solución, se seleccionan aleatoriamente soluciones vecinas de esa vecindad.

3.2.13.2 **Métodos Metaheurísticos.** Uno de los principales problemas de los métodos heurísticos es su incapacidad de escapar de los óptimos locales. Para solventar este problema fue necesaria la creación de algoritmos más inteligentes conocidos como metaheurísticas, los cuales tienen como propósito escapar de los óptimos locales permitiendo así obtener mejores soluciones en un tiempo computacional aceptable. De acuerdo con su naturaleza se pueden clasificar en trayectoriales y poblacionales:

- **Metaheurísticas trayectoriales:** Estas parten de una solución factible única y la van mejorando a través de la trayectoria definida en el espacio de búsqueda. Algunas metaheurísticas de esta clase son: Búsqueda Tabú, Recocido Simulado, Búsqueda en vecindad variable, entre otras.
- **Metaheurísticas Poblacionales:** Estas parten de un conjunto de soluciones (la población) y luego a partir de cada iteración van mejorando dicha solución. Algunas metaheurísticas poblacionales son: Búsqueda Dispersa, Optimización por enjambre de partículas, Optimización de colonia de hormigas, entre otras.

4. Caso de estudio: Recolección de RAEE en las comunas 6, 7 y 8

4.1. Descripción del problema de optimización

Según (Nowakowski & Mrówczyńska, 2018), la recolección y transporte de RAEE se divide en diferentes tareas y estaciones, dada la complejidad de cada etapa y la gran cantidad de variables a tener en cuenta. La localización y ruteo de los puntos se va a determinar a través de un modelo matemático, el cual se va a trabajar en dos fases: una fase de localización en la cual se ubicarán los puntos teniendo en cuenta un fácil acceso a la población de influencia y la fase de ruteo en la cual se busca un sistema de recogida eficiente de los residuos que minimice los costos de recogida de los residuos en los puntos asignados y garantice una gestión óptima de los RAEE

Inicialmente para la fase de localización, el usuario es quien se va a dirigir al punto de recolección. Para la ubicación de los puntos de recogida y asignación de los usuarios a estos, se utilizará un modelo de programación lineal que minimice el costo de la distancia recorrida por los clientes, así como los costos de instalación de los contenedores.

En el modelo de localización se considerarán como puntos fijos los conjuntos residenciales que cuenten con más de 106 hogares, de tal forma que su generación de RAEE amerite la instalación de contenedores. En estos se determinará el número de contenedores de acuerdo con la cantidad de hogares y su generación de RAEE correspondiente. Los puntos fijos serán integrados a los puntos asignados por el modelo de localización, para la formulación del modelo de ruteo.

Como datos de entrada del modelo de localización, y posibles puntos de recolección, se tendrán en cuenta lugares de interés general como colegios públicos, Juntas de Acción Comunal (JAC), y CAI'S. También se introducirán las distancias reales de los hogares a los posibles puntos de recolección traducidas en un costo de distancia recorrida por el usuario. Con estos datos se espera

determinar la mejor distribución de puntos que cumplan con la demanda de RAEE y minimicen los costos de instalación y penalización por distancia recorrida.

Al modelo también entran los centros comerciales y puntos de venta de electrónicos, que de acuerdo con el estatuto de responsabilidad extendida del productor deben ofrecer el servicio de recolección en sus instalaciones o delegar dicha tarea a un tercero, por lo tanto, se incluyen para asignarles usuarios y cantidad de contenedores.

En el modelo se debe tener en cuenta el punto limpio metropolitano, estableciendo una restricción especial que asegure que este sea abierto y se le asignen usuarios, con la característica de que no se le asignen contenedores, ya que este cuenta con todo el equipamiento necesario para la recogida de RAEE.

El modelo de localización además de asignar usuarios y seleccionar los mejores puntos de recolección minimizando los costos asociados, debe de acuerdo con la demanda, establecer la cantidad óptima de contenedores en cada punto seleccionado.

Estos contenedores según el (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2011), en la guía Lineamientos Técnicos para el Manejo de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos, para un punto de retoma y recolección, deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Instalarse en un lugar techado protegido de las condiciones del ambiente.
- Depositar temporalmente los RAEE en contenedores, sobre estibas, o en cajas de rejas o de madera, facilitando su carga en el transporte hacia el punto de almacenamiento, por un tiempo limitado de acuerdo con las características de los contenedores y a las condiciones del sitio. Estos recipientes deben estar debidamente señalizados.

- Realizar la clasificación por diferentes categorías o tipos de aparatos para facilitar su posterior entrega a empresas especializadas.
- Establecer mecanismos de control para evitar hurtos.
- Los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos que se depositen en el punto de recolección no deben ser desensamblados ni manipulados.

Por lo tanto, según estas restricciones el modelo se diseñará para recolectar únicamente los RAEE, según la Directiva de la Unión Europea, de las categorías:

- Categoría 3: Lámparas.
- Categoría 5: Pequeños aparatos sin ninguna dimensión superior a 50 cm
- Categoría 6: Aparatos de informática y telecomunicaciones pequeños sin ninguna dimensión superior a 50 cm.

Estos RAEE representan el 56% del total generado. Los RAEE pertenecientes a las demás categorías se consideran aparatos de grandes dimensiones, lo cual dificulta su recolección y almacenamiento temporal en puntos fijos. Para estos tipos de RAEE autores como (Nowakowski et al., 2017) recomiendan un sistema de recolección móvil bajo demanda, el cual no hace parte del alcance de este proyecto. Dicho sistema de recolección móvil es una fase posterior a la implementación de un sistema estacionario.

Para el modelo se usarán tres tipos de contenedores diferentes para las categorías de RAEE a recolectar. En todos los puntos seleccionados se ubicará al menos un contenedor de cada tipo, de tal manera que sea posible atender la demanda de cada categoría de RAEE.

Los tipos de RAEE asociados a cada contenedor, de acuerdo con las normas vigentes, se relacionan a continuación:

- Contenedor 1: Baterías y pilas
- Contenedor 2: Lámparas fluorescentes
- Contenedor 3: RAEE perteneciente a las categorías 5 y 6 según clasificación de UE

Posterior a la fase de localización, con los resultados obtenidos se procederá al diseño de un modelo de ruteo de vehículos (VRP), el cual tiene como objetivo plantear rutas de recolección entre los puntos localizados y los puntos fijos iniciales, minimizando los costos asociados con la distancia recorrida en la ruta desde el punto de origen hasta el sitio de acopio. En el caso de estudio la ruta inicia y termina en el punto limpio metropolitano.

Para el diseño del modelo se contará con un solo tipo de vehículo recolector con una capacidad total definida, en el cual se descargarán de forma separada por categorías los RAEE de cada punto de retoma. Se ha definido que la periodicidad de recolección sea de 15 días, de acuerdo con las características de los contenedores y la demanda asociada de los puntos.

Como datos de entrada al modelo de ruteo, se introducirán los costos por distancias recorridas entre los mismos puntos localizados y el punto de acopio. Estas distancias se obtienen a partir de la matriz de distancias de la API de Google Maps y son asimétricas, ya que no es lo mismo ir de i a j que de j a i .

4.2. Análisis de la zona objetivo

Para el diseño del modelo de recolección de RAEE se propone la instalación de puntos de recolección estacionarios en vecindades, de tal forma que los habitantes de las zonas objetivo, las comunas 6,7 y 8, se dirijan caminando al punto y depositen el residuo en el contenedor asignado.

Estas comunas están conformadas por 24000 hogares aproximadamente, 20 barrios, 2 asentamientos y 8 urbanizaciones. En la zona además se ubican 3 Comandos de Atención Inmediata CAIS, 25 juntas de acción comunal JAC y 17 colegios públicos.

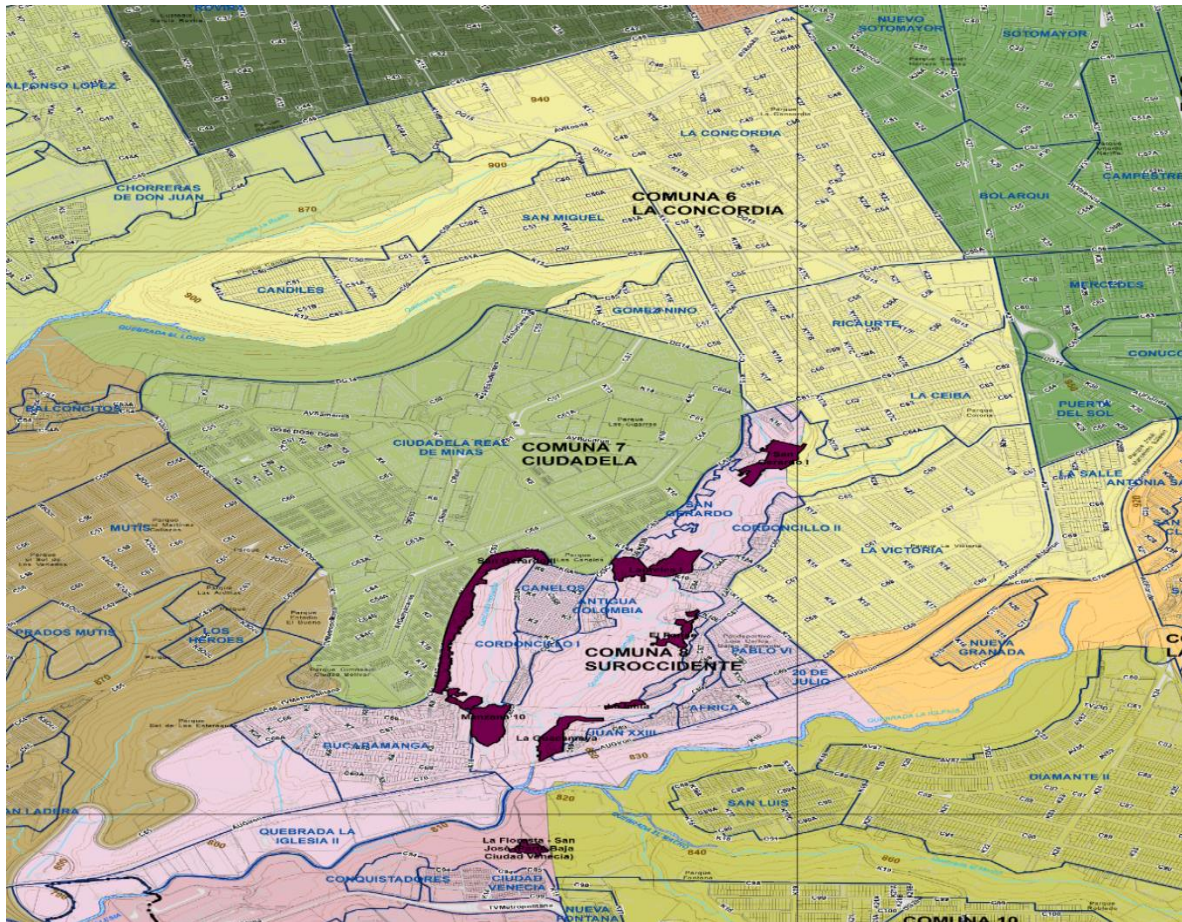


Figura 3. Mapa comunas objetivo. Adaptado de: Área Metropolitana de Bucaramanga

La Comuna 6, llamada La Concordia está constituida por los barrios La Concordia, San Miguel, Candiles, Aeropuerto Gómez Niño, Ricaurte, La Ceiba, La Salle, La Victoria. En esta comuna viven aproximadamente el 5,3% de los habitantes de Bucaramanga. Se caracteriza por tener viviendas de estrato 3.

La Comuna 7, La Ciudadela, está constituida por el barrio la Ciudadela Real de Minas y las urbanizaciones la Macaregua, Ciudad Bolívar, Los Almendros, Plazuela Real, Los Naranjos, Plaza Mayor y Plazuela Real. En esta comuna predominan los conjuntos cerrados y edificios como tipo de vivienda, en su mayoría estrato 4. En la Ciudadela habitan aproximante el 5,5% de población de Bucaramanga.

La Comuna 8 o Sur Occidente, está constituida por los barrios: San Gerardo, Antiguo Colombia, Los Canelos, Bucaramanga, Cordoncillo I y II, Pablo VI, 20 de Julio, Africa, Juan XXIII, Los Laureles; los asentamientos: El Fonce, Manzana 10 del barrio Bucaramanga. y la urbanización La Hoyada. En esta comuna habitan aproximadamente el 3,5% de la población de Bucaramanga en viviendas estrato 2 y 1.

5. Diseño del modelo matemático de localización

5.1. Características del modelo

Para cumplir el objetivo de ubicar los contenedores en sitios estratégicos de interés general, de tal forma que los usuarios no deban recorrer distancias demasiado grandes para depositar sus residuos (Sabbaghi et al., 2016), se seleccionaron en total 26 puntos posibles de localización de contenedores (Apéndice A), los cuales corresponden a juntas de acción comunal, CAI'S, colegios públicos y el punto limpio metropolitano. Además, debido a la normativa vigente bajo el concepto de Responsabilidad Extendida del Productor, se usarán como puntos fijos de recolección el centro comercial Acrópolis y el centro comercial La Isla.

Teniendo en cuenta los lineamientos del (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2011) se seleccionaron puntos donde se garantizara la buena disposición de los RAEE y donde no se incurriera en costos de adecuación del lugar, por lo tanto se asume un costo de apertura de \$10.000 que hacen referencia a señalización del lugar.

Se hace uso de la API de Google Maps para representar en el mapa los posibles puntos de recolección de acuerdo con los datos recolectados durante el recorrido por la zona. En la tabla 6 se muestran las convenciones y símbolos usados para representar en el mapa las ubicaciones geográficas de cada sitio:

Tabla 6.

Simbología de los sitios representativos del modelo

Lugar	Símbolo
Punto limpio metropolitano	
Punto de generación	
Colegio	
CAI	
JAC	
Conjunto residencial	
Centro comercial	

En la figura 4, se muestra la ubicación en el mapa de los posibles puntos de recolección.

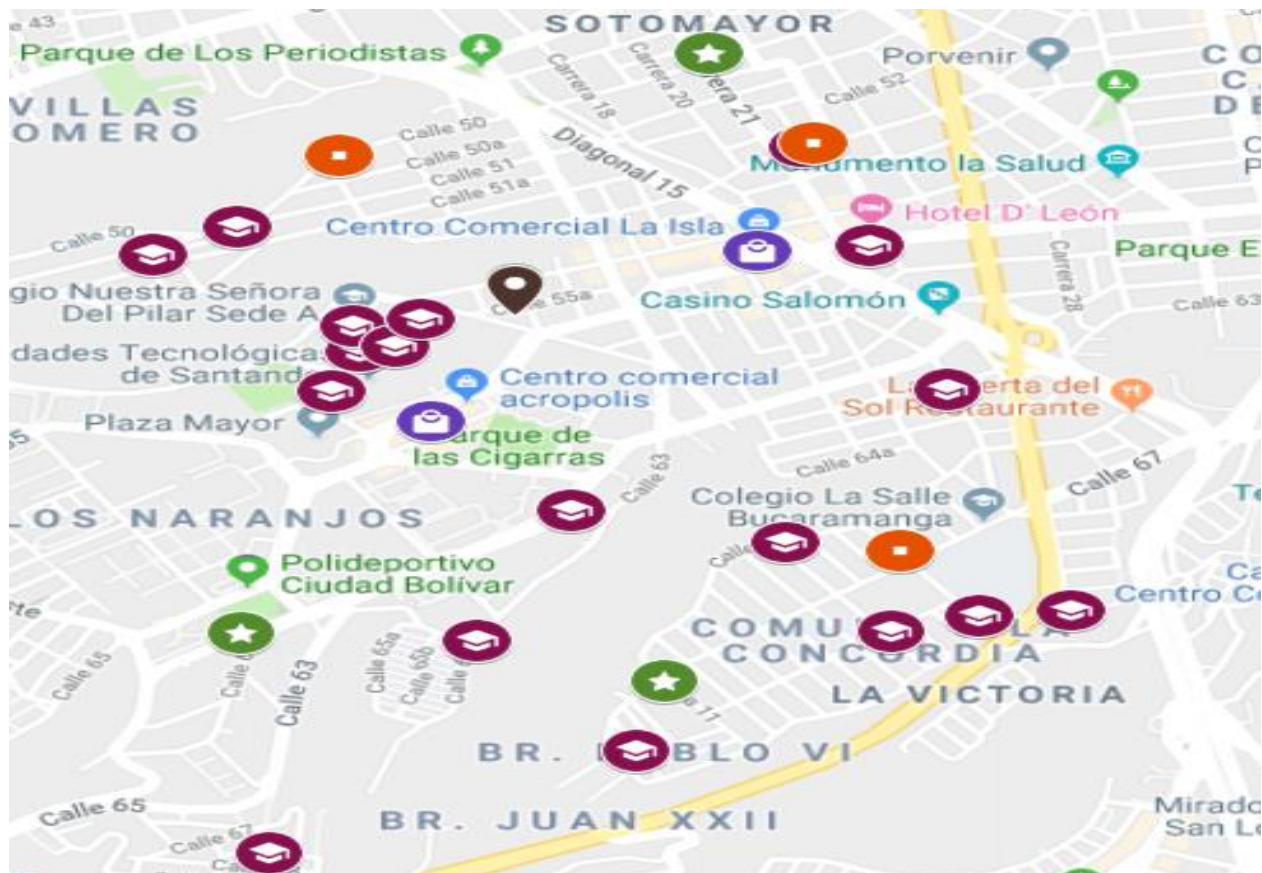


Figura 4. Posibles puntos de recolección

5.2. Contenedores

Para el presente proyecto se tienen en cuenta 3 tipos de contenedores diferentes, uno para cada tipo de RAEE, de acuerdo a los lineamientos técnicos vigentes (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2011). Los contenedores fueron seleccionados de acuerdo con sus características de capacidad y materiales de fabricación, para garantizar la integridad del RAEE recolectado en los puntos de recolección. La información de capacidad y costo de los contenedores se resume en la Tabla 7:

Tabla 7.

Contenedores seleccionados para el modelo

Contenedor	Tipo de RAEE asociado	Capacidad	Costo
Recopilador grande	Pilas y baterías	40 kg	\$120000
Estación Ecobombillos	Lámparas fluorescentes	60 kg	\$360000
Jaula metálica con ruedas	RAEE tipo 5 y 6	800 kg	\$1000000

5.3. Estimación de la generación de RAEE en la zona objetivo

Para calcular la cantidad de RAEE generado por hogar en el año 2018 se realiza una estimación de acuerdo con el número de habitantes por hogar, según el POT de Bucaramanga 3,4 habitantes, y al Global E-Waste Monitor donde se reporta para Colombia la producción de 5,6 kg de RAEE por persona.

Inicialmente para el modelo de localización, se asignaron agrupaciones de hogares en el territorio de estudio, los cuales se encuentran en un mismo sector y comparten características similares. De acuerdo con la cantidad de hogares en cada agrupación se estimó la cantidad de RAEE generado de cada una de las agrupaciones.

En la Política Nacional de Gestión Integral de RAEE se muestra la cantidad proyectada de generación anual de cada tipo de RAEE, el cual es el valor usado para estimar la demanda de residuos por tipo. En la tabla 8 se resumen los datos con los que estima la cantidad aproximada de RAEE a recolectar con una periodicidad de 15 días. En el Apéndice B se consolida la generación de RAEE por agrupación de hogares

Tabla 8.

Producción quincenal de RAEE por tipos

Producción quincenal de RAEE por hogar	0.705 Kg/hogar-quincenal
Porcentaje de baterías y pilas	8%
Producción de pilas y baterías	0.056 Kg/hogar-quincenal
Porcentaje de lámparas	13%
Producción de lámparas	0.092 kg/hogar-quincenal
Porcentaje de RAEE categoría 5 y 6	34%
Producción de RAEE categoría 5 y 6	0.24 Kg/hogar-quincenal

Las cantidades proyectadas aplican para los hogares del territorio de estudio, así como para los conjuntos residenciales de la zona, de los cuales se tiene información sobre el número de hogares y por consiguiente es posible estimar la generación de RAEE de dichos sitios.

Aquellos conjuntos residenciales cuya demanda estimada no supere el 60% de la capacidad de alguno de los contenedores, no se le asignara contenedor y será incluido como un punto de generación de demanda en el modelo de localización, para que sea asignado a un punto de recolección.

5.4. Construcción de la matriz de distancias

Cada centroide o agrupación de hogares, tiene asociada una coordenada de latitud y longitud, con la cual mediante el uso de la API de Google Maps es posible la creación de una matriz origen-

destino entre los puntos de generación hasta todos los puntos de recolección potenciales definidos para modelo. En la figura 5 se muestran en el mapa los diferentes centroides de cada agrupación de hogares de la zona objetivo:

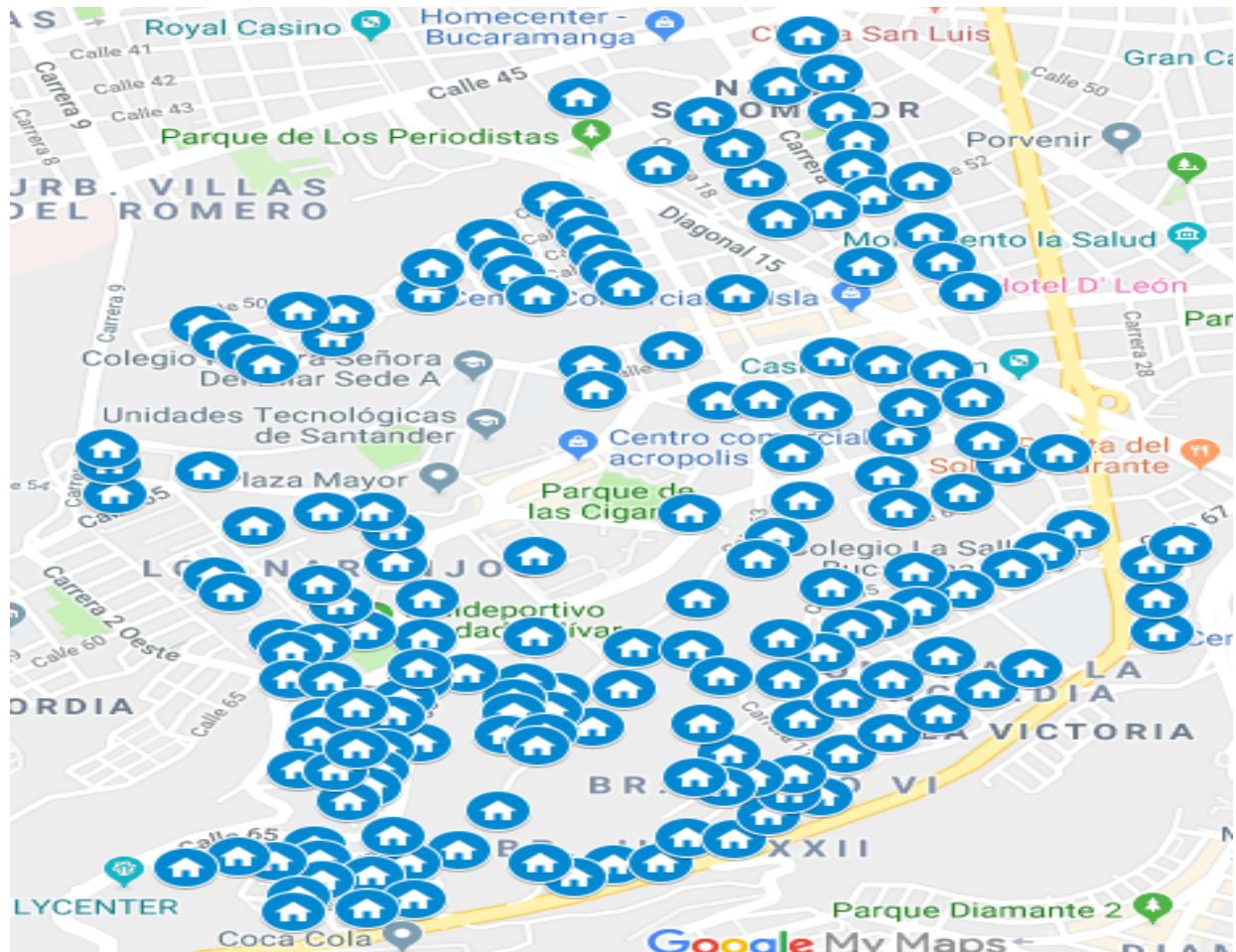


Figura 5. Centroides de generación de demanda

De acuerdo con la petición realizada al servidor de Maps, se puede crear la matriz de distancias teniendo en cuentas diferentes formas de desplazamiento (caminando, en bicicleta, en vehículo). Para el caso del modelo de localización se ha definido que los usuarios se dirijan al depósito

caminando, por lo tanto, se ajusta la solicitud al servidor, el cual tiene en cuenta el desplazamiento de las personas por caminos y andenes peatonales, brindando las distancias recorridas en metros.

Se obtuvo una matriz de 170 filas y 26 columnas, correspondientes a los puntos de generación de residuos y a los puntos potenciales de recolección, respectivamente, para un total de 4420 elementos.

Con la matriz de distancias construida, es posible establecer el límite máximo de distancia que los usuarios deben recorrer para depositar sus residuos en el punto asignado, de tal forma que el modelo no asigne hogares a puntos potenciales que superen dicho valor. Para calcular este valor se hace uso de la estrategia maximin, tomando los valores de distancia mínimos de cada fila y de estos seleccionar el valor máximo. Para la matriz hallada el valor del maximin es de 820 metros, el cual corresponde a la distancia máxima permitida que entra como parámetro al modelo de localización, teniendo en cuenta que valores inferiores a este hacen que el modelo no tenga solución.

No obstante, debido a que el modelo de localización está diseñado para minimizar los costos asociados, es necesario convertir la matriz de distancias a una matriz de costos. Para lograr este objetivo, se calcula el costo por distancia recorrida del usuario, como el importe asociado a la persona por invertir parte de su tiempo para llevar el RAEE al punto correspondiente, teniendo como base el salario mínimo legal vigente para el año 2019 y realizando la correspondiente conversión de distancia a tiempo, ponderando una velocidad promedio caminando de 4.6 km/h.

Como resultado se obtiene que el costo asociado por recorrer un metro es de \$0.7502/m y el maximin queda ajustado al valor de \$615.09, el cual se usa como parámetro en el modelo de localización.

5.5. Formulación del modelo de localización

Para solucionar el problema de localización se utilizará un modelo de Programación Lineal Entera Mixta (MILP por sus siglas en inglés), el cual posee variables reales, enteras y binarias que permitirán decidir si se asigna o no un punto de recolección, si se asigna el usuario al punto de recolección y cuantos de contenedores de cada tipo se deben instalar en cada punto aplicando las restricciones necesarias al modelo, como lo propuso (J. Mar-Ortiz et al., 2011) en su trabajo para Galicia, España.

El modelo de programación lineal que se lleva a cabo presenta la siguiente notación y formulación.

Índices

i = Puntos de generación de RAEE i (1, 2..., n)

j = puntos de localización j (1, 2, ..., m)

t = Tipo de RAEE t (1, 2, 3)

Variables

$X_{ij} = \begin{cases} 1. Si se asigna el punto de generación i al punto de localización j \\ 0. De lo contrario \end{cases}$

$Y_j = \begin{cases} 1. Si se abre el punto de localización j \\ 0. De lo contrario \end{cases}$

B_{tj} = Número de contenedores del tipo t ubicados en el punto j

Parámetros

M = Costo máximo de ir desde un punto de generación hasta un punto de localización.

U = Número grande

D_{it} = Demanda de RAEE tipo t generado en el punto i

P_t = Costo del contenedor t

Cap_t = Capacidad en Kg del contenedor asignado para el RAEE tipo t

Cos_{ij} = Costo de ir desde el punto de generación i hasta el punto de localización j

C_p = Costo de apertura del punto

Función objetivo

$$\text{Min } Z = \sum_i \sum_j Cos_{ij} X_{ij} + \sum_j C_p Y_j + \sum_j \left[\sum_t P_t B_{tj} \right]$$

Restricciones

$$1. \quad Y_1 + Y_2 + Y_3 = 3$$

$$2. \quad \sum_j X_{ij} = 1 \quad \forall_i$$

$$3. \quad Cos_{ij} X_{ij} \leq M \quad \forall_i, \forall_j$$

$$4. \quad UY_j \geq \sum_i X_{ij} \quad \forall_j$$

$$5. \quad UY_j \geq \sum_t B_{tj} \quad \forall_j \neq 1$$

$$6. \quad \sum_i D_{ti} X_{ij} \leq B_{tj} Cap_t \quad \forall_j, \forall_t$$

$$7. \quad X_{ij}, Y_j \in \{0,1\}$$

$$8. \quad B_{tj} \geq 0 \text{ y enteros } \forall_j, \forall_t$$

La restricción (1) hace que los puntos Y1, Y2 y Y3 sean abiertos para asignar usuarios; la restricción (2) asegura que todos los puntos de generación de RAEE deben ser atendidos por un punto de localización, la restricción (3) indica que el costo asociado por la distancia recorrida desde un punto de generación hasta el punto de localización asignado no supere el límite establecido, la restricción (4) indica que solo se abrirá un punto de localización si existe una demanda de residuos asociada a dicha ubicación, la restricción (5) define que deben que se asignan contenedores si se abre el punto.

La restricción (6) establece que la capacidad de los contenedores instalados en cada punto sea mayor a la demanda asociada de cada tipo de RAEE que se le asigne. Finalmente, la restricción (7) indica el carácter binario de las variables X, Y, mientras la restricción (8) la naturaleza entera positiva de la variable B.

5.6. Herramienta de solución del modelo

Para solucionar el modelo de programación lineal entera mixta MILP se hace uso de GAMS. El Sistema de modelado algebraico general (GAMS) es un sistema de modelado de alto nivel para programación y optimización matemática. GAMS está diseñado para aplicaciones complejas de modelado a gran escala, y permite construir grandes modelos que se pueden mantener y que se pueden adaptar rápidamente a nuevas situaciones, específicamente para el modelado de problemas de optimización de enteros lineales, no lineales y mixtos.

5.7. Experimentación del modelo de localización

Una vez programado el modelo de localización en GAMS se procedió a realizar pruebas, variando la cantidad de puntos de generación de RAEE i y la cantidad de puntos de localización j para analizar el comportamiento de este y comprobar su correcto funcionamiento, dando como resultado las siguientes conclusiones:

- Al variar el costo máximo de la distancia recorrida por cliente (M), si el valor de los costos de desplazamiento por cliente es menor a M para todos los puntos, todos los clientes serán asignados al punto 1, el cual no tiene costo de apertura y siempre se abre por ser el punto limpio.
- Si el valor de M es muy grande, solo abre los 3 puntos fijos y los costos se mantienen constantes.
- Si se asignan costos de apertura menores a los costos de desplazamiento, el modelo tiende a abrir todos los puntos.

Después de correr el modelo varias veces se llegó a la conclusión que, debido a restricciones de espacio en los puntos potenciales, se debía limitar a 2 el número de contenedores de cada tipo en todos los posibles sitios de recolección, ya que el modelo prefería asignar muchos contenedores en un solo punto en vez de abrir otro punto. La nueva restricción queda planteada de la siguiente manera:

$$B_{tj} \leq 2 \quad \forall_t, \forall_j$$

5.8. Solución modelo matemático de localización

Luego de la correspondiente prueba del modelo matemático de localización con los datos del caso de estudio, da un valor óptimo de la función objetivo de \$20.788.285, el cual corresponde al costo de compra de los contenedores, el costo de apertura de los puntos y la penalización por distancia recorrida de los clientes al punto.

En la tabla 9 se presentan los resultados del modelo, donde se describe los puntos de recolección abiertos, la cantidad de agrupaciones de hogares asignadas a cada punto, así como la cantidad de contenedores en cada punto. En el Apéndice C se muestra los centroides que fueron asignados a cada punto de recolección.

Tabla 9

Resultados modelo de localización

No.	Punto de Recolección abiertos	No.	Cantidad de			
			Agrupaciones de hogares asignados	Contenedores		
				Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3
1	1. Punto limpio metropolitano	29				
2	2. Centro Comercial Acrópolis	8	1	1	1	
3	3. Centro Comercial la Isla	0				
4	8. Instituto Santa María Goretti Sede C	13	2	2	1	
5	12. CAI La Concordia	13	2	2	1	
6	15. J.A.C. La Victoria	14	2	2	1	
7	16. J.A.C. San Miguel	14	2	2	1	
8	20. Instituto de Problemas de Aprendizaje IPA	13	2	2	1	
9	21. Instituto Santa María Goretti	10	1	1	1	
10	23. CAI Real de Minas	15	2	2	1	

Continuación Tabla 9 Resultados modelo de localización

11	24. Nuestra Señora del Pilar Sede B	15	2	2	1
12	25. Nuestra Señora del Pilar Sede E	13	2	2	1
13	26. INEM Sede H	13	2	2	1

De los 26 puntos que se introdujeron al modelo como datos de entradas, se seleccionaron 13 los cuales se muestran en la figura 6. En total se espera la recolección de 6169 kg de RAEE quincenal distribuidos en los puntos seleccionados como se muestra en la tabla 10. Cabe resaltar que, aunque el punto de recolección 3 La Isla, fue obligado a ser abierto por ser un centro comercial, sin embargo, El modelo no les asigna contenedores al no tener clientes asignados, por tal motivo este punto no se tendrá en cuenta para la fase de ruteo.

*Figura 6. Puntos de recolección abiertos*

Estos puntos de localización abiertos se unirán a los conjuntos residenciales seleccionados como puntos fijos del modelo para ser los datos de entrada del modelo de ruteo de vehículos definido para el caso de estudio.

Tabla 10.

RAEE recolectado por punto asignado

Punto de Recolección	RAEE recogido (kg)			Total
	Contenedor Tipo 1: Pilas y baterías	Contenedor Tipo 2: Lámparas y bombillos	Contenedor Tipo 3: RAEE de pequeñas dimensiones	
1. Punto limpio metropolitano	164,45	267,22	698,90	1130,58
2. Centro Comercial Acrópolis	36,33	59,03	154,40	249,77
3. Centro Comercial la Isla	0	0	0	0
8. Instituto Santa María Goretti	73,22	118,99	311,21	503,43
Sede C				
12. CAI La Concordia	73,45	119,35	312,17	504,98
15. J.A.C. La Victoria	73,67	119,72	313,13	506,53
16. J.A.C. San Miguel	73,11	118,80	310,73	502,65
20. Instituto de Problemas de	71,98	116,97	305,93	494,89
Aprendizaje IPA				
21. Instituto Santa María Goretti	36,89	59,95	156,80	253,65

Continuación tabla 10. RAEE recolectado por punto asignado

23. CAI Real de Minas	73,62	119,63	312,89	506,14
24. Nuestra Señora del Pilar Sede	73,67	119,72	313,13	506,53
B				
25. Nuestra Señora del Pilar Sede	73,22	118,99	311,21	503,43
E				
26. INEM Sede H	73,67	119,72	313,13	506,53
TOTAL				6169,171

6. Diseño del modelo matemático de ruteo de vehículos

6.1. Características de modelo

Para la definición de las rutas de recolección de RAEE en los puntos seleccionados, se diseña un modelo de ruteo de vehículos cuyo objetivo es recolectar todos los residuos generados en los puntos de localización para posteriormente llevarlos a un único punto de recolección, optimizando los costos asociados a la distancia recorrida por el vehículo. Para el caso de estudio la ruta inicia y termina en el punto limpio metropolitano.

De acuerdo con las características de la zona objetivo y los puntos de recolección escogidos como resultados del modelo de localización, se procede a formular el modelo de ruteo como un *Problema de ruteo de vehículos capacitado (CVRP)*, en el cual se hará uso de vehículos con

capacidad fija homogénea, los cuales pueden acceder a recolectar el residuo a cualquier hora de la jornada laboral del conductor del vehículo.

6.2. Problema de ruteo de vehículos capacitados CVRP

El problema de ruteo de vehículos capacitados es una extensión del problema de enrutamiento de vehículos, el cual consiste en la construcción de rutas para una flota de vehículos con capacidad definida, con el objetivo de visitar un conjunto de clientes con demandas determinísticas que deben ser atendidas por un solo vehículo (no se permite dividir las cargas en la formulación clásica del problema) de tal forma que se minimicen los costos de recolección asociados sin exceder la capacidad del vehículo en cada ruta que inicia desde un punto de partida común y termina en un único deposito (Toth & Vigo, 2002).

Desde los años 60 el CVRP ha sido ampliamente estudiado y se han desarrollado una gran cantidad de métodos de solución, los cuales incluyen heurísticas y métodos exactos. Los algoritmos exactos más efectivos han logrado solucionar de forma consistente instancias de hasta 50 clientes o más en algunos casos particulares. Sin embargo, para instancias mayores, se hace necesaria la aplicación de métodos heurísticos que brinden soluciones de alta calidad en un tiempo computacional aceptable (Vidal, 2013).

Además del CVRP clásico, se han desarrollado algunas extensiones, las cuales tienen un mayor grado de complejidad al problema original. Entre las más estudiadas en la literatura se encuentran:

- *Ruteo de vehículos con ventanas de tiempo*: Su característica principal es que los clientes deben ser atendidos dentro de los límites de las ventanas de tiempo asociadas
- *Ruteo de vehículos con flota heterogénea*: Similar al CVRP, pero en este caso se permite que las capacidades de los vehículos sean diferentes o se usen varios medios de transporte.

- *Ruteo de vehículos multi depósito:* En este caso existe más de un depósito al cual puede llegar un vehículo a liberar la carga recolectada en la ruta.
- *Ruteo de vehículos con carga dividida:* Se permite dividir la carga de los clientes, por lo cual un cliente puede ser visitado más de una vez.

La naturaleza del modelo depende de la situación abordada, para tratar casos prácticos en contextos reales; por lo tanto, el ruteo de vehículos puede incluir múltiples extensiones, lo cual incrementa la complejidad computacional.

6.3. Formulación de modelo matemático CVRP

Se diseñará la red de transporte para el presente trabajo, de acuerdo con el modelo matemático de (J. Mar-Ortiz et al., 2011), la cual se representa por un grafo $G = (V, A)$, donde $V = \{0, 1, 2, 3, \dots, n\}$ expresa el conjunto de vértices o nodos y $A = \{(i, j); i, j \in V\}$ hace referencia al conjunto de arcos por donde harán sus recorridos los vehículos teniendo en cuenta que $i \neq j$.

Los vértices V_0 y V_{n+1} representan el nodo inicial y final correspondiente al Punto Limpio desde donde partirán los vehículos y donde posteriormente finalizarán su recorrido, por lo tanto, ningún arco puede comenzar en el vértice $n+1$ ni terminar en el vértice 0. El resto de los m vértices representa los puntos localizados con el modelo de localización además de los puntos fijos correspondientes a los conjuntos residenciales a los cuales se les asigno contenedores de acuerdo con la demanda de estos, además, se cuenta con una flota de vehículos con capacidad limitada.

La matriz de costos de viaje es asimétrica, lo que indica que no es lo mismo ir del nodo i al j que ir del nodo j al i , lo cual se valida por el hecho de que se debe tener en cuenta en los recorridos

de los vehículos el sentido y la orientación de las carreteras de acuerdo con la red vial de la ciudad.

La formulación matemática para el CVRP se presenta a continuación:

Parámetros

K = Número de vehículos de igual capacidad

C = Capacidad del vehículo

D_{it} = Cantidad de RAEE t en kilogramos generado en el nodo i

Cos_{ij} = Costo por distancia de ir del nodo i al nodo j

Variables

$X_{ijv} = \begin{cases} 1. Si en la solución el vehiculo v va de i hasta j \\ 0. De lo contrario \end{cases}$

Función objetivo

$$Min Z = \sum_v \sum_{(i,j)} Cos_{ij} X_{ijv}$$

Restricciones

$$1. \sum_{v \in K} \sum_{j \in \Delta^+(i)} x_{ijv} = 1 \quad \forall i \in N$$

$$2. \sum_{j \in \Delta^+(0)} X_{0jv} = 1 \quad \forall v \in k$$

$$3. \sum_{i \in \Delta-(n+1)} X_{i,n+1,v} = 1 \quad \forall v \in k$$

$$4. \sum_{i \in \Delta-(j)} X_{ijv} - \sum_{i \in \Delta+(j)} X_{jiv} = 0 \quad \forall v \in k, \quad \forall j \in N$$

$$5. \sum_i \sum_t D_{it} \sum_{j \in \Delta+(i)} X_{ijv} \leq C \quad \forall v \in k$$

$$6. X_{ijv}, \in \{0,1\}$$

La función objetivo es suma de los costos asociados a la distancia total recorrida entre todos los nodos. La restricción (1) indica que cada punto de recolección debe ser atendido por un solo vehículo, donde $j \in \Delta + (i)$ representa los grafos completos que parten del nodo i y finalizan en el nodo j . La restricción (2) asegura que cada vehículo solo puede alcanzar un punto de recolección j desde el punto de partida y la restricción (3) señala que cada ruta tiene solo un punto que llega al punto limpio, así estas ecuaciones restringen el número de recorridos que hace el vehículo a uno.

La restricción (4) establece que el número de vehículos que entran a un nodo sea el mismo que sale, asegurando que cada nodo sea atendido una sola vez. La restricción (5) indica que la suma de la cantidad total de RAEE recolectado por ruta sea menor a la capacidad del vehículo. Finalmente, la restricción (6) muestra la naturaleza binaria de la variable X_{ijv} .

7. Descripción de la técnica de optimización a utilizar para el CVRP

Para la solución de problemas de ruteo de vehículos, las metaheurísticas son el método más utilizado para encontrar soluciones factibles de alta calidad para las diversas variantes del VRP y sus aplicaciones en un contexto real.

(Solomon, 1987) en su trabajo recopiló las diferentes técnicas de solución de modelos VRP más usadas. Definió una estructura para las diferentes heurísticas existentes de acuerdo con su naturaleza (heurísticas secuenciales y paralelas) haciendo un estudio computacional de los algoritmos más utilizados en la literatura usando diferentes instancias. Concluye que el uso de heurísticas es más eficiente en términos computacionales para problemas con instancias grandes y destaca el desempeño de las heurísticas de inserción con resultados de alta calidad.

(Kontoravdis & Bard, 1995) propusieron un modelo basado en el algoritmo GRASP para solucionar el problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo (VRPTW por sus siglas en inglés), en el cual para la fase de construcción inicializan un número determinado de rutas y asignan iterativamente un cliente a la vez cumpliendo con las restricciones de capacidad y tiempo de la ruta. Para la fase de búsqueda local desarrollaron un procedimiento de eliminación de rutas con el fin de hallar las mejores rutas posibles sin exceder los límites de factibilidad. Destacan la eficiencia del algoritmo GRASP para la construcción de las soluciones iniciales.

(Layeb, Ammi, & Chikhi, 2013) desarrollaron un algoritmo GRASP basado en una heurística aleatorizada en la cual construyeron una matriz de densidad teniendo en cuenta la capacidad de los vehículos y la distancia entre los diferentes nodos, para luego construir las rutas iterativamente. Para la fase de búsqueda local utilizan los operadores de movimiento, intercambio, inversión y 2-

opt para mejorar la calidad de las soluciones halladas en la fase inicial. El algoritmo desarrollado es probado con diferentes instancias de la literatura, mostrando un excelente desempeño en términos de tiempo computacional y calidad de las soluciones.

(Julio Mar-Ortiz et al., 2013) diseñaron un modelo de recolección de RAEE para Galicia, España, en el cual usaron la metaheurística GRASP para el problema de ruteo de vehículos con ventanas de fecha. Para la fase de construcción desarrollaron una matriz de rutas en la cual se insertaban inmediatamente aquellos puntos cuya ventana de fecha fuera cerrada y luego se asignaban iterativamente los demás puntos, de tal forma que todos los puntos fueran asignados sin exceder la capacidad de los vehículos y que las cargas fueran divididas lo menos posible. En la fase de búsqueda local aplicaron dos etapas. En la primera etapa eliminaban las penalizaciones sobre la ruta y en la segunda fase aplicaron los operadores de inserción, combinación y eliminación para minimizar los costos de la ruta. Para validar su algoritmo desarrollaron un generador de instancias y mediante pruebas estadísticas demostraron que el algoritmo ofrecía resultados de alta calidad tanto para las instancias generadas como para el caso de estudio de la red de recolección de RAEE de Galicia, España.

Por lo tanto, se concluye que el uso de métodos metaheurísticos permite obtener buenos resultados para las instancias de la literatura y diversos casos de estudio en entornos reales, con un tiempo computacional razonable. Para este trabajo de investigación se hará uso de un algoritmo GRASP combinado con operadores de intercambio y 2-opt para obtener las mejores soluciones posibles para nuestro caso de estudio.

7.1. Algoritmo GRASP

GRASP es un método iterativo, desarrollado en los años 80, en el cual cada iteración tiene dos fases, una de construcción y una de búsqueda local, en donde la primera se encarga de la construcción de soluciones factibles y la segunda de encontrar un mínimo (o máximo dependiendo del criterio de optimización) a partir de la solución construida. Este procedimiento se repite varias veces hasta que un criterio de parada determine hasta qué punto se continúa iterando y la mejor solución encontrada se asume como resultado.

En la fase de construcción la solución parcial se obtiene agregando elementos de un conjunto de elementos candidatos a la solución parcial sin superar los límites de factibilidad. La selección del siguiente candidato para agregar es determinada por la evaluación de todos los elementos de acuerdo con una función Greedy de evaluación.

La función Greedy usualmente representa los costos incrementales en la función objetivo debido a la incorporación de un elemento candidato en la solución parcial. La evaluación de los elementos de esta función lleva a la construcción de una lista restringida de candidatos (RCL por sus siglas en inglés) la cual contiene los mejores elementos (aquellos que presentan los menores costos incrementales). Esta característica muestra la naturaleza codiciosa del algoritmo.

El elemento de la RCL a ser incorporado en la solución parcial es seleccionado aleatoriamente (este es el aspecto probabilístico del algoritmo). Una vez el elemento ha sido ubicado en la solución parcial, se actualiza la lista de candidatos y se reevalúan los costos incrementales.

La segunda fase de búsqueda local busca mejorar las soluciones construidas en la primera fase. Esta funciona de forma iterativa, buscando en la vecindad de las soluciones actuales y las reemplaza por las mejores soluciones encontradas. Finaliza la iteración cuando no encuentra

mejores soluciones en la vecindad actual. La efectividad de la fase de búsqueda local depende de diversos factores como la estructura de las vecindades y las técnicas de búsqueda local usadas (Resende & Ribeiro, 2010).

7.1.1. Construcción de la Lista restringida de candidatos (RLC). Para la construcción de la RLC, primero se formulan los costos incrementales $C(e)$ de todos los elementos candidatos y en cada iteración se definen C_{min} y C_{max} , el costo incremental mínimo y máximo, respectivamente dentro de la lista de candidatos.

Para evaluar si un elemento entra a la RLC, el algoritmo usa un parámetro umbral $\alpha \in [0,1]$. Por lo tanto, la lista restringida de candidatos estará formada por aquellos elementos cuyo costo incremental $C(e)$ no supere los límites de factibilidad y cumpla la siguiente condición:

$$C(e) \leq C_{min} + \alpha(C_{max} - C_{min})$$

Es decir, su calidad sea mayor al valor umbral $C_{min} + \alpha(C_{max} - C_{min})$. Los valores límite de α representan diferentes casos:

- Si $\alpha=0$, entonces se habla de un algoritmo *codicioso puro* en el cual solo se tomarían los valores máximos de los candidatos para la RLC.
- Si $\alpha=1$, entonces se convierte en una *construcción aleatoria* en la cual los elementos de la lista se seleccionarían al azar

El valor de α debe ser ajustado de acuerdo a la naturaleza de cada problema, esto con el fin de controlar el grado de aleatoriedad requerida para la RLC (Resende & Ribeiro, 2010).

Cuando la RLC está completa, se seleccionan aleatoriamente elementos de la lista restringida para formar las rutas factibles que cumplen con las restricciones de capacidad. Este proceso se repite iterativamente hasta que sean asignados todos los puntos a una ruta. En la figura 7 se muestran los pasos que sigue el algoritmo en la fase de construcción:

```

procedure Greedy_Randomized_Construction( $\alpha$ , Seed)
1   Solution  $\leftarrow \emptyset$ ;
2   Initialize the candidate set:  $C \leftarrow E$ ;
3   Evaluate the incremental cost  $c(e)$  for all  $e \in C$ ;
4   while  $C \neq \emptyset$  do
5        $c^{min} \leftarrow \min\{c(e) \mid e \in C\}$ ;
6        $c^{max} \leftarrow \max\{c(e) \mid e \in C\}$ ;
7        $RCL \leftarrow \{e \in C \mid c(e) \leq c^{min} + \alpha(c^{max} - c^{min})\}$ ;
8       Select an element  $s$  from the RCL at random;
9       Solution  $\leftarrow$  Solution  $\cup \{s\}$ ;
10      Update the candidate set  $C$ ;
11      Reevaluate the incremental costs  $c(e)$  for all  $e \in C$ ;
12  end;
13  return Solution;
end Greedy_Randomized_Construction.

```

Figura 7. Pseudo código de la fase de construcción. Adaptado de Resende, M. G. C., & Ribeiro, C. C. (2010). Greedy Randomized Adaptive Search Procedures: Advances.

Una vez que la fase de construcción ha finalizado con todos los puntos asignados a una ruta factible, se procede a iniciar la búsqueda local.

7.1.2. **Búsqueda local.** En la literatura se han manejado diversos métodos de búsqueda local, para brindar buenas soluciones a problemas complejos (Layeb et al., 2013). Para el caso específico del problema de ruteo de vehículos, en la literatura se destacan los operadores de vecindad *intra-route* (dentro de la ruta) y los procedimientos *inter-route* (entre rutas). A continuación, se mencionan los más usados en la literatura para el VRP.

7.1.2.1. **Operadores *intra-route*.** Estos operadores se caracterizan por realizar cambios entre los diferentes nodos de una ruta, con el fin de verificar si la solución es mejorada o se originan soluciones no factibles. Algunos operadores clásicos son:

➤ **Operador de movimiento (Move operator)**

Un cliente aleatorio es movido de su posición actual a una nueva posición aleatoria

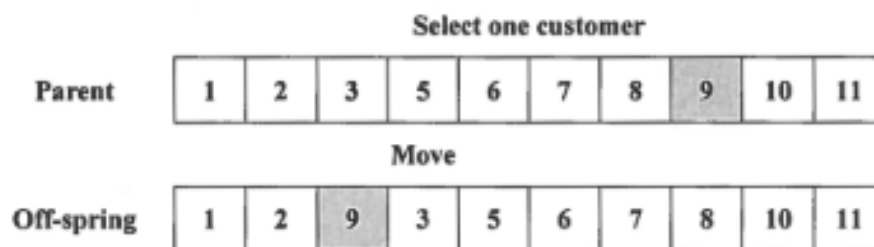


Figura 8. Operador de movimiento

➤ **Operador de canje (Swap operator)**

El operador de canje selecciona dos clientes aleatoriamente e intercambia sus posiciones en la ruta

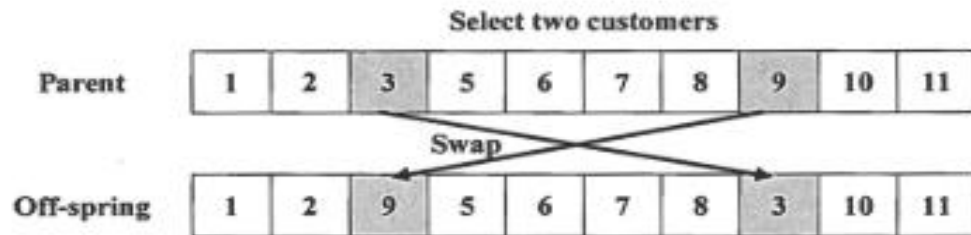


Figura 9. Operador de canje

➤ **Operador de inversión (Inversion operator)**

Este operador busca invertir la secuencia entre dos clientes en una ruta.

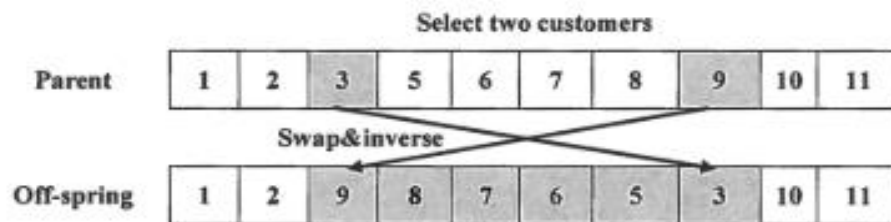


Figura 10. Operador de inversión

➤ **Operador 2-opt dentro de ruta (intra-route 2-opt operator)**

Es considerado uno de los más robustos operadores para el TSP. Este es un operador iterativo el cual en cada paso elimina dos segmentos y luego crea dos nuevos segmentos en la ruta.

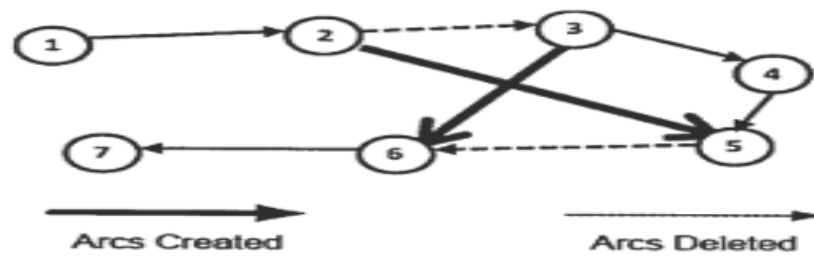


Figura 11. Operador 2-opt intra-route

7.1.2.2. Operadores *inter-route*. Estos operadores fueron diseñados específicamente para modelos de VRP y estos implican más de una ruta al tiempo.

➤ **Operador de intercambio 1-0**

Un cliente es eliminado de una ruta y es insertado en otra. Para obtener una mejor solución es insertado en la mejor posición de la segunda ruta.

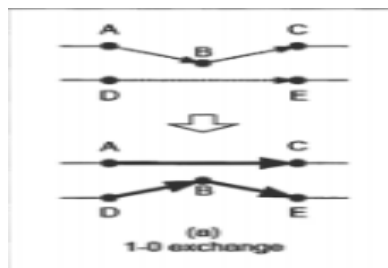


Figura 12. Operador intercambio 1-0.

➤ **Operador de intercambio 1-1**

Dos clientes son eliminados de dos rutas diferentes y cada cliente eliminado es insertado en la otra ruta, para lograr mejorar la solución.

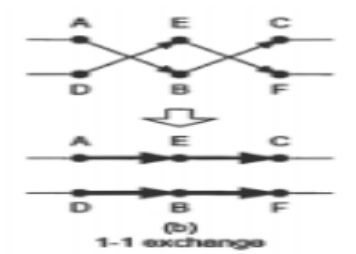


Figura 13. Operador de intercambio 1-1.

➤ **Operador 2-opt entre rutas (inter-route 2-opt operator)**

Este operador remueve un arco entre dos diferentes rutas y reconecta el primer nodo del arco con un segundo nodo del segundo arco y viceversa.

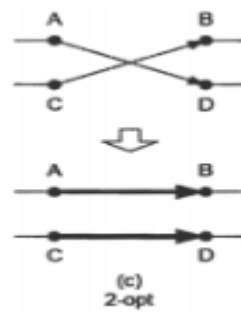


Figura 14. Operador 2-opt inter-route

8. Solución del CVRP usando el algoritmo GRASP

Para solucionar el problema de ruteo de vehículos planteado se hace uso del algoritmo GRASP adaptado del modelo propuesto por (Julio Mar-Ortiz et al., 2013), aplicando los operadores de

búsqueda local para mejorar la solución hallada en la primera fase. El proceso se repetirá hasta cumplir el criterio de parada asignado, que para el presente caso de estudio es de 100 iteraciones.

El diseño del algoritmo se resume en la aplicación de las siguientes fases en cada iteración:

➤ **Fase de Construcción**

Fase de iniciación de soluciones, con la evaluación de los costos incrementales $C(e)$ y la determinación de $C_{\max}$ y $C_{\min}$.

Construcción de la lista restringida de candidatos RLC

Selección aleatoria de los elementos de la RLC para llenar las rutas factibles

➤ **Fase de búsqueda local**

Aplicación del operador de intercambio 1-1 y el operador 2-opt para mejorar la solución

Comparación de las soluciones obtenidas

Actualización de las mejores soluciones

8.1 Fase de construcción

En esta fase se definen los datos de entrada del algoritmo como son la matriz de costos y la demanda de cada usuario. Además, se define el parámetro α , el cual controla el grado de aleatoriedad. Los costos incrementales para el presente caso de estudio corresponden a los costos asociados por distancia a recorrer del vehículo hacia todos los puntos posibles.

Toda ruta inicia desde un depósito común, marcado como el punto 1 en el algoritmo y desde ese lugar se ejecuta la función Greedy de evaluación, con el costo máximo y mínimo de ir desde el depósito a un punto determinado. Una vez se ha hallado el valor de función Greedy, se comparan todos los valores posibles con el valor hallado e ingresan a la lista restringida de candidatos aquellos valores que sean menores o iguales al valor de la función. En la figura 15 se muestra el diagrama de flujo de la fase de construcción.

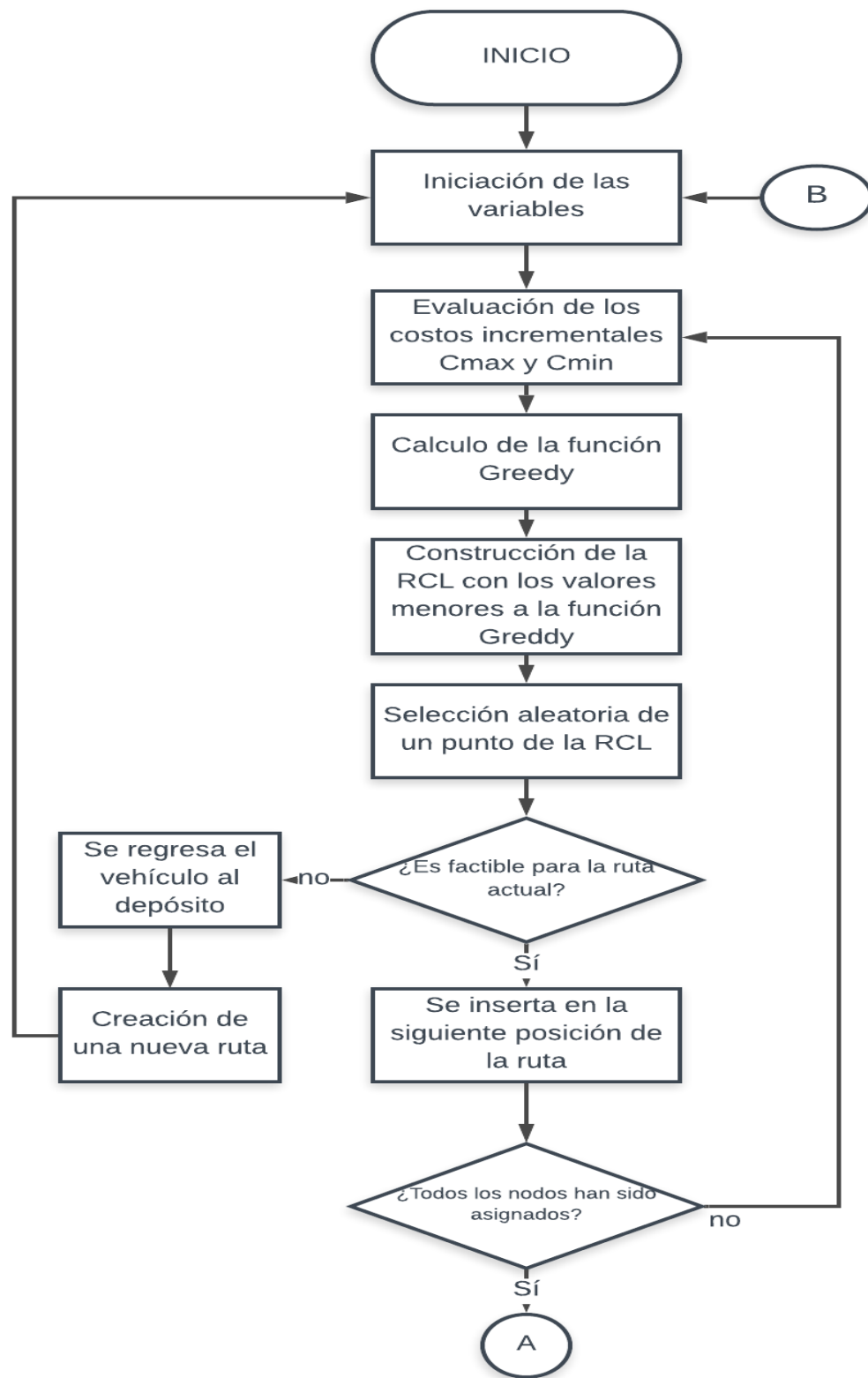


Figura 15. Diagrama de la fase de construcción algoritmo GRASP

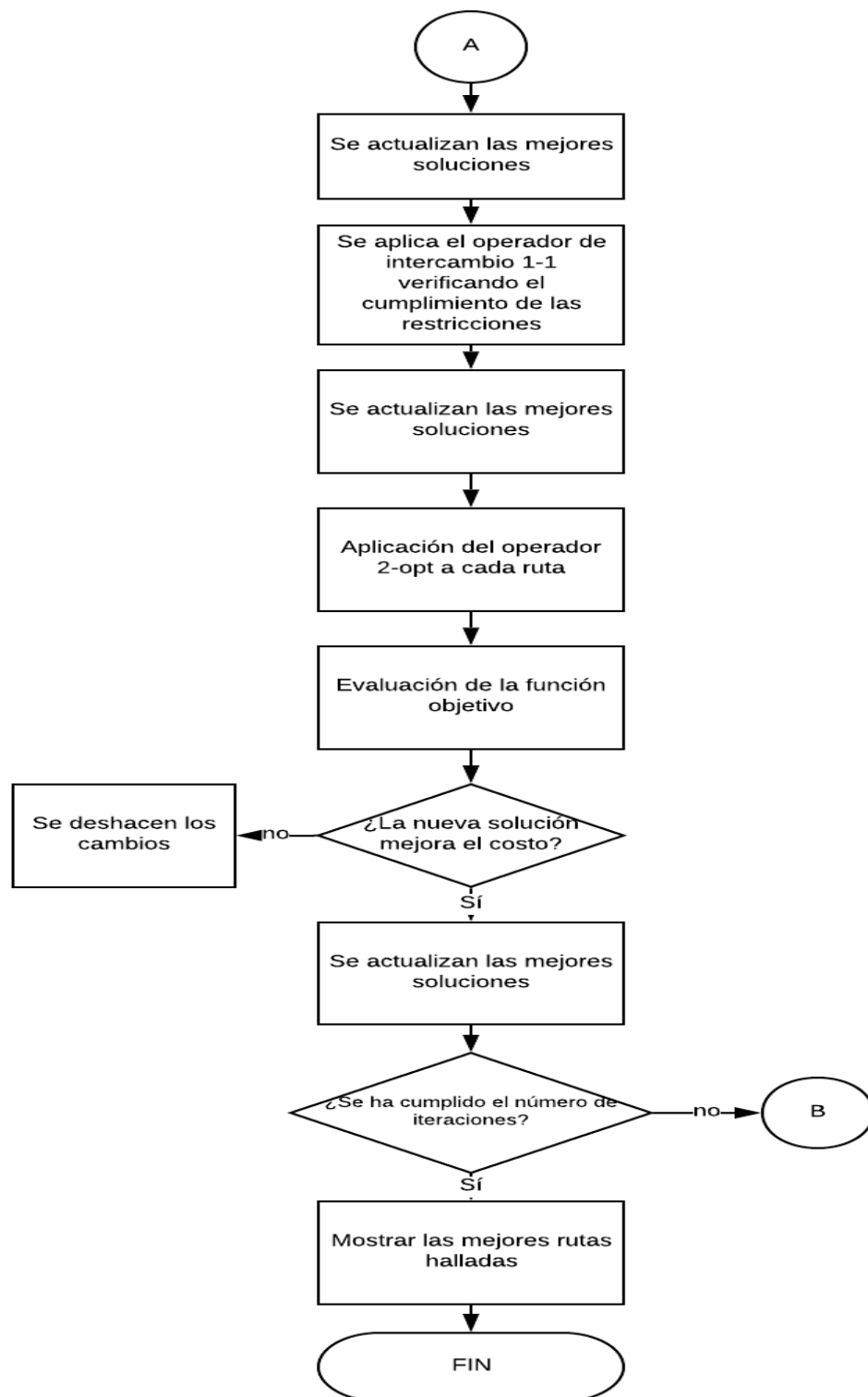


Figura 16. Diagrama de la fase de búsqueda del algoritmo

La lista restringida de candidatos es construida con los valores menores o iguales a la función Greedy, de tal forma que se construyan las rutas con menor costo en cada iteración. La lista se va actualizando cada vez que se ingresa un nodo a la ruta, para evitar que un cliente sea visitado más de una vez en cada iteración.

Posteriormente se selecciona de forma aleatoria un valor de la RCL y este es insertado en la siguiente posición de la ruta en construcción. Cada vez que un nodo es añadido a la ruta, se evalúa la demanda asociada a este y el total recolectado por el vehículo hasta ese punto. Si la demanda a recolectar en el punto hace que se exceda la capacidad máxima del vehículo, dicho punto será marcado como no factible y es eliminado de la ruta. El vehículo es devuelto al depósito de dónde partió, completando una ruta factible.

Si al cerrar una ruta quedan nodos sin asignar, el algoritmo crea una nueva ruta que parte desde el depósito y procede a repetir los procedimientos anteriores, verificando siempre el cumplimiento de la restricción de capacidad del vehículo. Cuando todos los nodos han sido asignados a una ruta, finaliza la fase de construcción de soluciones y se procede a la fase de búsqueda local.

8.2 Fase de búsqueda local

En la fase de búsqueda local, el objetivo es mejorar las soluciones obtenidas de la fase anterior, mediante la aplicación de los operadores de intercambio 1-1 e intercambio 2-opt. En la figura 16 se muestra el diagrama de la fase de búsqueda local.

8.2.1 Intercambio 1-1. Para ampliar el espacio de búsqueda se aplica primero el operador de intercambio 1-1, el cual toma al azar un nodo de una ruta y lo intercambia con un nodo perteneciente a una ruta diferente, verificando la factibilidad de los cambios realizados.

El procedimiento realizado para dicho operador es el siguiente:

1. Seleccionar dos rutas al azar
2. Escoger un punto de generación al azar de una ruta e intercambiarlo con un punto seleccionado aleatoriamente en la otra ruta
3. Verificar que se cumplan las restricciones de capacidad
4. Calcular el valor de la función objetivo
5. Actualizar la matriz de rutas

8.2.2 **Operador 2-opt.** Este operador es una heurística de intercambio, que para cada ruta realiza un procedimiento llamado *movimiento 2-opt*, el cual consiste en eliminar dos aristas y reconectar los dos caminos resultantes de una manera diferente para obtener un nuevo ciclo (Marti, 2003). Si se mejora la solución, se actualiza la ruta y se evalúa la siguiente ruta hasta evaluar todas las rutas disponibles.

Para que sea considerada como un ciclo completo 2-opt, es necesario evaluar todos los vértices realizando el mejor movimiento 2-opt hasta que todos los vértices sean analizados y se pueda garantizar que no existen movimientos 2-opt que puedan mejorar la solución.

El procedimiento aplicado para el algoritmo GRASP desarrollado es el siguiente:

1. Iniciar la búsqueda desde un nodo seleccionado al azar
2. Buscar un sustituto factible para el nodo siguiente al seleccionado
3. Intercambiar los nodos
4. Evaluar la función objetivo para la ruta resultante

5. Si la solución mejora la función objetivo, se actualizan las rutas, de lo contrario se reestablecen los arcos modificados y se procede a evaluar los siguientes vértices hasta que todos los vértices sean evaluados.

8.3 Comparación de resultados

Después de haber aplicado el operador 2-opt a todas las rutas, se guarda la mejor solución y en cada iteración se compara la mejor solución hallada con la solución anterior y de esta forma se actualiza la matriz de rutas y la matriz de costos hasta obtener las mejores rutas que optimicen la función objetivo y cumplan con las restricciones de capacidad. En el apéndice I se muestra el código del algoritmo GRASP diseñado en Matlab.

9 Validación del algoritmo

9.1 Ajuste del parámetro α

Debido a la importancia del parámetro α en la fase de construcción del algoritmo, es necesario ajustar el valor de dicho parámetro para obtener los mejores resultados en la implementación actual del algoritmo GRASP (Resende & Ribeiro, 2010).

En la literatura referente a CVRP, para ajustar el valor, se realizan una serie de pruebas con diversos valores de $\alpha \in \{0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9\}$ en diferentes instancias de la literatura, para encontrar el valor de α que brinde los mejores resultados en promedio (Julio Mar-Ortiz et al., 2013).

En el presente trabajo se usarán las instancias propuestas por Augerat et al. (1995), las cuales contienen diferentes sets de instancias A, B y P, ampliamente usadas en la literatura. Para este trabajo se usarán las instancias del set A con distancias euclidianas, en las cuales la localización de los clientes y sus demandas son aleatorias y la capacidad del vehículo es la misma para cada caso, similar a los datos obtenidos en el modelo de localización del presente estudio. Estas instancias vienen denominadas de acuerdo con el número de nodos y la cantidad mínima de vehículos requeridos de la siguiente forma:

- (A) tipo de instancia, en este caso instancias tipo A
- (N) número de nodos o clientes a visitar
- (K) mínima cantidad de vehículos

Para evaluar el desempeño del parámetro, se usarán 3 instancias del set A y se evaluarán 3 parámetros:

- El porcentaje de desviación entre la mejor solución obtenida por nuestro algoritmo y la mejor solución de la instancia (parámetro A).
- El porcentaje de desviación entre la peor solución obtenida por nuestro algoritmo y la mejor solución de la instancia (parámetro B)
- El porcentaje de desviación promedio entre las soluciones de nuestro algoritmo y la mejor solución de la instancia (parámetro C)

Los porcentajes de desviación se calculan así:

$$\%Desv = \frac{|Z_{GRASP} - Z_{mejor}|}{Z_{mejor}} * 100$$

Donde Z_{GRASP} y Z_{mejor} representan las soluciones del algoritmo GRASP y la mejor solución de la instancia, respectivamente. Para cada valor se harán 10 corridas y se computarán los valores. En la tabla 11 se presentan los resultados para las instancias seleccionadas:

Tabla 11.

Evaluación del parámetro α

Instancia		$\alpha = 0.1$	$\alpha = 0.3$	$\alpha = 0.5$	$\alpha = 0.7$	$\alpha = 0.9$
A-n33-k5	(A)	3.587%	22.312%	35.234%	64.899%	75.582%
	Zmejor = 661 (B)	10.738%	34.549%	55.582%	75.980%	104.133%
	(C)	8.268%	27.166%	47.003%	70.422%	88.105%
A-n45-k6	(A)	8.023%	36.674%	56.697%	90.926%	118.436%
	Zmejor = 944 (B)	18.815%	48.146%	73.040%	107.701%	133.744%
	(C)	13.722%	43.031%	65.865%	98.451%	126.975%
A-n64-k9	(A)	11.354%	38.282%	52.586%	83.860%	105.351%
	Zmejor = 1402 (B)	21.172%	44.563%	70.866%	97.173%	115.076%
	(C)	15.034%	41.863%	66.701%	91.926%	111.302%

De acuerdo con la tabla, para valores menores a $\alpha = 0.5$ se obtiene el menor porcentaje de desviación en promedio, destacándose los resultados obtenidos por el valor de $\alpha=0.1$, con el cual

se obtiene la menor desviación porcentual. Se puede concluir de la tabla que a medida que aumenta el valor del parámetro, el porcentaje de desviación aumenta en gran medida, razón por la cual valores de $\alpha > 0.5$ presentan resultados muy alejados del óptimo global y son descartados.

A medida que aumenta el tamaño de la instancia, el valor de la desviación promedio aumenta para cada α , mostrando que el desempeño del algoritmo disminuye para instancias grandes. Sin embargo, el valor de $\alpha=0.1$ presenta el menor valor promedio de desviación para cada una de las instancias analizadas.

Se procede a graficar los costos obtenidos para cada una de las instancias, en función de los valores de alfa para comparar los promedios obtenidos para cada valor. En las figuras 17, 18 y 19 se muestran los gráficos de cajas y bigotes obtenidos.

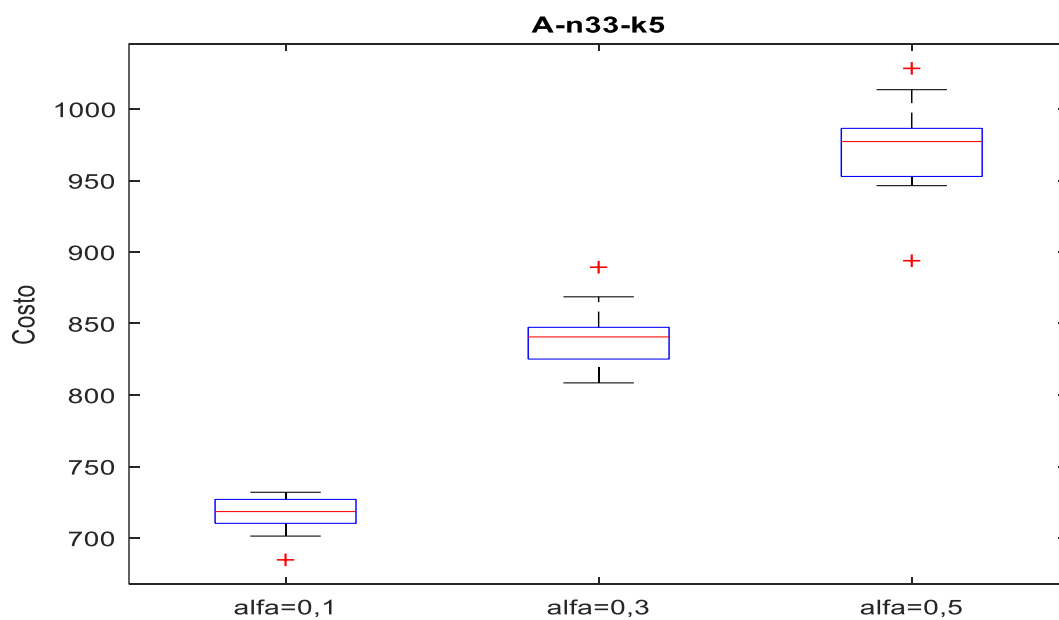


Figura 17. Diagrama de cajas y bigotes para la instancia A-n33-k5

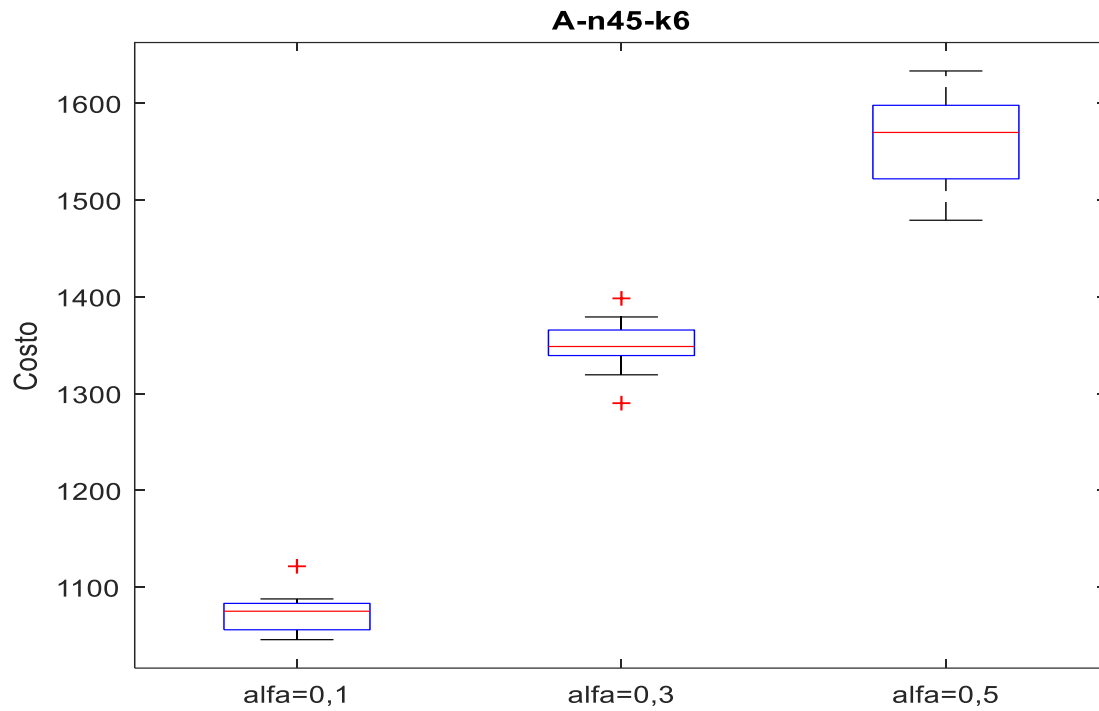


Figura 18. Diagrama de cajas y bigotes para la instancia A-n45-k6

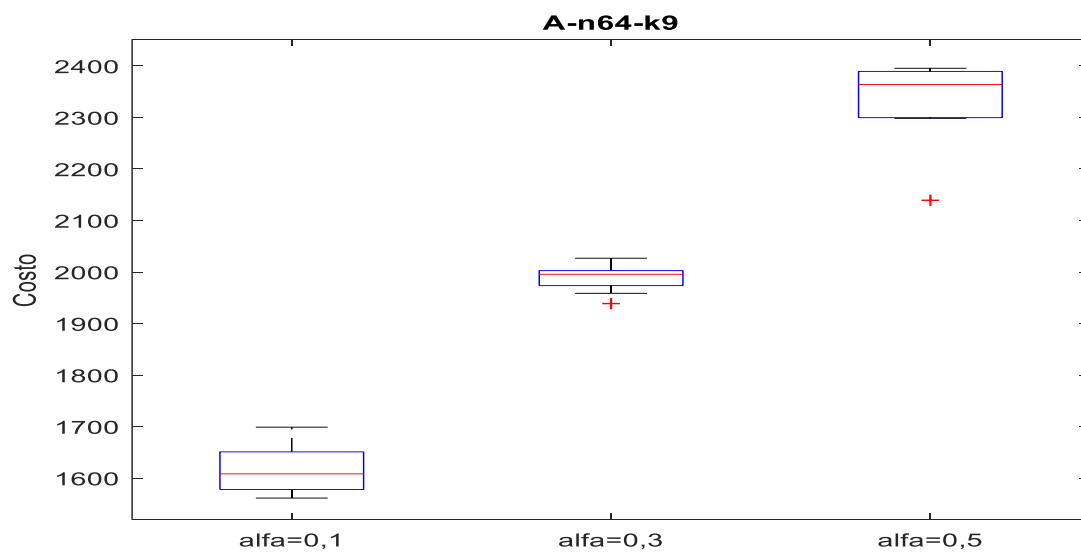


Figura 19. Diagrama de cajas y bigotes para la instancia A-n64-k9

Analizando los valores obtenidos en las gráficas de cajas y bigotes, se observa que los valores promedio más cercanos a los óptimos globales de cada instancia, se obtienen con el valor de $\alpha=0.1$. Por lo tanto, para la experimentación del algoritmo se usará el valor de $\alpha=0.1$ en cada una de las pruebas a realizar.

9.2 Validación con instancias

Para validar el funcionamiento del algoritmo GRASP desarrollado, se desarrolla una evaluación con instancias de la literatura. Para la validación se realizan pruebas con las instancias propuestas por Augerat et al. (1995), las cuales usan distancias euclidianas. Se aplicará el set A de instancias y se usaran 15 instancias conocidas en la literatura. Estas instancias pueden encontrarse en la página web del NEO Research Group en la sección CVRP Instances.

Para evaluar la eficiencia de nuestro algoritmo se establece una comparación entre la solución obtenida al aplicar las instancias y las mejores soluciones obtenidas por diferentes autores en la literatura para las instancias evaluadas. Se compara primero con las soluciones obtenidas por (Pinninghoff, Contreras, & Pantoja, 2014) quienes usaron un algoritmo GRASP con operadores genéticos de búsqueda local para resolver el CVRP. Además se realiza comparación con otros dos trabajos de la literatura como son el algoritmo DELS (Differential evolution algorithm with local search) desarrollado por (Teoh, Ponnambalam, & Kanagaraj, 2015) y el algoritmo CLOVES (Cluster and search heuristic) diseñado por (Ganesh & Narendran, 2007) los cuales lograron excelentes resultados con las instancias evaluadas.

Se utiliza para la validación el código desarrollado en Matlab R2018a ejecutado en un computador ASUS X456U con procesador Intel Core i5 y 8 GB de RAM. Los resultados de la validación se resumen en la tabla 12:

Tabla 12.

Comparación de resultados por instancia

Instancia	Mejor solución	GRASP	%Desv	DELS	%Desv	CLOVES	%Desv	Algoritmo Propuesto	%Desv
A-n32-k5	784	787.08	0.39	784	0.0	784	0.0	825.45	5.27
A-n33-k5	661	662.26	0.19	661	0.0	661	0.0	684.71	3.59
A-n33-k6	742	742.69	0.09	742	0.0	742	0.0	767.44	3.43
A-n34-k5	778	781.96	0.51	778	0.0	778	0.0	827.68	6.39
A-n36-k5	799	802.13	0.39	799	0.0	799	0.0	856.37	7.18
A-n37-k5	669	672.47	0.52	669	0.0	669	0.0	754.28	12.75
A-n37-k6	949	957.03	0.85	949	0.0	949	0.0	979.26	3.19
A-n38-k5	730	740.65	1.46	730	0.0	730	0.0	753.35	3.2
A-n39-k5	822	831.02	1.10	822	0.0	822	0.0	878.95	6.93
A-n39-k6	831	840.60	1.16	831	0.0	831	0.0	888.27	6.89
A-n44-k6	937	948.73	1.25	937	0.0	937	0.0	998.08	6.52
A-n45-k6	944	974.34	3.21	944	0.0	944	0.0	1019.74	8.02
A-n45-k7	1146	1158.25	1.07	1146	0.0	1146	0.0	1218.04	6.3
A-n46-k7	914	918.13	0.45	914	0.0	914	0.0	1044.08	14.23

Continuación tabla 12. Comparación de resultados por instancia

Instancia	Mejor	GRASP	%Desv	DELS	%Desv	CLOVES	%Desv	Algoritmo	%Desv
	solución				Propuesto				
A-n48-k7	1073	1091.79	1.75	1073	0.0	1073	0.0	1197.06	11.56
Promedio		860.61		851.93		851.93		912.85	7.03

Se observa que el algoritmo propuesto no mejora los mejores resultados de la literatura. Sin embargo, ofrece buenas soluciones para las instancias estudiadas, cercanas a los resultados obtenidos en investigaciones anteriores y con un porcentaje de diferencia promedio del 7.03%, lo cual muestra su eficiencia para brindar buenas soluciones. Se destacan los resultados obtenidos por (Teoh et al., 2015) y (Ganesh et al., 2007) quienes alcanzaron el óptimo global para todas las instancias estudiadas.

En comparación con el algoritmo GRASP desarrollado por (Pinninghoff et al., 2014), es de resaltar que los resultados obtenidos por dichos autores tienen un menor porcentaje de desviación comparado con el algoritmo propuesto, a pesar de estar basados en la misma metaheurística, esto se debe a que ellos usaron un algoritmo híbrido con operadores de mutación para la fase de búsqueda local, lo cual les permitió obtener mejores resultados para dichas instancias.

Finalmente se concluye que el algoritmo GRASP desarrollado, aunque no mejora los resultados obtenidos en la literatura, si ofrece buenas soluciones, lo cual lo hace factible para su aplicación en el problema de ruteo de vehículos desarrollado en el presente estudio.

10 CVRP en caso de estudio

10.1 Características del modelo

Como datos de entrada al modelo de ruteo de vehículos para la recolección de RAEE en el Área Metropolitana de Bucaramanga, se tienen los resultados del modelo de localización. Se asignaron 12 puntos de recolección de residuos ubicados estratégicamente para recoger el RAEE generado por las 170 agrupaciones hogares de las comunas 6, 7 y 8.

Adicionales a estos 12 puntos, entran al modelo de ruteo los puntos fijos que son 24 conjuntos residenciales con generación de RAEE y características de los contenedores específicas (Apéndice D). En total el ruteo de vehículos se hace para atender la demanda de 39 puntos. Se considera a el punto limpio metropolitano como punto de origen y finalización de las rutas.

La recolección de residuos electrónicos en el punto limpio la realiza el gestor autorizado LITO S.A, quienes normalmente recolectan de forma quincenal o mensual, dependiendo de la cantidad de residuos almacenada en el punto limpio y luego la llevan a una planta de procesamiento para su reciclaje y/o disposición final. Este trabajo realizado por LITO, no le genera ningún costo al AMB porque es posconsumo quien paga al gestor por el tratamiento de estos residuos.

De acuerdo con las encuestas realizadas en los conjuntos residenciales, estos tienen días específicos para la recolección de residuos reciclables, principalmente los martes y viernes. Los demás puntos de recolección como CAIS, centros comerciales y colegios públicos no tienen un día específico y pueden ajustarse a los días seleccionados.

10.2 Características del vehículo

Para la recogida de los residuos de los puntos de recolección, LITO S.A. sugiere la utilización de un vehículo tipo furgón, cuyas características se relacionan a continuación:

Tabla 13

Características del Vehículo

CARACTERISTICA	DESCRIPCIÓN
Marca	Chevrolet
Capacidad de carga	2118 kg
Peso bruto vehicular	4100 kg
Dimensiones de cabina	Longitud: 3167 mm Ancho: 1770 mm
Combustible	Diesel
Consumo de combustible promedio	0,1075Gl/Km
Costo de vehículo	\$69'400.000
Costo adecuación del vehículo	\$959.000
Costo total del vehículo	70'359.000

Este Vehículo es el óptimo para las labores de recolección en ciudad debido a su bajo consumo de combustible y a que no posee restricciones urbanas. Teniendo en cuenta que según el Ministerio

de minas el precio promedio de ACPM en Bucaramanga para el año 2018 fue de \$8.249, se calcula que el costo por kilómetro recorrido del vehículo es de \$887,53.

En los esquemas actuales de recolección de residuos electrónicos, se busca optimizar la carga de los vehículos ocupando la mayor capacidad posible, por lo tanto, en cada punto a visitar por el vehículo se recoge todo el RAEE de las tres categorías definidas en una sola ruta. Para el presente modelo, la cantidad de residuos a recolectar en cada nodo corresponde a la suma del peso total de las tres categorías seleccionadas.

Para el transporte de los RAEE se hace necesaria la adecuación del vehículo. Según (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2011) esta adecuación se puede realizar con cajas de cartón corrugado triple sobre estibas -cajas Gaylord- que tienen un costo de \$319.000 cada una. Para equipar el vehículo se hacen necesarias 3 cajas, para un valor total de equipamiento de \$957.000.

Para fines del presente proyecto y debido al alto costo de los vehículos y su adecuación, se asume que solo se usará un vehículo con las características anteriores por ruta.

Con el objetivo de ajustarse a las condiciones de recolección de los conjuntos residenciales seleccionados y debido a las restricciones de capacidad del vehículo, se decide dividir las jornadas de recolección en dos rutas semanales (martes y viernes), para un total de 4 rutas quincenales. Como solo se cuenta con un vehículo que realiza una ruta diaria, es necesario segmentar el territorio objetivo para cumplir con las restricciones dadas.

Para la segmentación del territorio se toma como guía el procedimiento realizado por (Cabrales Navarro & Galeano Rios, 2017) quienes hicieron la segmentación para múltiples centros de recolección de aceites, localizados en las comunas 9, 10 y 11 de Bucaramanga, teniendo en cuenta las coordenadas cartesianas de los puntos y la capacidad del vehículo recolector. Ellos usaron el

algoritmo K-means y realizaron varias pruebas y ajustes hasta lograr una configuración apropiada a las restricciones establecidas.

10.3 Segmentación del territorio objetivo

El problema de formar grupos en un conjunto de datos es muy importante para el conocimiento del comportamiento de una población de la cual solo se tiene una cantidad n de sus elementos. La solución de estos problemas se realiza mediante la creación de algoritmos de agrupamiento.

Los métodos de agrupamiento no paramétricos pueden dividirse en tres grupos fundamentales: jerárquicos, particionales y basados en densidad (Pascual, Pla, & Sánchez, n.d.).

Para la segmentación del territorio objetivo se hace uso de un algoritmo particional. Los algoritmos particionales son los que realizan una división inicial de los datos en grupos y luego mueven los objetos de un grupo a otro según se optimice alguna función objetivo. Estos algoritmos asumen un conocimiento a priori del número de clústeres en que debe ser dividido el conjunto de datos, llegan a una división en clases que optimiza un criterio predefinido o función objetivo. Entre los algoritmos que emplean esta técnica podemos mencionar: K-means, ISODATA, CLARANS, etc.

K-means es un algoritmo de clasificación no supervisada (clusterización), propuesto por James MacQueen en 1967, que agrupa objetos en k grupos basándose en sus características. El agrupamiento se realiza minimizando la suma de distancias entre cada objeto y el centroide de su grupo o clúster. Se suele usar la distancia cuadrática.

El algoritmo consta de tres pasos (Sancho, 2015):

- Fase de inicialización: K-means sitúa k puntos en el espacio en donde se encuentran los vértices. Los puntos determinados representan los centroides iniciales de los grupos.
- Fase de asignación: en esta etapa el algoritmo asigna cada vértice al grupo que tiene el centroide más cercano. Para realizar esto se mide la distancia entre el vértice y cada centroide. Una de las distancias más utilizadas es la euclidiana.
- Fase de actualización: después de que se hayan asignado todos los vértices a cada centroide inicial su ubicación cambia, por lo tanto, el algoritmo calcula nuevamente la posición de los k centroides.

Se repiten los pasos hasta que los centroides no se mueven, o se mueven por debajo de una distancia umbral en cada paso.

El algoritmo k-means resuelve un problema de optimización, siendo la función para optimizar (minimizar) la suma de las distancias cuadráticas de cada objeto al centroide de su clúster.

Las principales ventajas del método k-means son que es un método sencillo y rápido. Pero es necesario decidir el valor de k y el resultado final depende de la inicialización de los centroides.

10.3.1 Aplicación del algoritmo K-means. El algoritmo planteado se programa en Matlab versión R2018a por medio de la función $[idx, C] = kmeans(X, k)$ con el uso de distancias euclidianas, computadas por medio de la API de Google Maps, con la cual se diseña un sistema de coordenadas (x, y) con origen $(x=0, y=0)$ en el Punto Limpio Metropolitano y se hallan las distancias en metros correspondientes a los ejes definidos.

Para el presente proyecto, la matriz de coordenadas está compuesta por 39 filas que corresponden a los puntos de recolección seleccionados en el modelo de localización, además de

3 columnas que corresponden al número del punto, la coordenada X y la coordenada Y respectivamente.

El algoritmo en su primera fase ejecuta la función *kmeans* con las coordenadas cartesianas de los puntos de recolección como datos de entrada y regresa como resultado una matriz que contiene los datos iniciales, así como una columna que especifica el clúster al cual fue asignado cada punto. Se decide definir el número de clústeres a construir $k=4$, el cual corresponde a los cuatro viajes quincenales definidos en la sección 10.2. Dicha matriz es guardada en un archivo de Excel llamado “Segmentación”. Además, el algoritmo cuenta con una función auxiliar que grafica los clústeres obtenidos en el plano cartesiano y le asigna colores diferentes a cada grupo, para una mejor comprensión de los centroides generados. La programación del algoritmo se encuentra en el apéndice E.

10.3.2 Selección de la mejor opción. Al ejecutar el algoritmo, se obtienen los clústeres asignados para los 39 nodos definidos. Sin embargo, las soluciones obtenidas varían en cada corrida, debido a la naturaleza del modelo. Por lo tanto, se realizan varias corridas del algoritmo y se seleccionan las cinco mejores agrupaciones obtenidas para realizar un análisis de cantidad de RAEE a recoger por clúster y la distancia total recorrida, con el fin de escoger la mejor configuración.

Como se mencionó anteriormente, debido a que solo se cuenta con un vehículo con capacidad definida, es necesario asegurar que en cada clúster no se exceda la capacidad total del vehículo de 2118 Kg o que esto ocurra en la menor medida posible. Este se considera el primer parámetro para tener en cuenta para la elección del mejor clúster

El siguiente parámetro para tener en cuenta es la minimización de la distancia a recorrer por clúster. Para esto se hace uso de la API de Google Maps y se genera una matriz de origen – destino para cada agrupación, con el fin de escoger la que tenga menor distancia recorrida cumpliendo con las restricciones de capacidad.

En el apéndice F se describe el procedimiento realizado y se muestran las diferentes opciones de segmentación, así como la comparación de los parámetros y las coordenadas asociadas a la agrupación escogida. La mejor opción de clusterización fue la número 4, representada en la figura 20.

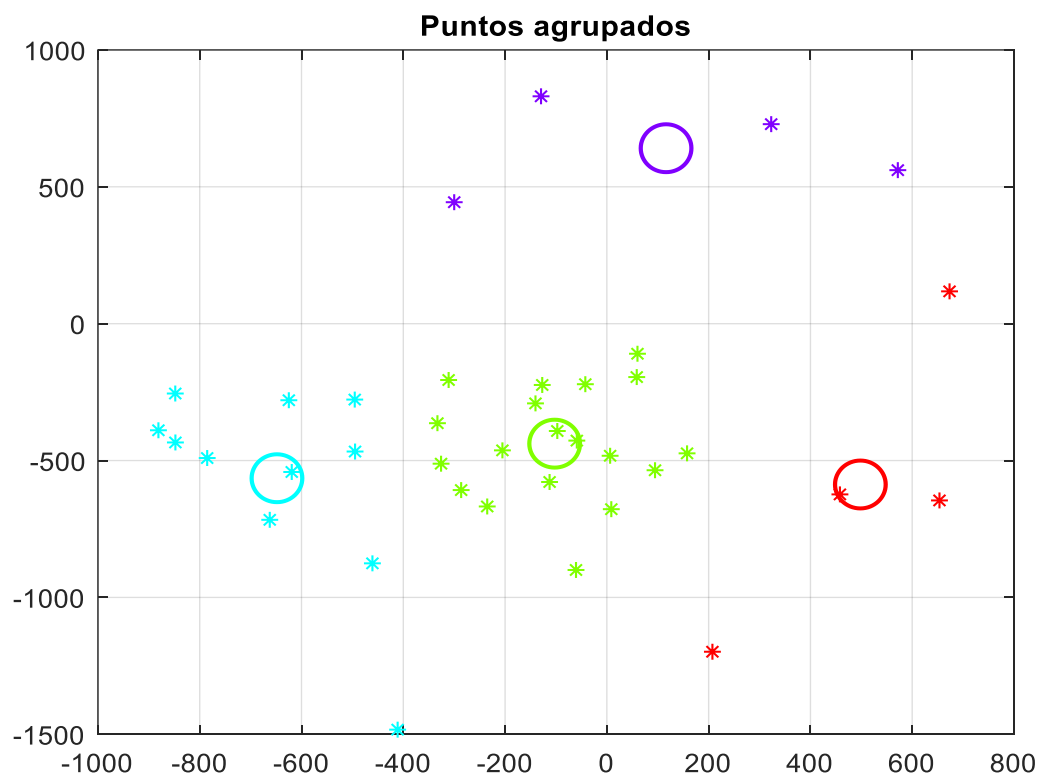


Figura 20. Segmentación de la zona objetivo

10.3.3 Segmentación final. La solución obtenida en la sección anterior debe ser ajustada para cumplir las restricciones de capacidad del vehículo, dado que en la mejor segmentación obtenida hay un clúster que sobrepasa la capacidad máxima. Se realizarán modificaciones a la clusterización actual, buscando una distribución proporcional de la demanda entre las cuatro rutas a recorrer por el vehículo. Para este caso se reasignan algunos nodos a otro clúster lo más cerca posible a su punto de origen. En la tabla 14 se muestran los nodos seleccionados y su ubicación inicial y final. En el apéndice G se muestra la organización final de los 4 clústeres y su representación en Google Maps.

Tabla 14.

Cambios de nodos entre clústeres

Nombre	Producción	Clúster inicial	Clúster final
Nuestra Señora del Pilar Sede B	506.53	3	4
Oasis De Mardel	149.32	3	2
Conjunto Acrópolis	74.46	3	2
Urbanización Macaregua	94.25	3	2

11 Resultados computacionales para caso de estudio

Para definir las rutas de recolección de RAEE en la zona objetivo, se aplica el algoritmo GRASP con búsqueda local desarrollado, para cada uno de los clústeres diseñados. La aplicación del algoritmo requiere como datos de entrada la matriz de costos por distancia y las demandas de los puntos para cada agrupación de nodos. En el apéndice H se muestran los datos de entrada para el modelo CVRP del caso de estudio.

Se propone establecer jornadas de recolección que parten desde el punto limpio metropolitano a las 8:00 am los martes y viernes de cada semana, lanzando máximo una ruta diaria. En total serán cuatro rutas quincenales para recolectar todo el residuo generado en la zona objetivo. En las siguientes tablas se relaciona la información sobre las secuencias de viaje, la cantidad de RAEE a recolectar por punto y los costos asociados por distancia recorrida para cada ruta. Cabe resaltar que el costo asociado al salario del conductor del vehículo se basa en un valor fijo por ruta a recorrer, calculado en base al salario promedio de conductores de vehículos de carga para Colombia por 1 día de trabajo.

Tabla 15.

Rutas clúster 1

Número	Nombre del punto	Demanda asociada
1	Punto limpio	0
11	Plaza Real	44.21
8	Palmeras	46.54
10	Villa de Santa Sofía	103.94
9	Samanes IV	62.06
7	Villa de San Valentín	52.36
12	Marsella Real	96.96
4	Samanes V	85.33
2	CAI Real de Minas	506.14
3	INEM Sede H	506.53
5	Plaza San Marcos	85.33
6	Samanes VI	50.42
1	Punto limpio	0
Total recolectado (Kg)		1639.84
Costo recorrido		\$10967.755

Tabla 16.

Rutas clúster 2

Número	Nombre del punto	Demanda asociada
1	Punto limpio	0
7	Oasis de Mardel	149.32
8	Urbanización Macaregua	94.25
4	Mardelia	46.54
2	CAI La Concordia	504.98
5	Torres Élite	50.42
3	J.A.C San Miguel	502.66
6	Conjunto Acrópolis	74.47
1	Punto limpio	0
Total recolectado (Kg)		1422.64
Costo recorrido		\$5757.52

Tabla 17.

Rutas clúster 3

Número	Nombre del punto	Demanda Asociada
1	Punto limpio	0
4	Instituto Santa María Goretti	253.55
6	Plaza Mayor	85.33
5	Torres de San Remo	55.86
7	Conjunto Búcaros	51.19
8	Torres de las Cigarras	76.79
16	Rincón de los Caballeros	85.33
15	Torres de Santo Domingo	100.84
14	Los Almendros	94.63
12	Parque San Remo II	43.44
13	Portal de San Sebastián	103.17
9	Metrópolis I	99.29
11	Parque San Remo I	65.16
10	Metrópolis III	50.81

Continuación Tabla 17 Resultados modelo de localización

3	Instituto IPA	494.89
2	Centro Comercial Acrópolis	249.78
1	Punto limpio	0
Total recolectado (Kg)		1910.17
Costo recorrido		\$5671.48

Tabla 18.

Rutas clúster 4

Numero	Nombre del punto	Demanda Asociada
1	Punto limpio	0
6	Puerta Mayor	46.54
5	Nuestra Señora del pilar sede E	503.43
3	J.A.C La Victoria	506.53
2	Santa María Goretti sede C	503.44
4	Nuestra Señora del pilar sede B	506.53
1	Punto limpio	0
Total recolectado (Kg)		2066.47
Costo Recorrido		6812.16

Una vez asignado cada nodo a su ruta específica, se propone el cronograma de recolección para garantizar el funcionamiento del programa. Cada punto será visitado una vez cada quince días y se recogerá todo el RAEE disponible en el sitio, para un total de 8 recorridos mensuales. En la tabla 19 se resume el cronograma de recolección semanal diseñado.

Tabla 19.

Cronograma de recolección propuesto

	Martes	Viernes	Total recolectado (Kg)
Semana 1	Clúster 1	Clúster 2	3062.48
Semana 2	Clúster 3	Clúster 4	3976.74
Semana 3	Clúster 1	Clúster 2	3062.48
Semana 4	Clúster 3	Clúster 4	3976.74

Es importante definir el cronograma de recolección, dado que en el punto limpio no solo se recolectan residuos electrónicos. Se propone que el gestor LITO S.A recoja semanalmente todo el RAEE almacenado en el punto limpio, para asegurar la disponibilidad de espacio y no afectar la operación normal del punto limpio metropolitano.

11.1 Presupuesto del proceso de recolección

En la tabla 20 se presenta el presupuesto total para ejecutar el modelo de recolección de residuos. El costo de inversión en los puntos de localización hace referencia al costo de apertura, instalación de contenedores y penalización por distancia recorrida por las personas al punto de localización. El costo de inversión en conjuntos residenciales hace referencia al costo de instalación de los contenedores en los conjuntos residenciales. El costo de compra del vehículo hace referencia al

costo de compra y adecuación para el traslado de los RAEE cumpliendo con los lineamientos técnicos.

Finalmente, en las actividades de recolección quincenal, se tiene en cuenta el costo de ruteo del vehículo que es la suma de los costos hallados por ruta anteriormente. El salario del conductor se calcula por día de trabajo asumiendo que recorre una ruta al día y teniendo en cuenta que el sueldo medio para el puesto de Conductor de carga en Colombia es de \$ 1.695.788 al mes con prestaciones sociales, por lo tanto, el día de trabajo del conductor sale en \$56.526.

Tabla 20.

Presupuesto total del modelo de recolección

Descripción	Costos
Inversión puntos de localización	\$ 20.788.285,35
Inversión conjuntos residenciales	\$ 23.100.000,00
Compra del vehículo	\$ 70.359.000,00
Actividades de recolección quincenal	
Ruteo del vehículo	\$ 29.207,00
Salario del conductor	\$ 226.105,00
TOTAL	\$ 114.487.412,35

Cabe resaltar que la financiación del modelo es una decisión tomada por el Área Metropolitana de Bucaramanga como ente de control y los productores representados por los programas Posconsumo, debido a que el decreto 284 de 2018 establece que en el desarrollo de las obligación de los productores de AEE se debe tener en cuenta que: “El diseño y la implementación de las

estrategias dirigidas a los usuarios o consumidores de sus productos para lograr la eficiencia en la devolución y recolección de los RAEE, así como las campañas informativas y de sensibilización sobre retoma y gestión adecuada de los RAEE, deberán ser coordinadas con la cadena de comercialización de los AEE y las autoridades competentes”.

12 Conclusiones

En la literatura relacionada con la recolección de RAEE, se evidencia el avance de las investigaciones con respecto a la gestión de estos residuos. En países como Polonia ya se encuentran en un sistema de recolección móvil bajo demanda, producto de las investigaciones que parten desde modelos de recolección estacionarios en vecindades, resueltos con el uso de técnicas heurísticas y metaheurísticas, indispensables para la solución de los modelos en un tiempo computacional aceptable, permitiendo una fácil adaptación a las características propias del escenario de aplicación.

La aplicación de modelos de programación lineal entera mixta permite la solución de problemas aplicados en contextos reales, adaptados a las características propias del escenario de estudio. El uso de software especializado como GAMS da resultados que facilitan la toma de decisiones para los problemas formulados, de acuerdo con las restricciones establecidas, de forma flexible y eficiente.

La formulación de modelos matemáticos aplicados en contextos reales requiere la definición precisa de las características de la zona de estudio. La división del modelo en dos fases permite la adaptación de las particularidades del caso de estudio, simplificando el modelamiento y la solución de los problemas planteados.

El uso de la metaheurística GRASP con operadores de búsqueda local brinda soluciones factibles en un tiempo computacional corto para las instancias evaluadas en la literatura, ofreciendo resultados cercanos a las mejores soluciones de dichas instancias con una desviación promedio del 7.03%, lo cual garantiza la eficiencia de las soluciones obtenidas para el caso de estudio.

Las soluciones obtenidas para el caso de estudio usando un modelo de recolección estacionario en vecindades, logran aumentar significativamente la cantidad recolectada de RAEE en la ciudad de Bucaramanga, pasando de 6357 Kg anuales en promedio a 7039 Kg quincenales, según los resultados obtenidos; en comparación con el modelo actual de recolección municipal centralizada, al facilitar el acceso de los usuarios a los sitios de disposición de residuos electrónicos.

El diseño del modelo de recolección de RAEE para el Área Metropolitana de Bucaramanga, complementa los componentes definidos por el Ministerio de Ambiente en la Política Nacional de gestión integral de RAEE. El éxito de la propuesta diseñada va ligado a las actividades de concientización e información a los usuarios de la zona de estudio. Es posible expandir el modelo de recolección a toda la ciudad, articulado con los nuevos puntos limpios que el municipio planea abrir próximamente.

13 Recomendaciones

Para futuras investigaciones se recomienda brindar capacitaciones a los estudiantes sobre el uso y aplicaciones del software Matlab para la solución de los problemas de investigación, debido a la adaptabilidad de su interfaz y a la gran cantidad de herramientas disponibles en el programa, que facilitan la formulación de los modelos planteados.

Es importante para el éxito de futuras investigaciones aplicadas al Área Metropolitana de Bucaramanga, contar con bases de datos actualizadas que brinden información confiable y de fácil acceso para el desarrollo los proyectos planteados que benefician a la comunidad.

Se sugiere a los entes encargados el diseño de jornadas de capacitación y concientización dirigidas a la población en general, con respecto al tratamiento de los AEE, desde la prevención y el uso correcto, hasta la disposición final de los residuos generados.

Se propone a los estudiantes de la Escuela de Estudios Industriales y Empresariales, continuar con la línea de investigación de recolección y gestión de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, teniendo en cuenta la importancia que han tomado los RAEE a nivel mundial y los objetivos planteados por el gobierno nacional con respecto a las metas de recolección para el año 2032.

Referencias Bibliográficas

- Achillas, C., Aidonis, D., Vlachokostas, C., Karagiannidis, A., Moussiopoulou, N., & Loulos, V. (2013). Depth of manual dismantling analysis: A cost-benefit approach. *Waste Management*, 33(4), 948–956. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.12.024>
- Bartolo Pinzón, J., Kimberly, J., & Guerra, U. (2015). Estado De La Gestión De Residuos De Aparatos Eléctricos Y Electrónicos En Colombia Atendiendo Al Marco De Convenios, Acuerdos Y Estrategias De Gestión En El Contexto Internacional. Retrieved from <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/4848/1/BartoloPinzónJonathan2016.pdf>
- Blum, C., & Roli, A. (2003). Metaheuristics in combinatorial optimization: overview and conceptual comparison. *ACM Computing Surveys*, 35(3), 189–213. <https://doi.org/10.1007/s10479-005-3971-7>
- Cabeza, D. 1960-. (2012). *Logística inversa en la gestión de la cadena de suministro*. Marge Books.
- Cabral Navarro, P. A., & Galeano Rios, J. P. (2017). Diseño de un modelo de recolección de residuos de aceites y grasas de origen animal y vegetal en las comunas 9, 10 y 11 de Bucaramanga. *Universidad Industrial de Santander*, 1–161.
- Chang, X., Huo, J., & Chen, S. (2006). Study on Integrated logistics Network Model and Network Design for Waste Electrical and Electronic Equipment. In *2006 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics* (pp. 654–658). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SOLI.2006.329016>

- Desarrollo, M. D. E. A. Y. (2016). República de Colombia Política Nacional para la gestión integral de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), 98. Retrieved from <http://www.andi.com.co/Ambiental/SiteAssets/Política Nacional de Gestión Integral de RAEE-19- 09 2016-Proceso de consulta.pdf>
- Dr. Dale S. Rogers, & Tibben-Lembke, D. R. S. (1998). Going Backwards : Reverse Logistics Trends and Practices Going Backwards : Reverse Logistics Trends and Practices. *Logistics Management*, 1–32.
- Ellram, L. (n.d.). Reverse logistics: a review of the literature and framework for future investigation. ... *Logistics*.
- Europeo, E. L. P., Consejo, E. L., & Uni, D. E. L. A. (2003). Directiva 2002/96/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 27 de enero de 2003 sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos. 27/01/2003, 5, 15 pags. (19 artículos). Retrieved from http://ofiverde.unizar.es/documents/2002_96_CE.pdf
- Extended Producer Responsibility*. (2001). OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/9789264189867-en>
- Gamberini, R., Gebennini, E., Manzini, R., & Ziveri, A. (2010). On the integration of planning and environmental impact assessment for a WEEE transportation network—A case study. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(11), 937–951. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2010.02.001>
- Ganesh, K., & Narendran, T. T. (2007). CLOVES: A cluster-and-search heuristic to solve the vehicle routing problem with delivery and pick-up. *European Journal of Operational*

Research, 178(3), 699–717. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.01.037>

Georgiadis, P., & Besiou, M. (2008). Sustainability in electrical and electronic equipment closed-loop supply chains: A System Dynamics approach. *Journal of Cleaner Production*, 16(15), 1665–1678. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.04.019>

Gomes, M. I., Barbosa-Povoa, A. P., & Novais, A. Q. (2011). Modelling a recovery network for WEEE: A case study in Portugal. *Waste Management*, 31(7), 1645–1660. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.02.023>

GREENPEACE ARGENTINA. (2011). Basura Informática: la otra cara de la tecnología, 25.

Grunow, M., & Gobbi, C. (2009). Designing the reverse network for WEEE in Denmark. *CIRP Annals*, 58(1), 391–394. <https://doi.org/10.1016/J.CIRP.2009.03.036>

Ibanescu, D., Cailean (Gavrilescu), D., Teodosiu, C., & Fiore, S. (2017). Assessment of the waste electrical and electronic equipment management systems profile and sustainability in developed and developing European Union countries. *Waste Management*. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.12.022>

Islam, M. T., Abdullah, A. B., Shahir, S. A., Kalam, M. A., Masjuki, H. H., Shumon, R., & Rashid, M. H. (2016). A public survey on knowledge, awareness, attitude and willingness to pay for WEEE management: Case study in Bangladesh. *Journal of Cleaner Production*, 137, 728–740. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.07.111>

Islam, M. T., & Huda, N. (2018). Reverse logistics and closed-loop supply chain of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)/E-waste: A comprehensive literature review. *Resources, Conservation and Recycling*, 137, 48–75.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.05.026>

- Kontoravdis, G., & Bard, J. F. (1995). A GRASP for the Vehicle Routing Problem with Time Windows. *ORSA Journal on Computing*, 7(1), 10–23. <https://doi.org/10.1287/ijoc.7.1.10>
- Layeb, A., Ammi, M., & Chikhi, S. (2013). A GRASP Algorithm Based on New Randomized Heuristic for Vehicle Routing Problem, 35–46.
- Lin, C., Choy, K. L., Ho, G. T. S., & Ng, T. W. (2014). A Genetic Algorithm-based optimization model for supporting green transportation operations. *Expert Systems with Applications*, 41(7), 3284–3296. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.11.032>
- Liu, Z., Tang, J., Li, B. yi, & Wang, Z. (2018). Trade-off between remanufacturing and recycling of WEEE and the environmental implication under the Chinese Fund Policy. *Journal of Cleaner Production*, 167, 97–109. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.137>
- Lundgren, K. (2012). *The global impact of e-waste: Addressing the challenge*. International Labour Office. <https://doi.org/978-92-2-126898-7>
- Manzini, R., Gamberi, M., Gebennini, E., & Regattieri, A. (2008). An integrated approach to the design and management of a supply chain system. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 37(5–6), 625–640. <https://doi.org/10.1007/s00170-007-0997-9>
- Mar-Ortiz, J., Adenso-Díaz, B., & González-Velarde, J. L. (2011). Design of a recovery network for WEEE collection: The case of Galicia, Spain. *Journal of the Operational Research Society*, 62(8), 1471–1484. <https://doi.org/10.1057/jors.2010.114>
- Mar-Ortiz, Julio, González-Velarde, J. L., & Adenso-Díaz, B. (2013). Designing routes for WEEE collection: the vehicle routing problem with split loads and date windows. *Journal of*

- Heuristics*, 19(2), 103–127. <https://doi.org/10.1007/s10732-011-9159-1>
- Marti, R. (2003). Procedimientos Metaheurísticos en Optimización Combinatoria. *Journal of Heuristics*, 1–60.
- Meira, L. A. A., Miyazawa, F. K., & Pedrosa, L. L. C. (2017). Clustering through Continuous Facility Location Problems. *Theoretical Computer Science*, 657, 137–145. <https://doi.org/10.1016/j.tcs.2016.10.001>
- MENDOZA, H. A. D. (2016). ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA EL MONTAJE DE UNA EMPRESA GESTORA DE RESIDUOS DE APARATOS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS (RAEE) EN LA CIUDAD DE CÚCUTA -NORTE DE SANTANDER HERMES. *Universidad Industrial de Santander*.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2011). *Lineamientos Técnicos para el Manejo de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos*.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2013). Ley 1672, 13. Retrieved from http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/leyes/2013/ley_1672_2013.pdf
- Nagurney, A., & Toyasaki, F. (2005). Reverse supply chain management and electronic waste recycling: a multitiered network equilibrium framework for e-cycling. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 41(1), 1–28. <https://doi.org/10.1016/J.TRE.2003.12.001>
- Nowakowski, P. (2016). The influence of residents' behaviour on waste electrical and electronic equipment collection effectiveness. *Waste Management and Research*, 34(11), 1126–1135. <https://doi.org/10.1177/0734242X16669997>

- Nowakowski, P. (2017). A proposal to improve e-waste collection efficiency in urban mining: Container loading and vehicle routing problems – A case study of Poland. *Waste Management*, 60, 494–504. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.016>
- Nowakowski, P., Król, A., & Mrówczyńska, B. (2017). Supporting mobile WEEE collection on demand: A method for multi-criteria vehicle routing, loading and cost optimisation. *Waste Management*, 69(2017), 377–392. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.045>
- Nowakowski, P., & Mrówczyńska, B. (2018). Towards sustainable WEEE collection and transportation methods in circular economy - Comparative study for rural and urban settlements. *Resources, Conservation and Recycling*, 135(December), 93–107. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.12.016>
- Olivera, A. (2004). Heurísticas para problemas de ruteo de vehículos. *Instituto de Computacion - Facultad de Ingenieria.*, 63. Retrieved from <https://www.fing.edu.uy/inco/pedeciba/bibliote/reptec/TR0408.pdf>
- Papadimitriou, C. H., & Steiglitz, K. (1982). *Combinatorial optimization: algorithms and complexity*. Prentice Hall.
- Parlamento Europeo. (2012). DIRECTIVA 2012/19/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 4 de julio de 2012 sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE). *Diario Oficial de La Unión Europea*, 38–71.
- Pascual, D., Pla, F., & Sánchez, S. (n.d.). Algoritmos de agrupamiento.
- Pinninghoff, M. A., Contreras, R., & Pantoja, C. (2014). A comparison of methods for the vehicle routing problem. *Proceedings of the 2014 Latin American Computing Conference, CLEI*

2014. <https://doi.org/10.1109/CLEI.2014.6965167>

PNUMA. (2006). Convenio de Basilea. *Europa: Síntesis de La Legislación de La UE*. Retrieved from

http://europa.eu/legislation_summaries/environment/waste_management/128043_es.htm

POT Bucaramanga. (n.d.). Municipio de Bucaramanga.

Quesada, I. F. (2003). The Concept of Reverse Logistics. A Review of Literature. *Annual Conference for Nordic Researchers in Logistics (NOFOMA 03)*, (June 2003), 1–15. Retrieved from <http://gio.uniovi.es/documentos/bel-li/nofoma.pdf>

Resende, M. G. C., & Ribeiro, C. C. (2010). Greedy Randomized Adaptive Search Procedures: Advances, Hybridizations, and Applications, 283–319. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1665-5_10

ROSAS PÉREZ, M. (2012). Propuesta de un proceso de recolección de residuos electrónicos para motivar la participación en poblaciones definidas. *Investigaciones Turísticas*, 9.

RREUSE | Putting Secondhand First. (2018).

Sabbaghi, M., Behdad, S., & Zhuang, J. (2016). crossmark, 182(October), 545–563.

Sancho, F. (2015). Clustering por K-medias. Retrieved May 8, 2019, from <http://www.cs.us.es/~fsancho/?e=43>

Solomon, M. M. (1987). Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Window Constraints. *Operations Research*, 35(2), 254–265. <https://doi.org/10.1287/opre.35.2.254>

- Teoh, B. E., Ponnambalam, S. G., & Kanagaraj, G. (2015). Differential evolution algorithm with local search for capacitated vehicle routing problem. *International Journal of Bio-Inspired Computation*, 7(5), 321. <https://doi.org/10.1504/ijbic.2015.072260>
- Ting, C. J., & Chen, C. H. (2013). A multiple ant colony optimization algorithm for the capacitated location routing problem. *International Journal of Production Economics*, 141(1), 34–44. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.06.011>
- Toth, P., & Vigo, D. (2002, November). Models, relaxations and exact approaches for the capacitated vehicle routing problem. *Discrete Applied Mathematics*. North-Holland. [https://doi.org/10.1016/S0166-218X\(01\)00351-1](https://doi.org/10.1016/S0166-218X(01)00351-1)
- UNU; ISWA. (2017). *The Global E-waste Monitor 2017 - Executive Summary*. Retrieved from <https://www.itu.int/en/ITU-D/Climate-Change/Pages/Global-E-waste-Monitor-2017.aspx>
- Vidal, A. (2013). Algoritmos Heuristicos en Optimizacion, 94.
- Wang, I.-L., & Yang, W.-C. (2007). Fast Heuristics for Designing Integrated E-Waste Reverse Logistics Networks. *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, 30(2), 147–154. <https://doi.org/10.1109/TEPM.2007.899112>
- Wang, W., Tian, Y., Zhu, Q., & Zhong, Y. (2017). Barriers for household e-waste collection in China: Perspectives from formal collecting enterprises in Liaoning Province. *Journal of Cleaner Production*, 153, 299–308. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.202>
- Wang, X., Zhang, K., & Yang, B. (2011). Optimal design of reverse logistics network on e-waste in Shanghai. *International Journal of Networking and Virtual Organisations*, 8(3/4), 209. <https://doi.org/10.1504/IJNVO.2011.039995>

Xie, Q. H., Zhang, X. W., Lv, W. G., Cheng, S. Y., Huang, H. X., & Cai, S. Da. (2013). Research on Re-Use Reverse Logistics Network of Disused Electric Appliances Based on Election Campaign Algorithm. *Applied Mechanics and Materials*, 397–400, 1121–1128. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.397-400.1121>