

Algoritmo memético para el problema de localización y ruteo de vehículos con ventanas de tiempo en el proceso de recolección de residuos sólidos en el centro de la ciudad de Bucaramanga de la empresa de aseo de Bucaramanga-EMAB

Andrea Carolina Niño Gómez

Juan Sebastián Vargas Duarte

**Trabajo de grado para optar al título de:
Ingeniero Industrial**

Directora:

Myriam Leonor Niño López

Doctora en Administración y Dirección de Empresas

Co-director:

Henry Lamos Díaz

Ph.D en Física -Matemática

Facultad de Ingenierías Físico - Mecánicas

18 de Mayo de 2018

DEDICATORIA

A Dios, por sus contantes bendiciones, sin ellas no hubiera podido llegar hasta este punto
y continuar soñando con un futuro.

A mis padres por todo su esfuerzo, apoyo, por ser el polo a tierra de mi vida, este ciclo
culminado es de ellos

A mi hermana menor Angelica por su compañía y tiempo que me ha brindado

A mis amigos de carrera que sin su compañía y apoyo este trayecto no hubiera sido el
mismo

Andrea Carolina Niño Gómez

A Dios, a mi familia y amigos por ser el eje central de mi vida, motivación y sustento
diario en cada meta alcanzada. Su acompañamiento fue fundamental en la conclusión de este
camino.

Juan Sebastián Vargas Duarte

AGRADECIMIENTOS

A Dios porque sin Él nada es posible.

A nuestra alma mater, la UIS por todas sus enseñanzas en las aulas de clase y las experiencias vividas que nos permitieron crecer personal y profesionalmente.

A los profesores Myriam Niño y Henry Lamos por su exigencia, compromiso y guía en el desarrollo de este trayecto.

Al grupo de investigación OPALO por su colaboración.

A la empresa de aseo de Bucarmanga – EMAB y sus colaboradores por el tiempo dedicado.

A todos gracias.

Tabla de Contenido

Introducción	16
1. Justificación.....	18
2. Planteamiento del Problema.....	19
3. Objetivos	21
3.1 Objetivo general	21
3.2 Objetivos específicos.....	22
4. Revisión de Literatura	22
5. Marco Teórico	29
5.1 Glosario	29
5.2 Normatividad ambiental	30
5.3 Optimización Combinatoria	34
5.3.1 Problemas de optimización combinatoria.	34
5.3.2 Complejidad computacional o algorítmica.....	35
5.3.3 Problema de Localización-Ruteo.	36
5.3.3.1 Clasificación de los LRP.	37
5.3.3.2 LRP con ventanas de tiempo.....	38
5.3.3.3 Método de Solución para los LRP.....	39
5.3.4 Métodos de Solución.....	39
5.3.4.1 Métodos Exactos	39
5.3.4.2 Algoritmos Aproximados.....	40
5.3.4.2.1 Métodos Heurísticos.....	40
5.3.4.2.2 Metaheurísticos	40
5.3.4.2.3 Métodos Híbridos.....	41
5.3.4.3 Computación Evolutiva.....	41
5.3.4.3.1 Programación evolutiva.....	41
5.3.5 Algoritmo Memético	42
6. Propuesta Innovadora de Elementos Claves para el Desarrollo del Proceso	45
6.1 Contenedores Subterráneos	45
6.2 Vehículos Recolectores para la Zona Centro	48
7. Caracterización del Proceso	50

8. Formulación del Modelo Matemático	52
9. Diseño del algoritmo memético para el LRPTW	54
9.1 Las soluciones en el algoritmo	55
9.1.1 Representación de la solución.	55
9.2 Pasos lógicos del algoritmo	57
9.2.1 Población inicial.	59
9.2.2 Operador de Selección.....	61
9.2.3 Operador de Cruce.....	62
9.2.4 Operador de Mutación.....	63
9.2.5 Operador de mejora.....	63
9.2.6 Actualización de la población.	64
10.1 Resultados de la Validación de las Instancias	65
11. Diseño Experimental para la Determinación de los Factores Incidentes en el LRP	67
11.1 Instancias del Benchmarking Analizadas.....	67
11.2 Factores Principales.....	68
11.3 Análisis de los Efectos Principales de los Parámetros del Algoritmo.....	69
11.3.1 Análisis de Varianza para el Problema 20-5-1	69
11.4 Parámetros del algoritmo	71
11.5 Resultados de las Instancias	71
12. Resultados del Caso de Estudio EMAB	72
12.1 Mejor Resultado Grupo 1	75
12.2 Mejor Resultado Grupo 2	76
13. Conclusiones	78
14. Recomendaciones.....	79
15. Referencias Bibliográficas	81

Lista de Figuras

Figura 1. Delimitación de la zona céntrica atendida por los motocarros.	19
Figura 2. Clasificación de los usuarios del servicio de recolección personalizada.....	20
Figura 3. Relación entre los problemas P y NP.....	36
Figura 4. Esquema de un MA.....	42
Figura 5. Cuadro comparativo de algunos de los aspectos de los aspectos más distintivos de los GA y los MA.	44
Figura 6. Contenedores Subterráneos.....	46
Figura 7. Isla de Contenedores Subterráneos.	47
Figura 8. Vehículos Satélite.	49
Figura 9. Distribución Geográfica de los nodos.....	51
Figura 10. Representación Estaciones de Transferencia Habilitadas.....	55
Figura 11. Representación Vector Secuencia de Clientes.....	56
Figura 12. Diagrama del algoritmo memético para la solución del LRPTW	58
Figura 13. Diagrama del algoritmo memético para la solución del LRPTW	59
Figura 14. Diagrama RECWA	60
Figura 15. Diagrama RECWA	61
Figura 16. Representación One-point crossover	62
Figura 17. Representación Order Crossover	63
Figura 18. Representación Operador Mutación SWAP	63
Figura 19. Representación Operador de Mejora LocalOpt	64
Figura 20. Resumen Instancia 50-5-2BIS	66
Figura 21. Resumen Instancia Gaspell	66
Figura 22. Resumen Instancia Min134	67
Figura 23. Tratamiento del diseño 2^3	68
Figura 24. Resumen Instancia 20-5-1.....	69
Figura 25. Análisis de Varianza Problema 20-5-1	69
Figura 26. Diagrama de Pareto Problema 20-5-1	70
Figura 27. Resumen Resultado del Diseño de Experimentos en las Instancias	70
Figura 28. Resumen Resultados de las Instancias según los Mejores Parámetros.....	72
Figura 29. Resumen Resultados de Corridas para el Caso de Estudio.....	73

Figura 30. Ejemplo de tipo de estación de transferencia escogida.....	74
Figura 31. Ruta grupo 1 para el carro 1.....	75
Figura 32. Ruta grupo 1 para el carro 2.....	75
Figura 33. Ruta grupo 1 para el carro 3.....	76
Figura 34. Ruta grupo 2 para el carro 1.....	76
Figura 35. Ruta grupo 2 para el carro 2.....	77
Figura 36. Rutas grupo 2 para los carros 3 y 4.....	77
Figura 37. Distribución geográfica de los resultados	77

Lista de Tablas

Tabla 1. Tabla cumplimiento de objetivos	17
Tabla 2. Clasificación del LRP según la perspectiva del problema	37
Tabla 3. Características de los contenedores subterráneos.....	47
Tabla 4. Opciones de capacidad de las estaciones de transferencia	48
Tabla 5. Niveles de los factores del diseño de experimentos.	68
Tabla 6. Definición de parámetros del algoritmo memético	71

Apéndices

Apéndice A. Lista de usuarios.....	20
Apéndice B. Tiempo de viaje entre nodos	52
Apéndice C. Demandas de los usuarios	52
Apéndice D Ventada de tiempo de los nodos.....	52
Apéndice E. Tiempos de servicio de clientes y estaciones de transferencia.....	52
Apéndice F. Código GAMS	54
Apéndice G Validación del algoritmo.....	65
Apéndice H Réplicas del diseño experimental 2k.....	67
Apéndice I. Resultados del diseño experimental 2k.....	69
Apéndice J.. Replicas instancias con los factores incidentes	72
Apéndice K. Algoritmo memético.....	

RESUMEN

TITULO: “ALGORITMO MEMÉTICO PARA EL PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN Y RUTEO DE VEHÍCULOS CON VENTANAS DE TIEMPO EN EL PROCESO DE RECOLECCIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS EN EL CENTRO DE LA CIUDAD DE BUCARAMANGA DE LA EMPRESA DE ASEO DE BUCARAMANGA-EMAB”*

AUTOR: NIÑO GOMEZ, Andrea Carolina y VARGAS DUARTE, Juan Sebastián[†]

PALABRAS CLAVE: Localización, ruteo, algoritmo memético, ventanas de tiempo, recolección de residuos.

DESCRIPCION:

La presente investigación aborda el problema de localización-ruteo con ventanas de tiempo (LRPTW) para realizar la recolección de residuos sólidos de algunos clientes de la empresa de aseo de Bucaramanga - EMAB ubicados en el centro de la ciudad y que requieren este servicio debido a la ventana de tiempo determinada por el mismo cliente. El objetivo del LRPTW es localizar estaciones de transferencia en los parques del centro de la ciudad destinados al almacenamiento temporal de residuos sólidos y la generación de rutas óptimas que permitan satisfacer las ventanas de tiempo de los clientes. Para la solución del problema se elabora un algoritmo memético, el cual combina operadores genéticos con operadores de búsqueda local con el objetivo de explorar y aprovechar el conocimiento del problema para minimizar el costo.

El algoritmo fue ejecutado por medio del lenguaje de programación Python y validado con las instancias de la literatura de Prodhon y Barreto para el problema localización - ruteo capacitado (CLRP), debido a la no existencia de instancias para el LRPTW. Los resultados propuestos por el algoritmo memético muestran que este se acerca a las mejores soluciones encontradas de las instancias de baja complejidad.

Se evalúa de igual forma el caso de estudio de la EMAB determinando la ubicación de las estaciones de transferencia con sus respectivas rutas para cada grupo de clientes de la empresa, respetando la capacidad de los vehículos y las ventanas de tiempo de los usuarios.

Adicionalmente, se propone una alternativa innovadora de infraestructura para las estaciones de transferencia que aporta una solución logística y ambiental en el proceso de recolección de residuos sólidos urbanos.

* Proyecto de Grado

[†] Facultad de Ingeniería Físico Mecánicas. Escuela de estudio industriales y empresariales. Programa de ingeniería industrial. Director: PhD Myriam Leonor Niño. Codirector: PhD Henry Lamos Diaz.

ABSTRACT

TITLE: “MEMETIC ALGORITHM FOR THE LOCALITATION ROUTING PROBLEM OF VEHICLES WITH TIME WINDOWS IN THE PROCESS OF SOLID WASTE COLLECTION IN THE CENTER OF THE CITY OF BUCARAMANGA FOR THE COMPANY EMAB”*

AUTHOR: NIÑO GOMEZ, Andrea Carolina y VARGAS DUARTE, Juan Sebastián †

KEYWORDS: Localitation, routing, memetic algorithm, time window, waste collection

DESCRIPTION:

The present research addresses the problem of location-routing with windows of time (LRPTW) to carry out the solid waste collection of some clients of the cleaning company of Bucaramanga - EMAB located in the center of the city that require this service due to the time window determined by the themselves. The objective of the LRPTW is to locate transfer stations in the parks of the city center destined to the temporary storage of solid waste and the generation of optimal routes that allow to satisfy the windows of time of the clients. For the solution of the problem a memetic algorithm is elaborated, which combines genetic operators with local search operators with the aim of exploring and taking advantage of the knowledge of the problem to minimize the cost.

The algorithm was executed in Python programming language and validated with the instances of the Prodhon and Barreto literature for the capacitated location routing problem (CLRP), due to the non-existence of instances for the LRPTW. The results proposed by the memetic algorithm show that it approaches the best solutions found in instances of low complexity.

The case study of the EMAB is also evaluated, determining the location of the transfer stations with their respective routes for each group of customers of the company, respecting the capacity of the vehicles and the time windows of the users.

Additionally, an innovative alternative of infrastructure for transfer stations is proposed, which provides a logistical and environmental solution in the process of urban waste collection.

* Graduation Project.

† Facultad de Ingeniería Físico Mecánicas. Escuela de estudio industriales y empresariales. Programa de ingeniería industrial. Director: PhD Myriam Leonor Niño. Codirector: PhD Henry Lamos Diaz.

Introducción

El incremento en la generación de residuos sólidos en el mundo es ocasionado en gran medida por el desarrollo industrial y el crecimiento poblacional asociado a la migración hacia las áreas urbanas. El Banco Mundial determinó que, a mayor nivel de ingresos y tasa de urbanización, mayor cantidad de residuos son generados por los países (World Bank, 2010). Colombia por ser un país con una economía en desarrollo y rápido crecimiento urbano debe tornarse hacia una gestión eficiente de los residuos sólidos. Dicha gestión representa una gran carga para los presupuestos municipales como resultado de los altos costos asociados a su manejo, por lo que se hace necesario utilizar herramientas y técnicas que conduzcan a minimizar los costos e impactos ambientales que este problema suscita.

La EMAB S.A. E.S.P presta el servicio público domiciliario de aseo en la ciudad de Bucaramanga, se encarga del barrido, recolección, transporte y disposición final de residuos en la ciudad. De manera especial, oferta el servicio de recolección personalizada a algunos usuarios ubicados en el centro de la ciudad que exigen una frecuencia y franja horaria para ser visitados. Debido a las restricciones de tránsito en el sector, esta labor debe ser realizada por vehículos de baja capacidad que al alcanzar su carga máxima deben transferir los residuos a otro vehículo de mayor tamaño para continuar la recolección vacíos.

Esta investigación busca abordar desde la perspectiva de la investigación de operaciones el proceso de recolección de residuos personalizados, el cual puede ser modelado con el objetivo de minimizar el costo operacional en el largo plazo, como un problema de localización y ruteo de vehículos con ventanas de tiempo (LRPTW). Con él se pretenden establecer los puntos óptimos de transferencia de residuos y la ruta que debe seguir cada vehículo para cumplir con las restricciones horarias. Para la solución del problema, se propone un algoritmo memético ya que los métodos exactos suelen no ser eficientes con instancias a gran escala.

Adicionalmente, se propone una alternativa innovadora para el proceso que aporta una solución logística, estética y ambiental para mejorar la operación y la imagen de la empresa EMAB S.A. E.S.P. ante la ciudadanía.

Tabla 1
Cumplimiento de Objetivos

Objetivos	Cumplimiento
Realizar una revisión de literatura de los modelos de operación para el problema de recolección de residuos sólidos urbanos y de los métodos de solución del problema de localización y ruteo con ventanas de tiempo.	Capítulo 4
Revisar la normativa medio ambiental para la disposición de residuos sólidos en Colombia	Capítulo 5
Proponer una alternativa innovadora para la recolección y transferencia de residuos sólidos de la empresa de aseo de Bucaramanga - EMAB, en el centro de la ciudad Bucaramanga, que se ajuste a las condiciones legales medioambientales	Capítulo 6
Caracterizar el problema de localización y ruteo de vehículos con ventanas de tiempo con el fin de identificar los elementos claves que permitan diseñar un método de resolución eficiente	Capítulo 7
Formular el modelo matemático del problema de localización y ruteo de vehículos con ventanas de tiempo para el proceso de recolección de residuos sólidos de la empresa de aseo de Bucaramanga - EMAB, en el centro de la ciudad Bucaramanga	Capítulo 8
Construir el algoritmo memético para la solución del problema planteado	Capítulo 9
Implementar el algoritmo desarrollado utilizando la herramienta de software Python y probarlo con varias instancias	Capítulo 10
Elaborar un artículo de carácter publicable con base en los resultados obtenidos en la investigación	

1. Justificación

El problema de recolección de residuos sólidos urbanos ha sido ampliamente estudiado desde el punto de vista logístico debido a la necesidad de encontrar una solución rentable para el proceso de disposición de desperdicios generados por las actividades de las ciudades. La empresa de aseo de Bucaramanga EMAB realiza la recolección, transporte y disposición de los residuos en el área metropolitana de Bucaramanga y opera de manera especial en el centro de la ciudad utilizando vehículos de baja capacidad, ya que los camiones compactadores no pueden ingresar a este sector en un horario diurno, pues su gran tamaño causa congestión y deterioro de las vías.

Debido a esta restricción y para evitar que los vehículos menores se desplacen directamente al relleno sanitario al completar su carga, estos deben realizar varias transferencias de los residuos durante el día a un vehículo de mayor capacidad, con el que se acuerda un punto de encuentro en las afueras del Centro. Tomando como base la caracterización previa del proceso y un análisis estadístico de las variables del servicio realizado por Díaz y Uribe (2016), se observa que el procedimiento resulta ineficiente y caótico, pues en promedio tarda 24,36 minutos, de los cuales, el 69% corresponde a tiempos de transporte hasta el punto acordado y espera por el servicio, sin mencionar la afectación que causa a las rutas de ambos vehículos, generando congestión vial y creando focos de contaminación en los puntos de transferencia incitando a que la población vecina arroje sus residuos allí. Así mismo, el 42% del tiempo de operación diario de los vehículos, es utilizado en los desplazamientos para las transferencias y en transporte de los residuos durante las visitas a los clientes, las cuales son realizadas aleatoriamente a consideración del conductor, resultando en recorridos que no son los más rápidos ni cortos.

A pesar de que el servicio es prestado eficazmente, no es eficiente en la utilización de los recursos debido a la falta de organización en las rutas y a la falta de definición de los puntos óptimos de transferencia. Por esto se propone un nuevo modelo de operación utilizando estaciones de transferencia fijas compuestas por contenedores soterrados, ubicados en puntos estratégicos de la periferia de la zona central, los cuales facilitarán el almacenamiento de los desechos sólidos temporalmente.

Tomando como base la investigación realizado por Díaz y Uribe (2016), se desea formular matemáticamente el nuevo modelo de operación, se propone el diseño de un algoritmo para la

solución del problema conocido en la literatura como localización y ruteo de vehículos con ventanas de tiempo (LRPTW), necesario para lograr la satisfacción del usuario mediante la disminución del tiempo total de servicio, que cumpla con los requerimientos horarios del cliente y a su vez le permita a la EMAB contar con un proceso rentable para atender el máximo de clientes posibles a menor costo mediante la reducción del tiempo de operación.

2. Planteamiento del Problema

La empresa de aseo de Bucaramanga EMAB recolecta residuos de forma personalizada a ciertos clientes, los cuales tiene como factor prioritario el despacho de sus residuos sólidos en un horario específico, ubicados en el centro de la ciudad. Los clientes son quienes definen la frecuencia y la franja horaria de visita. El área está delimitada por la avenida Quebradaseca y la calle 45 y las carreras 9 y 27 (Ver Figura 1). Por restricciones de tránsito y horarias, los vehículos compactadores no pueden ingresar en este sector y por ello el proceso se realiza gracias a la implementación de motocarros que representan una solución adecuada al problema de congestión vial y conservación de la malla vial.

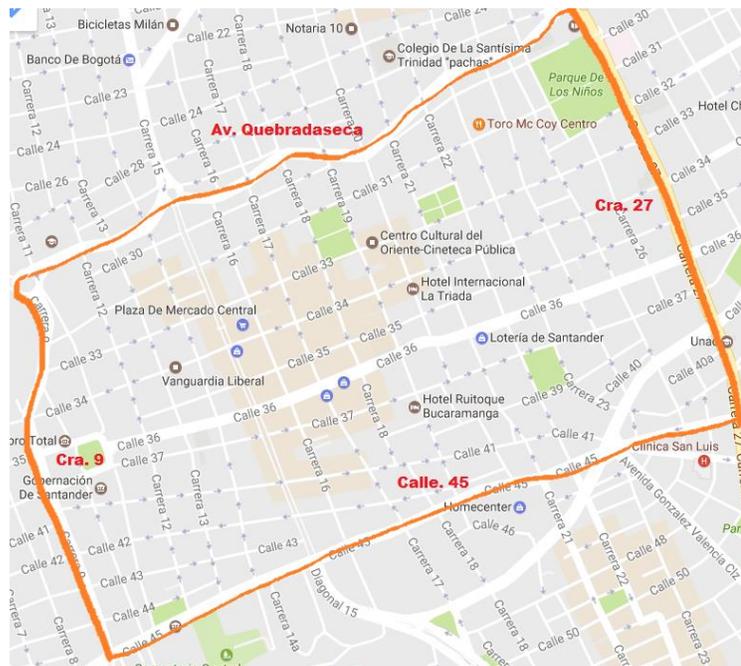


Figura 1. Delimitación de la zona céntrica atendida por los motocarros.

Los cuatro motocarros en operación de la empresa tienen capacidad de 600 kg cada uno. Los operarios son los encargados de recoger los residuos de los establecimientos de 50 clientes, clasificados de acuerdo con la Figura 2. Cada motocarro cuenta con dos grupos fijos de clientes: uno para los días lunes, miércoles y viernes (Bloque 1 de la semana) y otro para los martes, jueves y sábados (Bloque 2 de la semana). Los clientes se asignan a cada ruta según el horario en que necesita que sus residuos sean recogidos y la frecuencia del servicio por lo que la carga de trabajo de los conductores puede no estar balanceada. En el Apéndice A se enlistan los usuarios del servicio, ubicación y la ruta a la que pertenecen, información recopilada por Díaz y Uribe (2016).

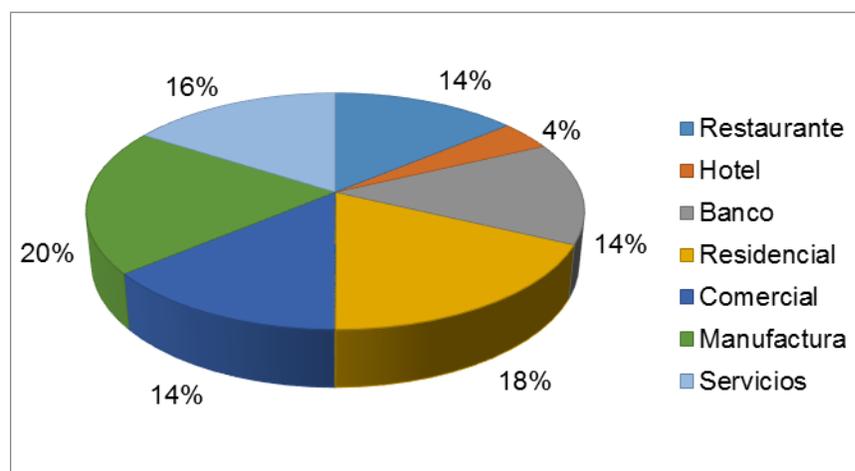


Figura 2. Clasificación de los usuarios del servicio de recolección personalizada.

El proceso comienza cuando los conductores reciben el listado de usuarios que deben atender durante el día sin un recorrido preestablecido. Parten desde el garaje ubicado en la calle 33 #11-37 y son ellos quienes deciden la secuencia de visitas basados en su experiencia, por lo que este orden podría variar de un día a otro. Luego de visitar algunos clientes y que el motocarro alcance su capacidad máxima, se procede a contactar al conductor del vehículo compactador que se encuentra atendiendo barrios aledaños a la zona. Este es el encargado de recibir los residuos recogidos por los motocarros, en un punto cercano acordado por ambas unidades; para después ser transportado hasta el sitio de disposición final. Después de efectuada la transferencia, el motocarro vacío continúa visitando los clientes asignados. El proceso de transferencia, que comprende las fases de desplazamiento hasta el punto acordado, espera por el servicio y

transbordo de los residuos, tarda en promedio 24,36 min y se debería efectuar en cuatro puntos definidos por la empresa:

- Calle 44 con carrera 11, frente a la estación de bomberos.
- Avenida Quebradaseca con carrera 25, frente al lavadero Cárdenas.
- Avenida Rosita con carrera 20, detrás de Homecenter.
- Calle 45 con carrera 12A Occidental, Quintaestrella.

En la práctica, la mayoría de las transferencias no se realizan en los lugares establecidos por la EMAB y se utilizan hasta 40 puntos no autorizados, generando focos de contaminación e incitando a la población vecina a arrojar los residuos allí. La operación como es llevada a cabo causa ineficiencia en las rutas e interrupción del flujo laboral que se traduce en inactividad y más horas de trabajo tanto de los motocarros como del camión recolector.

Expuesta esta situación, el problema que se quiere solucionar es la falta de organización y control en las rutas de los motocarros y la utilización de una gran cantidad de puntos no autorizados para realizar la transferencia de residuos en la zona del centro, que afecta las rutas tanto del motocarro como del camión compactador. Se busca profundizar en un área específica de la investigación de operaciones para conseguir dicha solución. De igual forma se plantea una alternativa innovadora y estética para el uso y manejo de los puntos de transferencia que se puede implementar en el centro de la ciudad. Así se contribuye a mejorar las condiciones ambientales en las inmediaciones en las que se realiza la operación.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Diseñar un algoritmo memético para la solución del problema de localización y ruteo con ventanas de tiempo para el proceso de recolección de residuos sólidos en el centro de la ciudad de Bucaramanga de la empresa de aseo de Bucaramanga – EMAB.

3.2 Objetivos específicos

- Realizar una revisión de literatura de los modelos de operación para el problema de recolección de residuos sólidos urbanos y de los métodos de solución del problema de localización y ruteo con ventanas de tiempo.
- Revisar la normativa medio ambiental para la disposición de residuos sólidos en Colombia.
- Proponer una alternativa innovadora para la recolección y transferencia de residuos sólidos de la empresa de aseo de Bucaramanga – EMAB, en el centro de la ciudad Bucaramanga, que se ajuste a las condiciones legales medioambientales.
- Caracterizar el problema de localización y ruteo de vehículos con ventanas de tiempo con el fin de identificar los elementos claves que permitan diseñar un método de resolución eficiente.
- Formular el modelo matemático del problema de localización y ruteo de vehículos con ventanas de tiempo para el proceso de recolección de residuos sólidos de la empresa de aseo de Bucaramanga – EMAB, en el centro de la ciudad Bucaramanga.
- Construir el algoritmo memético para la solución del problema planteado.
- Implementar el algoritmo desarrollado utilizando la herramienta de software Python y probarlo con varias instancias.
- Elaborar un artículo de carácter publicable con base en los resultados obtenidos en la investigación.

4. Revisión de Literatura

“La gestión integrada de residuos sólidos comprende todas las actividades asociadas con el manejo de los diversos flujos de residuos dentro de la sociedad y su meta básica es administrar los residuos de una forma que sea compatible con el medio ambiente y la salud pública” (MADS, 1998).

En la gestión de residuos sólidos es posible diferenciar varias etapas. El modelo sostenible de gestión integrado de residuos desarrollado por Waste (2015), estudia la multidimensionalidad de los sistemas de residuos de manera integral. En él destaca la existencia de cuatro elementos mayores presentes en todos los sistemas de residuos: generación y separación, recolección,

transferencia y transporte y tratamiento y disposición. Beliën, De Boeck, y Van Ackere (2011) en su revisión de literatura exponen que el ciclo de gestión de residuos debe ser ejecutado eficientemente y que este va más allá de solo la recolección, ya que incluye el transporte, procesamiento, reciclaje, disposición y monitoreo. Aquí importantes decisiones deben ser tomadas, entre ellas, la apertura de una instalación, la asignación de vehículos a las instalaciones y el desarrollo eficiente de rutas. Guerrero, Maas, y Hogland (2013) condujeron un estudio en 22 países en desarrollo y analizaron los factores que influyen los sistemas de gestión de residuos urbanos, encontraron que las municipalidades buscan en los equipos el camino de solución a los problemas que enfrentan. Sin embargo, por ser un asunto multidimensional, las soluciones deben estar basadas en cuestiones ambientales, socioculturales y legales para crear un sistema realmente efectivo. Insisten en la importancia de contar con datos sobre la situación de las municipalidades para que los tomadores de decisiones puedan desarrollar estrategias adaptadas a las necesidades de sus habitantes.

El trabajo de grado que se planea desarrollar se enfoca particularmente en las etapas de recolección, transporte y transferencia. Por ello es preciso servirse de los aportes realizados por diferentes autores que durante varios años han estudiado la manera de aumentar la efectividad de los sistemas conformados por una flota de vehículos, un conjunto de puntos a visitar y múltiples instalaciones de servicios como es el caso de la operación de recolección de residuos sólidos urbanos.

Kek, Cheu, y Meng (2008) analizaron un problema de ruteo vehículos con asignación flexible a los depósitos mediante un caso de estudio en Singapur. Esto permite a los vehículos comenzar y terminar sus rutas en diferentes depósitos y realizar paradas intermedias en cualquiera de ellos durante el recorrido. Encontraron un ahorro hasta del 49,1% cuando los vehículos no están asignados a un solo depósito. Ramos, Gomes, y Barbosa-Póvoa (2014) analizaron un sistema de recolección selectiva de papel, vidrio, plástico y metal que son depositados en canecas especiales. Estos sistemas son comúnmente formados por depósitos o instalaciones que actúan como estaciones de transferencia y clasificación donde la flota de vehículos tiene su base. Encontraron en un caso de estudio en Portugal que el costo total disminuye un 13,3% cuando los vehículos no están asignados a una instalación y pueden servir a varias de ellas.

Con relación a las instalaciones mencionadas, Bovea, Powell, Gallardo, y Capuz-Rizo (2007) expresaron que cuando la distancia del área de recolección al área de disposición es grande, se puede usar una estación de transferencia para aumentar el volumen de los residuos para un transporte más eficiente mediante un camión más grande. En promedio el impacto del sistema de gestión de residuos puede ser reducido en 16,8%, medido por los costos ambientales derivados de las operaciones de transporte y aquellos referidos a la operación de la estación de transferencia en el caso de estudio de una provincia de Castellón en España. Chatzouridis y Komilis (2012) presentaron una metodología para el diseño de un sistema regional de gestión de residuos formado por nodos de producción de desperdicios (municipios), nodos intermedios (estaciones de transferencia) y nodos finales (rellenos sanitarios). Tomaron dos enfoques para la ubicación de estaciones de transferencia y encontró que es preferible ubicarlas tan cerca al centro de las municipalidades como sea posible. Vitorino de Souza Melaré, Montenegro, Faceli, y Casadei (2017) indicaron que las decisiones sobre estaciones de transferencia deben tomar en cuenta las expectativas de todos los implicados. En esta situación, técnicas multiobjetivo han sido aplicadas para minimizar conflictos con asuntos ambientales y económicos.

En el ámbito de la investigación de operaciones los autores consideran casos reales como fuente de datos, de los que se pueden extraer los distintos modelos de operación utilizados en diversas partes del mundo.

Kim, Kim, y Sahoo (2006) propusieron dos algoritmos para solucionar el problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo (VRPTV) para la recolección de residuos utilizando un caso real de Waste Management Inc, la empresa líder de este servicio en Norteamérica. Se considera un depósito, un área operacional, una flota de vehículos, un conjunto de paradas y varias instalaciones de disposición de desechos. Cuando un vehículo alcanza su capacidad máxima, debe ir a la instalación de disposición más cercana y puede realizar varios viajes durante el día. Así los vehículos parten del depósito, recolectan desechos en las paradas hasta que se llenan, descargan en la instalación de disposición, repiten la recolección y el descargue y finalmente regresan al depósito vacío. Cada parada tiene una ventana de tiempo que se refiere al momento más temprano y más tardío en el que la visita se puede realizar. Minh, Van Hoai, y Nguyet (2013) consideraron un problema de ruteo en el que los diferentes tipos de desechos no pueden ser recogidos y transportados en un mismo vehículo. Se incluyen ventanas de tiempo para cada

parada y la capacidad de los vehículos no puede ser excedida. Para minimizar el tiempo total de recorrido y el número de vehículos, propone el uso de un algoritmo memético (MA) con operador λ de intercambio.

Buhrkal, Larsen, y Ropke (2012) resolvieron el problema de ruteo con ventanas de tiempo con varias instancias utilizando un algoritmo (ALNS) mediante un caso de una empresa Danesa. Tomaron en cuenta periodos de descanso para los trabajadores, flota heterogénea, múltiples sitios de disposición y un conjunto de puntos a visitar.

Senarclens de Grancy (2015) trató un problema de decisión llamado ruteo de vehículos con ventanas de tiempo y múltiples trabajadores de servicios (VRPTWMS) en el que los clientes cercanos son agrupados y asignados a un lugar de estacionamiento y las entregas ocurren mediante un segundo modo de transporte que puede ser a pie. Para resolver el problema de los largos tiempos de servicio, varios trabajadores pueden ser asignados a cada vehículo para hacer las entregas de última milla. El método de solución está basado en la metaheurística ACO. Rabbani, Farrokhi-Asl, y Rafiei (2016) desarrollaron un algoritmo genético híbrido para la recolección de residuos por una flota de vehículos heterogénea con compartimientos separados para cada tipo de residuo. Los resultados experimentales mostraron que la metaheurística propuesta permite obtener soluciones satisfactorias.

Islam y Rahman (2012) consideraron un problema real en el que un conjunto de clientes debe ser visitado, un grupo de instalaciones donde los residuos pueden desecharse y un número infinito de vehículos dispuestos en un único depósito. Los clientes, las instalaciones y el depósito están asociados a unas ventanas de tiempo dentro de las cuales pueden ser servidos. Incluso se consideraron periodos de descanso para los conductores. Resolvieron el problema utilizando un algoritmo de Optimización de Colonia de Hormigas (ACO) y el objetivo es reducir la distancia total recorrida y el número de vehículos utilizados. Wy, Kim, y Kim (2013) tratan el problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo que involucra grandes contenedores de trasbordo rodado que acumulan desperdicios en sitios de construcción y distritos comerciales. Los tractores mueven un contenedor a la vez entre las ubicaciones de los clientes, el depósito, la instalación de disposición y los patios de almacenamiento de contenedores. El estudio propuso un enfoque

heurístico iterativo basado en la búsqueda de vecindarios que consiste de un algoritmo constructivo y varios algoritmos de mejoramiento.

Recientemente Ghiani, Laganà, Manni, Musmanno, y Vigo (2013) realizaron un estudio sobre cuestiones estratégicas y tácticas de la investigación de operaciones en la gestión de residuos sólidos y concluye que estos modelos pueden tratarse disociando el problema en sub-problemas parciales para ser optimizado. De esta manera los aspectos estratégicos pueden ser considerados en un horizonte de planeación de largo plazo mientras se modela el impacto de las decisiones tácticas en la solución estratégica obtenida en cada iteración. Bing et al., (2016) investigaron los desafíos que enfrenta la logística de gestión de residuos municipales al comparar algunas prácticas utilizadas en varios países de la Unión Europea. En sus resultados indicaron que esta gestión es un asunto multidimensional y varias cuestiones de diferentes niveles de decisión están interrelacionadas. Tomarlas separadamente puede conducir a soluciones subóptimas. Soluciones óptimas globales solo se obtienen usando un enfoque integrado que tome simultáneamente diferentes niveles de decisión.

Uno de los enfoques de la investigación de operaciones que combina las decisiones estratégicas y tácticas es el problema de Localización y Ruteo (LRP). Este permite, por ejemplo, dado un conjunto de instalaciones potenciales con costos de apertura, una flota de vehículos y un conjunto de puntos a visitar, decidir la ubicación de múltiples instalaciones mientras configura las rutas de los vehículos con mínimo costo total.

Más de cincuenta años han pasado desde que se introdujo por primera vez la idea de estudiar conjuntamente las decisiones de localización y ruteo. Boventer (1961) estableció el punto de partida de una importante línea de investigación. El trabajo de Maranzana (1964) resaltó que la ubicación de puntos de suministro que sirven a una red de clientes es con frecuencia influenciado por los costos de transporte. Salhi (1989) mostró que tomar los problemas de localización y ruteo separadamente, a menudo conduce a subóptimas soluciones. Min (1998) expuso que desde que los clientes a menudo exigen tiempos de servicio y plazos, los futuros estudios de LRP deben extenderse a considerar la presencia de ventanas de tiempo. En este sentido los artículos a seguir involucran el uso de ventanas de tiempo.

Durante los últimos años, se han desarrollado varios algoritmos para el LRP y sus variantes. Prodhon y Prins, (2014) realizaron una revisión de literatura con las variantes surgidas a partir de

este problema. Por ejemplo, LRP con vehículos sin capacidad, LRP con depósitos sin capacidad, LRP multiperiodo, LRP con inventario y truck y tráiler LRP. Koç, Bektaş, Jabali y Laporte (2016) trataron por primera vez lo que llamaron problema de localización y ruteo con tamaño de flota y ventanas de tiempo (FSMLRPTW). En este problema se consideró una flota de vehículos heterogénea con varias capacidades, un grupo de depósitos potenciales y un conjunto de clientes con una demanda y ventana de tiempo conocida. Desarrollaron un algoritmo híbrido de búsqueda evolutiva (HESA) y muestran que es altamente efectivo en este tipo de problemas. Los tiempos de ejecución son tales que puede ser usado en aplicaciones prácticas. Nasherakhani, Bashiri y Bagherinejad (2015) tomaron el caso de distribución de productos con tiempo de vida corto en el que la entrega debe hacerse en un intervalo de tiempo específico que de no cumplirse, podría afectar la satisfacción del cliente. La violación de las ventanas de tiempo reduce la demanda del cliente en el siguiente periodo.

Como el LRP clásico no maneja esta situación, se introdujo un nuevo modelo en el que minimiza los costos de pérdida de demanda durante todos los periodos. Formularon matemáticamente el problema y propusieron el desarrollo de un algoritmo heurístico como futuro estudio para resolver instancias mayores. Li-Ying y Yuan-Bin (2015) desarrollaron una heurística híbrida que incorpora una búsqueda de vecindad variable adaptativa (AVNS) con el algoritmo de búsqueda tabú para resolver el problema de localización de estaciones de carga y ruteo de vehículos eléctricos capacitados con ventanas de tiempo. Los resultados experimentales en instancias de prueba a pequeña escala demuestran que el algoritmo puede encontrar soluciones cercanas a las óptimas.

Adicionalmente, los resultados en casos a gran escala también mostraron la efectividad del algoritmo. Ponboon, Qureshi, y Taniguchi (2016) propusieron un algoritmo Branch and Price para resolver el problema de localización y ruteo con ventanas de tiempo (LRPTW). Este puede resolver varias instancias de prueba de manera efectiva en un tiempo aceptable. Posteriormente Çağrı Koç (2016) introdujo tres variantes del problema de localización y ruteo periódico (PLRP): el PLRP heterogéneo (HP), el PLRP heterogéneo con ventanas de tiempo (HPTW) y el PLRP homogéneo con ventanas de tiempo (PTW). Desarrolló una metaheurística de búsqueda de vecindario unificado adaptable (U-ALNS) y los experimentos computacionales con varias instancias mostraron que el algoritmo supera los métodos anteriores y es altamente efectivo con

PLRP ya que es capaz de manejar un horizonte multiperiodo, la composición de la flota y las decisiones de localización.

Las variantes del LRPTW no se han desarrollado en el contexto de la recolección de residuos sólidos urbanos, sin embargo, el LRP sí. Asefi, Lim, y Maghrebi (2015) tomaron un caso real de Australia y formulan y resuelven un problema matemático de localización y ruteo dirigido a minimizar el costo de transporte y de apertura de instalaciones entre las que se incluyen estaciones de transferencias, centros de reciclaje, estaciones de tratamiento y centros de disposición, considerando varios tipos de desperdicios. No obstante, el problema no puede ser resuelto de forma eficiente por métodos exactos en una instancia de gran escala y por ello recomendaron el desarrollo de un método heurístico. Ghezavati (2015) utilizó un modelo multiobjetivo para resolver un caso real de una zona económica especial petroquímica localizada en Irán. Las decisiones se refieren a las ubicaciones de los centros de disposición, reciclaje y tratamiento, así como las rutas para transportar los diferentes tipos de residuos industriales. Minimiza los costos totales y los riesgos de la población a la exposición a lo largo de las rutas y alrededor de los centros de tratamiento y disposición. El modelo fue resuelto mediante el software Lingo y durante la optimización el sistema se mejoró al considerar el nivel de satisfacción difuso del cliente. Rabbani, et al. (2016) resolvieron un LRP biobjetivo mediante un algoritmo genético de clasificación no dominado (NSGA-II) con objetivos económicos y sociales mediante la aplicación en el problema de recolección de residuos. Los resultados experimentales mostraron que el algoritmo propuesto NSGA-II superó todos los métodos de descomposición existentes, aunque sus tiempos de cálculo sean mayores.

Como se observa en la relación anterior, es posible encontrar en la literatura artículos que refieren al LRP para el problema de recolección de residuos. En ellos, las formulaciones matemáticas se basan en modelos multiobjetivos donde generalmente se desea minimizar el costo total y el riesgo causado por las decisiones de operación. El LRPTW también ha sido objeto de estudio incluyendo algunas variantes, sin embargo, no se han encontrado estudios específicos relacionados con casos de recolección de residuos sólidos urbanos. Este trabajo de grado busca ampliar el análisis del LRPTW en el contexto de la recolección de residuos sólidos municipales en un caso que no ha sido previamente estudiado.

5. Marco Teórico

5.1 Glosario

Para obtener una comprensión exitosa del presente documento, se incluyen definiciones de palabras que pertenecen al lenguaje técnico usado por la empresa, tomada de la reglamentación vigente. (DECRETO 2981, 2013)

- **Aforo:** Es el resultado de las mediciones puntuales, que realiza un aforador debidamente autorizado por la organización prestadora, respecto de la cantidad de residuos sólidos que produce y presenta un usuario de manera individual o conjunta al prestador del servicio de aseo.
- **Contenedor soterrado:** Están destinados a la recogida de residuos sólidos urbanos, la basura queda bajo tierra enterrando el contenedor que tradicionalmente estaba a la vista, quedando este oculto bajo una tapa con el mismo acabado que la acera. (Waste Solutions, 2013)
- **Estación de transferencia:** Son las instalaciones destinadas al traslado de residuos sólidos de un vehículo recolector a otro con mayor capacidad, que se encarga de transportarlos hasta su sitio de tratamiento o disposición final.
- **Motocarro:** Es un vehículo compuesto por tres ruedas y motor, especialmente utilizado para transportar cargas ligeras. (REAL ACADÉMIA ESPAÑOLA, 2013)
- **Plan de gestión integral de residuos sólidos (PGIRS):** Instrumento de planeación municipal o regional que contiene un conjunto ordenado de objetivos, metas, programas, proyectos, actividades y recursos definidos por uno o más entes territoriales para el manejo de los residuos sólidos, basado en la política de gestión integral de los mismos, el cual se ejecutará durante un período determinado, basándose en un diagnóstico inicial, en su proyección hacia el futuro y en un plan financiero viable que permita garantizar el mejoramiento continuo del manejo de residuos y la prestación del servicio de aseo a nivel municipal o regional, evaluado a través de la medición de resultados.
- **Residuo sólido:** Es cualquier objeto, material o elemento resultante del consumo o uso de un bien en actividades domésticas, industriales, comerciales, institucionales o de servicios, que el generador presenta para su recolección por parte de la empresa prestadora del servicio público de aseo. También se considera como residuos sólidos

aquellos provenientes del barrido y limpieza de áreas y vías públicas, corte de césped y poda de árboles.

- **Ruta:** Es la división geográfica de una ciudad, zona o área de prestación del servicio para la distribución de los recursos y equipos a fin de optimizar la actividad de recolección de residuos, barrido y limpieza de vías y áreas públicas y/o corte de césped y poda de árboles ubicados en las vías y áreas públicas.
- **Servicio público de aseo:** Es el servicio de recolección municipal de residuos, principalmente sólidos. También las actividades complementarias de transporte, tratamiento, aprovechamiento y disposición final de tales residuos, incluyendo las actividades complementarias de corte de césped y poda de árboles ubicados en las vías y áreas públicas.
- **Transferencia:** Es la actividad realizada al interior de una estación de transferencia y consiste en trasladar los residuos sólidos de un vehículo recolector de menor capacidad a un vehículo de transporte a granel, con una mínima exposición al aire libre de los residuos, el cual se encarga de transportarlos hasta el sitio de tratamiento o disposición final.
- **Usuario:** Es la persona natural o jurídica que se beneficia con la prestación de un servicio público, bien sea como propietario del inmueble en donde este se presta o como receptor directo del servicio. También es denominado como consumidor.
- **Vehículo recolector:** Es el vehículo de transporte a granel utilizado en las actividades de recolección de los residuos sólidos desde algunos de los lugares de presentación o estaciones de transferencia y su transporte hasta las estaciones de clasificación y aprovechamiento o hasta el sitio de disposición final.
- **Vehículo Satélite:** Vehículo de baja capacidad utilizados en zonas de gran dificultad de acceso, especialmente en centros urbanísticos.

5.2 Normatividad ambiental

En el estado colombiano la norma que reglamenta la prestación del servicio público de aseo es el Decreto 2981 de 2013. El cual aplica, al servicio público de aseo que trata la Ley 142 de 1994,

a las personas prestadoras de residuos aprovechables y no aprovechables, a los usuarios, a la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, a la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico, a las entidades territoriales y demás entidades con funciones sobre este servicio.

En el Capítulo I del Título II del Decreto 2981 de 2013 se mencionan las actividades del servicio público de aseo, de las cuales la recolección, transporte y transferencia son las que le competen a este proyecto.

El Capítulo III del Título II, especifica las condiciones de recolección y transporte de los residuos sólidos. Aquí se mencionan aspectos de gran importancia como propiciar una recolección que minimice los impactos, especialmente el ruido. Adquirir equipos y mecanismos de recolección suficientes que garanticen la suplencia en caso de averías, debido a que este servicio no podrá ser interrumpido por fallas mecánicas. También se menciona que cuando existan restricciones para el ingreso de los vehículos recolectores en zonas de difícil acceso, el prestador del servicio de aseo podrá utilizar vehículos con características distintas a las generales para la recolección y posterior transbordo al vehículo recolector asignado a la respectiva microrruta.

En la actividad de trasbordo se deberá evitar las afectaciones sanitarias por derrame y esparcimiento de residuos sólidos y líquidos. Los sitios de trasbordo de residuos estarán ubicados en zonas donde no se genere afectación sobre la comunidad y su entorno; teniendo en cuenta la clasificación por sectores para los estándares máximos establecidos en las normas vigentes, los cuales deben ser zonas alejadas de hospitales, bibliotecas, hogares geriátricos, guarderías, zonas residenciales o exclusivamente destinadas para desarrollo habitacional, hotelería y hospedajes. Al hacer el trasbordo, el compactador debe accionarse solo cuando sea estrictamente necesario, minimizando así la generación de ruido.

El Capítulo VII del Título II, habla de las condiciones idóneas para el funcionamiento de las estaciones de transferencia. Estas estaciones deben ser previamente evaluadas por las personas encargadas de prestar el servicio de aseo, esta evaluación debe basarse en la necesidad de una solución de costo mínimo, con el objetivo de incrementar eficiencia al optimizar costos de recolección racionalizando los recursos económicos, energéticos, con el fin de coadyuvar al logro de una mayor productividad de la mano de obra y del equipo utilizado. De igual forma Los

municipios o distritos deberán definir las áreas donde es posible la localización y el funcionamiento de estaciones de transferencia de residuos sólidos de conformidad con los usos del suelo previstos en las normas de ordenamiento territorial. En el momento que se decida implementar la estación de transferencia la persona prestadora del servicio deberá realizar los estudios que incluyan la evaluación económica, técnica operativa, jurídica, comercial, financiera, institucional, sociocultural y de riesgos cumpliendo con la reglamentación técnica vigente para el sector, obteniendo las autorizaciones ambientales pertinentes al caso. La transferencia debe garantizar que los residuos se puedan transportar en la jornada laboral sin permitir que se acumulen y se generen focos de contaminación y perturbación del bienestar ciudadano.

Así mismo el Capítulo VII enuncia las características generales que deben adoptar los vehículos de transferencia para transporte de residuos sólidos entre las cuales podemos destacar las siguientes:

1. Ser motorizados, y estar claramente identificados (color, logotipos, placa de identificación, iconos informativos, entre otras características).
2. Estar provistos de equipo de comunicaciones, el cual se utilizará para la logística y coordinación con las otras actividades del servicio.
3. Podrán o no tener incorporados elementos de compactación de los residuos, lo cual dependerá de las condiciones operativas, la capacidad de la unidad de almacenamiento, las restricciones viales, las condiciones del cargue y descargue de los residuos y la naturaleza física y química de los mismos.
4. Cumplir con las normas vigentes para emisiones atmosféricas y ajustarse a los requerimientos de tránsito.
5. Las unidades de almacenamiento de los vehículos deberán ser estancos y permitir su cierre o cubierta, de manera que impidan la fuga y descarga en la vía pública de los líquidos (lixiviados) durante el transporte, evitar el arrastre y la dispersión de residuos, de material particulado y de olores, y deben contar con un dispositivo automático que permita una rápida acción de descarga en el sistema de disposición final.

6. Posibilitar el cargue y el descargue de los residuos sólidos almacenados de forma tal que se evite la dispersión de estos y la emisión de partículas.

7. Estar cubiertos durante el transporte, de manera que se reduzca el contacto con la lluvia y el viento y, se evite el esparcimiento y el impacto negativo visual y estético.

8. Las especificaciones de los vehículos deberán corresponder a la capacidad y dimensión de las vías públicas.

9. Cumplir con las especificaciones técnicas existentes para no afectar la salud ocupacional de los conductores y operarios.

10. Estar dotados con los equipos de carretera y de atención de incendios.

11. Estar dotados de dispositivos de control de ruido.

En el Título III se hace referencia a la gestión integral de residuos sólidos y para ello hace mención al plan para la gestión integral de residuos sólidos el cual indica que los municipios y distritos, deberán elaborar, implementar y mantener actualizado un plan municipal o distrital para la gestión integral de residuos o desechos sólidos en el ámbito local y/o regional según el caso, en el marco de la gestión integral de los residuos, el presente decreto y la metodología para la elaboración de los PGIRS.

El plan de gestión integral de residuos sólidos de Bucaramanga (2016-2027) describe en primera instancia la situación actual de manejo de residuos sólidos en la ciudad. Se identifican los principales problemas y se formulan objetivos con sus respectivos proyectos para solucionar la problemática actual. Se describe que la ciudad actualmente no cuenta con estaciones de transferencia instaladas por ninguna de las empresas prestadoras del servicio público de aseo y propone articular las actividades del PGIRS con el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) para cambiar el uso del suelo que permita ubicar en el casco urbano, estaciones de clasificación y aprovechamiento de residuos, similares a las estaciones de transferencia propuestas en este proyecto.

El decreto 2981 de 2013 también hace mención al Plan de Ordenamiento Territorial (POT), el cual enuncia que las empresas de aseo que presten el servicio en el municipio de Bucaramanga deberán establecer medidas tendientes a la incorporación del sistema de separación de los

residuos en la fuente; así como el desarrollo de campañas dirigidas a crear una cultura de adecuada convivencia con el medio ambiente urbano. Dichos desarrollos los deben realizar racionalizando y optimizando las rutas de recolección de basuras que presentan deficiencias en la recolección por sitios de difícil acceso, así como la ampliación del perímetro de cubrimiento del servicio que permita integrar al Plan Maestro de Aseo las nuevas zonas de desarrollo definidas en el Plan de Ordenamiento Municipal y Metropolitano al Plan Maestro de Aseo.

5.3 Optimización Combinatoria

La optimización combinatoria es una rama de la optimización con aspectos comunes de matemática aplicada, ciencias de la computación e investigación operativa que trata problemas cuyas soluciones son discretas. Puede definirse como el proceso de diseñar e implementar algoritmos para resolver una gran variedad de problemas de optimización. La combinatoria consiste en encontrar la mejor solución (óptima) de entre un conjunto finito de soluciones alternativas. Esta disciplina tiene numerosas aplicaciones en ámbitos como las ciencias, la ingeniería, la industrial, la logística, etc.

5.3.1 Problemas de optimización combinatoria. El problema de optimización combinatoria consiste en encontrar un objetivo entre un conjunto finito de posibilidades. Este objeto suele ser un número natural, una permutación o una estructura de grafo. Los problemas combinatorios presentan como particularidad que siempre existe un algoritmo exacto que permite obtener la solución óptima. Este método consiste en la exploración de forma exhaustiva del conjunto de soluciones. (Navarro, 2008, p2).

Blum y Roli (2003) definen, un problema de optimización combinatoria como $COP = (F, f)$, utilizando los siguientes conceptos.

- Un conjunto de variables $X = \{x_1, \dots, x_n\}$;
- Dominios de las variables D_1, \dots, D_n ;
- Una función objetivo $f: D_1 \times \dots \times D_n \rightarrow \mathbb{R}^+$;
- Un conjunto de restricciones entre las variables;

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, $F = \{s =$

$\{(x_1, u_1), \dots, (x_n, u_n)\}$ con $u_i \in D_i, i=1, \dots, n$ tal que s satisface todas las restricciones del problema}.

La función objetivo transforma los vectores de decisión (s) desde el espacio de búsqueda hacia un espacio objetivo $Z \in \mathbb{R}$. De esta forma, dado un problema de minimización, el objetivo es encontrar aquella solución $s' \in F$ tal que $f(s') \leq f(s), \forall s \in F$. La solución s' se denomina óptimo global del COP.

5.3.2 Complejidad computacional o algorítmica. La optimización computacional incluye las disciplinas de investigación operativa para modelar el sistema, matemáticas para formular el modelo, ciencias de la computación para el diseño y análisis de algoritmos e ingeniería del software para implementar el modelo. Matemáticamente, los problemas pueden caracterizarse atendiendo a la dificultad que entraña su resolución por un ordenador. (Duarte, Pantrigo y Gallego, 2007)

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).

Se han definido varias clases de problemas entre las cuales se destacan las siguientes:

- **Clase P:** está formada por problemas de decisión que pueden ser resueltos mediante algunos algoritmos en un número de pasos acotado por un polinomio fijo en función del tamaño de la entrada.
- **Clase NP:** incluye a todos los problemas de decisión cuyas soluciones pueden ser verificadas en un tiempo polinómico dada la información correcta o lo que es lo mismo, pueden ser encontradas en tiempo polinómico haciendo uso de una máquina de Turing no determinista.
- **Clase NP-completos:** son los problemas NP más difíciles, debido a que es menos probable que pertenezcan a la clase P, debido a su dificultad por encontrar una forma de resolver el problema rápidamente (en un tiempo polinómico).
- **Clase NP-hard:** se caracterizan porque si se resuelve un problema en un tiempo polinómico permite resolver todos los problemas de la clase NP en un tiempo polinómico. (Navarro, 2008).

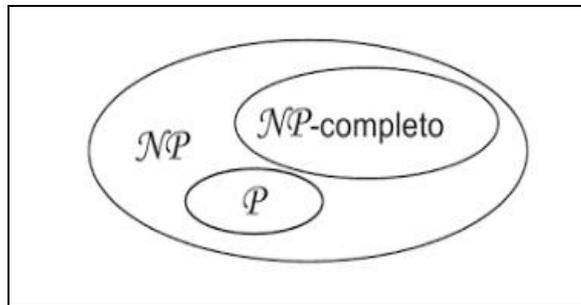


Figura 3. Relación entre los problemas P y NP. Adaptado de Navarro, R. B. (2008). Meta-Heurísticas híbridas para optimización mono-objetivo y multi-objetivo. Paralelización y aplicaciones (Vol. 241). Universidad Almería.

5.3.3 Problema de Localización-Ruteo. Tradicionalmente la ubicación de instalaciones y el enrutamiento de vehículos han sido temas que se han tratado y tomado decisiones por separado. Por su poca practicidad se afirma que no es conveniente combinar estos problemas gracias a su dificultad en realizar sus cálculos juntos, sin embargo, se ha demostrado que al trabajar el problema de manera conjunta como un problema de localización-ruteo se reducen los costos a largo plazo y proporciona altos beneficios tanto a los operadores como a la comunidad (Ponboon, Qureshi y Taniguchi, 2016b). La idea del LRP tuvo sus comienzos en los años 60's donde se resaltó la interdependencia de estos dos problemas.

Generalmente los vehículos salen de un depósito ya establecido y visitan a sus clientes en algún orden, regresando nuevamente al depósito inicial. El objetivo es optimizar tanto las rutas, como la ubicación espacial de los depósitos, minimizando el costo de las rutas, resolviendo ambos problemas simultáneamente (Capelle, 2012). El LRP se define como un problema determinístico, estático, discreto, de un solo período, solución exacta, minimización de costos, ubicación discreta, depósitos múltiples, flota homogénea y estructura depósito-cliente-depósito. El problema LRP se caracteriza por contar con un grupo de clientes con sus respectivas demandas distinguidas, un grupo potencial de ubicación para los depósitos, costos fijos de operación, conocimiento del número de vehículos, largo de las rutas y su duración, los clientes se visitan una sola vez por un vehículo. Para que se tome en cuenta un problema LRP debe tener dos sub-problemas concretos: problema de localización (FLP, por sus siglas en inglés) y el problema de ruteo (VRP, por sus siglas en inglés), los cuales deben estar interrelacionados y debe tener en cuenta la planificación de rutas, es decir, que contemple múltiples paradas en la ruta.

Los problemas de localización-ruteo están claramente tanto en el problema clásico de localización como en el problema de enrutamiento de vehículos. De hecho, ambos problemas pueden ser vistos como casos especiales del LRP. Si se define que todos los clientes estén directamente conectados al depósito, el LRP se convierte en un problema de ubicación estándar. Si, por otro lado, se determina la localización del depósito, el LRP se reduce a un VRP. Desde un punto de vista práctico, la localización-ruteo forma parte de la gestión de la distribución, mientras que, desde un punto de vista matemático, suele modelarse como un problema de optimización combinatorio. Se conoce que este es un problema NP-hard, ya que abarca dos de tipo NP-hard (ubicación de la instalación y ruteo de vehículos) (Nagy y Salhi, 2006).

5.3.3.1 Clasificación de los LRP. La literatura contempla varias clasificaciones para el LRP, en este caso se menciona su clasificación según la perspectiva del problema propuesto por (Min et al. 1998).

Tabla 2.

Clasificación del LRP según la perspectiva del problema.

Nivel jerárquico	Una etapa Dos etapas
Naturaleza de la demanda	Determinística Estocástica
Número de instalaciones	Instalación única Instalación múltiple
Tamaño de la flota de vehículos	Un solo vehículo Múltiples vehículos
Capacidad de los vehículos	Sin restricciones de capacidad Con restricciones de capacidad (capacitado)
Capacidad de las instalaciones	Sin restricciones de capacidad Con restricciones de capacidad (capacitado)
Capa de instalación	Primaria Secundaria
Horizonte de planeación	Un solo periodo Múltiples periodos
Restricciones de tiempo	Tiempo no especificado sin un plazo Ventanas de tiempo suaves con plazos libres Ventanas de tiempo duras con plazos estrictos
Función objetivo	Único objetivo Múltiples objetivos

Tabla 2. (Continuación)

Tipo de datos del modelo	Hipotético Mundo real
--------------------------	--------------------------

Nota: Adaptado de Farahani, R. Z., y Hekmatfar, M. Facility location: concepts, models, algorithms and case studies. 2009. Physica-Verlag, Heidelberg.

5.3.3.2 LRP con ventanas de tiempo. La creciente competencia empresarial y la crisis financiera requieren un reajuste en las decisiones estratégicas de logística que ahora deben incluir la consideración de las principales cuestiones tácticas logísticas. Por lo tanto, es más importante para las distribuciones de logística mantener la eficiencia, mientras que las calidades de servicio, tales como las ventanas de tiempo se satisfacen. Es por eso que las ventanas de tiempo son ahora casi esenciales en diferentes negocios, tales como entregas bancarias, entregas postales, recolección de basura industrial, enrutamiento y programación de autobuses escolares, o el comercio electrónico moderno (Ponboon, Qureshi y Taniguchi, 2016c).

El problema se define en un gráfico completo $G = (V, A)$, donde el conjunto de nodos $V = V^d \cup V^f \cup V^c$ consta de un depósito $V^d = \{0\}$, m sitios de eliminación $V^f = \{1, \dots, m\}$, n clientes $V^c = \{m+1, \dots, m+n\}$ $\{v_0, v_1, \dots, v_n\}$ y $A = \{(i, j) \mid i, j \in V, i \neq j\}$ es el conjunto de arco. Siendo $K = \{1, \dots, k\}$ ser el conjunto de vehículos y ser t_{ij} y c_{ij} el tiempo de viaje y el costo asociado respectivamente a un arco (i, j) . Cada nodo $i \in V$ tiene un tiempo de servicio asociado s_i y una ventana de tiempo $[a_i, b_i]$ y define q_i como la cantidad recogida en un cliente $i \in V^c$. se asume que todos los vehículos poseen una capacidad C . (Buhrkal et al., 2012). La función objetivo minimiza la suma de costos de depósito y de transporte.

La ventana de tiempo requiere que los servicios se entreguen al cliente dentro del período deseado. Si un vehículo llega temprano, inducirá en el tiempo de espera y probablemente incurrirá en costos de estacionamiento. Si un vehículo llega retrasado, disminuye la satisfacción del cliente, incluso acaba el contrato en el peor de los casos. Estos costos adicionales de llegada temprana y demora se llaman los costos de penalización. En el caso de la ventana de tiempo dura, la llegada tardía está estrictamente prohibida, configurando el costo de penalización igual a infinito, mientras que la llegada temprana se permite sin cargo adicional (Ponboon et al., 2016c)

5.3.3.3 Método de Solución para los LRP. El problema LRP combina dos problemas NP-hard y es por ello que posee un número reducido de publicaciones en métodos de solución, sin embargo, se considera un problema de clase optimización combinatoria, que se resuelve mediante métodos exactos y aproximados. De ellos se puede resaltar algunos métodos que se han tratado últimamente como los métodos híbridos, los cuales combinan dos o más métodos para aprovechar sus características y beneficios de cada uno y obtener mejores resultados.

Los métodos exactos se posicionan como uno de los mejores métodos de solución. Estos algoritmos definen estados del sistema, los cuales se van actualizando a medida que recorren el conjunto de rutas factibles. Las rutas se comparan y se establece un criterio para identificar cuales sub-rutas son mejores que otras. Con esto, se puede establecer que estados son mejores que otros y por lo tanto las rutas dominadas son eliminadas, finalmente el algoritmo termina con la solución óptima (Capelle, 2012). En cuanto a los métodos aproximados se puede afirmar que encuentran soluciones cercanas al óptimo en tiempos de computación razonables aproximando los problemas y sus soluciones a instancias más reales.

La metaheurística propuesta para solucionar el problema de localización-ruteo con ventanas de tiempo es un algoritmo memético (MA), el cual trabaja con problemas de clase computacional NP-hard. Gran parte del éxito de este algoritmo se debe a que se basa en la propiedad de convexidad global en el espacio de búsqueda. La combinación de algoritmos evolutivos con la búsqueda local fue nombrada "Algoritmo Memético". Este tipo de algoritmo puede satisfacer las necesidades propias de un problema de logística gracias a su solidez, ya que combinan la adaptación evolutiva de una población con aprendizaje individual dentro de las vidas de sus miembros (Knowles y Corne, 2000).

5.3.4 Métodos de Solución. Para la solución del problema de localización y ruteo se puede mencionar dos enfoques de metodología de optimización los cuales pueden clasificar en métodos exactos y aproximados o heurísticos.

5.3.4.1 Métodos Exactos. Se puede definir como “aquellos que parten de una formulación como modelos de programación lineal (enteros) o similares, y llegan a una solución factible (entera) gracias a algoritmos de acotamiento del conjunto de soluciones factibles”. (Lüer, Benavente, Bustos y Venegas, 2009). Estos proporcionan una solución óptima del problema.

5.3.4.2 Algoritmos Aproximados. Son técnicas no exhaustivas que representan cada solución por medio de un individuo, que simboliza un punto de búsqueda dentro de un espacio en un conjunto de soluciones potenciales de un problema. Estos individuos poseen un valor de bondad, determinado por el valor tomado sobre dicho individuo una función objetivo (Molina, 2007).

5.3.4.2.1 Métodos Heurísticos. Se define como “un algoritmo que permite obtener soluciones de buena calidad para un problema dado. Esto permite tener menores tiempos de ejecución, pero sin asegurar la optimalidad de la solución.” (L?er et al., 2009, p4).

5.3.4.2.2 Metaheurísticos. Las metaheurísticas son técnicas poderosas aplicables a un gran número de problemas. Se refiere a una estrategia maestra iterativa que guía y modifica las operaciones de heurísticas subordinadas al combinar diferentes conceptos para explorar y explotar el espacio de búsqueda. La metaheurística puede manipular una completa, incompleta o una colección de soluciones con cada iteración. (El-Sherbeny, 2010).

Tienen un rol fundamental aplicados a problemas de optimización combinatoria ya que aporta un resultado más cercano al óptimo. Se caracterizan por brindar suficiente libertad a quien la implemente, por medio de la posibilidad de trabajar con distintos parámetros, adición de heurísticas, etc. También logra un rendimiento consistente y estable en los problemas de la clase que resuelve. Se consolida como un algoritmo global el cual permite escapar de óptimos locales y permitiendo perturbar la solución actual y generar otras basadas en las anteriores. (Lüer et al., 2009). Las metaheurísticas se clasifican en algoritmos basados en métodos constructivos, en trayectorias y en población.

- Las metaheurísticas basadas en métodos constructivos parten de una solución inicial vacía y se agregan componentes hasta construir una solución. Un ejemplo de estas son algoritmos de optimización basada en colonias de hormigas y procedimiento de búsqueda miope aleatorizado (GRASP).
- Las metaheurísticas basadas en trayectorias son aquellos algoritmos de búsqueda local que siguen una trayectoria en el espacio de búsqueda y parten de una solución inicial e iterativamente tratan de reemplazar por otra solución con mejor calidad. Algunos ejemplos son algoritmos de Búsqueda local, Recocido Simulado, Búsqueda tabú y Búsqueda local iterativa.

- Las metaheurísticas basadas en poblaciones se caracterizan porque su proceso considera múltiples puntos de búsqueda en el espacio que evolucionan en paralelo. Algoritmos que se acoplan a esta definición son los Algoritmos Genéticos, Búsqueda Dispersa y Optimización basada en Cúmulos de Partículas (PSO). (Herrera, 2006)

5.3.4.2.3 Métodos Híbridos. Los algoritmos híbridos metaheurísticos son aquellos que combinan los mejor de otros métodos heurísticos o metaheurísticos con el fin de obtener lo mejor de ellos. Otra forma de hibridación de algoritmos consiste en sistemas que se etiquetan como búsqueda cooperativa, los cuales consisten en varios algoritmos que intercambian información. Una de las formas más populares de hibridación es la combinación de metaheurísticas basadas en trayectoria con métodos basados en población. (Christianblum y Roli, 2003).

5.3.4.3 Computación Evolutiva. A lo largo de los años las diferentes especies se han adaptado para poder sobrevivir a un medio cambiante. Es de esta forma como se puede pensar en tener una población de potenciales soluciones a un problema de las cuales se irán seleccionado las mejores hasta que se adapten a la perfección al medio, en este caso el problema a resolver. En términos generales se puede hablar de la computación evolutiva como una familia de modelos computacionales inspirados en la evolución. De igual forma se refiere al estudio de los fundamentos y aplicaciones de algunas técnicas heurísticas basadas en los principios de la evolución natural (Gestal, 2009).

Las técnicas de computación evolutiva trabajan sobre una población compuesta por un conjunto de soluciones candidatas, estas soluciones interactúan entre sí, siguiendo los principios darwinianos de la evolución naturales. Las soluciones se evalúan mediante una función de adecuación que toma en cuenta el problema a resolver.

Las técnicas de computación evolutiva en general son mecanismo de resolución de problemas de optimización combinatoria y problemas análogos en otras áreas de aplicación (Nesmachnow, 2004).

5.3.4.3.1 Programación evolutiva. Fogel, Owens y Walsh como se citó en (Nesmachnow, 2004) afirman que las técnicas de programación evolutiva fueron propuestas en 1966 como un método para evolucionar comportamientos de autómatas de estado finito utilizados para la predicción de series temporales. En este tema los individuos, conocidos aquí como organismos,

son máquinas de estado finito. Los organismos que mejor resuelven alguna de las funciones objetivo tienen la oportunidad de reproducirse. Antes de producirse los cruces para generar la descendencia se aplica el operador de mutación sobre los padres. (Gestal, 2009)

5.3.5 Algoritmo Memético. Los algoritmos meméticos (MA) son técnicas de optimización basadas en la combinación sinérgica de las ideas tomadas de otra metaheurístico, como la búsqueda basada en poblaciones (en algoritmos evolutivos), y la búsqueda local (las técnicas de seguimiento de gradiente), (Moscato y Cotta, 2003, p1) obteniendo las ventajas de ambos compensando al mismo tiempo las insuficiencias individuales de cada uno. Debemos tener en cuenta algunos aspectos claves en esta definición:

- Se utiliza el concepto de agentes en lugar de individuos debido a que se considera a los primeros una extensión de los segundos.
- Permite la hibridación con todo algoritmo evolutivo y proceso de búsqueda local.
- Tanto la selección como el reemplazo (competición) son procesos puramente competitivos.
- La reproducción es la encargada de crear nuevos agentes (mediante cooperación de los individuos existentes). Como operadores de reproducción se tienen principalmente dos: Recombinación y Mutación (Molina, 2007).

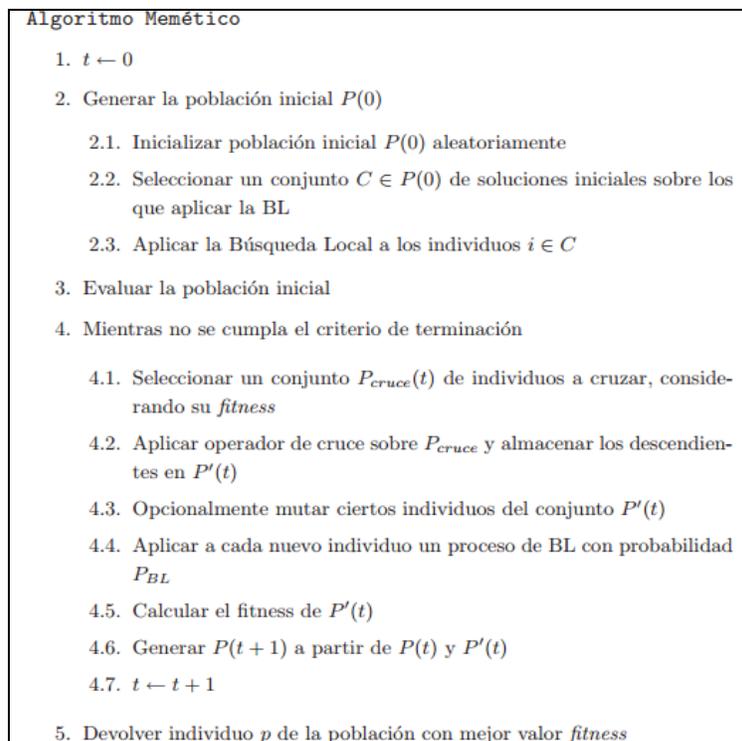


Figura 4. Esquema de un MA. Adaptado de Herrera, F. (2006). Introducción a los algoritmos metaheurísticos. Ciencias de la Computación e IA.

Cuando se considera la población de agentes en un conjunto, esta interacción puede ser estructurada en una sucesión de grandes pasos temporales denominados generaciones. Cada generación consiste en la actualización de la población de agentes obteniendo una nueva población mediante la recombinación de las características de algunos agentes seleccionados. Este componente de selección es el responsable de forzar la competencia entre agentes, junto con el paso final de actualización.

El reemplazo o la actualización inciden en el aspecto competitivo, ocupándose de limitar el tamaño de la población, es decir, eliminar ciertos agentes para permitir la entrada de otros nuevos y enfocarse en la tarea de búsqueda. Los operadores de selección y de reemplazo son procesos netamente competitivos en los que varía la distribución de agentes existentes, lo cual es responsabilidad de la fase de reproducción. La recombinación es responsable de llevar a cabo los procesos de cooperación entre agentes, esta tiene lugar mediante la construcción de nuevos agentes utilizando información extraída del grupo de agentes recombinados. La función del operador de mutación es ser el responsable de la inclusión de información externa no contenida en ninguno de los agentes involucrados.

Este operador generara un nuevo agente por medio de la modificación parcial de un agente existente. En relación con los operadores de mutación, es posible definir un meta-operador basado en la aplicación iterativa de un operador de mutación arbitrario sobre un agente. Concretamente, dichos meta operadores iteran la aplicación del operador de mutación, conservando los cambios que llevan a una mejora en la bondad del agente, por lo cual son denominados optimizadores locales.

Estos optimizadores locales pueden considerarse como un operador más, y como tales pueden emplearse en diferentes fases de la reproducción. En cualquier caso, es la existencia de estos optimizadores individuales la que justifica el empleo de la denominación ‘agente’ ya que el algoritmo puede caracterizarse como una colección de agentes que realizan exploraciones autónomas del espacio de búsqueda, cooperando a través de la recombinación, y compitiendo continuamente por los recursos computacionales a través de la selección y el reemplazo.

La generación de la población inicial puede acometerse de diferentes formas, como ejemplo mencionar la creación de agentes al azar, utilizar las soluciones proporcionadas por heurísticas existentes o emplear optimizadores locales que pueden generar opciones más satisfactorias.

Cuando se aborda el diseño de un MA efectivo para cierto problema, se parte de la base de que no existe procedimiento sistemático para ese fin, por eso se implica que únicamente pueden considerarse heurísticas de diseño. De igual forma se destaca que la filosofía del MA es muy flexible y siempre se orientan a incorporación de nuevas ideas tomadas de otras metaheurísticas.

Cuadro 1: Comparativa de algunos de los aspectos más distintivos de los GA y los MA.	
GA	
<i>codificación</i>	esquemas, cadenas lineales, alfabetos predefinidos
<i>individuo</i>	solución al problema
<i>cruce</i>	intercambio no-guiado de información
<i>mutación</i>	introducción aleatoria de nueva información
MA	
<i>representación</i>	formas, no-linealidad, cercanía al problema
<i>agente</i>	solución/ones al problema + mecanismo mejora local
<i>recombinación</i>	intercambio guiado de información
<i>mutación</i>	introducción sensible de nueva información
<i>mejora local</i>	aprendizaje lamarckiano

Figura 5. Cuadro comparativo de algunos de los aspectos de los aspectos más distintivos de los GA y los MA. Adaptado de Moscato, P., & Cotta, C. (2003). Una Introducción a los Algoritmos Meméticos. Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial, 19(19), 131–148.

La optimización combinatoria es el campo que más aplicaciones tiene para los MA, esto gracias a que se considera que existen miles de problemas de optimización pertenecientes a la clase NP, donde los MA se han mostrado de gran ayuda. Algunos de las aplicaciones más destacadas que reflejan la popularidad de esta metodología son el problema de particionado en grafos, partición de números, conjuntos independientes de cardinalidad máxima, empaquetado, recubrimiento de conjuntos, planificación de tareas en varias máquinas, problema de mochila multidimensional, programación entera no lineal, y muy especialmente el problema del viajante de comercio (Moscato y Cotta, 2003).

6. Propuesta Innovadora de Elementos Claves para el Desarrollo del Proceso

El objetivo principal del proceso de transferencia es liberar la carga de los motocarros para que estos puedan continuar con su recorrido sin tener que desplazarse hasta el relleno sanitario “El Carrasco”, pues resulta más económico transportar mayores cantidades de residuos hasta su sitio de disposición final mediante los camiones compactadores. Actualmente, las transferencias son realizadas mediante el trasbordo de los residuos desde los motocarros, que deben viajar hasta el perímetro del centro, hacia los camiones compactadores, que se encuentran realizando sus recorridos propios y no pueden ingresar al centro de la ciudad. Al no establecer un conjunto de lugares fijos, el trasbordo de residuos se da en 40 sitios diferentes como fue identificado en la caracterización del proceso de recolección de residuos realizada por Díaz y Uribe (2016). Esta situación causa que, del tiempo total de la transferencia, el 42% esté representado por el viaje hasta el punto de encuentro, el 27% a la espera por el servicio y el 31% sea efectivamente el trasbordo de los residuos, sin mencionar las complicaciones que acarrea en materia de congestión vehicular, contaminación ambiental y deterioro de la imagen de la EMAB ante la ciudadanía al no ser lugares estrictamente autorizados.

En la literatura relacionada con sistemas de recolección de residuos sólidos urbanos, se mencionan estaciones de transferencia o sitios de disposición ubicados en lugares cercanos al área de recolección que funcionan como depósitos temporales de residuos. Allí se almacena el contenido transferido por los vehículos de baja capacidad, hasta que un vehículo de mayor tamaño recoge los residuos para transportarlos hasta el sitio de disposición final.

Al ser el centro de la ciudad un sector donde el espacio público es reducido y el precio del metro cuadrado privado es bastante elevado, se requiere de una solución de almacenamiento temporal adaptable a estas condiciones y que permita reducir el impacto ambiental generado por la actividad. Por ello se presenta la siguiente propuesta.

6.1 Contenedores Subterráneos

Los contenedores subterráneos son nuevas alternativas para la disposición temporal de residuos sólidos urbanos. La basura queda bajo tierra enterrando el contenedor que tradicionalmente estaba a la vista, quedando este oculto bajo una tapa con el mismo acabado que

la acera. El sistema consiste en una serie de plataformas elevadoras accionadas mediante un sistema hidráulico, con tapa pavimentada, en un foso de hormigón, quedando a la vista solamente el buzón de depósito, manteniendo un aspecto agradable, discreto e integrado. Los contenedores subterráneos consisten en una isla de buzones de deposición y son sistemas compatibles con cualquier sistema de recogida de residuos. (Waste Solutions, 2013)

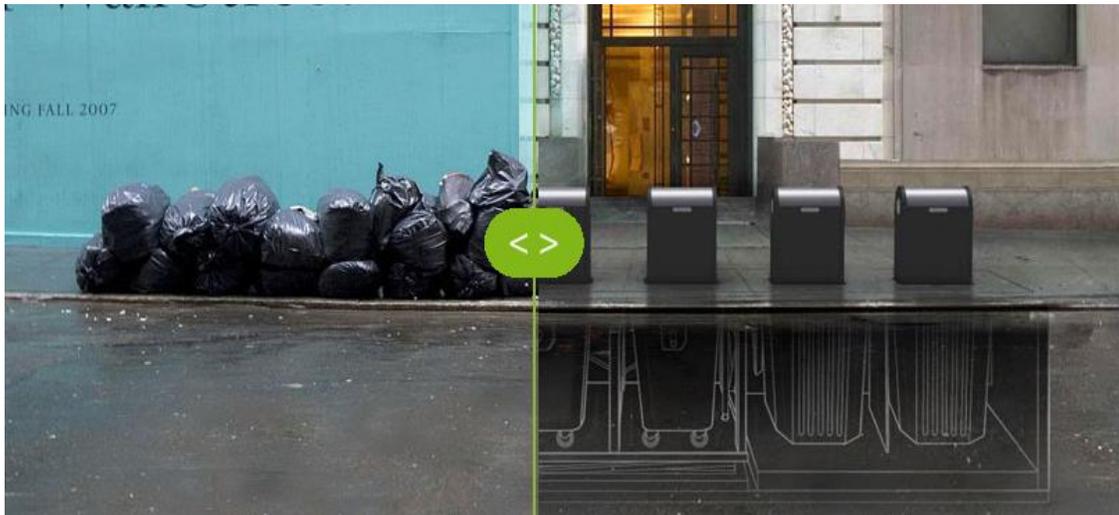
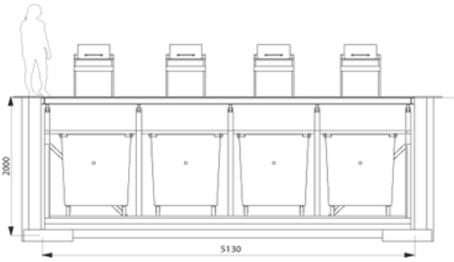


Figura 6. Contenedores Subterráneos. Adaptado de Formato Verde Waste Solutions (2016). <http://www.formatoverde.com/es-ES/soterrados/que-es-un-soterrado.aspx>.

La tabla 3 aborda las características principales de este sistema, cuya capacidad pueden variar según el proveedor. Tradicionalmente estos pueden ser instalados en parques, plazas públicas o aceras de las ciudades ya que su diseño compacto y fácil construcción no afecta estética ni ambientalmente dichos espacios.

Estas plataformas ocultan la basura y por su condición de contenedores subterráneos permite que los espacios se mantengan transitables, de fácil adaptación, acordes para los centros de las ciudades. La basura permanece bajo el suelo, reduciendo olores y adicionalmente al ser de uso exclusivo de la empresa impide que las basuras sean dispersadas por animales o que las personas hagan mal uso de ellas.

Tabla 3
Características de un Sistema de Cuatro Contenedores

CARACTERÍSTICAS	
Diseño	
Configuración	Estación con 4 contenedores
Forma de recolección del camión	Lifter Trasero (adaptable a cualquier camión)
Mecanismo hidráulico	Accionamiento mediante Sistema Hidráulico del propio camión compactador
Capacidad por contenedor	1100 L o 450 kg
Capacidad máxima de la estación	4400 L o 1800 kg

Esta opción permite a los operarios de la EMAB realizar la transferencia de residuos en puntos fijos estratégicos, sin ocasionar focos de contaminación, y permitiendo que esta se realice aún más acorde a la normativa ambiental, aprovechando de una mejor forma el tiempo empleado en servicio y el número de operarios que están encargados de la recolección de los residuos en el centro de la ciudad.



Figura 7. Isla de Contenedores Subterráneos. Adaptado de Sky High City (2017). <http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=559374&page=305>.

Las capacidades y las opciones de estaciones de transferencia potenciales a instalar se pueden observar en la Tabla 4. Se parte de que la capacidad que deben tener en conjunto las estaciones debe ser suficiente para albergar los residuos máximos recogidos en cualquier día. En el Apéndice A se observa la clasificación de los clientes según su día de recolección:

- Grupo 1: lunes, miércoles y viernes, con una demanda diaria aproximada de 3500 kg.
- Grupo 2: martes, jueves y sábado, con demanda diaria aproximada de 4700 kg.

Así pues, la capacidad total de las estaciones debe ser como mínimo 4700 kg, por tanto se presentan 3 tipos de configuración de estaciones posibles disponibles en el mercado. Cada alternativa de estación contaría con 3, 4 y 6 contenedores a instalar respectivamente. En todos los tipos de estaciones se establece una holgura del 10% en su capacidad que permita amortiguar las variaciones de la cantidad de residuos recolectados en diferentes días.

Tabla 4.

Opciones de capacidad de las estaciones de transferencia.

Tipo Estación	Capacidad de la Estación (kg)	Capacidad Real (kg)	Número de Estaciones Requeridas a Instalar	Costo Total de Inversión (millones COP)
Tipo 1 (1 isla de 3 contenedores)	1350	1215	4	288
Tipo 2 (1 isla de 4 contenedores)	1800	1620	3	243
Tipo 3 (1 isla de 4 contenedores + 1 isla de 2 contenedores)	2700	2430	2	284

Los datos de la tabla anterior fueron calculados a partir de cotizaciones sobre el valor de la construcción e instalación de los contenedores subterráneos. El número de las estaciones requeridas a instalar para cada tipo de estación se calcula al dividir la demanda total de residuos recolectados diariamente por el grupo 2 entre la capacidad de cada tipo de estación.

6.2 Vehículos Recolectores para la Zona Centro

Se proponen vehículos especiales para transitar y realizar la recolección puerta a puerta de los diferentes usuarios ubicados en la zona del centro de la ciudad de Bucaramanga. Estos vehículos

se denominan vehículos satélites, los cuales por su tamaño reducido establecen la mejor solución para realizar esta actividad, porque permiten una perfecta maniobrabilidad en el centro de la ciudad. Son camiones pequeños que consumen menos combustible, compactados, de menor altura para facilitar el acceso al parking en los sótanos de los edificios.

Estos vehículos están fabricados en acero, poseen una opción de carga y descarga automática la cual puede ser accionada mediante el control de mandos ubicado en la cabina del vehículo para máxima eficiencia y comodidad del operario. Posee una puerta lateral opcional para la carga manual de ser necesaria, tiene una lona protectora resistente al desgaste para cubrir la caja que transporta los desechos. Estos vehículos cuentan con una capacidad de 3,2 mt³. Capacidad similar a la de los motocarros usados actualmente por la EMAB.



Figura 8. Vehículos Satélite. Adaptado de Helesi, (2016). Adaptado de <http://es.helesi.com/product.aspx?Id=68>

Los vehículos descritos anteriormente cumplen con todas las especificaciones que se detallan en la norma medioambiental y se proponen como alternativa para reemplazar los motocarros que actualmente incumplen algunas de las normas. La inversión no se considera, ya que no hacen parte de nuestra propuesta de estaciones de transferencia. Simplemente se recomienda su utilización.

7. Caracterización del Problema

El problema de recolección de residuos sólidos en el centro de la ciudad de Bucaramanga realizado por la EMAB es abordado como un problema de localización y ruteo con ventanas de tiempo y restricciones de capacidad. El objetivo principal es determinar la ubicación de las estaciones de transferencia y las rutas de los vehículos, mientras se minimizan los tiempos de viaje totales cumpliendo con las siguientes condiciones:

- Los usuarios deben ser visitados una única vez por un solo vehículo
- Los vehículos deben partir y finalizar la jornada desde el garaje
- Los residuos recolectados por cada vehículo satélite no deben superar su capacidad
- Los residuos que lleguen a una estación de transferencia no pueden superar su capacidad
- Los vehículos deben llegar a cada nodo dentro de la ventana de tiempo establecida
- Los vehículos satélites vacían su contenido en las estaciones de transferencia y deben llegar sin carga al garaje.
- Cada vehículo servirá siempre a una misma estación ejecutando varias rutas.
- Las capacidades de las estaciones son iguales.

Para resolver el caso de estudio se requiere contar con la siguiente información:

- Ubicación de los usuarios con demanda promedio de residuos identificada
- Localizaciones potenciales de las estaciones de transferencia con su respectiva capacidad y costo de apertura
- Ubicación del garaje
- Cantidad de vehículos satélites capacitados disponibles
- Costo de desplazamiento de los vehículos
- Ventanas de tiempo de todos los nodos
- Tiempos de viaje entre cada par de nodos
- Tiempos de servicio en los clientes y estaciones de transferencia
- Capacidad de las estaciones

Gran parte de esta información ha sido tomada del trabajo “Caracterización del proceso de recolección de residuos sólidos con motocarros de la empresa de aseo de Bucaramanga-Emab en

el sector del centro de la ciudad de Bucaramanga” realizado por Díaz y Uribe (2016) y ha sido complementada conforme al alcance de este proyecto.

La ubicación de los usuarios, el garaje y las estaciones de transferencia potenciales se incluyen en el Apéndice A. Estas locaciones potenciales se establecieron en conjunto con la EMAB teniendo en cuenta los lineamientos de la normativa legal vigente y la revisión de literatura con relación a la conveniencia de la ubicación respecto al área de operación. En la Figura 9 se observa la distribución geográfica de los diferentes nodos. En color naranja se encuentran los clientes que deben ser visitados diariamente, en color fucsia los clientes del grupo 1 y en color azul los clientes del grupo 2. Los números son las ubicaciones potenciales de las estaciones de transferencia y la línea interlineada azul es la delimitación del centro de la ciudad de Bucaramanga.

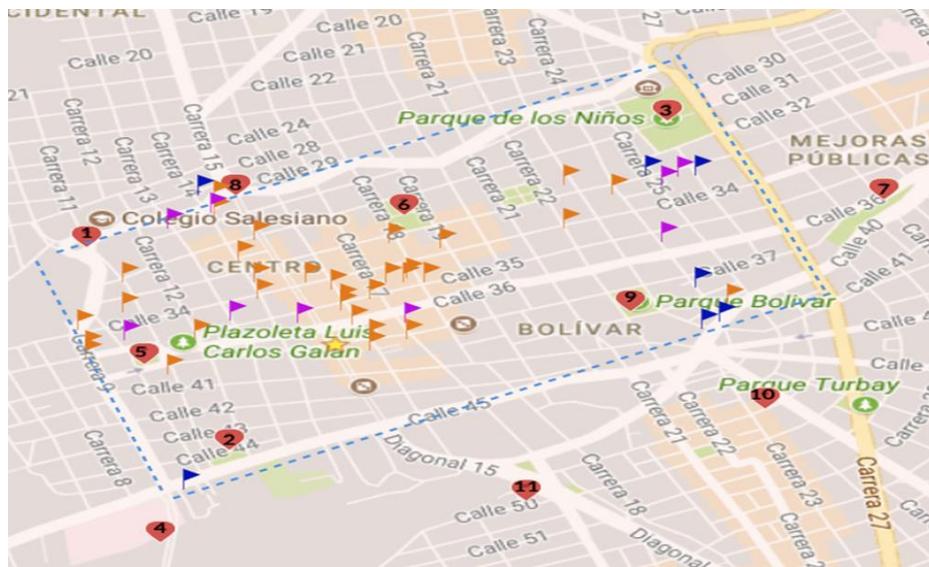


Figura 9. Distribución Geográfica de los nodos.

La capacidad de los vehículos satélites homogéneos es de 700 kg por viaje, se decide manejar esta capacidad teniendo en cuenta que los motocarros tienen actualmente una capacidad de 600 kg y los vehículos satélites consultados llegan a cargar hasta 1300 kg información tomada de la ficha técnica por la empresa del fabricante.

Al tomarse como el reemplazo de los motocarros, se cuenta con un total de cuatro vehículos. El costo de desplazamiento de vehículo por segundo se estima a partir de datos suministrados por la EMAB sobre el consumo de galones de gasolina de dos vehículos de características técnicas

similares a los aquí propuestos. Estos trabajan en total 3 turnos al día, consumiendo 476 galones de gasolina corriente cada mes, desplazándose solo el 42% de su tiempo total de trabajo. Con el precio de la gasolina en Bucaramanga suministrado por el ministerio de minas y energía es posible determinar que movilizar un vehículo por segundo cuesta aproximadamente 4,4 pesos para el mes de abril del año 2018.

El tiempo de viaje entre nodos fue estimado mediante la herramienta Google Maps Distance Matrix API y se presentan en el Apéndice B. Las demandas de los usuarios se presentan en el Apéndice C. Las ventanas de tiempo de todos los nodos se relacionan en el Apéndice D, las cuales hacen referencia a la información brindada por los clientes la cual indica el horario preferencial

Finalmente, los tiempos de servicio de los clientes y las estaciones de transferencia se incluyen en el Apéndice E. Los tiempos de servicio de las estaciones de transferencia se estiman tomando en cuenta que, originalmente estas transferencias tardaban 24,36 minutos en promedio, de los cuales, sólo el 31% correspondía al trasbordo de los residuos. El 69% del tiempo restante se ocupaba en transporte hasta el sitio de transferencia y espera por el servicio. Al eliminar la espera mediante la propuesta de estaciones de transferencia fijas y contemplar el tiempo de viaje en la matriz del Apéndice B, se establece que el servicio en la estación dura el 31% de los 24,36 minutos, es decir, 7,6 minutos.

8. Formulación del Modelo Matemático

En esta sección se formula el LRPTW para el problema de recolección de residuos sólidos en el centro de Bucaramanga por la empresa de aseo EMAB. El problema se define en una gráfica $G = (V, A)$, donde el conjunto de nodos $V = V^c \cup V^e \cup V^g$ consiste de un conjunto de n clientes $V^c = \{1, \dots, n\}$, m posibles ubicaciones de estaciones de transferencia $V^e = \{n+1, \dots, n+m\}$, r garajes $V^g = \{n+m+r\}$ y un conjunto de arcos $A = \{(i, j) | i, j \in V, i \neq j\}$. Se establece $K = \{1, \dots, l\}$ como el conjunto de vehículos recolectores.

El parámetro t_{ij} corresponde al tiempo de viaje asociado al arco $(i, j \in V)$. Cada nodo $i \in V$ tiene un tiempo de servicio S_i y una ventana de tiempo $[a_i, b_i]$ que no puede ser violada. La cantidad de residuos recogidos en un cliente $j \in V^c$ es definida en q_j . Todos los vehículos son

homogéneos y tienen capacidad C . El costo asociado al recorrido de un vehículo por unidad de tiempo es R . La capacidad de cada estación de transferencia está dada por Ca .

Se definen las siguientes cuatro variables: $x_{ijk} \in \{0,1\}$ toma el valor de 1 sólo si el vehículo $k \in K$ usa el arco $(i,j) \in A$; $y_j \in \{0,1\}$ es 1 si la estación de transferencia es abierta en la potencial ubicación $j \in V^e$; la demanda acumulada por el vehículo $k \in K$ en el nodo $i \in V$ se representa en d_{ik} ; y w_{ik} representa el tiempo de comienzo del servicio en el nodo $i \in V$ para el vehículo $k \in K$.

El objetivo del problema es encontrar el conjunto de rutas y la ubicación de las estaciones de transferencia minimizando el costo total de viaje y el costo de apertura de las estaciones sin exceder la capacidad de los vehículos y estaciones, y visitando una vez a cada cliente dentro de sus ventanas de tiempo. El modelo matemático es presentado a continuación:

$$\min z = \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} R t_{ij} x_{ijk} + \sum_{j \in V^e} C_o y_j \quad (1)$$

$$\sum_{j \in V} \sum_{k \in K} x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in V^c \quad (2)$$

$$\sum_{i \in V} x_{ijk} = \sum_{i \in V} x_{jik} \quad \forall j \in V, k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{j \in V^c} x_{ijk} = \sum_{j \in V^e} x_{jik} \quad \forall i \in V^g, k \in K \quad (4)$$

$$\sum_{i \in V} \sum_{j \in V^e} x_{ijk} \leq 1 \quad \forall k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{j \in V^c} \sum_{k \in K} x_{ijk} = 0 \quad \forall i \in V^e \quad (6)$$

$$\sum_{j \in V^e} \sum_{k \in K} x_{ijk} = 0 \quad \forall i \in V^g \quad (7)$$

$$a_i \leq w_{ik} \leq b_i \quad \forall i \in V, k \in K \quad (8)$$

$$w_{ik} + S_i + t_{ij} \leq w_{jk} + (1 - x_{ijk})M \quad \forall (i,j) \in A, k \in K \quad (9)$$

$$d_{ik} + q_j \leq d_{jk} + (1 - x_{ijk})M \quad \forall i \in V, j \in V^c, k \in K \quad (10)$$

$$d_{ik} = 0 \quad \forall i \in V^e \cup V^g, k \in K \quad (11)$$

$$0 \leq d_{ik} \leq C \quad \forall i \in V, k \in K \quad (12)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in V} C x_{ijk} \leq Ca y_j \quad \forall j \in V^e \quad (13)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall (i,j) \in A, k \in K \quad (14)$$

$$y_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in V^e \quad (15)$$

La función objetivo (1) minimiza el costo total de viaje y el costo asociado a la apertura de cada estación bajo las siguientes restricciones. Todos los clientes deben ser visitados una única vez por un solo vehículo (2). El flujo de entrada y de salida (3) debe ser igual en todos los nodos. Las rutas que se habilitan parten del garaje hacia los clientes y regresan al garaje desde la estación de transferencia (4). Restricción (5) permite que una ruta como máximo llegue a una sola estación. Las ecuaciones (6) y (7) restringen que de las estaciones partan rutas hacia cualquier destino y que del garaje salgan rutas hacia las estaciones.

El tiempo de comienzo por el servicio debe estar dentro de las ventanas de tiempo (8). La ecuación (9) establece los tiempos de comienzo por el servicio teniendo en cuenta el tiempo de viaje y la duración del servicio. La restricción (10) es la demanda acumulada en cada cliente. La demanda acumulada por cada vehículo (11) en las estaciones de transferencia y garaje debe ser igual a cero y la demanda acumulada en cualquier nodo por cada vehículo (12) no puede ser negativa ni superar la capacidad de cada vehículo. En (13) se define que las cargas de todos los vehículos que lleguen a la estación de transferencia no pueden superar su capacidad si esta es abierta. Finalmente (14) y (15) establecen variables positivas y variables binarias. El Apéndice F contiene la programación lineal en lenguaje computacional GAMS.

9. Diseño del algoritmo memético para el LRPTW

El algoritmo memético (MA) es un método que ha demostrado tener un éxito práctico en una variedad de dominios problemáticos y particularmente para la solución aproximada de problemas de optimización NP (Moscato y Cotta, 2003), como el caso del LRPTW. Este método de solución permitirá obtener las estaciones de transferencia a ser abiertas y las rutas que deben seguir los vehículos para visitar a los usuarios asignados minimizando el costo de transporte y de instalación de las estaciones.

Los MAs son metaheurísticas basadas en población. Esto quiere decir que mantienen un conjunto de soluciones candidatas (agentes) para el problema considerado (Cotta, 2007). Dichos agentes son sometidos a algunos procedimientos (operadores meméticos) en un marco de competición y cooperación para producir una nueva generación de soluciones que mejoren la población en función de su valor de aptitud o fitness.

9.1 Las soluciones en el algoritmo

Antes de explicar los pasos lógicos del algoritmo es necesario definir los componentes de las diversas soluciones que componen la población con la que trabaja el MA. Esto, permitirá entender de mejor manera la forma como trabaja el algoritmo propuesto.

9.1.1 Representación de la solución. Es la formulación abstracta de las soluciones desde el punto de vista del algoritmo. La representación de un agente o cromosoma se realiza mediante un esquema de codificación que contiene estructuras de datos con información relevante del problema (genes) y que les permite a los operadores retener unidades de información con efecto positivo sobre la calidad de las soluciones.

9.1.1.1 Codificación. El agente consiste de dos partes: estaciones habilitadas y la secuencia de los clientes a visitar.

La matriz de las estaciones habilitadas será de tamaño $2 \times E$. Siendo E el número mínimo de estaciones necesarias para albergar durante un día los residuos recolectados según la capacidad de los diferentes tipos de estaciones y conocida la demanda total de los clientes. Cada posición (1,E) tendrá el número de la estación a abrir y en (2,E) un número entero que representa el índice en la secuencia de clientes del primer cliente asignado en el ruteo de esa estación. Si el número de la estación no aparece aquí, indicará que no será abierta.

Estaciones de transferencia. E = 4.			
52	54	57	60
5	12	26	50

Figura 10. Representación Estaciones de Transferencia Habilitadas

La secuencia de los clientes a visitar se compone de un vector de C posiciones con la permutación de los clientes en la que aquellos que pertenecen a una misma estación de transferencia se conectan en series. La inserción de los viajes a las estaciones de transferencia cuando la capacidad del vehículo se llena será responsabilidad de la decodificación. Sobre la matriz de estaciones habilitadas y el vector secuencia de clientes actuarán los operadores meméticos.

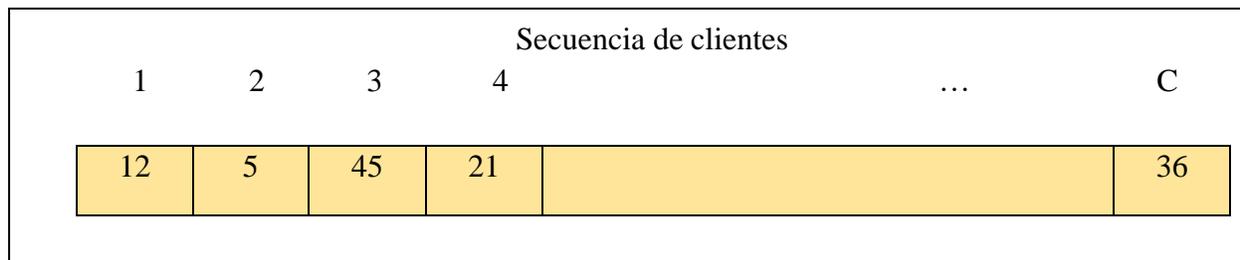


Figura 11. Representación Vector Secuencia de Clientes

9.1.1.2 Decodificación. Permite hacer lectura de los datos contenidos en el cromosoma, lo cual proporciona conocimiento sobre:

- Qué estaciones de transferencia fueron habilitadas extraída de la primera fila de la matriz de $2 \times E$.
- Del vector de la secuencia de clientes se extraen las rutas que van a seguir los vehículos. Este vector se fracciona de acuerdo a los índices de la segunda fila de la matriz $2 \times E$ y divide a los clientes de acuerdo a la estación que le corresponde. Posteriormente el algoritmo crea las rutas para cada división realizada anteriormente teniendo en cuenta las restricciones de capacidad y ventana de tiempo, es decir, se evalúa la capacidad y la ventana de tiempo de cada cliente en orden posicional del vector. Si el cliente a evaluar cumple con las restricciones se asigna a la ruta actual, de no ser así, termina dicha ruta regresando a la estación de la cual partió y se comienza una nueva ruta hasta recorrer todos los clientes del vector. Teniendo las rutas identificadas se calcula el costo de cada ruta cuyo valor resulta de multiplicar el tiempo que toma hacer esa ruta por un factor de costo de desplazamiento.
- El valor de la función objetivo.

9.1.2 Función objetivo (fitness). Este valor será calculado para cada una de las soluciones generadas y permitirá hacer comparaciones respecto a la calidad de las mismas. La función objetivo corresponde a la suma total de los costos de viaje ejecutados por todos los vehículos, más el costo de apertura de las estaciones, más el costo fijo por utilización de los vehículos.

Ejemplo representación de la solución

Estaciones habilitadas: 52, 54, 55, 56

Índices: 12, 24, 34, 50

Clientes: 17, 2, 45, 3, 16, 13, 48, 11, 14, 21, 9, 25, 10, 20, 8, 12, 35, 5, 37, 6, 26, 7, 39, 15, 34, 41, 36, 23, 30, 29, 3, 47, 45, 4, 42, 18, 27, 31, 44, 50, 1, 28, 33, 32, 16, 2, 46, 38, 40, 19, 43, 22, 24, 49.

Costo: 79245.

9.2 Pasos lógicos del algoritmo

- **Generación de la población inicial:** Se ejecutará de manera aleatoria la habilitación de estaciones de transferencia y se aplicará un enfoque heurístico de la versión aleatoria la extensión del algoritmo de Clarke and Wright (RECWA) para la asignación de clientes a cada estación. Con este procedimiento se forma la segunda fila de la matriz $2 \times E$ y el vector de clientes para cada solución. El número de soluciones creadas no puede ser alterada en cada generación luego de la aplicación de los operadores.
- **Selección:** Realiza a selección de los padres por medio de torneo probabilístico.
- **Cruce:** Para el diseño del algoritmo memético se empleará los operadores de cruce one-point crossover, para la matriz de estaciones habilitadas y order crossover para el vector de clientes.
- **Mutación:** Para el vector de rutas se empleará la mutación SWAP en todas las soluciones.
- **Mejora LocalOpt:** Selecciona q puntos en un tour y realiza combinaciones de los elementos de dicho fragmento seleccionado, con el objetivo de encontrar la combinación

que obtenga la mínima distancia entre los puntos seleccionados, seguido a este operador se calcula el fitness y se actualiza la piscina de soluciones.

La solución del problema LRPTW es la localización de las estaciones de transferencia, con sus respectivas rutas encargadas de recolectar los residuos sólidos de cada cliente asignado a cada estación.

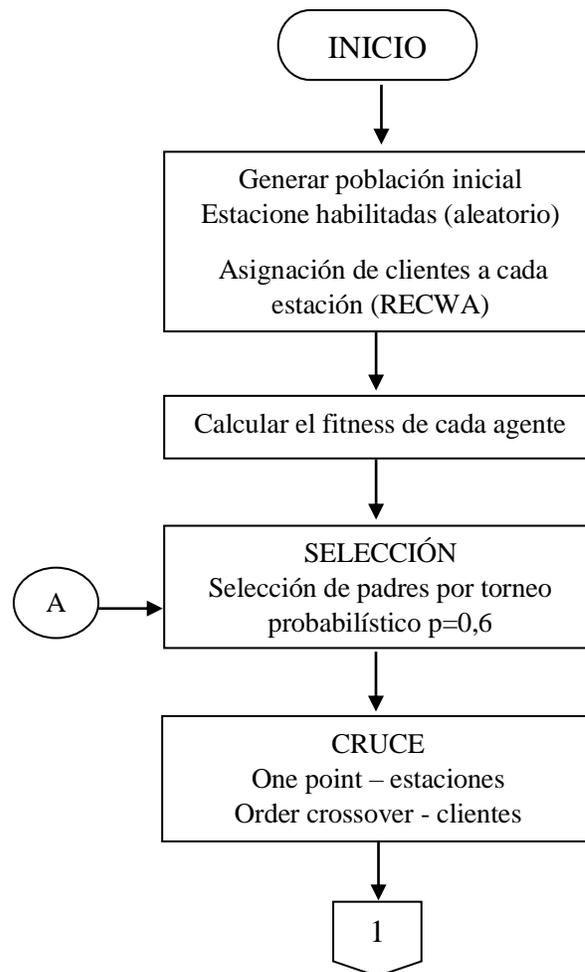


Figura 12. Diagrama del algoritmo memético para la solución del LRPTW

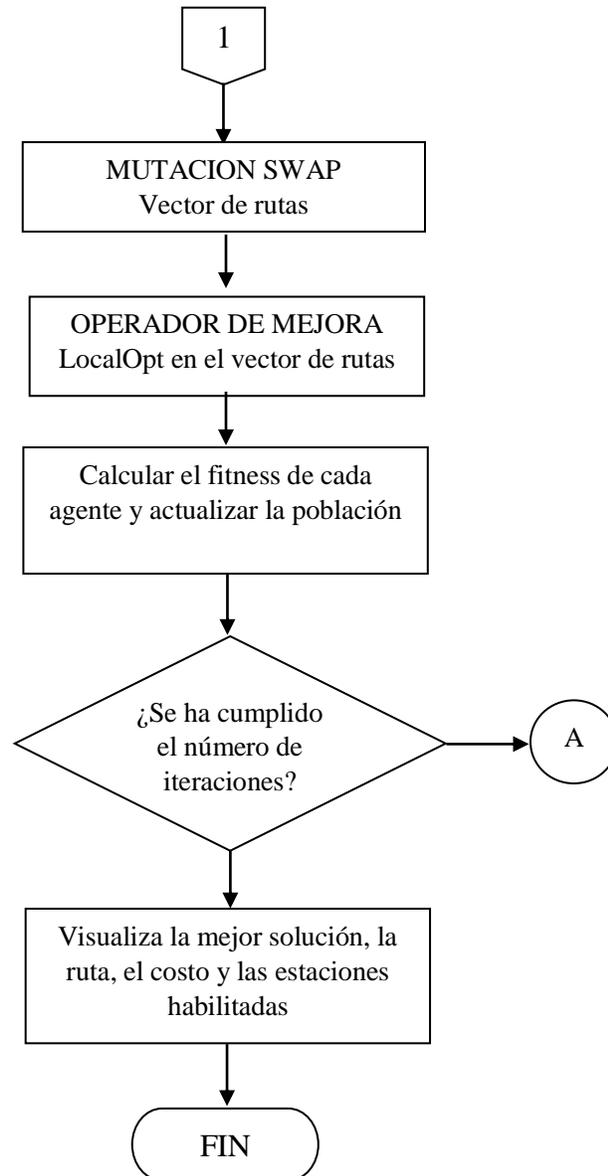


Figura 13. Diagrama del algoritmo memético para la solución del LRPTW

9.2.1 Población inicial. La población consiste de un número n de soluciones o cromosomas factibles. La inicialización de la población es un paso fundamental en el algoritmo ya que debe garantizar la diversificación para evitar la rápida convergencia del MA. En este sentido se ha diseñado un procedimiento que combina la generación aleatoria de una parte de la solución y el uso de una heurística para la otra. Así, la sección aleatoria explora las regiones del espacio de búsqueda mientras la heurística introduce conocimiento del problema.

El procedimiento para generar cada una de las n soluciones comienza con la habilitación aleatoria de las estaciones de transferencia, es decir, aleatoriamente se escogerán aquellas estaciones a las cuales los vehículos podrán llegar para realizar la respectiva transferencia de los residuos.

El siguiente paso consiste en la aplicación de un procedimiento conocido como RECWA, el cual es una versión aleatorizada del ECWA, el cual es la extensión del algoritmo heurístico de Clarke y Wright primeramente introducido por Prins para el CLRP (Karaoglan & Altıparmak, 2015). Este algoritmo crea una lista aleatoria de los clientes y los asocia a su depósito (estación de transferencia) más cercano teniendo en cuenta la capacidad del depósito y la demanda del cliente, es decir, cuando un depósito ya no pueda apropiarse de más clientes, ellos deben ser asignados a un segundo depósito más cercano con capacidad disponible hasta que a cada uno de los clientes les corresponda un depósito. Una vez se han hecho todas las asignaciones se procede a elaborar las rutas, creando una ruta simple en el vector de clientes con el orden en que se asignaron los clientes a cada estación de transferencia.

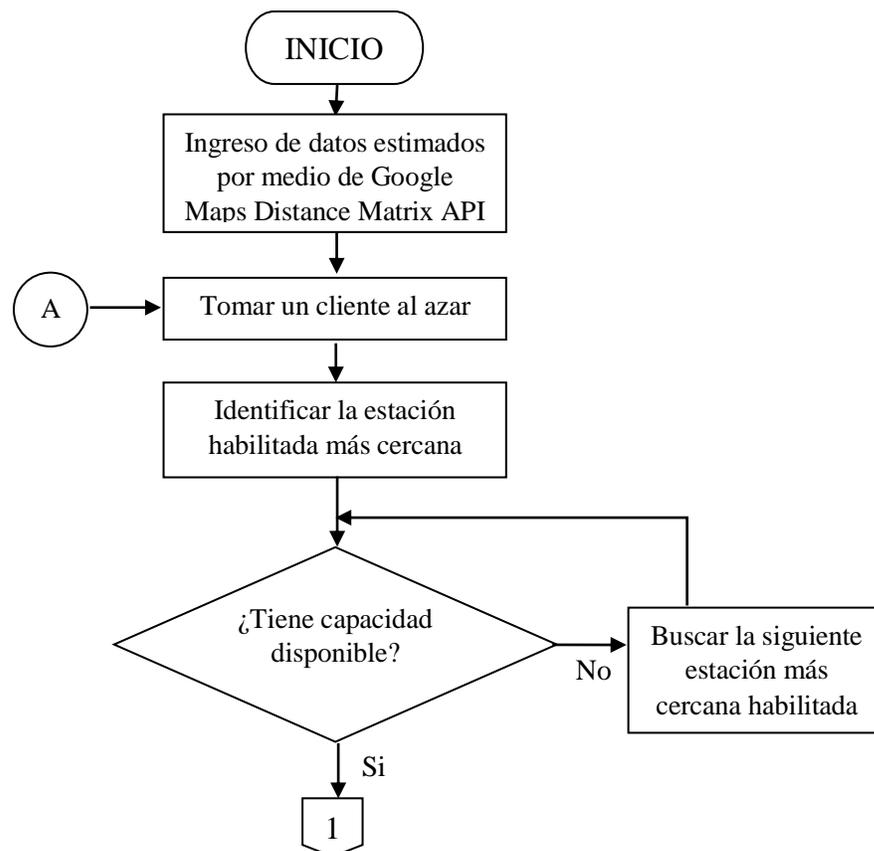


Figura 14. Diagrama RECWA

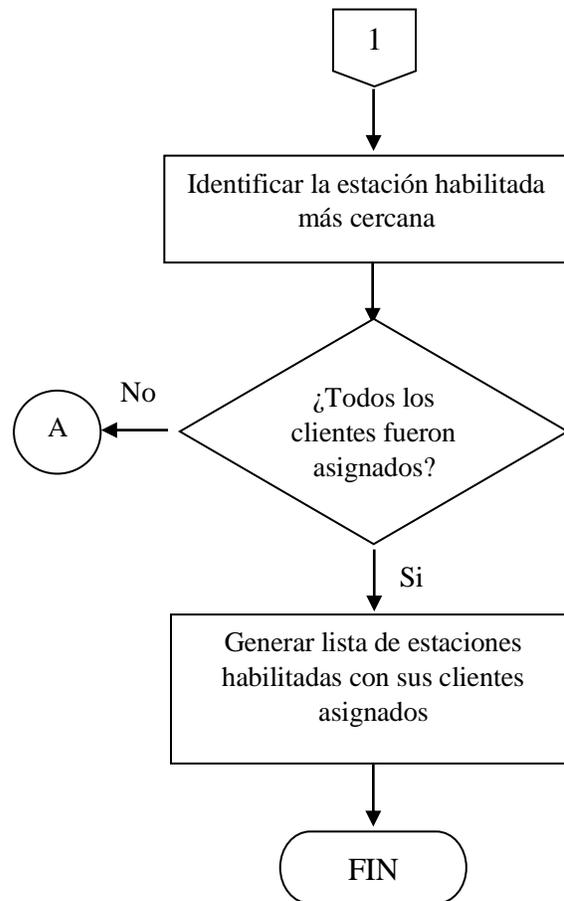


Figura 15. Diagrama RECWA

De esta forma una solución, agente, individuo o cromosoma está compuesto por dos partes: la primera, que indica el estado de las estaciones de transferencia; y la segunda que indica el orden de las visitas a los clientes.

9.2.2 Operador de Selección. El ciclo de reproducción comienza con el operador de selección. La selección tiene el propósito de mejorar la calidad promedio de la población al darle a los individuos de mayor calidad una más alta probabilidad de ser copiados en la siguiente generación. La selección enfoca la búsqueda en regiones prometedoras del espacio de búsqueda. La calidad de un individuo es medida por una función *fitness* (Blickle & Thiele, 1995). En nuestro caso el método de selección escogido es la técnica de torneo probabilístico, el cual consiste en escoger a los individuos genéticos en base a comparaciones directas entre sus genotipos. Este genera un número aleatorio del intervalo [0- 1], si es mayor que un parámetro p

(fijado para todo el proceso evolutivo) se escoge el individuo más alto y en caso contrario el menos apto. Generalmente p toma valores en el rango $0.5 < p \leq 1$ variando el número de individuos que participan en cada torneo se puede modificar la presión de selección. Cuando participan muchos individuos en cada torneo, la presión de selección es elevada y los peores individuos apenas tienen oportunidades de reproducción.

Cuando el tamaño del torneo es reducido, la presión de selección disminuye y los peores individuos tienen más oportunidades de ser seleccionados. Elegir uno u otro método de selección determinará la estrategia de búsqueda del Algoritmo Genético. Si se opta por un método con una alta presión de selección se centra la búsqueda de las soluciones en un entorno próximo a las mejores soluciones actuales. Por el contrario, optando por una presión de selección menor se deja el camino abierto para la exploración de nuevas regiones del espacio de búsqueda (Gestal, Rivero, Rabuñal, Dorado, y Pazos, 2010).

9.2.3 Operador de Cruce. El operador de cruce intenta intercambiar partes de dos padres de la población para generar nuevos descendientes. Está hecho con la esperanza de que la descendencia heredará buenas partes del antiguo cromosoma (Derbel, Jarboui, Hanafi, y Chabchoub, 2012). Diferentes operadores de cruce pueden ser aplicados en un cromosoma. Debido a la codificación de la solución que se propuso, se utilizara *one-point crossover* para la matriz de estaciones habilitadas y *order crossover* para el vector de clientes.

One-point crossover toma dos cromosomas y los corta una vez en puntos aleatorios correspondientes y las secciones después de los cortes son intercambiadas

	Padre 1					Hijo 1			
52	54		57	60	52	54	56	59	
1	12		26	37	1	12	25	41	
	Padre 2					Hijo 2			
53	55		56	59	53	55	57	60	
1	10		25	41	1	10	26	37	

Figura 16. Representación One-point crossover

Order crossover divide dos cromosomas en tres partes iguales mediante dos puntos de cruce aleatorios, el primer hijo hereda la sección izquierda y derecha del padre uno. La sección del medio es determinada por el padre uno en el orden que aparece en el segundo padre. El proceso es similar para el segundo hijo.

Padre 1	4	2		1	3		6	5	Hijo 1	4	2	3	1	6	5
Padre 2	2	3		1	4		5	6	Hijo 2	2	3	4	1	5	6

Figura 17. Representación Order Crossover

9.2.4 Operador de Mutación. El operador de mutación modifica individuos cambiando aleatoriamente (típicamente) partes pequeñas en los vectores de decisión asociados de acuerdo con una probabilidad dada (tasa de mutación) (Aysy, Dullaert, y Gendreau, 2005). En este caso se utilizará el método SWAP, el cual toma un cromosoma hijo resultante de la operación de cruce y en este escoge un cliente del vector ruta al azar y lo intercambia por otro, también escogido al azar.

Padre	4	5	6	7	8	9
				X		
				↙ ↘		
Hijo	4	5	7	6	8	9

Figura 18. Representación Operador Mutación SWAP

9.2.5 Operador de mejora. El uso de este operador es uno de los rasgos distintivos del algoritmo memético. Cuando existe información específica del problema, es favorable considerar heurísticas de búsqueda local. Así el MA explota la perspectiva global de los GA y la convergencia de la técnica específica del problema. Para la ejecución de este operador se utiliza el algoritmo LocalOpt, el cual selecciona q puntos consecutivos en un tour y realiza $(q-2)!$ combinaciones de los elementos comprendidos entre el primero y el último de dicho fragmento

seleccionado, con el objetivo de encontrar la combinación que obtenga la mínima distancia entre el primer punto y le último de la secuencia, una vez lo encuentra, modifica el fragmento seleccionado del tour por la combinación resultante. Posteriormente se repite este procedimiento para cada elemento en el tour. (Jayalakshmi, Sathiamoorthy, y Rajaram, 2001).

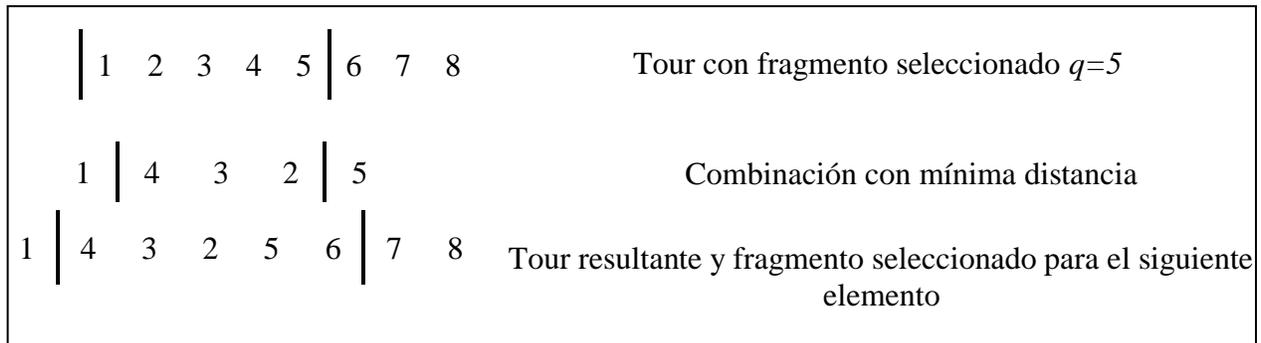


Figura 19. Representación Operador de Mejora LocalOpt

Al ejecutar los anteriores operadores, en especial los de cruce y mutación, pueden ocasionar soluciones no factibles. Es por esto por lo que después de la ejecución de cada operador se verifica su factibilidad.

9.2.6 Actualización de la población. Este procedimiento se usa para reconstruir la población usando la antigua población y la nueva población generada después de la fase reproductiva. Aquí padres e hijos son unidos en un conjunto ordenado según el fitness y se seleccionan las mejores n soluciones que se someterán a un nuevo ciclo de reproducción.

9.2.7 Criterio de Parada. Se establece como criterio de parada el número de generaciones del algoritmo

10. Validación del Algoritmo

Para evaluar el desempeño del algoritmo memético se utilizaron 3 instancias de la librería de prueba realizada por Prodhon (Prodhon, 2014) los cuales son los problemas Gaspell y Min134 del benchmarking de Barreto (2004) y el problema coord50-5-2BIS de Prodhon (2006). Se tomaron como base estos problemas ya que son los más trabajados en la literatura y poseen características

similares al problema a resolver en esta investigación, debido a que el LRPTW no tiene instancias establecidas para verificar su eficiencia. También se tuvo en cuenta que las capacidades de los depósitos fueran iguales ya que el programa necesita como dato de entrada el número total de estacione necesarias que deben habilitarse, el cual debe ser mayor a dos (2) para poder ejecutar la asignación mediante el RECWA satisfactoriamente.

Los parámetros usados son el tamaño de la población (10 y 40 individuos), el número de generaciones (10 y 30 iteraciones) y el parámetro de selección (0.5 y 0.7), el programa se ejecutó 10 veces para cada instancia con las posibles combinaciones de los parámetros.

Los resultados pueden ser observados en el Apéndice G el lenguaje de programación utilizado para comprobar la eficiencia del programa es Python 3.6.5.

Se compara la mejor solución conocida de cada problema y la mejor solución encontrada por el MA propuesto calculando el porcentaje de diferencia entre las soluciones para cada instancia y su respectivo promedio de los datos encontrados para cada combinación realizada.

10.1 Resultados de la Validación de las Instancias

La notación utilizada en las tablas de resultados de la validación del algoritmo es la siguiente:

P= Población

M= Media

G= Numero de generaciones

DS= Desviación estándar

P.S= Parámetro de selección

MC= Mejor solución conocida

ME= Mejor solución encontrada

%D= porcentaje de diferencia

Resumen Instancia 50-5-2BIS							
P	G	P.S	ME	M	DS	MC	%D
10	10	0,5	106743	115206,6	5311,10299	84055	26,992%
40	10	0,5	103413	106414,2	1610,97602	84055	23,030%
10	30	0,5	104822	109333,9	2583,14801	84055	24,706%
40	30	0,5	98981	102630,7	2279,75793	84055	17,757%
10	10	0,7	111736	117568,9	3910,21797	84055	32,932%
40	10	0,7	103187	106676,3	1417,23644	84055	22,761%
10	30	0,7	106670	111814,4	3236,38915	84055	26,905%
40	30	0,7	97912	103206,7	3051,93316	84055	16,486%

Figura 20. Resumen Instancia 50-5-2BIS

El algoritmo memético tiene un mejor desempeño en la solución cuando se ejecuta con los parámetros más altos de tamaño de la población y el número de generaciones más altas, el valor más cercano que arrojo el MA propuesto se aproxima a un 16% de diferencia con la mejor solución encontrada.

Resumen Instancia Gaspell							
P	G	P.S	ME	M	DS	MC	%D
10	10	0,5	526,75	589,669	33,01051	424,9	23,970%
40	10	0,5	495,17	512,546	12,686906	424,9	16,538%
10	30	0,5	491,36	537,899	30,297554	424,9	15,641%
40	30	0,5	453	475,551	12,527682	424,9	6,613%
10	10	0,7	554,15	601,823	34,561566	424,9	30,419%
40	10	0,7	507,05	523,011	13,218041	424,9	19,334%
10	30	0,7	482,46	542,527	25,101702	424,9	13,547%
40	30	0,7	454,08	480,711	15,239443	424,9	6,867%

Figura 21. Resumen Instancia Gaspell

Para la instancia Gaspell, el algoritmo memético arroja nuevamente la mejor solución cuando el tamaño de la solución y el número de generaciones se encuentran en los niveles más altos, el valor más cercano a la mejor solución encontrada por el MA se diferencia en un 6% respecto a ese valor.

Resumen Instancia Min134							
P	G	P.S	ME	M	DS	MC	%D
10	10	0,5	18916,87	20526,714	1078,78049	5423	248,8%
40	10	0,5	16786,4	17634,99	584,922555	5423	209,5%
10	30	0,5	17375,68	19987,052	1113,79825	5423	220,4%
40	30	0,5	16244,41	16950,659	564,049563	5423	199,5%
10	10	0,7	18616,17	20709,626	934,174839	5423	243,3%
40	10	0,7	17438,91	18140,739	607,763839	5423	221,6%
10	30	0,7	17308,13	18859,288	730,368981	5423	219,2%
40	30	0,7	16134,91	16893,361	457,176688	5423	197,5%

Figura 22. Resumen Instancia Min134

El análisis de la instancia Min134 encuentra la mejor solución posible cuando los parámetros de tamaño de población y número de generaciones se encuentran en el nivel más alto, sin embargo, el desempeño del algoritmo es regular ya que no se acerca a la mejor solución encontrada en la literatura, para este problema de alta complejidad con más de 100 cliente.

De acuerdo con los resultados anteriores, con ninguna combinación de parámetros establecidos se logra llegar a la mejor solución conocida en la literatura, sin embargo, en todos los casos la mejor solución encontrada se sitúa cuando el tamaño de la población y el número de generaciones se encuentran en sus niveles altos.

11. Diseño Experimental para la Determinación de los Factores Incidentes en el LRP

Para el análisis de los factores más significativos que influyen en la respuesta de la función objetivo en el LRP, se eligió un diseño factorial 2^k , tomando 3 factores k y dos niveles para cada factor.

11.1 Instancias del Benchmarking Analizadas

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos mediante la validación del algoritmo para las instancias anteriormente evaluadas, y observando el comportamiento de las respuestas obtenidas según los parámetros establecidos, se decidió realizar un diseño de experimentos conformado por problemas del benchmark de Prodhon 20-5-1/ 20-5-1b/ 50-5-2a/ 50-5-2b/ 50-5-2bBIS/ 50-5-

2BIS y los problemas del benchmark de Barreto Min134, Or117 y Gaspell. Estos problemas fueron escogidos debido a que son problemas con características similares al problema trabajado en esta investigación. Los experimentos fueron desarrollados en el lenguaje de programación Python 3.6.5 en un PC Linux con procesador Intel Core i7, 3.40GHz y 8GB de memoria. El diseño experimental fue analizado en Statgraphics Centurion. Los datos utilizados para el diseño de experimentos se encuentran en el Apéndice H.

11.2 Factores Principales

Los factores por analizar son aquellos que presenta mayor influencia en la calidad de la respuesta y los niveles serán establecidos según su complejidad, para ello se analizan tres (3) parámetros: Tamaño de población, número de generaciones y parámetro de selección. Se realizaron 10 réplicas para cada instancia.

Tabla 5.

Niveles de los factores del diseño de experimentos

Factores	Bajo	Alto
Tamaño de Población	20	80
Generaciones	20	100
Parámetro de Selección	0.5	0.7

Se lista el diseño factorial completo 2^3 , que muestra los 8 tratamientos del diseño factorial.

	A Tamaño Población	B Generaciones	C Parametro de Selección
1	-	-	-
2	+	-	-
3	-	+	-
4	+	+	-
5	-	-	+
6	+	-	+
7	-	+	+
8	+	+	+

Figura 23. Tratamiento del diseño 2^3

11.3 Análisis de los Efectos Principales de los Parámetros del Algoritmo

Se realizó el análisis de los factores que inciden en los parámetros del algoritmo para cada una de las instancias anteriormente mencionadas. Como ejemplo se presenta el análisis para el problema 20-5-1b y los resultados del diseño de experimentos aplicado a cada problema se pueden observar en el Apéndice I.

11.3.1 Análisis de Varianza para el Problema 20-5-1

Los resultados de la ejecución del algoritmo con las diferentes combinaciones de parámetros realizados en la instancia de Prodhon 20-5-1 se muestran a continuación, los resultados de los demás problemas se encuentran en el Apéndice H.

Resumen Instancia 20-5-1							
P	G	S	ME	M	DS	MO	%Dif
20	20	0,5	61108	63229,3	1463,4	54793	11,53%
80	20	0,5	55222	57558,9	1353,4	54793	0,78%
20	100	0,5	55540	58572,7	1578,7	54793	1,36%
80	100	0,5	55069	55844,5	840,1	54793	0,50%
20	20	0,7	60171	62287,0	1404,8	54793	9,82%
80	20	0,7	56317	58345,3	1184,5	54793	2,78%
20	100	0,7	57299	59730,2	1875,3	54793	4,57%
80	100	0,7	55079	55513,8	459,2	54793	0,52%

Figura 24. Resumen Instancia 20-5-1

En la figura 25 se muestra la tabla ANOVA, la cual indica que los efectos: tamaño de población, número de generaciones y la interacción de ambos tienen un valor-P menor que 0,05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95,0%.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Tamaño poblacion	3,43E+08	1	3,43E+08	175,04	0
B:Generaciones	1,73E+08	1	1,73E+08	88,3	0
C:Parametro seleccion	562634	1	562634	0,29	0,5937
AB	8,89E+06	1	8,89E+06	4,54	0,0369
AC	72300,3	1	72300,3	0,04	0,8482
BC	1,21E+06	1	1,21E+06	0,62	0,4352
Error total	1,25E+08	64	1,96E+06		
Total (corr.)	6,68E+08	79			

Figura 25. Análisis de Varianza Problema 20-5-1

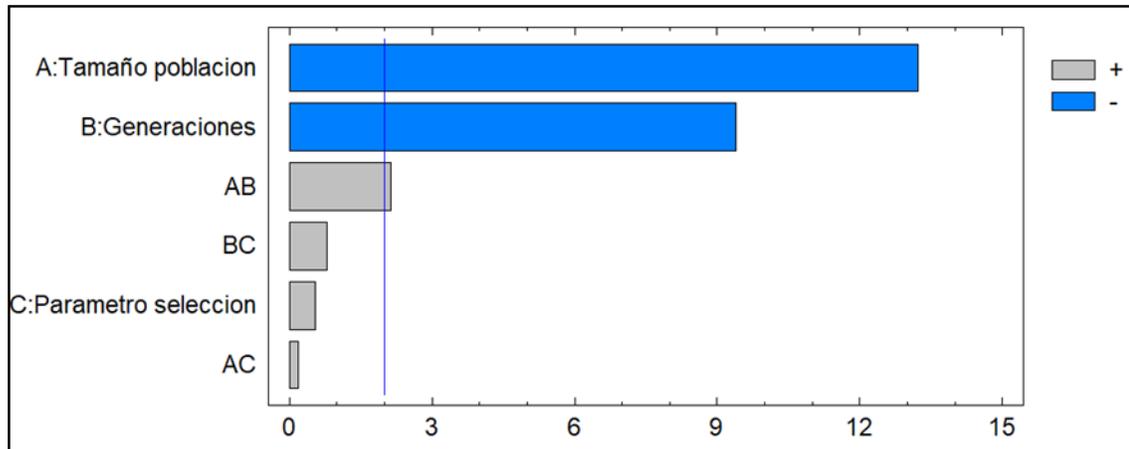


Figura 26. Diagrama de Pareto Problema 20-5-1

Como se observa en la figura 26 cuando el tamaño de la población y el número de generaciones usan su nivel más alto la solución del algoritmo converge a la mejor encontrada por el programa, el factor que menos incide es el parámetro de selección.

A continuación, se observan el resumen del diseño experimental de cada una de las instancias evaluadas según los parámetros anteriormente fijados.

	Tamaño Poblacion (A)	Generaciones (B)	Parametro de seleccion (C)	AB	AC	BC
Instancia	Valor-P	Valor-P	Valor-P	Valor-P	Valor-P	Valor-P
20-5-1--	0	0	0,5937	0,0369	0,8482	0,4352
20-5-1b	0	0	0,6621	0,0723	0,814	0,3998
50-5-2a	0	0	0,7242	0,0801	0,0725	0,1299
50-5-2b	0	0	0,499	0,7966	0,1173	0,1798
50-5-2bBIS	0	0	0,0587	0,0046	0,8395	0,684
50-5-2BIS	0	0	0,2022	0,6932	0,1624	0,3726
Gaspell	0	0	0,6777	0	0,095	0,9369
Min134	0	0	0,3556	0,0137	0,809	0,5468
Or117	0	0	0,2685	0,1521	0,1111	0,4085

Figura 27. Resumen Resultado del Diseño de Experimentos en las Instancias

Para todas las instancias se observa el mismo comportamiento descrito para la instancia 20-5-1, el cual encuentra la mejor solución cuando el tamaño de la población y el número de

generaciones se encuentran en el nivel más alto. Los resultados del diseño de experimentos para cada instancia se pueden observar en el Apéndice H.

11.4 Parámetros del algoritmo

Tabla 6.
Definición de Parámetros del Algoritmo Memético

Parámetro	Descripción
Tamaño de la Población	En total una población inicial de 80 individuos, verificando que los individuos generados sean diferentes del resto y cumplan con las restricciones
Generaciones locales	Se ejecutan un máximo de 100 iteraciones locales.
Tasa de Mutación	La tasa de mutación establecida para este problema es de 100%. Se realizará mutación SWAP en el vector de rutas.
Parámetro de Selección	Se fija el parámetro de selección como $q=0,5$ teniendo en cuenta el diseño de experimentos en donde se observa que este parámetro no es significativo en la variabilidad de la solución.
Corridas	Se establece 1 corridas por cada ejecución del algoritmo

11.5 Resultados de las Instancias

La notación utilizada en las tablas de resultados de la validación del algoritmo es la siguiente:

P= Población

DS= Desviación estándar

G= Numero de generaciones

MC= Mejor solución conocida

P.S= Parámetro de selección

%D= porcentaje de diferencia

ME= Mejor solución encontrada

LB= Lower bound

M= Media

Se ejecutó nuevamente el MA propuesto teniendo en cuenta los parámetros más significativos según el diseño de experimentos. El resultado de las diferentes corridas para cada instancia se observa en el Apéndice J. En la figura 28 se observan los resultados de cada instancia programada con los nuevos parámetros y se puede concluir que se obtiene mejores resultados fijando el tamaño de la población y el número de generaciones en el nivel alto. Para los problemas de baja complejidad podemos observar una diferencia no mayor al 6% con respecto a la mejor solución conocida. En los problemas de mediana complejidad cuyo tamaño es similar al del caso de estudio de la presente investigación se encontraron soluciones que difieren en menos de un 20% con respecto a la mejor solución conocida en la literatura.

Resumen Resultados de las Instancias								
Instancia	P	G	P.S	ME	M	DS	LB	% Dif
20-5-1--	80	100	0,5	55051	55974,1	806,1	54793	0,47%
20-5-1b	80	100	0,5	41443	42613,9	828,0	39104	5,98%
50-5-2a	80	100	0,5	99517	102768,7	2219,5	88298	12,71%
50-5-2b	80	100	0,5	80235	82443,0	911,0	67308	19,21%
50-5-2bBIS	80	100	0,5	59905	62058,6	2069,4	51822	15,60%
50-5-2BIS	80	100	0,5	93464	94915,5	988,1	84055	11,19%
Min134	80	100	0,5	11912,1	13555,9	748,6	5423	119,66%
Or1173	80	100	0,5	18936,7	20657,3	1210,9	12048	57,18%
Gaspell	80	100	0,5	433,7	439,6	6,9	424,9	2,07%

Figura 28. Resumen Resultados de las Instancias según los Mejores Parámetros

12. Resultados del Caso de Estudio EMAB

El algoritmo memético fue aplicado para resolver el problema de localización y ruteo con ventanas de tiempo para el problema de recolección de residuos sólidos en el centro de Bucaramanga realizado por la EMAB. El diseño de experimentos realizado en el capítulo anterior permitió ajustar los parámetros del algoritmo para hallar la configuración que entregue la mejor calidad en las soluciones. Debido a que los clientes están divididos en dos grupos según el día de recolección se asumió inicialmente que estos son visitados todos los días para determinar qué estaciones debían ser habilitadas. De lo contrario, ejecutar el algoritmo con los clientes por separado podría llevar a que para el primer grupo se habiliten determinadas estaciones y para el

segundo grupo otras diferentes. Se realizó la asignación de las rutas a los vehículos. Como paso previo fue necesario determinar la capacidad que debe tener cada estación ya que se cuenta con varias alternativas descritas en el capítulo 6.1 y cualquiera de estas puede ser instalada en los 11 puntos potenciales identificados. Por esta razón el algoritmo fue ejecutado 3 veces, una por cada tipo de estación para encontrar el menor costo de la solución. La Figura 29 presenta los resultados obtenidos para 10 ejecuciones del algoritmo por cada alternativa

# Estaciones	Réplica	Costo Solucion	Costo Ruta
2	1	\$ 284.050.072	\$ 50.072
	2	\$ 284.048.334	\$ 48.334
	3	\$ 284.048.259	\$ 48.259
	4	\$ 284.051.234	\$ 51.234
	5	\$ 284.052.149	\$ 52.149
	6	\$ 284.052.615	\$ 52.615
	7	\$ 284.049.764	\$ 49.764
	8	\$ 284.047.766	\$ 47.766
	9	\$ 284.051.489	\$ 51.489
	10	\$ 284.050.670	\$ 50.670
3	1	\$ 243.047.080	\$ 47.080
	2	\$ 243.051.964	\$ 51.964
	3	\$ 243.048.748	\$ 48.748
	4	\$ 243.050.868	\$ 50.868
	5	\$ 243.052.760	\$ 52.760
	6	\$ 243.048.224	\$ 48.224
	7	\$ 243.049.350	\$ 49.350
	8	\$ 243.052.677	\$ 52.677
	9	\$ 243.047.379	\$ 47.379
	10	\$ 243.050.534	\$ 50.534
4	1	\$ 288.042.676	\$ 42.676
	2	\$ 288.051.401	\$ 51.401
	3	\$ 288.053.588	\$ 53.588
	4	\$ 288.048.748	\$ 48.748
	5	\$ 288.055.290	\$ 55.290
	6	\$ 288.051.449	\$ 51.449
	7	\$ 288.048.712	\$ 48.712
	8	\$ 288.050.112	\$ 50.112
	9	\$ 288.054.564	\$ 54.564
	10	\$ 288.053.372	\$ 53.372

Figura 29. Resumen Resultados de Corridas para el Caso de Estudio

El menor costo promedio se obtuvo cuando la cantidad de estaciones abiertas es 3 ya que la mayor proporción del valor de la solución corresponde a la inversión en el sistema soterrado en la cual dicha alternativa aventaja considerablemente a las demás.



Figura 30. Ejemplo de tipo de estación de transferencia escogida

A partir de estas evidencias se escogió la réplica 1 de la apertura de 3 estaciones como mejor solución encontrada, habilitando las estaciones Colegio Salesiano, Concha Acústica e Intercambiador Cra. 15 Av. Quebradaseca. El cromosoma obtenido fue el siguiente:

Estaciones habilitadas: 51, 57, 58

Índices: 12, 28, 50

Clientes: 35, 21, 23, 20, 41, 17, 13, 10, 9, 11, 25, 22, 33, 45, 2, 29, 30, 32, 28, 47, 1, 44, 27, 43, 50, 31, 42, 3, 26, 16, 37, 46, 38, 39, 40, 12, 8, 15, 19, 5, 14, 24, 18, 36, 49, 48, 7, 6, 34, 4

Costo: \$243.047.080.

Posteriormente, se ejecutó el algoritmo para cada grupo de clientes. Aquí se dejaron fijas las estaciones encontradas y no se aplicaron operadores meméticos a la sección del cromosoma correspondiente a las estaciones habilitadas. Luego de 5 ejecuciones para cada grupo de clientes las mejores soluciones encontradas fueron las siguientes:

12.1 Mejor Resultado Grupo 1*Estaciones habilitadas:* 44, 45, 46*Índices:* 14, 17, 43*Clientes:* 6, 21, 7, 17, 19, 10, 16, 18, 12, 20, 30, 15, 23, 13, 34, 31, 37, 41, 39, 42, 4, 5, 3, 40, 29, 43, 27, 25, 26, 28, 1, 8, 11, 22, 32, 24, 33, 35, 36, 38, 9, 14, 2*Costo:* \$243.088.186,40

En las figuras 31, 32 y 33 se observa el orden de los clientes a visitar, la estación a la que fueron asignados y el vehículo que realiza la acción de recolección.

Carro 1			
Estación	Concha Acústica	Colegio Salesiano	Intercambiados Cra 15 Av Quebradaseca
Ruta 3-1-4	Banco Davivienda	Alcaldía	Rayco
	Panadería Trillos	Secretaría de Salud	Financiera Comultrasan
	Centro Comercial Panamá	Aluvidrios	Surtidora de Confecciones
		Notaría Séptima	Restaurante Los Andes
		Raspados El Manantial	Restaurante Rosalba
		Casa del Libro Total	Restaurante La Brasa
		Gráficos Trijaimés	
		Parqueadero	

Figura 31. Ruta grupo 1 para el carro 1

Carro 2			
Estación	Colegio Salesiano	Intercambiados Cra 15 Av Quebradaseca	
Ruta 2-5	Consentidos	Gráficas	
	Restaurante Aldaba	Hotel El Pilar	
	Metro (Cra 17)	Vidriería Clitsu	
	El Machete	Edificio Urbano 24	
	Vioplast	Edificio Juan Pablo	
	Cristsol		Edificio Samore
			Hotel Guane
			Metro (CII 34)

Figura 32. Ruta grupo 1 para el carro 2

Carro 3	
Estación	Intercambiados Cra 15 Av Quebradaseca
Ruta 6	Avisneyder
	Casetas Tierrero
	SKF
	Restaurante Claudia
	Banco de la República
	Banco Agrario
	Bancolombia
	Banco BBVA
	Droguería Pinzón
	Bancolombia
	Distriplast
	Peleterías

Figura 33. Ruta grupo 1 para el carro 3

12.2 Mejor Resultado Grupo 2

Estaciones habilitadas: 40,41,42

Índices: 12, 28, 39

Clientes: 10, 11, 12, 16, 18, 9, 17, 19, 32, 26, 33, 4, 24, 23, 22, 35, 1, 2, 38, 34, 36, 15, 20, 14, 13, 27, 31, 21, 8, 30, 29, 28, 37, 39, 7, 3, 25, 6, 5

Costo: \$243.110.258,80

En las figuras 34, 35 y 36 se observa el orden de los clientes a visitar, la estación a la que fueron asignados y el vehículo que realiza la acción de recolección.

Carro 1			
Estación	Colegio Salesiano	Colegio Salesiano	Colegio Salesiano
Ruta 1-2-3	Gráficos Trijaimés	Avisneyder	Centro Comercial Panamá
	Parqueadero	Barrio Villa Romero	Panadería Trillos
	Alcaldía	Casa del Libro Total	Droguería Pinzón
	Notaría Séptima		Peleterías
	Restaurante Aldaba		

Figura 34. Ruta grupo 2 para el carro 1

Carro 2			
Estación	Concha Acústica	Concha Acústica	Concha Acústica
Ruta 4-5-6	El Machete	Gráficas	Hotel El Pilar
	Vioplast	Edificio Arboreto	Hotel Guane
	Distriplast	Edificio Paseo España	Edificio Urbano 24
	Consentidos		Edificio Palmar 37
	Restaurante Claudia		Edificio Maria Ema
	Banco BBVA		Edificio Martha Cecilia
	Banco de la República		

Figura 35. Ruta grupo 2 para el carro 2

Carro 3		Carro 4	
Estación	Intercambiados Cra 15 Av Quebradaseca	Estación	Intercambiados Cra 15 Av Quebradaseca
Ruta 7	Ultramatic	Ruta 8	Metro (Cra 17)
	Bancolombia		Restaurante Los Andes
	Banco Davivienda		Restaurante La Brasa
	Banco Agrario		
	Financiera Comultrasan		
	Surtidora de Confecciones		
	Restaurante Rosalba		
	Metro (CII 34)		

Figura 36. Rutas grupo 2 para los carros 3 y 4

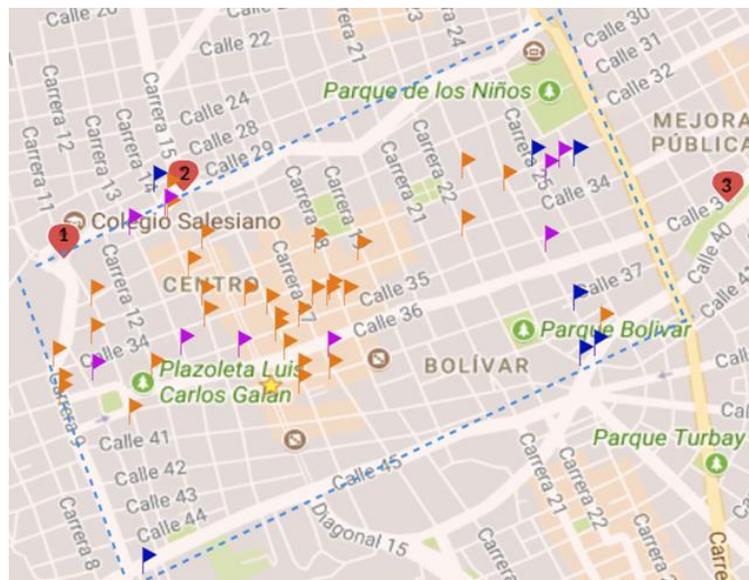


Figura 37. Distribución geográfica de los resultados

13. Conclusiones

Los objetivos propuestos para la investigación “Algoritmo memético para el problema de localización y ruteo de vehículos con ventanas de tiempo en el proceso de recolección de residuos sólidos en el centro de la ciudad de Bucaramanga de la empresa de aseo de Bucaramanga – EMAB” se cumplieron en su totalidad. El algoritmo diseñado puede ser utilizado como herramienta para la toma de decisiones logísticas de localización y ruteo con ventanas de tiempo. La edición de los datos de entrada es sencilla y debe seguir el formato establecido en Excel para la lectura de los mismos por parte del algoritmo, de igual forma encuentra buenas soluciones que cumplen con las restricciones propias del problema planteado.

La representación de la solución en el algoritmo permitió una rápida comprensión de los resultados y la aplicación de los operadores meméticos. El procedimiento de decodificación dividió la solución en rutas para el cálculo del costo provocando que los operadores que explotan el conocimiento sobre el ruteo fueran aplicados más fácilmente en un único vector de clientes con longitud constante, utilizando el ECWA en conjunto con la habilitación aleatoria de estaciones de transferencia diversifica la generación de soluciones iniciales para evitar la convergencia prematura en un óptimo local.

El optimizador local LocalOpt fue aplicado para introducir la ruta más corta entre cuatro clientes consecutivos. El aumento del número de clientes consecutivos que evalúa aumenta considerablemente el tiempo de ejecución del algoritmo, de manera que al establecer el número en cuatro clientes se obtenían buenas soluciones sin incurrir en mayor costo computacional. Si bien el algoritmo propuesto no fue diseñado para resolver problemas de tipo CLRP, se suprimió la consideración de las ventanas de tiempo para probar su desempeño al resolver instancias de dicho problema. Se encontró que para aquellas de baja y media complejidad el algoritmo encuentra soluciones cercanas a las mejores encontradas, mientras que para instancias de alta complejidad su desempeño es regular.

Los resultados encontrados para el caso de estudio arrojaron rutas para ambos grupos de recolección pasando de aproximadamente 17 transferencias diarias según el estudio

anteriormente realizado a sólo 6 y 8 respectivamente para cada grupo aprovechando mejor las capacidades de los vehículos y recorriendo distancias más cortas, teniendo en cuenta las holguras de capacidad consideradas durante la resolución del problema, las cuales permiten amortiguar las variaciones de demanda que efectivamente pueden ocurrir en la operación real y que no se tuvieron en cuenta al asumir demandas determinísticas.

La propuesta innovadora de infraestructura para el desarrollo de la operación de recolección de residuos sólidos en el centro de la ciudad de Bucaramanga es una alternativa logística que cumple con la normativa medioambiental y evita el antiguo proceso de transferencia de residuos ineficiente, eliminando el tiempo de espera para el encuentro de los vehículos, aumentando la productividad del sistema y mitigando el impacto ecológico.

El desarrollo de este proyecto de grado representó un reto académico con relación a la comprensión del problema de investigación, el modelo matemático, el diseño del algoritmo y el lenguaje de programación utilizado que involucró conocimiento de diferentes áreas de la ingeniería industrial reforzando habilidades necesarias para una competente formación profesional

14. Recomendaciones

Realizar un estudio de viabilidad financiera para la propuesta innovadora de infraestructura del proceso de recolección desde la perspectiva de la situación económica de la EMAB y considerar la instalación de este tipo de estaciones en otros sectores de la ciudad.

Implementar el algoritmo con información reciente de los clientes de la EMAB necesaria para encontrar soluciones más acordes con la actualidad de la empresa debido a que los clientes, ventanas de tiempo y demandas pueden haber cambiado desde la realización del último estudio de caracterización de la operación, de igual modo expandir el uso del algoritmo a la solución de problemas de localización y ruteo en sectores diferentes a la recolección de residuos sólidos urbanos.

Incluir en la función objetivo del problema aspectos relacionados con el impacto ambiental al instalar una estación de transferencia en determinado sector que aporte información adicional para la toma de decisiones, así mismo desarrollar un optimizador local que tenga en cuenta tanto la cercanía de los puntos como la condición temporal que posibilita la visita.

Crear instancias para el LRPTW que permitan evaluar el desempeño de futuros algoritmos desarrollados para este problema, de igual modo diseñar otro tipo de algoritmos heurísticos o metaheurísticos para la solución del LRPTW en el grupo de investigación OPALO para comparar la eficiencia de los mismos en este tipo de problemas comunes en logística empresarial.

15. Referencias Bibliográficas

- Arango-Serna, M. D., & Serna Uran, C. A. (2015). A Memetic Algorithm for the Traveling Salesman Problem. *IEEE Latin America Transactions*, 13(8), 2674–2679. <https://doi.org/10.1109/TLA.2015.7332148>
- Asefi, H., Lim, S., & Maghrebi, M. (2015). A mathematical model for the municipal solid waste location-routing problem with intermediate transfer stations. *Australasian Journal of Information Systems*, 19, S21–S35.
- Aysy, O. B. R., Dullaert, W., & Gendreau, M. (2005). Evolutionary Algorithms for the Vehicle Routing Problem with Time Windows. *Journal of Heuristics*, 10, 587–611.
- Beliën, J., De Boeck, L., & Van Ackere, J. (2011). Municipal Solid Waste Collection and Management Problems: A Literature Review. *Transportation Science*, 48(1), 78–102. <https://doi.org/10.1287/trsc.1120.0448>
- Bing, X., Bloemhof, J. M., Ramos, T. R. P., Barbosa-Povoa, A. P., Wong, C. Y., & van der Vorst, J. G. A. J. (2016). Research challenges in municipal solid waste logistics management. *Waste Management*, 48, 584–592. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.11.025>
- Blickle, T., & Thiele, L. (1995). A Comparison of Selection Schemes used in Genetic Algorithms. *TIK-Report*, 2(11), 311–347. <https://doi.org/10.1162/evco.1996.4.4.361>
- Bovea, M. D., Powell, J. C., Gallardo, A., & Capuz-Rizo, S. F. (2007). The role played by environmental factors in the integration of a transfer station in a municipal solid waste management system. *Waste Management*. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.03.020>
- Buhrkal, K., Larsen, A., & Ropke, S. (2012). The Waste Collection Vehicle Routing Problem with Time Windows in a City Logistics Context. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 39, 241–254. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.03.105>
- Capelle, T. (2012). Problema de localización y ruteo con Pickup and Delivery, 1–69.
- Chatzouridis, C., & Komilis, D. (2012). A methodology to optimally site and design municipal solid waste transfer stations using binary programming. *Resources, Conservation and Recycling*. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.12.004>
- Christianblum, & Roli, A. (2003). Metaheuristics in Combinatorial Optimization: Overview and Conceptual Comparison, 35(3), 268–308. <https://doi.org/10.1145/937503.937505>
- Cotta, C. (2007). Una Visión General de los Algoritmos Meméticos. *Rect@: Revista Electrónica de Comunicaciones Y Trabajos de ASEPUMA*, 3, 139–166.
- Derbel, H., Jarboui, B., Hanafi, S., & Chabchoub, H. (2012). Genetic algorithm with iterated local search for solving a location-routing problem. *Expert Systems with Applications*, 39(3), 2865–2871. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.08.146>
- Duarte, A., Pantrigo, J., & Gallego, M. (2007). *Metaheurísticas*. Madrid: DYKINSON.

- El-Sherbeny, N. A. (2010). Vehicle routing with time windows: An overview of exact, heuristic and metaheuristic methods. *Journal of King Saud University - Science*. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2010.03.002>
- Gestal, M. (n.d.). COMPUTACIÓN EVOLUTIVA PARA EL.
- Gestal, M., Rivero, D., Rabuñal, J. R. J., Dorado, J., & Pazos, A. (2010). *Introducción a los algoritmos genéticos y la programación genética*. Retrieved from <http://books.google.com/books?id=PMTvZwEACAAJ&pgis=1%5Cnhttp://www.galeon.com/dantethedestroyer/algoritmos.pdf>
- Ghiani, G., Laganà, D., Manni, E., Musmanno, R., & Vigo, D. (2013). Author's personal copy Review Operations research in solid waste management: A survey of strategic and tactical issues. Retrieved from <http://www.elsevier.com/authorsrights>
- Guerrero, L. A., Maas, G., & Hogland, W. (2013). Solid waste management challenges for cities in developing countries. *Waste Management*. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.09.008>
- Herrera, F. (2006). Introducción a los algoritmos metaheurísticos. *Ciencias de La Computación E IA*. Retrieved from <http://sci2s.ugr.es>
- Islam, R., & Rahman, M. S. (2012). An ant colony optimization algorithm for waste collection vehicle routing with time windows, driver rest period and multiple disposal facilities. In *2012 International Conference on Informatics, Electronics and Vision, ICIEV 2012* (pp. 774–779). <https://doi.org/10.1109/ICIEV.2012.6317421>
- Jayalakshmi, G. A., Sathiamoorthy, S., & Rajaram, R. (2001). A Hybrid Genetic Algorithm — A New Approach To Solve Traveling Salesman Problem. *International Journal of Computational Engineering Science*, 2(2), 339–355. <https://doi.org/10.1142/S1465876301000350>
- Karaoglan, I., & Altiparmak, F. (2015). A memetic algorithm for the capacitated location-routing problem with mixed backhauls. *Computers and Operations Research*, 55, 200–216. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2014.06.009>
- Kek, A. G. H., Cheu, R. L., & Meng, Q. (2008). Distance-constrained capacitated vehicle routing problems with flexible assignment of start and end depots. *Mathematical and Computer Modelling*. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2007.02.007>
- Kim, B.-I., Kim, S., & Sahoo, S. (2006). Waste collection vehicle routing problem with time windows. *Computers & Operations Research*, 33(33), 3624–3642. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2005.02.045>
- Knowles, J., & Corne, D. (2000). M-PAES: A memetic algorithm for multiobjective optimization. *Evolutionary Computation*, 2000. ... Retrieved from http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=870313
- Koç, Ç. (2016). A unified-adaptive large neighborhood search metaheuristic for periodic location-routing problems. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 68, 265–284. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.04.013>
- Koç, Ç., Bektaş, T., Jabali, O., & Laporte, G. (2016). The fleet size and mix location-routing

- problem with time windows: Formulations and a heuristic algorithm. *European Journal of Operational Research*. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.06.082>
- Linden, R. (2008). *Algoritmos genéticos (2a edição)*. Brasport.
- Li-Ying, W., & Yuan-Bin, S. (2015). Multiple charging station location-routing problem with time window of electric vehicle. *Journal of Engineering Science and Technology Review*.
- Lüer, A., Benavente, M., Bustos, J., & Venegas, B. (2009). The vehicle routing problem: Extensions and resolution methods, state of the art | El problema de rutas de veh?culos: Extensiones y m?todos de resoluci?n estado del arte. In *CEUR Workshop Proceedings* (Vol. 558).
- MADS. Política para la gestión integral de residuos solidos (1998). <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- Maranzana, F. E. (1964). On the location of supply points to minimize transport costs. *OR*, 261-270.
- Minh, T. T., Van Hoai, T., & Nguyet, T. T. N. (2013). A memetic algorithm for waste collection vehicle routing problem with time windows and conflicts. *Computational Science and Its Applications – ICCSA 2013 Lecture Notes in Computer Science Volume 7971, 7971 LNCS*, 485–499. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-39637-3-38>
- MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. (2013, Diciembre 20). DECRETO 2981.
- Molina, D. (2007). *Algoritmos Meméticos con Aplicación Adaptativa de la Búsqueda Local para Optimización Continua*. Universidad de Granada.
- Moscato, P., & Cotta, C. (2003). A Gentle Introduction to Memetic Algorithms. *Building*, 7(19), 1–36. <https://doi.org/10.4114/ia.v7i19.721>
- Moscato, P., & Cotta, C. (2003). Una Introducción a los Algoritmos Meméticos. *Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial*, 19(19), 131–148.
- N. Nasherahkami, M. Bashiri, & J. Bagherinejad. (2015). Modeling of Periodic Location Routing Problem with Time Window and Satisfaction Dependent Demands. *Alzahra University*.
- Nagy, G., & Salhi, S. (2006). Location-routing: Issues, models and methods. *European Journal of Operational Research*. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.04.004>
- Navarro, R. B. (2008). *Meta-Heurísticas híbridas para optimización mono-objetivo y multi-objetivo. Paralelización y aplicaciones*. Universis Almenía.
- Nesmachnow, S. (2004). Algoritmos Genéticos y Paralelos y su Aplicación al Diseño de Redes de Comunicaciones Confiables, 174. Retrieved from <http://www.fing.edu.uy/~sergion/Tesis.pdf>
- Nier, A., & Niño, J. (2015). DESARROLLO DE UN ALGORITMO HÍBRIDO PARA RESOLVER EL PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN-RUTEO (LRP).
- Ponboon, S., Qureshi, A. G., & Taniguchi, E. (2016a). Branch-and-price algorithm for the

- location-routing problem with time windows. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 86, 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2015.12.003>
- Ponboon, S., Qureshi, A. G., & Taniguchi, E. (2016b). Branch-and-price algorithm for the location-routing problem with time windows. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 86, 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2015.12.003>
- Ponboon, S., Qureshi, A. G., & Taniguchi, E. (2016c). Branch-and-price algorithm for the location-routing problem with time windows. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2015.12.003>
- Prodhon, C., & Prins, C. (2014). A survey of recent research on location-routing problems. *European Journal of Operational Research*. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.01.005>
- Prodhon, C. (22 de Diciembre de 2014). *Caroline Prodhon's home page*. Obtenido de <http://prodhonc.free.fr/>
- Rabbani, M., Farrokhi-Asl, H., & Asgarian, B. (2016). Solving a bi-objective location routing problem by a NSGA-II combined with clustering approach: application in waste collection problem. *Journal of Industrial Engineering International*, 13. <https://doi.org/10.1007/s40092-016-0172-8>
- Rabbani, M., Farrokhi-Asl, H., & Rafiei, H. (2016). A hybrid genetic algorithm for waste collection problem by heterogeneous fleet of vehicles with multiple separated compartments. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*. <https://doi.org/10.3233/IFS-151893>
- Ramón Rabuñal Dopico Doctorando Marcos Gestal Pose, J. (n.d.). COMPUTACIÓN EVOLUTIVA PARA EL.
- Ramos, T. R. P., Gomes, M. I., & Barbosa-Póvoa, A. P. (2014). Assessing and improving management practices when planning packaging waste collection systems. *Resources, Conservation and Recycling*. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.12.013>
- REAL ACADÉMIA ESPAÑOLA. (2013, 12 20). Retrieved from Diccionario de la lengua española: <http://dle.rae.es/?id=PwJqAMq>
- Salhi, S. &. (1989). The effect of ignoring routes when locating depots. *European journal of operational research*, 150-156.
- Senarclens de Grancy, G. (2015). An adaptive metaheuristic for vehicle routing problems with time windows and multiple service workers. *Journal of Universal Computer Science*, 21(9), 1143–1167.
- Vitorino de Souza Melaré, A., Montenegro González, S., Faceli, K., & Casadei, V. (2017). Technologies and decision support systems to aid solid-waste management: a systematic review. *Waste Management*, 59, 567–584. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.045>
- World Bank. (2010). Waste Generation. *Urban Development Series-Knowledge Papers*, 3(1), 8–12.
- Wy, J., Kim, B.-I., & Kim, S. (2013). The rollon–rolloff waste collection vehicle routing problem

with time windows. *European Journal of Operational Research*, 224(3), 466–476.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.09.001>

WASTE. (2015). *WASTE*. Retrieved from <http://waste.nl/en/about/mission-and-vision>

Waste Solutions, F. (2013). Retrieved from Formato Verde: <http://www.formatoverde.com/es-ES/soterrados/que-es-un-soterrado.aspx>