

**“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE RUTAS DE RECOLECCIÓN DE RESIDUOS
HOSPITALARIOS PARA LA EMPRESA EDEPSA S.A.S”**

**JOHAN ALONSO GUEVARA PARADA 2062533
ADRIANA MARCELA VARGAS SAAVEDRA 2071993**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE ESTUDIOS INDUSTRIALES Y EMPRESARIALES
BUCARAMANGA
2014**

**“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE RUTAS DE RECOLECCIÓN DE RESIDUOS
HOSPITALARIOS PARA LA EMPRESA EDEPSA S.A.S”**

**JOHAN ALONSO GUEVARA PARADA 2062533
ADRIANA MARCELA VARGAS SAAVEDRA 2071993**

**Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero Industrial.**

**Director
JAVIER ARIAS OSORIO
Ingeniero de Sistemas
Magister en Administración**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE ESTUDIOS INDUSTRIALES Y EMPRESARIALES
BUCARAMANGA
2014**

AGRADECIMIENTOS

A Dios por la vida y por ser quien ha estado a nuestro lado en cada decisión que hemos tomado, dándonos fuerza y bendiciendo nuestro camino día tras día.

A cada una de nuestras familias por su constante apoyo y comprensión, por la formación integral y el buen ejemplo de vida.

A nuestros amigos y profesores por obsequiarnos tiempo y valioso conocimiento en nuestra proyección profesional.

Al ingeniero Javier Arias por su compromiso y acompañamiento en cada paso dado.

Y al ingeniero Juan David Rodriguez por su asesoría y Colaboración.

Este es el final de una etapa más de nuestras vidas y la apertura de nuevos retos, metas y oportunidades. GRACIAS

TABLA DE CONTENIDO

Página

INTRODUCCIÓN.....	21
1. GENERALIDADES DEL PROYECTO.....	23
1.1 GENERALIDADES DE LA EMPRESA.....	23
1.1.1 ACTIVIDAD ECONÓMICA.....	23
1.1.2 LOCALIZACIÓN.....	24
1.1.3 TAMAÑO DE DE LA EMPRESA.....	24
1.1.4 COBERTURA.....	25
1.1.5 CLIENTES.....	25
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	26
1.3 OBJETIVOS.....	27
1.3.1 OBJETIVO GENERAL.....	27
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	27
1.4 ALCANCE DEL PROYECTO.....	28
2. MARCO REFERENCIAL.....	29
2.2 MARCO TEORICO.....	30
2.2.1 SISTEMAS LOGISTICOS.....	30
2.2.2 INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES.....	36
2.2.3 MODELOS DE OPTIMIZACIÓN.....	36
2.2.4 OPTIMIZACIÓN COMBINATORIA (OC).....	37
2.2.5 MODELO DE TRANSPORTE.....	37
2.2.6 PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS.....	39
2.2.7 MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN EMPLEADOS EN LA SOLUCIÓN DEL TSPTW.....	39
3. APLICACIÓN DEL MODELO DE OPTIMIZACIÓN TSPTW A LA PROGRAMACIÓN DE RUTAS EN EDEPSA ESP.....	56

3.1 ELEMENTOS A CONSIDERAR PARA LA OPTIMIZACIÓN	56
3.1.1 CLIENTES	56
3.1.2 FUERZA LABORAL	59
3.1.3 RECOLECCIÓN DE LOS RESIDUOS (CARGA Y DESCARGA).....	60
3.1.4 RECURSOS INVOLUCRADOS	61
3.1.5 RESTRICCIONES DE TRÁNSITO	63
3.1.6 VELOCIDAD	64
3.1.7 RESTRICCIONES DE CAPACIDAD.....	64
3.1.8 DESCRIPCIÓN DEL MODELO.....	70
3.1.9 FORMULACIÓN DEL MODELO DE OPTIMIZACIÓN.....	71
3.2 TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN MATEMÁTICAS APLICADAS.....	74
4. SOFTWARE PARA EL PROBLEMA DEL AGENTE VIAJERO CON VENTANAS DE TIEMPO.....	76
4.1 INTRODUCCIÓN	76
4.2 DISEÑO DEL SOFTWARE TSPTW	77
4.2.1 COMPONENTES.....	78
4.2.2 HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES.....	86
4.2.3 HERRAMIENTA PARA EL CÁLCULO	89
4.3 DESARROLLO DEL SOFTWARE TSPTW	89
4.4 CONSTRUCCIÓN DE UNA RUTA DE RECOLECCIÓN EDEPSA SOLUCIONES AMBIENTALES.	92
5. IMPLEMENTACION	95
5.1 FASE 1.....	95
5.1.1.DEFINICIÓN LÍNEA BASE.....	95
5.1.2.EVALUACIÓN DE CRITERIOS Y SUPUESTOS.....	97
5.1.3.RESULTADOS OBTENIDOS CON EL MODELO DE OPTIMIZACIÓN	98
5.2 FASE 2.....	100
5.2.1.EXPERIMENTACIÓN Y REPLICACIÓN.....	100

5.2.2 PROGRAMACIÓN DE RUTAS CON EL MODELO DE OPTIMIZACIÓN.....	103
5.2.3 IMPLEMENTACIÓN DE LA RUTA PROGRAMADA.....	105
6. CONCLUSIONES.....	111
7. RECOMENDACIONES.....	114
REFERENCIAS.....	116
BIBLIOGRAFIA.....	121
ANEXOS.....	126

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. UBICACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA DE EDEPSA ESP.	24
TABLA 2. ANTECEDENTES.....	29
TABLA 3. CONCEPTOS CLAVES DE OPTIMIZACIÓN COMBINATORIA.....	38
TABLA 4. VARIACIONES DEL PROBLEMA DEL RUTEO DE VEHÍCULOS.....	40
TABLA 5. TIPOS DE INSERCIÓN	47
TABLA 6. PUNTOS DE REFERENCIA PARA LA TERMINACIÓN DE LA META HEURÍSTICA.....	53
TABLA 7. CANTIDAD DE CLIENTES ACTIVOS EN BUCARAMANGA SEGÚN EL TIPO DE RESIDUO GENERADO.....	56
TABLA 8. CANTIDAD DE CLIENTES INSCRITOS EN LA CIUDAD DE BUCARAMANGA DE LA LÍNEA HOSPITALARIA SEGÚN SU FRECUENCIA DE RECOLECCIÓN.....	57
TABLA 9. CANTIDAD DE CLIENTES DE ACUERDO A LA VENTANA HORARIA DE RECOLECCIÓN.	58
TABLA 10. PERSONAL DE GESTIÓN RESPALDO PARA LA RUTA DE BUCARAMANGA.....	59
TABLA 11. ALGORITMOS DESARROLLADOS EN LA APLICACIÓN DE RUTEO.....	75
TABLA 12. VERSIONES DEL API DE JAVA SCRIPT.....	82
TABLA 13. LIMITACIONES DE USO DEL API DE MATRIZ DE DISTANCIAS.....	84
TABLA 14. RUTAS DE RECOLECCIÓN EJECUTADA POR EL CONDUCTOR MES OCTUBRE	96
TABLA 15. RESULTADOS DE LA RUTA PLANEADA MEDIANTE EL MEJOR MÉTODO DE OPTIMIZACIÓN DESARROLLADO.....	99
TABLA 16. MEJORAS OBTENIDAS AL HACER USO DEL APLICATIVO.....	100
TABLA 17. ESCENARIO 1.....	101
TABLA 18. ESCENARIO 2.....	102
TABLA 19. ESCENARIO 3.....	102
TABLA 20. ESCENARIO 4.....	103
TABLA 21. RUTA PROGRAMADA POR EL MODELO DE OPTIMIZACIÓN NOVIEMBRE- DICIEMBRE.....	104

TABLA 22. RESULTADOS OBTENIDOS DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DE OPTIMIZACIÓN.....	106
TABLA 23. SITUACIONES FORTUITAS PRESENTES EN LE RUTEO VEHICULAR.....	107
TABLA 24. VARIACIÓN OPTIMIZACIÓN VS IMPLEMENTACIÓN.....	109

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. DEFINICIONES DE LOGÍSTICA INVERSA.....	32
FIGURA 2: DIAGRAMA DE LA INTEGRACIÓN DE LA RED LOGÍSTICA Y LA LOGÍSTICA INVERSA	33
FIGURA 3. ESTRATEGIAS MANEJO DE RESIDUOS.....	34
FIGURA 4. REPRESENTACIÓN DEL MODELO DE TRANSPORTE CON NODOS Y ARCOS	37
FIGURA 5. DIAGRAMA DE PROCESOS DEL VECINO MÁS CERCANO CON ENFOQUE TEMPORAL	45
FIGURA 6. DIAGRAMA DE FLUJO DOS OPT.....	50
FIGURA 7. DIAGRAMA DE FLUJO DOS OPT.....	50
FIGURA 8. TRES -OPTIMA.....	51
FIGURA 9. PRIMERA OPCIÓN DE MODIFICACIÓN 3- OPT.....	52
FIGURA 10. SEGUNDA OPCIÓN DE MODIFICACIÓN 3-OPT.....	52
FIGURA 11. DIAGRAMA DE CAJAS Y BIGOTES POR MES.....	66
FIGURA 12. DIAGRAMA DE CAJAS Y BIGOTES TOTAL	66
FIGURA 13. DISTRIBUCIÓN DE LA MUESTRA	68
FIGURA 14. GRÁFICO DE CONTROL DE CAPACIDAD.....	69
FIGURA 15. CLIENTE WEB.....	79
FIGURA 16. SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (API GOOGLE MAPS).....	81
FIGURA 17. SERVIDOR APACHE.....	84
FIGURA 18. INTERACCIÓN ENTRE COMPONENTES DEL SOFTWARE TSPTW.....	86
FIGURA 19. DIAGRAMA ENTRADAS Y SALIDAS DE LA APLICACIÓN DE RUTAS	90
FIGURA 20. DIAGRAMA DE ALMACENAMIENTO DE DATOS.....	90
FIGURA 21. ASIGNACIÓN DE CLIENTES A LA RUTA VEHICULAR.....	91
FIGURA 22. DIAGRAMA DE FLUJO DEL FUNCIONAMIENTO DE LA APLICACIÓN DE RUTEO VEHICULAR.....	92
FIGURA 23. PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DE UNA RUTA MEDIANTE EL APLICATIVO DESARROLLADO.....	93

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. CLASIFICACIÓN DE RESIDUOS	126
ANEXO B. DECRETO 2676 DE 29 DE JULIO DE 2011	127
ANEXO D. MAPA DE PROCESOS DE EDEPSA ESP SOLUCIONES AMBIENTALES.....	136
ANEXO E. ESTRUCTURA ORGANIZACIONAL DE EDEPSA ESP SOLUCIONES AMBIENTALES.....	137
ANEXO F. DESCRIPCION DE CARGOS DEL PERSONAL DIRECTO E INDIRECTO DE EDEPSA ESP SOLUCIONES AMBIENTALES	138
ANEXO G. COBERTURA DEL SERVICIO DE RECOLECCIÓN DE RESIDUOS DE EDEPSA ESP A NIVEL NACIONAL	141
ANEXO H. CLASIFICACIÓN DE LOS CLIENTES DE EDEPSA ESP	143
ANEXO I. PORTAFOLIO DE PRODUCTOS Y SERVICIOS	145
ANEXO J. NÚMERO DE CLIENTES DE EDPSA ESP POR MUNICIPIO	147
ANEXO K DIAGRAMA RADAR	149
ANEXO L. ENCUESTAS DE SATISFACCION DEL CLIENTE.....	159
ANEXO M DIAGRAMA CAUSA – EFECTO.....	166
ANEXO N PROCESO DE LA GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS PELIGROSOS:	170
ANEXO O. DIAGRAMA GESTION INTEGRAL DE RESIDUOS PELIGROSOS ...	173
ANEXO P. GENERADORES RESPEL.....	174
ANEXO Q. PROBLEMAS DE OPTIMIZACIÓN.....	175
ANEXO R. ESTUDIOS MÁS POSICIONADOS A TRAVÉS DE LA HISTORIA ENTRE 2006-2010	177
ANEXO S. POSIBLES FORMULACIONES DEL TSP	180
ANEXO T. TSPTW POSIBLES FORMULACIONES	183
ANEXO U. GENERALIDADES DE ALGUNAS META HEURÍSTICAS	185

ANEXO W. CÁLCULO DEL TIEMPO DE SERVICIO PARA PEQUEÑAS Y MEDIANAS ENTIDADES	190
ANEXO X. INSTRUCTIVO DEL USO DE LA APLICACIÓN DE RUTEO	194
ANEXO Y. GENERALIDADES DE LAS SOLICITUDES DE LA MATRIZ DE DISTANCIAS.....	203
ANEXO Z. CONSTRUCCIÓN DE UNA RUTA DE RECOLECCIÓN EDEPSA SOLUCIONES AMBIENTALES.....	207
ANEXO AA .VALIDACIÓN DE LA APLICACIÓN DE RUTEO.....	230
ANEXO AB ARTICULO :DISEÑO E IMPLEMENTACION DE RUTAS DE RECOLECCION DE LA EMPRESA EDEPSA ESP.....	230

RESUMEN

TÍTULO: “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE RUTAS DE RECOLECCIÓN DE RESIDUOS HOSPITALARIOS PARA LA EMPRESA EDEPSA S.A.S”¹

AUTORES: GUEVARA PARADA, Johan Alonso
VARGAS SAAVEDRA, Adriana Marcela

PALABRAS CLAVE: TSP con ventanas de tiempo, heurísticas de construcción, heurísticas de mejora, Meta heurística.

DESCRIPCION.

Gracias a la globalización de los mercados, a los frecuentes avances tecnológicos, y al fácil y rápido acceso a la información, ha podido crecer cada día el número de empresas que dedicadas al transporte concentran sus esfuerzos en mejorar sus operaciones optimizando sus recursos y aumentando su rentabilidad a través de herramientas que permitan resolver problemas de ruteo vehicular.

La empresa Edepsa Soluciones ambientales, asentada en el sector dedicado al servicio ambiental, permitió construir e implementar una herramienta de ruteo vehicular para optimizar los resultados de la ruta de recolección hospitalaria para clientes de Bucaramanga.

Se inicia con la revisión de la documentación del proceso RESPEL y se desarrolla un diagnóstico evidenciando oportunidades de mejora en la programación de rutas de recolección.

Seguido se selecciona el modelo del problema del agente viajero con ventanas de tiempo, por sus condiciones que se ajustan al comportamiento real sistema de recolección. Básicamente el modelo consta de un vehículo con capacidad infinita que debe visitar a un conjunto de clientes con ventanas horarias en una sola oportunidad partiendo de un punto de origen y retornando a este al final del recorrido.

Para dar solución al modelo se empleó una estrategia que permitiera establecer puntos de comparación entre métodos que ofrecieran mejores resultados con menor tiempo de procesamiento de cómputo. Métodos seleccionados de acuerdo a buenas prácticas expuestas en la bibliografía, que de antemano ofrecen confiabilidad para su aplicación.

Entre las técnicas utilizadas se encuentran 4 Heurísticas, 2 de construcción (El vecino más cercano y la inserción más barata) y 2 de mejora (2-opt y 3-opt) y 1 meta heurística (Búsqueda Tabú). Cabe resaltar que para la creación de esta herramienta se emplearon recursos y programas de libre aplicación web, elementos que se encuentran definidos en el capítulo 4.

¹ Proyecto de grado. Modalidad de Practica Empresarial

ABSTRACT

TÍTULO: “DESIGN AND IMPLEMENTATION OF HOSPITAL WASTE COLLECTION ROUTES FOR EDEPSA SAS COMPANY”²

AUTHORS: GUEVARA PARADA, Johan Alonso
VARGAS SAAVEDRA, Adriana Marcela

KEYWORDS: TSP with time windows, construction heuristics, enhancement heuristics, metaheuristic..

DESCRIPTION.

Thanks to the markets globalization, the frequent technological advances, and the quick and easy access to information, it has been able to grow each day the number of transport companies dedicated to improve its operations through optimizing resources and increasing profitability with tools to allow solve vehicle routing problems.

Edepsa environmental solutions is a company dedicated to environmental services, thanks to them was possible to build and implement a tool for vehicle routing to optimize results in the collection path for hospital clients in Bucaramanga.

It begins with a documentation review of the RESPEL process and it is developed a diagnostic, showing improvement opportunities in collection routes programming.

Followed it is selected a problem model for the traveling salesman with time windows, by its terms that fit the actual behavior collection system. Basically the model consists of a vehicle with infinite capacity that must visit a set of clients with time windows in just one opportunity from an origin point and returning to the same location at the end of trip.

To solve the model, a strategy to establish a comparison point between methods was employed for offered better results with less computer processing time. Methods selected according to best practices in the literature, which offer reliability in their application.

Among the techniques used are 4 heuristics, 2 of construction (The nearest neighbor and cheapest insertion), 2 of enhancement (2-opt and 3-opt) and 1 metaheuristic (Tabú Search). It is significant to mention the importance of free resources and free web application programs, these elements are defined in chapter 4.

² Degree Project. Modality Enterprise Practice

TABLA DE CUMPLIMIENTO DE OBJETIVOS

OBJETIVO	DESCRIPCIÓN	CUMPLIMIENTO
1	Adquirir y documentar información sobre la recolección de residuos peligrosos Hospitalarios de la empresa Edepsa S.A de los usuarios ubicados en la meseta de Bucaramanga.	Capítulo 1. Generalidades del proyecto.
2	Revisar y analizar en artículos científicos el problema del agente viajero y sus posibles variaciones.	Capítulo 2. Marco referencial.
3	Identificar las variables de mayor influencia, y las restricciones para el problema de ruteo vehicular en estudio.	Capítulo 3. Aplicación del modelo de optimización TSPTW a la programación de rutas en Edepsa.
4	Seleccionar las técnicas de optimización matemática aplicables, para dar solución al problema acotado.	Capítulo 3. Aplicación del modelo de optimización TSPTW a la programación de rutas en Edepsa Subcapítulo 3.2
5	Desarrollar modelos de optimización matemático para el problema en estudio.	Capítulo 3. Aplicación del modelo de optimización TSPTW a la programación de rutas en Edepsa Subcapítulo 3.1
6	Desarrollar las heurísticas propuestas contrastando sus resultados, seleccionando la mejor como semilla en el desarrollo de una meta heurística a implementar.	Capítulo 4. software para el problema del agente viajero con ventanas de tiempo
7	Validar la implementación del modelo con mejores resultados.	Capítulo 5. Implementación.

GLOSARIO

IMPACTO AMBIENTAL: Alteración del medio ambiente, provocada directa o indirectamente por un proyecto o actividad en un área determinada.

RESIDUOS PELIGROSOS: Desecho con propiedades intrínsecas que ponen en riesgo la salud de las personas o que pueden causar un daño al medio ambiente.

INSUMOS: Concepto económico que permite nombrar a un bien que se emplea en la producción de otros bienes, puede utilizarse como sinónimo de materia prima o factor de producción.

KID DE DERRAMES: Compuestos por productos versátiles con diferentes capacidades de absorción y múltiples aplicaciones, tanto para el rubro industrial como medida a la salida anormal de un líquido orgánico al exterior de la cavidad que debería contenerlo.

SEÑALIZACIÓN: Conjunto de señales y órdenes de agentes de diferente tipo.

GUARDIÁN: Recipiente que se utiliza para el desecho de elementos corto punzantes.

EDEPSA OPERATIVO: Software corporativo empleado como soporte en la empresa Edepsa S.A.S

MANIFIESTO DE TRANSPORTE: Planilla generada por el operador logístico que contiene la ruta a emplear en las recolecciones.

RESIDUOS INFECCIOSOS: Llamado también residuo patológico, posee características infecciosas.

BIOSANITARIO: Residuos sanitarios potencialmente infecciosos o peligrosos al haber entrado en contacto con pacientes enfermos o ser excretados por ellos.

ANATOMOPATOLOGICO: son los provenientes de restos humanos, incluyendo biopsias, placentas y fetos que no son reclamados por los familiares.

CORTO PUNZANTE: Se denomina material cortopunzante a las agujas, cánulas, branulas, catéteres venosos, hojas de bisturí, ampollas de vidrio rotas, hojas de afeitar, Punzones de Biopsia o dermal punch; o a cualquier insumo o herramienta que posea filo o punta que pudiese producir una herida por corte o punción.

CLIENTE ACTIVO: Son los clientes de Edepsa S.A.S que actualmente poseen una actividad dentro de la empresa , manteniendo tiempos de recolección constantes.

RESIDUOS HOSPITALARIOS: Sustancias, materiales o subproductos en estado sólido, líquido o gaseoso, generados en la prestación de servicios de salud incluidas las actividades de promoción de la salud, la prevención de la enfermedad, diagnóstico, tratamiento y rehabilitación.

RESIDUOS INDUSTRIALES: La industria genera una gran cantidad de residuos muchos de los cuales son recuperables.

VENTANA DE TIEMPO HORARIA: Es el período entre una hora de inicio y una hora de finalización en el que una ruta debería visitar una ubicación de red.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, los residuos peligrosos son considerados como fuentes de riesgo para el medio ambiente y la salud, estos residuos generados a partir de actividades industriales, agrícolas, de servicios y aun de las actividades domésticas, constituyen un tema ambiental de especial importancia en razón de su volumen cada vez creciente como consecuencia del proceso de desarrollo económico.

En Colombia la gestión ambiental sostenible de los residuos o desechos peligrosos, en adelante RESPEL, está orientado más hacia el tratamiento y disposición final que a la prevención y el aprovechamiento de los residuos, el tratamiento tiene como objetivo principal separar y concentrar los residuos con el fin de recuperar materias primas para su incorporación al ciclo económico productivo, y reducir la cantidad, volumen y peligrosidad como actividad previa a una disposición final.

Dicho tratamiento es brindado por empresas especializadas como Edepsa soluciones ambientales encargadas de la recolección y disposición de estos materiales, el proyecto se enfoca en el diseño y la implementación de rutas de recolección de residuos hospitalarios a partir de una planeación táctica, permitiendo ampliar la cobertura del servicio en Bucaramanga, el área metropolitana y algunos lugares de la región oriental del país, además permite aumentar el índice de cumplimiento y respuesta oportuna del servicio.

Posterior al diseño se realiza la implementación, con el objetivo de cuantificar el aumento en la capacidad de la prestación del servicio, la reducción en el tiempo de viaje, los costos asociados y el aumento en los índices de cumplimiento, adicionalmente se contribuirá a la disminución de clientes

inactivos causando un impacto económico positivo para la empresa y contribuyendo a su competitividad a nivel nacional.

Para abordar la problemática encontrada, se iniciará con el conocimiento de los factores relevantes del problema para continuar con el análisis de métodos exactos y heurísticas clásicas del problema TSP con ventanas de tiempo, con el propósito de encontrar una solución práctica dentro del marco de referencia planteado.

En el diseño de las rutas de recolección se hará uso de un software en línea creado en lenguaje de programación php, donde se encontrarán algoritmos que permitan comparar alternativas de solución en términos de costo, distancia y tiempo, con el objetivo de proporcionar respuestas eficientes y flexibles que cubran el servicio en la totalidad de clientes, contribuyendo de esta forma, al logro de las metas empresariales propuestas por la empresa Edepsa S.A.

1. GENERALIDADES DEL PROYECTO

1.1 GENERALIDADES DE LA EMPRESA

1.1.1 Actividad Económica

Edepsa E.S.P Soluciones ambientales, es una empresa dedicada a la prestación de servicios en gestión integral de residuos, de acuerdo al **Anexo A Clasificación de residuos**, y al **Anexo B Decreto 2676**, que lleva a cabo el ministerio del medio ambiente de la república de Colombia. Por otra parte, brinda los servicios de monitoreo de aguas, asesoría técnica ambiental, comercialización de insumos para la protección, el cuidado y la atención de incidentes ambientales, brindando su acompañamiento al desarrollo de empresas que pertenecen al sector Industrial y Salud a nivel nacional.

En el marco de las actividades para la gestión integral de residuos, se pueden citar la recolección y manejo, transporte, almacenamiento, control y disposición final de los desechos peligrosos, con el objetivo de minimizar las afecciones contra la salud humana e impactos ambientales de acuerdo a la normativa legal vigente que se puede observar en el **Anexo C Matriz de requisitos legal de Edepsa ESP Soluciones Ambientales**.

Cuenta con un sistema integrado de gestión certificado en las normas ISO 9001:2008 – Sistema de Gestión de la Calidad, ISO 14001:2004 – Sistema de Gestión Ambiental Y OHSAS 18001:2007 – Sistema de gestión en seguridad y salud ocupacional, reflejado en el **Anexo D Mapa de Procesos de Edepsa ESP Soluciones Ambientales**.

1.1 .2 Localización

EDEPSA cuenta con dos sedes administrativas ubicadas en las ciudades de Bucaramanga (Santander) y Cúcuta (Norte de Santander) y una planta de tratamiento de residuos peligrosos ubicada en girón (Santander).

Tabla 1. Ubicación de la Infraestructura de EDEPSA ESP.

INFRAESTRUCTURA	Sede Administrativa	Sede Administrativa	Planta de Tratamiento
DEPARTAMENTO	Santander	Norte de Santander	Santander
MUNICIPIO / CIUDAD	Bucaramanga	Cúcuta	Girón
BARRIO	Conucos	Centro	Zona Industrial Chimita
DIRECCIÓN	Calle 63 # 32 – 81 Segundo Piso	Calle 10 # 3 – 75 Oficina # 7	Calle 2 # 3 ^a – 69

1.1.3 Tamaño de de la empresa

Edepsa tiene en total 22 personas vinculadas de las cuales 16 de ellas se encuentran contratadas de forma directa y los restantes apoyan la labor indirectamente, como se puede observar en el **Anexo E Estructura Organizacional de Edepsa ESP Soluciones Ambientales**.

El Personal directo de la empresa se encuentra repartido de acuerdo a la infraestructura de la empresa en los municipios de Bucaramanga, Girón y Cúcuta, tal como se puede apreciar en el **Anexo F Descripción de cargos del Personal directo e indirecto de Edepsa ESP Soluciones Ambientales**.

1.1.4 Cobertura

Actualmente la empresa presta el servicio de recolección de Residuos a Nivel Nacional en 50 Municipios Distribuidos en 8 Departamentos tal como se puede observar en el **Anexo G. Cobertura del servicio de recolección de residuos de Edepsa ESP a nivel Nacional**, con más de 1000 Clientes inscritos que se ven beneficiados por la adecuada Disposición final de sus desechos generados.

1.1.5 Clientes

Por Medio de la Licencia Ambiental otorgada por la CDMB (Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga), la empresa Edepsa se encuentra habilitada para desarrollar las actividades de recolección, transporte, almacenamiento y disposición final a residuos peligrosos Hospitalarios e industriales generados por empresas que pertenecen al sector salud, químico, belleza y estética , minero y petróleo, medio ambiente, farmacéutico, electrónico, eléctrico, industrial, construcción, automotriz, alimentos y bebidas entre otros.

En este sentido, Edepsa ESP tiene segmentado a sus clientes de acuerdo a una serie de parámetros definidos en el **Anexo H. Clasificación de los clientes de Edepsa ESP Soluciones Ambientales** y en el **Anexo I. Portafolio de Productos y servicios** en aumento de la calidad de su servicio y acompañamiento a las necesidades y requisitos de sus clientes en el marco de su actividad comercial.

En el Departamento de Santander hace presencia en 32 Municipios con un total de 814 clientes activos de los cuales 328 de ellos se encuentran en el Municipio de Bucaramanga identificados en la base de datos de la organización como, generadores de Residuos Peligrosos Hospitalarios, de acuerdo al **Anexo J. Número de Clientes de Edepsa ESP por Municipio**

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El desarrollo del Proyecto “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE RUTAS DE RECOLECCIÓN DE RESIDUOS HOSPITALARIOS PARA LA EMPRESA EDEPSA S.A.S”, tomó como punto de partida un Pre-diagnóstico contemplado en el **Anexo K. Diagrama Radar**, para aquellos procesos que mantienen una relación directa con la logística de la empresa.

De acuerdo a la información que arrojó el diagrama radar, se contrastó con resultados que proporcionó la organización a partir del **Anexo L Encuestas de Satisfacción**. Desarrolladas para 57 clientes con un nivel de confianza del 90%, ejercicio que permitió concluir sobre el problema de insatisfacción en el cumplimiento de la programación de la ruta de recolección.

Seguido se emplea una herramienta de diagnóstico cualitativa tal como se puede apreciar en el **Anexo M Diagrama Causa Efecto**. En esta etapa se encontró oportunidades de mejora en el desarrollo de la programación de la ruta de recolección de residuos peligrosos.

Por otra parte, el gerente de la empresa solicitó concentrar el desarrollo del trabajo de grado, en los clientes ubicados en el municipio de Bucaramanga, por ser la zona que concentra el mayor número de entidades inscritas.

En esta medida es necesario señalar la importancia en el adecuado desarrollo de la planeación y la programación en la gestión de la recolección de residuos, como proceso misional de la organización en cumplimiento de las expectativas y necesidades de sus clientes para asegurar la conformidad y la aceptación del servicio.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

Diseñar e implementar rutas de recolección de residuos hospitalarios para la empresa Edepsa S.A a partir del análisis de un sistema de ruteo que permita reducir el costo y tiempo de transporte.

1.3.2 Objetivos Específicos

- ✓ Adquirir y documentar información sobre la recolección de residuos peligrosos Hospitalarios de la empresa Edepsa S.A de los usuarios ubicados en la meseta de Bucaramanga.
- ✓ Revisar y analizar en artículos científicos el problema del agente viajero y sus posibles variaciones.
- ✓ Identificar las variables de mayor influencia, y las restricciones para el problema de ruteo vehicular en estudio.
- ✓ Seleccionar las técnicas de optimización matemática aplicables, para dar solución al problema acotado.
- ✓ Desarrollar modelos de optimización matemático para el problema en estudio.
- ✓ Desarrollar las heurísticas propuestas contrastando sus resultados, seleccionando la mejor como semilla en el desarrollo de una meta heurística a implementar.
- ✓ Validar la implementación del modelo con mejores resultados.

1.4 ALCANCE DEL PROYECTO

El proyecto contempla como alcance, a partir de la revisión bibliográfica sobre la logística inversa, modelos matemáticos de ruteo vehicular y herramientas de optimización para la construcción de un marco de referencia teórico que sirva como guía, para el desarrollo del proyecto.

Asimismo se llevó a cabo una captura de requerimientos sobre el proceso de recolección de desechos, tal como se muestra en el **Anexo N. Proceso de la gestión integral de residuos peligrosos** y el **Anexo O. Diagrama Gestión Integral de residuos peligrosos**. Para obtener un conocimiento claro de las actividades que conforman el debido proceso y la interacción entre cada una de ellas.

En ese contexto se documentan los elementos a considerar, las variables y posibles restricciones, para seleccionar un modelo matemático de ruteo vehicular que se pueda ajustar al problema planteado.

También incluye el desarrollo de un software computacional, desarrollado en una plataforma de libre aplicación para dar solución a la programación de la ruta de recolección de Bucaramanga, adicionalmente se realizó un artículo publicable disponible en el ANEXO AB.

Cabe señalar que el alcance del proyecto se definió a partir de los requerimientos que Edepsa ESP SAS estableció. Siendo estos:

- Realizar un análisis de la situación actual sobre la capacidad Vehicular de almacenamiento de acuerdo al cargue de residuos Peligrosos.
- Poner en marcha el uso del software de ruteo vehicular evaluando resultados sobre el cumplimiento de la ruta.
- Formular propuestas de mejora en la ejecución de las actividades del proceso de Recolección de residuos peligrosos, enfocadas en la mejora del nivel de servicio de la organización de acuerdo a su política ambiental.

2. MARCO REFERENCIAL

La tabla 2, presenta el marco de antecedentes de forma general.

Tabla 2. Antecedentes

Título	Alcance	Aporte al proyecto
Solución del problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo (VRPTW) mediante métodos heurísticos	Métodos exactos y aproximados de solución del VRPTW	Conceptos básicos del VRPTW, clasificación general de las principales técnicas de optimización y descripción de las mismas. [7]
Desarrollo metodológico para la determinación de caminos mínimos en redes de tránsito y en tiempo real utilizando técnicas de aprendizaje computacional.	Presenta una metodología que toma características operativas de la red en tiempo real, con el objetivo de establecer el camino mínimo.	Proceso de modelación llevado a cabo en tiempo real considerando TW ,el sistema empleado en la caracterización de la red vial se presenta como un ejemplo en la selección del modelo propio.[8]
Planeación de rutas de distribución utilizando el algoritmo heurístico 2-optimal	Muestra que el algoritmo heurístico 2-optimal como solución aproximada al TSP, implementa un prototipo computacional.	Modelación matemática del TSP, conceptos básicos relacionados, el algoritmo de solución dos-óptimal con el proceso de desarrollo.[9]
Formular las meta heurísticas Búsqueda Tabú y recocido simulado para CVRP	Estudio de heurísticas de construcción de forma general, las meta heurísticas de búsqueda Tabú y recocido simulado.	Recopilación de la información concerniente a la meta heurística de búsqueda tabú, explorando a fondo los conceptos claves del algoritmo. [10]

Título	Alcance	Aporte al proyecto
Estudio cuantitativo de tres aplicaciones diferentes del problema de ruteo (VRP) en la UIS	Se aplicaban técnicas cuantitativas, específicamente de programación matemática,	Generalidades del problema TSP y sus variaciones, los métodos de solución exactas, las heurísticas clásicas y meta heurísticas. [11].
Colonia de hormigas fundamentación teórica y aplicación en la optimización de sistemas logísticos de ruteo con intervalos de recepción y tiempo de atención máximo.	Expone la utilización de la optimización por colonia de hormigas (OCH), en la construcción para resolver un problema de ruteo multi-objetivo	Este documento presenta información relacionada con los sistemas logísticos, los problemas de decisión presentes en ruteo y su clasificación y conceptos heurísticos valiosos para este proyecto [12].

2.2 MARCO TEORICO

2.2.1 SISTEMAS LOGISTICOS

Sistemas: "Es un todo integrado, aunque compuesto de estructuras diversas, interactuantes y especializadas. Tiene un número de objetivos, y los pesos asignados a cada uno de ellos puede variar ampliamente de un sistema a otro. Un sistema ejecuta una función imposible de realizar por una cualquiera de las partes individuales. La complejidad de la combinación está implícita." ³

Sistemas logísticos: se ciñe a la gestión del flujo y de las interrupciones en él, de materiales (materias primas, componentes, subconjuntos, productos acabados y

³ IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronic Terms

suministros) y personas asociadas al proceso de distribución o logístico de una empresa. La logística congregaría los ejercicios de planificación, organización y control del conjunto de actividades de movimiento y almacenamiento que facilitan el flujo de materiales y productos desde la fuente al consumo, para satisfacer la demanda al menor coste, incluidos los flujos de información y control.

El concepto moderno de logística que se aplica en las organizaciones actuales, viene caracterizado por jugar un papel protagonista en el plano de integración de las actividades del sistema técnico-productivo, cuyo máximo exponente tiene que ver con el aseguramiento de un flujo que se dirige a suministrar al cliente los productos y servicios demandados teniendo en cuenta su solicitud desde el mismo momento que surge la necesidad.

La *logística* se enfoca en la coordinación de las actividades para asegurar un flujo que garantice un alto nivel de servicio al cliente y de optimización de recursos en la dirección de operaciones.⁴

2.2.1.1 Principales aéreas logísticas

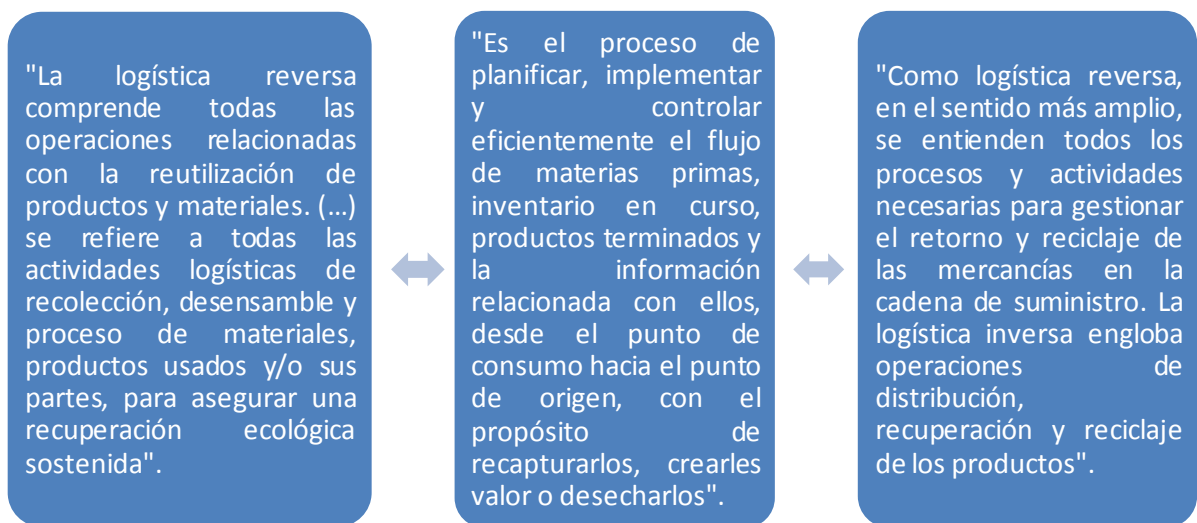
Estipuladas por la Universidad a Distancia de Madrid (UDIMA) son: recepción de suministros, aprovisionamiento, compras, transporte externo e interno, distribución, tratamiento y atención de los pedidos, reciclaje de residuos y de los productos desechados por el cliente, planificación de la producción, control de producción, información y comunicaciones, control de calidad, mantenimiento y ventas.

⁴ Acadeudima.com, El sistema de distribución o logístico de la empresa concepto y marco de actuación.

2.2.1.2 Logística reversa o inversa

De las actividades logísticas expuestas anteriormente, se realizara un enfoque en logística inversa o reversa, a continuación se presentan las últimas definiciones con el objetivo de identificar la importancia y contribución al mundo empresarial, en la figura 1.

Figura1. Definiciones de logística inversa



Los elementos más importantes y representativos de la logística inversa son el tratamiento de mercancías, productos, envases, embalajes y la disminución en origen, es decir, emplear y utilizar herramientas en el ciclo de vida del producto para obtener la mínima cantidad posible de residuos, desechos y materiales no reciclables o recuperables. Es un nuevo compromiso ambiental en la cadena de abastecimiento, que propicia el desarrollo de una producción (o servicio) más limpia, con mejores prácticas ambientales y de producción.

La logística reversa o inversa se propone como objetivo estratégico económico, ya que agrega valor y diferenciación en las compañías. El concepto hace parte de los

nuevos retos empresariales de competitividad y responsabilidad social empresarial frente a la ecología. [13]

Figura 2: Diagrama de la Integración de la red logística y la logística inversa



Fuente: [13]

2.2.1.3 Logística de la gestión RESPEL en Colombia.

Para abordar el tema iniciaremos con la definición de residuos peligrosos, que en forma genérica se entiende por residuos peligrosos a los residuos que debido a su peligrosidad intrínseca (tóxico, corrosivo, reactivo, inflamable, explosivo, infeccioso, eco tóxico) pueden causar daños a la salud o al ambiente^[14]. Por lo tanto, la definición no depende del estado físico, ni del manejo al que será sometido posteriormente a su generación.

La debida clasificación de los residuos o desechos se constituye en el primer paso crítico para velar por el manejo y la gestión de los residuos en condiciones de seguridad. El segundo elemento clave en la gestión de los residuos, junto con su clasificación es el correspondiente a la identificación de las fuentes que los generan, y los lugares donde se encuentran ubicadas, ya que permite anticipar las necesidades de infraestructura de manejo que se requiere para dar cumplimiento a las políticas y disposiciones legales en la materia.

El ciclo de manejo inicia con un generador, en una sociedad moderna los residuos peligrosos provienen de un gran número de fuentes como se ve en el ANEXO P. “En Colombia el manejo RESPEL está orientado más hacia el tratamiento y disposición final más que a la prevención y el aprovechamiento”⁵ por tal motivo la actividad logística a la cual se centran los esfuerzos es la logística de recolección, actividad que realiza la empresa de Edepsa Soluciones ambientales, a continuación la figura 3 donde se observa la recuperación de valor en el manejo de los residuos, reiterando la logística de recolección como un elemento que arregla valor a las organizaciones que lo realizan.

Figura 3. Estrategias Manejo de residuos.



Fuente: [13]

Desde el momento en que se generan los RESPEL, hasta su ingreso en una instalación para su gestión externa, los RESPEL siguen el acondicionamiento, el almacenamiento y transporte, el tratamiento y la disposición final. El **acondicionamiento** incluye la compatibilidad de residuos, que se denomina su potencial de reacción entre sí.

⁵ Ministerio de ambiente, política de residuos peligrosos, situación actual de Colombia.

- ✓ Envasado, realizado de acuerdo a su estado físico, y sus características de peligrosidad,
- ✓ Etiquetado: Tal como lo establece la Norma Técnica Colombiana NTC 1692, los recipientes que contengan RESPEL, deben estar etiquetados, de forma clara, legible e indeleble.

El **almacenamiento** consiste en el depósito temporal de los mismos, a la espera de su gestión en un espacio físico definido y especialmente acondicionado, el tiempo de almacenamiento en las instalaciones del generador debe ser lo más breve posible, este lugar debe poseer las siguientes características:

- ✓ Ubicación: Debe garantizar que los riesgos para la salud y el medio ambiente son mínimos, debe ser de fácil acceso y contar con servicios de energía, agua potable y comunicaciones.
- ✓ Cercado y señalización: Debe impedir el acceso a personas ajenas a las instalaciones, y claramente señalizado.
- ✓ Diseño: Estándares determinados por la norma técnica.

El **transporte** Con el objetivo de lograr que el transporte de RESPEL se realice con riesgos mínimos tanto para los operadores como para el resto de la población y el medio ambiente. Las normas establecidas de transporte están definidas a través del decreto 1609 de 2002 expedido por el ministerio de transporte dentro de los requisitos del vehículo se encuentran los rótulos de identificación, la placa de identificación de la ONU, el equipo de carretera, los equipos básicos para atención a emergencias, requisitos técnicos entre otras.

Finalmente se realiza el **tratamiento** y la **disposición final**, que consiste en un proceso de transformación cuyos objetivos son reducir el volumen y la peligrosidad, destruir sustancias peligrosas que no es posible confiar y contener y aislar los materiales peligrosos.

2.2.2 Investigación de operaciones

No se cuenta con una técnica única para resolver todos los modelos que puedan surgir en la práctica. En su lugar, el tipo y complejidad del modelo matemático determina la naturaleza del método de solución. La optimización busca encontrar una alternativa de decisión con la propiedad de ser mejor que cualquier otra en algún sentido, sus componentes son la función objetivo (medida cuantitativa del funcionamiento de un sistema que se desea maximizar o minimizar), las variables (Decisiones dependientes o independientes que pueden afectar el valor de la función objetivo) y las restricciones (relaciones que las variables están obligadas a satisfacer), se busca encontrar el valor que deben tomar las variables para hacer óptima la función objetivo satisfaciendo el conjunto de restricciones.

2.2.3 Modelos de optimización

La técnica de IO (investigación de operaciones) más importante es la programación **lineal**, diseñada para modelos con funciones objetivo y restricciones lineales. Otras técnicas incluyen **la programación entera** (en la cual las variaciones asumen valores enteros), **la programación dinámica** (en la cual el modelo original puede descomponerse en sub problemas más pequeños y manejables), **la programación de red** (en la cual el problema puede modelarse como una red) y **la programación no lineal**. Estas son algunas de las muchas herramientas que por lo general las soluciones no se obtienen en formas cerradas sino que se determinan mediante algoritmos, un algoritmo proporciona reglas fijas de cálculo que se aplican en forma repetitiva (llamada iteración) al problema, acerca la solución a lo óptimo, En algunos casos se busca una buena solución aplicando la heurística y la meta heurística, o bien reglas empíricas, el ANEXO Q especifica algunos tipos de problemas de optimización.

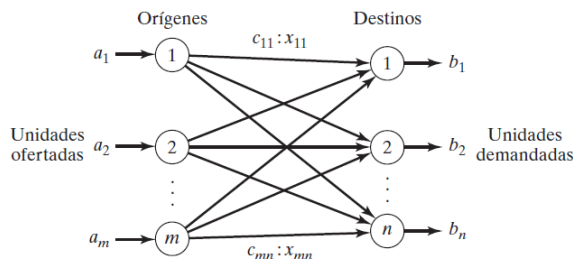
2.2.4 Optimización combinatoria (OC)

La combinatoria se dedica al estudio de las configuraciones⁶. Un problema OC es la búsqueda de la mejor combinación. La construcción de una o más funciones de valor sobre el espacio de las configuraciones permite ordenar estas para saber cuál es la mejor. Se ha desarrollado en 6 áreas principales: El problema de asignación, el problema de transporte, el teorema de Menger y el flujo máximo (Maximun flow), el árbol más corto para recorrer (shortest spanning tree), el camino más corto (Shortest path) y el problema del agente viajero (TSP Travelling salesman problem). [17], en la tabla 3 encontrará los conceptos de problema uniobjetivo y multiobjetivo, hipergrafo, problemas NP y NP-Hard.

2.2.5 Modelo de transporte

Existen m orígenes y n destinos, representado por un nodo. El arco (i, j) une el origen i con el destino j transporta dos piezas de información. El costo de transporte por unidad i es a_i y la cantidad de la demanda en el destino j es b_j . El objetivo del modelo es minimizar el costo de transporte total al mismo tiempo que se satisfacen las restricciones de la oferta y la demanda. [15],

Figura 4. Representación del modelo de transporte con nodos y arcos



Fuente: libro. Programación lineal entera, por Handy A.

Los estudios más posicionados a través de la historia se encuentran en el ANEXO R

⁶ Colocación de objetos en lugares

Tabla 3. Conceptos claves de optimización combinatoria

Conceptos	Definición
Problema uniobjetivo	Sobre el espacio de configuraciones se construye una sola función de valor.
Prom multi-objetivo	Se construye más de una función de valor, Se resuelve con facilidad mediante un programa ordenador [16].
Hipergrafo	Un par (V,R) , donde V es finito, llamándose vértices del hipergrafo a sus elementos, se caracterizan porque sus soluciones son subconjuntos de un conjunto.
Problemas NP	Problemas de decisión para la cual existe un algoritmo no determinista poli nómicamente acotado que puede resolverse en tiempo polinomial. El nombre NP proviene de “No determinista Poli nómicamente acotado”. [18] Los problemas de coloreado de grafos, ciclo y camino hamiltoniano, calendarización de trabajos con castigos, llenado de cajones, sumatoria de subconjuntos, mochila, satis factibilidad y vendedor viajero están en NP.
Problema NP- Hard	Problema de decisión perteneciente a la clase NP completa, pertenece a NP- hard. La complejidad computacional hace parte de uno de los siete problemas del milenio, que es determinar si todos los problemas no tratables (Los conocidos NP) eventualmente llegaran a ser tratables (Problemas tipo P^7). Es decir, si la imposibilidad es tecnológica o lógica (P vs NP) es un problema abierto, los problemas NP-hard no presentan algoritmos poli nómicos que corroboren posibles soluciones [19], los problemas representativos son la asignación de recursos, balanceo de líneas, de ruteo, programación de vehículos entre otros.

⁷ Los problemas tipo P, son problemas de decisión que brindan una respuesta por medio de algoritmos determinísticos en un tiempo polinomial.

Los problemas de optimización combinatoria constan de un conjunto de variables de decisión (variables independientes), una función objetivo (F.O) que mide la efectividad de cada sistema de decisiones, y un conjunto de restricciones que representan las limitaciones bien sea de capital, recursos, etc.

2.2.6 Problema de ruteo de vehículos

El estudio de los problemas de ruteo surge a mediados del siglo pasado con la proposición del modelo matemático TSP, a partir del cual muchas investigaciones se han dedicado de lleno a estos problemas en todos los casos particulares y con aplicaciones en el mundo real. [20] Consiste en varios vehículos de capacidad conocida que opera desde una o múltiples bases/ depósitos con el objetivo de visitar a un conjunto de puntos de servicios de localización conocida. Los problemas reales comprenden una amplia variedad de restricciones que se vinculan a vehículos, a clientes o a ambos, además, existen diferentes características que deben ser contempladas, así como las posibles opciones de solución para cada una, en la tabla 4 se encuentran algunas variaciones.

2.2.7 Métodos de optimización empleados en la solución del TSPTW.

Pueden resolverse mediante **métodos exactos** que brindan una solución óptima mediante un algoritmo eficiente. Son de gran funcionalidad para problemas diversos, inclusive los de optimización combinatoria donde se tiene pocos clientes. Se presentaran dos algoritmos el de ramificación y acotamiento (B&B) [15] y el plano de corte, pueden o no producir la solución en un tiempo razonables.

Tabla 4. Variaciones del problema del ruteo de vehículos

Variación	Definición
El problema del agente viajero	(TSP o por Travelling Salesman Problem) se dispone de un solo vehículo que debe visitar a todos los clientes en una sola ruta y a costo mínimo. No suele haber un depósito (y si lo hubiera no se distingue de los clientes), no hay demanda asociada a los clientes y tampoco hay restricciones temporales. En el ANEXO S se exponen tres posibilidades de formulación.
El problema de los Agente Viajero con ventanas de tiempo (TSPTW)	El TSPTW es un TSP en el que cada ciudad lleva asociado un intervalo de tiempo $[e_i, l_i] = 1, \dots, n$, en el que tiene que ser visitada: si se llega a la ciudad i antes del instante e_i hay que esperar hasta ese momento, y nunca se puede llegar más tarde del instante l_i , se supone que el tiempo de salida inicial es e_i . Donde d_{ij} y t_{ij} es la distancia y el tiempo entre la ciudad i y la ciudad j respectivamente, y D_i es el tiempo de llegada a la ciudad i . [22] en el ANEXO T se encuentra la formulación con grafos.
TSP simétrico (STSP)	Caso especial del ATSP, Explorando la simetría, es posible reemplazar las restricciones asignadas. Dado $\delta(v)$ el conjunto de aristas incidentes en el nodo v de G .
TSP con cuello de botella	Consiste en encontrar un circuito hamiltoniano tal que minimice el mayor coste de entre todas las aristas del mismo, en vez de minimizar el coste total.
TSP Gráfico	Consiste en encontrar un circuito de coste mínimo tal que se visiten las ciudades al menos una vez.
El problema de los m Agentes Viajeros (m -TSP)	Generalización del TSP en la cual se tiene un depósito y m vehículos. El objetivo es construir exactamente m rutas, una para cada vehículo, de modo que cada cliente sea visitado una vez por uno de los vehículos. Cada ruta debe comenzar y finalizar en el depósito y puede contener a lo sumo p clientes.

Variación	Definición
Problema de agente viajero agrupado	Los nodos o ciudades están divididos en “clusters” o grupos, de manera que lo que se busca es un circuito hamiltoniano de coste mínimo en el que se visiten los nodos de cada grupo de manera consecutiva.
El problema con Capacidades (VRP o CVRP)	Es una extensión del m-TSP en la cual cada cliente $i \in V \setminus \{0\}$ tiene asociada una demanda d_i y cada vehículo tiene una capacidad. En este problema la cantidad de rutas no es fijada de antemano como en el TSP o el m-TSP. Para un conjunto de clientes S , $d(S) = \sum_{i \in S} d_i$ es su demanda total y $r(S)$ indica la mínima cantidad de vehículos necesarios servirlos a todos. En la formulación conocida con el nombre de <i>flujo de vehículos de dos índices</i> , se utilizan las variables binarias x_{ij} para determinar si el arco (i, j) se utiliza o no en la solución.
El problema con flota Heterogénea (FSMVRP) o <i>Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem</i>	En la flota heterogénea, los costos y capacidades de los vehículos varían, existiendo un conjunto $T = \{1, \dots, T \}$ de tipos de vehículo. La capacidad de los vehículos $k \in T$ es q^k y su costo fijo (si lo tuvieran) es f^k . Los costos y tiempos de viaje para cada tipo de vehículo son c_{ij}^k y t_{ij}^k respectivamente. Se asume que los índices de los vehículos están ordenados en forma creciente por capacidad (<i>es decir</i> , $q^{k_1} \leq q^{k_2}$ para $k_1, k_2 \in T, k_1 < k_2$). No solo se debe decidir las rutas, sino la composición de la flota de vehículos a utilizar.
El problema con Ventanas de Tiempo (VRPTW)	Contempla capacidades, además cada cliente $i \in V \setminus \{0\}$ tiene asociada una ventana de tiempo $[e_i, l_i]$ que establece un horario de servicio permitido para que un vehículo arribe a él y un tiempo de servicio o demora s_i . Si (i, j) es un arco de la solución y t_i y t_j son las horas de arribo a los clientes i y j , las ventanas de tiempo implican que necesariamente debe cumplirse $t_i \leq l_i$ y $t_j \leq l_j$. Por otro lado, si $t_i < e_i$, entonces el vehículo debería esperar hasta que el cliente “abra” y necesariamente $t_j = e_i + s_i + t_{ij}$. Utilizando los nodos 0 y $n + 1$ para representar al depósito y el conjunto K para representar a los vehículos [24].

Es posible encontrar soluciones mediante **métodos heurísticos** diseñados para encontrar buenas soluciones con rapidez a problemas combinatorios difíciles utilizando reglas favorables prácticas que de lo contrario no pueden resolverse mediante los algoritmos de optimización disponibles, la calidad de la solución (con respecto a la óptima) suele desconocerse. Las primeras generaciones se basan en la regla de búsqueda codiciosa que dicta que se mejore el valor de la función objetivo con cada movimiento de búsqueda, esta termina en un óptimo local donde ya no son posibles más mejoras.

2.2.7.1 Heurísticas de construcción: Crean una solución factible mediante la inserción de nodos, iniciando con la unión de dos ciudades, para después añadir los nodos restantes uno por uno, de tal forma que el costo de la ruta se incremente mínimamente. Existen algunas variaciones dependiendo de cuáles son los nodos que se eligen al iniciar, y cuales se insertan en cada etapa.

a) Heurística del vecino más cercano con enfoque temporal

El algoritmo halla una solución basada en la cercanía de dos nodos o clientes adyacentes. En el enfoque temporal de la heurística del vecino más cercano, se usa una métrica o medida que hace un balance ponderado entre la cercanía geográfica de los clientes y el tiempo recorrido respectivo de un nodo a otro.

En esta aproximación, un cliente cercano geográficamente no implica factibilidad en términos de tiempo, por esta razón el costo de la ruta al insertar un cliente hace un balance entre los dos parámetros, y asigna los clientes a la ruta dando prioridad a aquellos cuyo “balance” sea menor. Si se tiene una ruta $(0, \dots, u_i, \dots, 0)$ se define el costo de insertar el cliente u_j a continuación de u_i en la ruta como:

$$c_{ij} = \delta_1 d_{ij} + \delta_2 T_{ij} + \delta_3 V_{ij} \quad (1.1) \quad \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 = 1$$

$$T_{ij} = W_j - (W_i + s_i) \quad (1.2)$$

$$V_{ij} = b_j - (W_j + s_i + t_{ij}) \quad (1.3)$$

Ele.	Definición
d_{ij}	Distancia directa entre dos nodos, mide la cercanía geográfica
T_{ij}	Diferencia entre la hora de comienzo del servicio j y la del fin de servicio en i, midiendo la cercanía de los clientes en términos temporales. Este parámetro minimiza el menor tiempo de recorrido y el menor tiempo de espera entre dos clientes.
V_{ij}	Mide la urgencia de realizar la inserción. Se define como la diferencia entre la hora de arribo a j (sin incluir la espera) y la última hora a la que podría arribar dicho cliente. Prioriza los clientes a insertar teniendo en cuenta la diferencia de tiempo más tardía para servir al cliente j. valores cercanos a 0 indican que dentro de “pocas” iteraciones, el cliente j no podrá ser insertado en esta ruta.

Diferentes valores de δ_1, δ_2 y δ_3 arrojan resultados distintos, según el enfoque que se quiera dar al modelo. Si se busca insertar los clientes en las rutas minimizando su cercanía geográfica, se dará menor valor a δ_1 , en cambio si se priorizan clientes por su cercanía temporal, menores valores de δ_2 guiarán la heurística a que forme rutas con valores ponderados de tiempo y distancia menores, si existen clientes cuyo tiempo de servicio más tardío está alejado del horizonte de planeación de rutas, el coeficiente δ_3 , debe ser menor para que se garantice el servicio a clientes críticos.

- **Procedimiento del vecino más cercano con enfoque temporal**

1. Se calculan los costos c_{ij} desde el depósito hasta cada uno de los clientes. Al hacer este cálculo es importante tener en cuenta que el término T_{ij} , desde el

depósito hasta el cliente j , es igual al tiempo de inicio del servicio en j , W_j , porque el depósito no tiene asociado un tiempo de inicio del servicio; por lo tanto $W_i = 0$. La métrica V_{ij} , es equivalente a la diferencia entre el final de la ventana de tiempo en el cliente j y su tiempo de recorrido desde el depósito t_{oj} , así:

$$T_{ij} = W_j$$

$$V_{ij} = b_j - t_{oj}$$

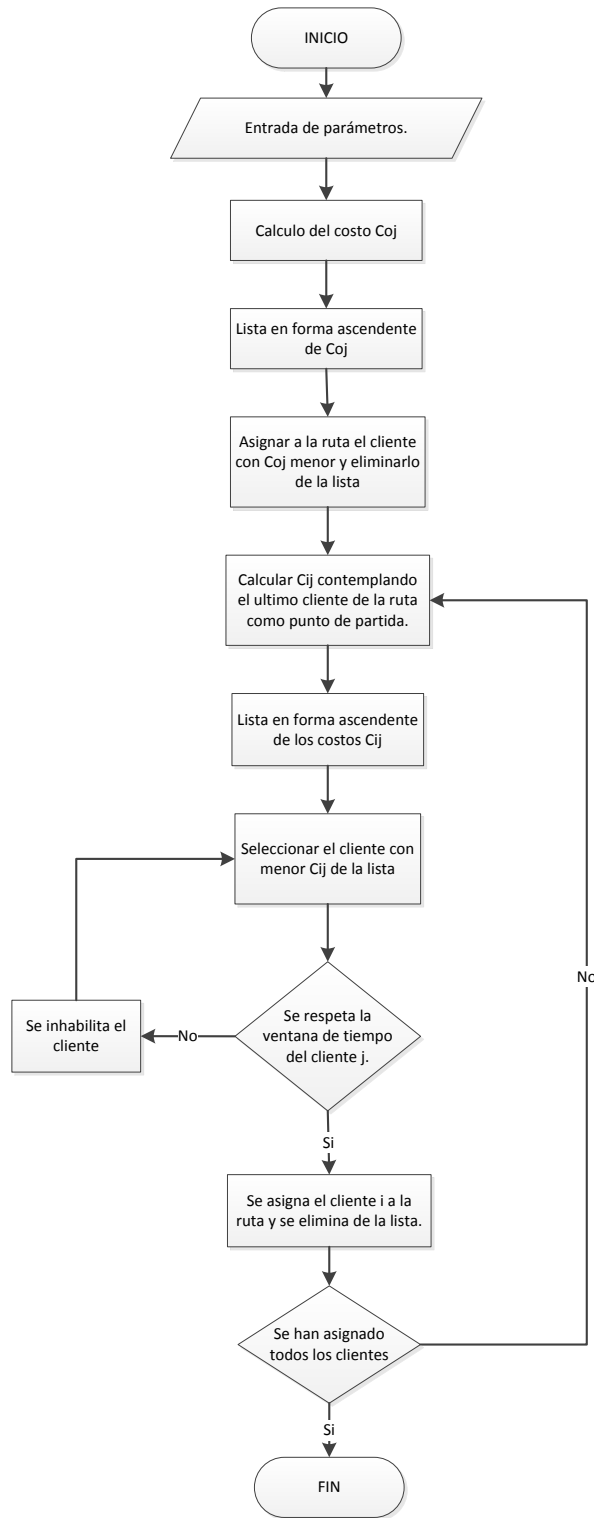
2. Se listan los costos C_{oj} en orden ascendente. El algoritmo selecciona el cliente inicial de una ruta como el más cercano al depósito, según la medida C_{oj} , dentro de los clientes no visitados.

3. Se calculan los costos c_{ij} partiendo del último cliente asignado a la ruta, desde y hacia cada uno de los clientes restantes y se listan de manera ascendente. En cada paso se selecciona al cliente no visitado que sea más cercano al último cliente de la ruta en términos del parámetro calculado, considerando solamente las inserciones factibles, y se agrega al final de la ruta parcialmente formada.

4. El tiempo de llegada al cliente j , no debe ser mayor que el tiempo más tardío en el que el cliente j permite el servicio.

5. Si una inserción es no factible, se busca en la lista el segundo costo menor y se inserta en la ruta, si el segundo costo es no factible se busca en la lista aquellos clientes que no violen las restricciones de ventanas de tiempo, siempre y cuando se respete el orden ascendente.

Figura 5. Diagrama de procesos del vecino más cercano con enfoque temporal



b) Heurísticas de inserción

Las principales variantes de estos algoritmos, descritos por Rosenkrantz, Stearns & Lewis, (1.974), descritos en la tabla 5, la regla de inserción propone varios criterios (criterio I, II e III) que minimizan de forma ponderada el criterio de distancia y tiempo que supone la inclusión de un cliente, estas métricas están relacionadas con los costos en los que se incurre a la introducción al introducir un nuevo nodo, en este caso se emplea la numero I, considera la ventaja de visitar a un cliente dentro de una ruta parcial y no en una ruta específica para él.

Dada una ruta inicial de clientes, debe elegirse un parámetro de inserción que permita intercalar el mejor nodo en el lugar adecuado del recorrido, con esta inclusión los tiempos de llegada a los clientes son modificados, Solomon propone tres reglas o criterios de inserción, que seleccionan los clientes bajo un parámetro c_2 y los inserta en el nodo más barato según el parámetro c_1 .

$$c_1(v_i, w) = \alpha_1 c_{11}(v_i, w) + \alpha_2 c_{12}(v_i, w) \quad (2.1)$$

$$c_{11}(v_i, w) = d_{iw} + d_{w,i+1} - ud_{i,i+1} \quad (2.3)$$

$$c_{12}(v_i, w) = b_{i+1}^w - b_{i+1} \quad (2.4)$$

$$c_2(v_i, w) = \lambda d_{0w} - c_1(v_i, w) \quad (2.5)$$

Dónde: b_{i+1}^w indica el tiempo de arribo al nodo $i + 1$ cuando w es insertado en la ruta.
 d_{ij} es la distancia entre los nodos i y j ,

Para calcular la mejor inserción se tiene en cuenta dos factores. Por un lado c_{11} mide el ahorro en la distancia si se insertan w entre v_i y v_{i+1} . Además c_{12} , tiene en cuenta el retardo que provoca insertar el cliente nuevo en la ruta el tiempo adicional es llamado también *Push Forward*. Si en la inserción pesan variables temporales, entonces se dará mayor ponderación α_2 y si es más importante optimizar la distancia, se dará prioridad a α_1 y $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$

Tabla 5. Tipos de Inserción

Inserción	Pasos
Cercana	<p><u>Paso 1:</u> Comenzar con un subgrafo formado por un nodo arbitrario.</p> <p><u>Paso 2:</u> Encontrar un nodo k tal que C_{ik} sea minima y formar una subruta $i - k - i$</p> <p><u>Paso 3:</u>(Paso de selección): Dada una subruta encontrar el nodo k que no esté en ella más cercano a la subruta actual.</p> <p><u>Paso 4:</u> (Paso de Inserción): Encontrar el arco (i, j) en la subruta actual que minimice $C_{ik} + C_{kj} - C_{ij}$, insertar k entre i y j.</p> <p><u>Paso 5:</u> Si la subruta actual contiene las n ciudades parar, en otro caso volver al paso 3.</p>
Barata	<p>Este procedimiento difiere del de inserción más cercana en que los pasos 3 y 4 son reemplazados por el siguiente paso:</p> <p><u>Paso 3:</u> Encontrar un arco (i, j) en la subruta actual y un nodo k que no lo esté, de tal forma que $C_{ik} + C_{kj} - C_{ij}$ sea mínimo. Insertar k entre i y j.</p>
Arbitraria	<p>Difiere de la inserción más cercana en que en el paso 3, el nodo k a insertar se elige arbitrariamente entre todos los nodos que no estén en la sub ruta.</p>
Lejana	<p>Difiere de la inserción más cercana en que en el paso 3 se elige como ciudad a insertar en la sub ruta actual la más alejada de esta. Existen varias heurísticas de inserción secuencial, pero todas se basan en extensiones de las funciones de costo para incorporar las distancias y el tiempo. Se define b_j y w_j de forma igual a los métodos anteriores.</p>

Heurísticas de mejora de rutas: Se basa en modificaciones simples (operaciones de intercambio y movimientos) de una ruta ya construida, el objetivo es producir un recorrido mejorado. Alternativamente, podemos ver lo anterior como un proceso de búsqueda de vecindad, cada ruta tiene una vecindad asociada, es decir, recorridos que se pueden producir con un simple movimiento, de esta manera se obtienen soluciones que mejoran la función objetivo, el algoritmo se detiene cuando la solución no puede ser mejorada, entre estos métodos se encuentran los algoritmos de búsqueda local también llamadas heurísticas codiciosas, para los problemas que contemplan ventanas de tiempo, es dispendioso computacionalmente mejorar soluciones iniciales ya que se deben respetar las ventanas horarios de los nodos a modificar [25].

a) Método Optimización 2-opt

Esta es una de las heurísticas más exitosas para obtener una solución cercana al problema del TSP tanto simétrico como asimétrico, ya que puede encontrar soluciones cercanas a la óptima para un problema de tamaño considerable, en Cada ruta que se va obteniendo el vector (NP_i) puede calcularse utilizando $\theta(n^2)$ operaciones a partir de la matriz (VP_{ij}) . El algoritmo parte de un circuito Hamiltoniano, cuyo costo de recorrido será optimizado, en cada paso el algoritmo de búsqueda local selecciona dos aristas, las retira e inserta dos nuevas de la mejor manera posible, sin crear sub rutas, a continuación se expone el proceso de forma detallada y el diagrama de flujo se encuentra en la figura 7.

La teoría de Dos-Optimal dice que este método es mejor cuando se le da una ruta inicial buena, y de acuerdo a la evaluación de algoritmos para la solución del TSP, es importante mencionar que al sustituir los grafos, es necesario cambiar el sentido de algunos arcos.

- **Procedimiento de heurística 2-opt**

Paso 1. Inicia con un ciclo hamiltoniano llamado H , este ciclo o ruta inicial para el TSP puede ser arbitraria o puede extraerse de una heurística de construcción.

Paso 2. Borran 2 aristas de H , produciendo así 2 caminos desconectados.

Paso 3. Reconectar estas 2 aristas de tal forma que cumplan las restricciones temporales y produzcan otra ruta para el TSP llamada H' , en la que se usan aristas diferentes de aquellas que fueron removidas de H . Así H y H' difieren una de la otra en exactamente 2 aristas, las $(n-2)$ aristas que permanecen son las aristas en común.

La Figura 6 ilustra el método 2-Optimal, donde las aristas propuestas para eliminarse serían a y b , después se reconectan sus nodos como en la Figura 21b por medio de las aristas x , y .

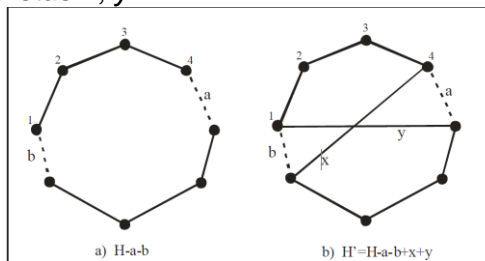


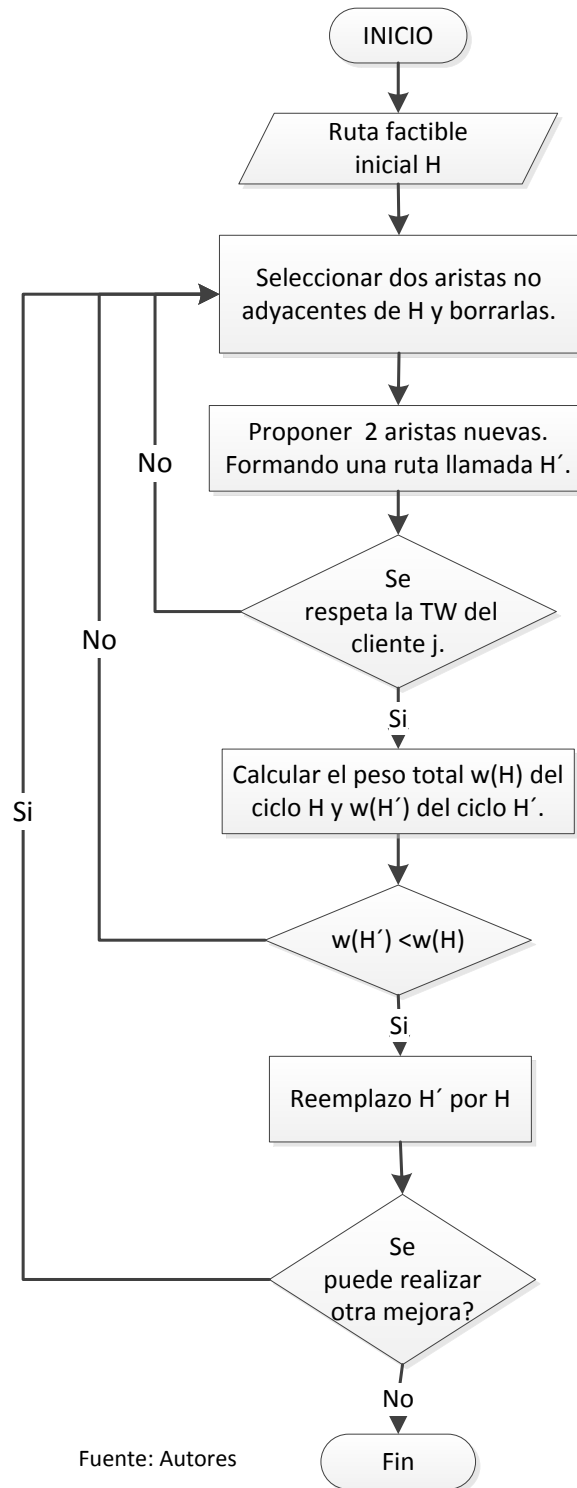
Figura . Unión de nodos para formar un camino 2-Optimal.

Fuente: libro. Programación lineal entera, por Handy A.

Paso 4. Se calcula el peso total $w(H')$ del ciclo H' , y si $w(H') < w(H)$ entonces se reemplaza H por H' , y se repite el proceso con el nuevo ciclo iniciando desde el nodo 1, si no, tomar otro conjunto de 2 aristas de H para intercambiarlas. Tales intercambios de conjuntos de 2 aristas se continúan hasta que ninguna otra mejora se pueda realizar por el intercambio de 2 aristas.

El procedimiento de mejora local resultante de la aplicación de intercambios 2-opt a una solución inicial del problema (hasta que ningún intercambio 2-opt mejore la solución en curso) genera una solución 2-óptima.

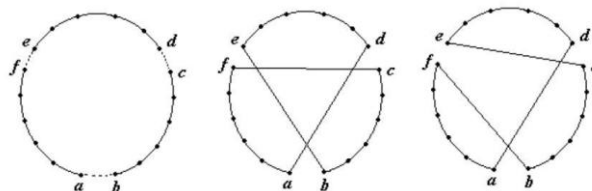
Figura 7. Diagrama de flujo dos opt



b) Método Optimización 3-opt

Este algoritmo intenta encontrar una mejor ruta entre un conjunto de puntos dados, lo que hace esta algoritmo es eliminar tres arcos e intentar buscar un camino más óptimo reconectándolos de manera alternativa, tal y como podemos ver en la figura 8, de forma que se respeten las restricciones temporales.

Figura 8. Tres -optima



Fuente: [26]

El dibujo en la izquierda de la figura 3.15 sería la ruta inicial actual, mientras que los dos siguientes dibujos vendrían a ser posibles alternativas al camino obtenido, y que podrían resultar mejor que el primero, hasta encontrar una solución 3-óptima que es aquella que no se puede mejorar por un intercambio 3-opt, el 3-Opt hace necesario cambiar el sentido de algunos arcos, para que el resultado siga siendo una solución factible o realizar la operación de cruce, que consiste en el intercambio de un segmento por otro de la ruta manteniendo la dirección de todas las aristas del circuito [26], a continuación se encuentra el proceso detallado.

- **Proceso de la heurística 3-opt**

La operación a realizar para encontrar caminos alternativos es la siguiente.

Dados tres arcos cuyos puntos son:

$$(i, i + 1), (j, j + 1) \text{ y } (k, k + 1), \text{ tal que } i < j < k,$$

Con unos costes asociados $c_{i,i+1}$, $c_{j,j+1}$ y $c_{k,k+1}$, tal y como se puede ver la figura 9.

Figura 9. Primera opción de modificación 3- opt.

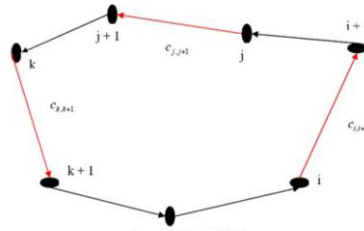


Figura 3.16: Estado inicial.

Si se da la condición de que $c_{i,i+1} + c_{j,j+1} + c_{k,k+1} > c_{i,j+1} + c_{j,k+1} + c_{k,i+1}$ y que además cumple con las restricciones temporales entonces hemos encontrado un camino mejor que el que teníamos en la solución actual. Por tanto debemos eliminar los arcos $(i, i + 1), (j, j + 1)$ y $(k, k + 1)$, y sustituirlos por los arcos $(i, j + 1), (j, k + 1)$ y $(k, i + 1)$ teniendo en cuenta que en este algoritmo no tenemos que cambiar el sentido a ningún camino entre estos arcos, tal y como pasaba en el algoritmo anterior, como se muestra en la figura 10.

Figura 10. Segunda opción de modificación 3- opt

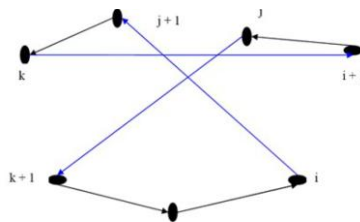


Figura 3.17: Después de la optimización.

Esta operación se debe repetir para todos los arcos del camino en estudio, teniendo en cuenta que i debe ser mayor que j y j debe ser menor que k , ya hasta que no se puedan realizar más intercambios en el camino en estudio.

En este caso el algoritmo tiene una complejidad $O(n^3)$.

2.2.7.3 Métodos meta heurísticos

En la década de 1980, la ventaja obtenida se logra a expensas de los cálculos incrementados. ^[15], diseñada principalmente para escapar del entrampamiento en el óptimo local al permitir movimientos inferiores, si es necesario, se espera que la flexibilidad agregada a la búsqueda conduzca a una mejor solución, a diferencia de la heurística codiciosa o de búsqueda local, la cual siempre termina cuando se llega a un óptimo local, la meta heurística termina mediante los referentes encontrado en la tabla 6.

Tabla 6. Puntos de referencia para la terminación de la meta heurística

La cantidad de iteraciones de búsqueda excede una cantidad especificada.
La cantidad de iteraciones desde la última mejor solución excede una cantidad especificada.
La vecindad asociada con el punto de búsqueda actual, o está vacía o no puede conducir a un nuevo movimiento de búsqueda viable.
La calidad de la mejor solución actual es aceptable.

Fuente: [15]

En el ANEXO U se encuentran las generalidades de las meta heurísticas de recocido simulado, el algoritmo genético, el algoritmo de colonia de hormigas y la meta heurística híbrida de búsqueda tabú y colonia de hormigas.

a) Meta heurística de Búsqueda Tabú

Usa un procedimiento de tipo iterativo para resolver problemas de optimización combinatoria discreta, fue propuesta inicialmente por Fred Glover en 1986. El principal objetivo es escapar de óptimos locales, para ello emplea algunas metodologías como el uso de memorias flexibles o cambio de la estructura del problema creando o relajando las restricciones con la finalidad de realizar la

búsqueda en áreas no factibles pero que de alguna manera nos puede llevar a una solución de buena calidad. [10]

“La búsqueda tabú se basa en tres principios:

- Uso de estructuras de memoria basadas en atributos diseñados para permitir criterios de evaluación e información de búsqueda histórica, la cual se explota más a fondo que las +-estructuras de memoria rígida (como en ramificación y acotamiento) o por sistemas de pérdida de memoria (como recocido simulado y otros métodos aleatorizados).
- Un mecanismo asociado de control, mediante el empleo de estructuras de memoria, basado en el inter-juego entre las condiciones que restringen y liberan al proceso de búsqueda (envuelto en las restricciones tabú y el criterio de aspiración).
- La incorporación de funciones de memoria de diferentes lapsos de tiempo, desde término corto hasta de término largo.

El tipo de memorias que se usan en TS se clasifican en:

- Memoria a corto plazo: También llamada lista tabú; en esta memoria se almacena el historial de los últimos movimientos realizados (movimientos tabú) a través de una lista FIFO (First in first out), prohibiendo que los movimientos se repitan en las próximas iteraciones, así evita ciclos y escapa de mínimos locales.
- Memoria a medio plazo: en ella se registran los atributos, así evita ciclos y escapa de mínimos locales.
- Memoria de largo plazo: La memoria guarda un registro de las zonas que no han sido exploradas aun, diversificando de esta manera la búsqueda.

- **PASOS PARA DE BÚSQUEDA TABÚ (FORMA GENERAL)**

Paso 1: Generar una solución inicial, puede ser de manera aleatoria o a través de algoritmos heurísticos. Generar una solución de manera aleatoria puede traer grandes desventajas debido a que la solución encontrada puede ser de mala calidad.

Paso 2: Elegir el entorno o vecindario de la solución inicial, con el fin de generar nuevas soluciones a partir de esta. Para generar el vecindario se aplican técnicas como: Inserción, intercambio, etc.

Paso 3: Evaluar la función objetivo. Si la solución es factible y mejor que la anterior (criterio de aspiración) se toma como nueva solución, si no paso 4.

Paso 4: Se revisa que la nueva solución no esté restringida por un movimiento tabú, y se toma como nueva solución, si está restringida se toma la siguiente mejor solución factible y no restringida por la lista tabú.

Paso 5: Se actualiza la lista tabú reemplazando el valor más antiguo de la lista por el nuevo movimiento tabú.

Paso 6: Se ejecuta el algoritmo hasta que se cumpla de parada. Este criterio puede ser definido por la cantidad de iteraciones, la cantidad de iteraciones, la cantidad de iteraciones sin mejora, el tiempo de ejecución entre otros.

En el ANEXO V se presentan los conceptos de vecindad, lista tabú, criterio de aspiración, estrategia de intensificación, estrategia de diversificación, y el criterio de parada.

3. APLICACIÓN DEL MODELO DE OPTIMIZACIÓN TSPTW A LA PROGRAMACIÓN DE RUTAS EN EDEPSA ESP

3.1 ELEMENTOS A CONSIDERAR PARA LA OPTIMIZACIÓN

3.1.1 Clientes

A 14 de Febrero de 2014 se presenta la información del número de clientes que posee la empresa Edepsa Soluciones ambientales. donde se entiende por cliente activo a aquella entidad que a la fecha posee un contrato vigente para el servicio de recolección de residuos peligrosos, y como a cliente inactivo a aquella entidad que de haber poseído vínculo contractual con la empresa prestadora de servicio a la fecha se encuentra desvinculada.

Bucaramanga representa un 46.92% respecto al total de clientes de su base de datos, de los cuales se les presta el servicio a 362 de ellos. En la tabla 7 se muestra que para un total 362 clientes activos de la ciudad de Bucaramanga 328 de ellos están clasificados en la línea de recolección hospitalaria con un 90.61% de participación.

Tabla 7. Cantidad de clientes activos en Bucaramanga según el tipo de residuo generado.

MUNICIPIO	TIPO DE RESIDUO		TOTAL
	N° CLIENTES HOSPITALARIOS	N° CLIENTES INDUSTRIALES	
BUCARAMANGA	328	34	362
	90,61%	9,39%	100%

Cada cliente posee características de acuerdo al tipo y cantidad de residuo peligroso generado, de ahí que la empresa ha definido una frecuencia de

recolección con cada cliente de acuerdo al contrato de prestación del servicio, dato que es indispensable para llevar a cabo la programación y la ejecución del servicio.

En la tabla 8 se presenta la clasificación de los clientes activos de Bucaramanga que pertenecen a la línea hospitalaria de acuerdo a la frecuencia de recolección establecida contractualmente.

Otro elemento asociado a cada cliente es la ventana de tiempo que es un intervalo $[e_i, l_i]$ durante el cual se puede realizar la recolección, si el vehículo llega antes del instante e_i deberá esperar y si se llega después del instante l_i no será posible realizar el servicio. **La tabla 9** muestra las cantidades de clientes de la línea hospitalaria en la ciudad de Bucaramanga de acuerdo a las ventanas de tiempo horario.

Tabla 8. Cantidad de clientes inscritos en la ciudad de Bucaramanga de la línea Hospitalaria según su frecuencia de Recolección.

FRECUENCIA DE RECOLECCION EN DIAS	N° ENTIDADES PARA BUCARAMANGA	PORCENTAJE DE PARTICIPACION
1	1	0,30%
3	2	0,61%
8	11	3,35%
15	10	3,05%
20	1	0,30%
30	135	41,16%
45	2	0,61%
60	133	40,55%
90	33	10,06%
TOTAL	328	100,00%

Tabla 9. Cantidad de Clientes de acuerdo a la ventana horaria de recolección.

VENTANA HORARIA	N. ENTIDADES
6:30 a.m. - 12:00 m. y 2:00 p.m. - 6:00 p.m.	1
7:00 a.m. - 11:00 a.m.	1
7:00 a.m. - 8:00 a.m.	1
7:00 a.m. - 11:00 a.m. y 2:00 p.m. - 5:00 p.m.	5
7:00 a.m. - 12:00 m. y 2:00 p.m. - 6:00 p.m.	2
7:00 a.m. - 5:00 p.m.	12
7:15 a.m. - 12:00 m. y 2:00 p.m. - 6:00 p.m.	1
7:30 a.m. - 11:30 a.m. y 2:00 p.m. a 6:00 p.m.	1
7:30 a.m. - 6:00 p.m.	4
8:00 a.m. - 11:00 a.m.	1
8:00 a.m. - 11:00 a.m. y 2:00 p.m. - 5:00 p.m.	3
8:00 a.m. - 11:00 a.m. y 3:00 p.m. - 6:00 p.m.	1
8:00 a.m. - 11:30 a.m. y 2:00 p.m. - 5:30 p.m.	1
8:00 a.m. - 12:00 m.	1
8:00 a.m. - 12:00 m. y 1:00 p.m. - 6:00 p.m.	1
8:00 a.m. - 12:00 m. y 2:00 p.m. - 5:30 p.m.	1
8:00 a.m. - 12:00 m. y 2:00 p.m. - 6:00 p.m.	208
8:00 a.m. - 12:00 m. y 2:30 p.m. - 6:00 p.m.	2
8:00 a.m. - 12:00 m. y 3:00 p.m. - 5:00 p.m.	1
8:00 a.m. - 12:00 m. y 3:00 p.m. - 6:00 p.m.	1
8:00 a.m. - 12:00 m. y 4:00 p.m. - 6:00 p.m.	1
8:00 a.m. - 12:30 p.m. y 2:00 p.m. - 6:00 p.m.	1
8:00 a.m. - 12:30 p.m. y 2:00 p.m. - 6:00 p.m.	5
8:00 a.m. - 1:00 p.m. y 2:30 p.m. - 6:00 p.m.	1
8:00 a.m. - 1:00 p.m. y 3:00 p.m. - 6:00 p.m.	1
8:00 a.m. - 4:00 p.m.	20
8:30 a.m. - 11:30 a.m. y 2:30 p.m. - 5:30 p.m.	1
8:30 a.m. - 12:00 m. y 2:30 p.m. - 6:00 p.m.	1
8:30 a.m. - 12:30 p.m.	1
8:30 a.m. - 12:30 p.m. y 2:30 p.m. - 6:00 p.m.	1
8:30 a.m. - 12:30 p.m. y 3:30 p.m. - 6:00 p.m.	1
8:30 a.m. - 6:00 p.m.	6
9:00 a.m. - 12:00 m. y 2:00 p.m. - 6:00 p.m.	3
9:00 a.m. - 12:00 m. y 2:30 p.m. - 6:00 p.m.	1
9:00 a.m. - 12:00 m. y 3:00 p.m. - 6:00 p.m.	2
9:00 a.m. - 12:00 m. y 3:30 p.m. - 6:00 p.m.	1
9:00 a.m. - 12:00 m. y 4:00 p.m. - 6:00 p.m.	2
9:00 a.m. - 1:00 p.m. y 4:00 p.m. - 6:00 p.m.	1
9:00 a.m. - 6:00 p.m.	8
9:30 a.m. - 1:00 p.m. y 3:00 p.m. - 6:00 p.m.	1
10:00 a.m. - 12:00 m. y 2:00 p.m. - 5:30 p.m.	1
10:00 a.m. - 6:00 p.m.	1
10:30 a.m. - 12:00 m. y 3:00 p.m. - 6:00 p.m.	1
11:00 a.m. - 6:00 p.m.	2
2:00 p.m. - 4:00 p.m.	1
2:00 p.m. - 5:00 p.m.	1
2:00 p.m. - 6:00 p.m.	10
2:30 p.m. - 6:00 p.m.	1
3:00 p.m. - 4:30 p.m.	2

3.1.2 Fuerza laboral

En la tabla 10 se encuentra el personal que integra el área de gestión respel en el área de Bucaramanga.

Tabla 10. Personal de Gestión Respel para la ruta de Bucaramanga

ÁREA	PERSONAL	NÚMERO
Administrativa	Auxiliar logístico	1
Operativa	Jefe de planta.	1
	Operarios de planta	6
	Conductores	1
	Operarios de recolección.	1

✓ **Horario:**

El conductor y el operario asignado inician la jornada de recolección con el primer cliente a las 7:30 am, actividad que se extiende hasta las 4:30 pm momento en el cual deben llegar a la planta de tratamiento proporcionando 30 minutos para el descargue, pesaje y almacenamiento de residuos, seguido de la limpieza y desinfección vehicular, finalmente este es dirigido al garaje donde finalizará la jornada a las 5:15 pm como máximo.

Basados en la información suministrada por el auxiliar logístico se considera una hora de holgura para las actividades concernientes a alimentación y descanso, adicionalmente incluye la actividad de llenado de gasolina que se lleva a cabo 3 veces a la semana.

3.1.3 Recolección de los residuos (carga y descarga)

La recolección es realizada por el operario que acompaña al conductor, quien se dirige al área de almacenamiento de la entidad y realiza el pesaje del material en presencia del cliente o el personal encargado por el cliente para esta labor, una vez conocido el peso se diligencia la orden de servicio y se ubica el material peligroso dentro del vehículo. El tiempo del recorrido de la recolección es la sumatoria del tiempo de viaje hacia cada entidad más el tiempo de carga de los residuos.

Con el fin de establecer un tiempo de servicio en la recolección de residuos peligrosos para el caso de Edepsa se analizaron los datos reales recolectados en el mes de octubre del 2013, en el cual se presentaron dos situaciones propias de dos tipos de clientes:

- ***Negocios pequeños y medianos:*** La responsabilidad de entregar los residuos peligrosos es compartida, es decir cualquier persona está calificada para entregar los residuos, por tal motivo el tiempo de espera en cada entidad no representa un factor determinante en el tiempo de servicio. En cuanto a la generación de residuos peligrosos, estos clientes son generadores de menos de 3 bolsas, dichos clientes están previamente identificados por la empresa ya que el cobro realizado depende de la cantidad de bolsas entregadas.
- ***Grandes negocios:*** Para este tipo de clientes la responsabilidad de entregar los residuos es claramente definida, y sin su presencia no se puede realizar el proceso de recolección por lo cual es posible incurrir en tiempos de espera. En cuanto a la generación de residuos, estos clientes son generadores de más de tres bolsas y son previamente identificados

por la empresa debido a que la forma de pago de la prestación del servicio fue establecida según el peso de los residuos generados.

Una vez identificados los clientes se analizan los tiempos reales de servicio presentados en el mes de octubre del 2013, como se ve en el ANEXO W, se obtiene como resultado un $S_i = 5$ minutos para clientes medianos y pequeños (3.8 minutos de media más 1.3 de desviación) y un $S_i = 17$ minutos para grandes negocios.

Una vez realizada la recolección, el vehículo se dirige a la planta de tratamiento, la cual se encuentra ubicada en la Calle 2 # 3ª – 69, Zona industrial chimita en Girón, donde se descargan los residuos peligrosos para ser pesados, almacenados en el cuarto frío y tratados posteriormente.

3.1.4 Recursos involucrados

Instalaciones de almacenamiento: En el cuarto de almacenamiento se depositan los residuos, hasta realizar el tratamiento adecuado, este cuarto debe reunir los siguientes requisitos:

- ✓ Acabados lisos que permiten una limpieza fácil e imposibilita la formación de ambientes propicios para la proliferación de microorganismos.
- ✓ Posee sistemas de ventilación natural provistos de mallas para impedir el acceso de insectos, roedores entre otros.
- ✓ Programa de aseo diario incluyendo descontaminación, limpieza, desinfección y secado.
- ✓ El cuarto se encuentra debidamente señalizado.
- ✓ Cuarto sin estantes de clasificación de residuos peligrosos, debido a la recolección diaria de un solo tipo de residuo.
- ✓ Capacidad de $36 m^3$

Recursos tecnológicos: Actualmente la empresa utiliza las herramientas del paquete de Microsoft Office 2010 (Excel, Word, PowerPoint, y Access) y cuenta con el software denominado **Edepsa Operativo**, que permite el almacenamiento, interacción y suministro de toda la información relacionada con los productos, servicios, clientes y demás partes interesadas, para asegurar el desempeño de los diferentes procesos definidos por la organización.

Flota vehicular: Se cuenta con un vehículo que cubre la ruta de Bucaramanga, este posee las siguientes características:

- ✓ Vehículo cerrado tipo furgón con superficies lavables.
- ✓ Destinado únicamente a la recolección de residuos peligrosos
- ✓ Capacidad de 2.5 toneladas equivalente a 2.500 kilogramos Furgones refrigerados y acondicionados para el transporte y almacenamiento.
- ✓ Piso en acero inoxidable.
- ✓ Canaletas y llaves de paso para controlar fluidos.
- ✓ Compuerta trasera y cabina separada del vehículo.
- ✓ Emplea señalización visible, indicando el tipo de residuo que transporta.
- ✓ Porta el nombre de la empresa Edepsa, dirección y teléfono.

La programación de rutas es diaria y realiza recolecciones de un único tipo de residuo peligroso (hospitalario o industrial), por tal motivo el vehículo no requiere de compartimentos especiales para separar cada tipo de material, pero si esta acondicionado para cumplir con las especificaciones de almacenamiento y transporte de desechos hospitalarios e industriales peligrosos dando cumplimiento a las exigencias medio ambientales.

3.1.5 Restricciones de tránsito

Consultadas en la dirección de tránsito de Bucaramanga aplicables al año 2013, se registra:

- ✓ No se registran prohibiciones de tránsito a vehículos con capacidad de carga de 2.5 toneladas.
- ✓ Resolución N°. 060 del 12 de Febrero de 2010, se aprobó el uso del carril exclusivo a los vehículos del Sistema Integrado de Transporte Masivo – SITM - METROLINEA, sobre el corredor vial Carrera 15 Diagonal 15 autopista Bucaramanga-Floridablanca.
- ✓ Resolución N° 368 de 2012 por la cual se modifica:8 sentido doble de circulación vial Norte-Sur y Sur-Norte a la Carrera 37 entre Calles 41 y 42 del Barrio Cabecera del Llano, y sentido único de circulación vial Oriente-Occidente a la Calle 51 entre Diagonal 15 y Carrera 17 .1
- ✓ Resolución N° 575 de 2012 por la cual se modifican sentidos únicos de circulación vial (Sur-Norte a la Carrera 34 entre Calles 45 y 34; Occidente-Oriente a la Calle 48 entre Carreras 17 y 17B; Occidente- Oriente a la Calle 55B entre Carrera 29 y Av. González Valencia), se prohíben maniobras de giro a la izquierda Sur-Occidente en la Carrera 21 con Calle 56, y se implementa su respectiva señalización, en algunos sectores de la ciudad de Bucaramanga⁹
- ✓ Resolución N° 165 de 2013 por la cual se modifican algunos sentidos únicos de circulación y se restablecen e implementan prelación viales en varios sectores de la ciudad de Bucaramanga¹⁰

1. Dirección de tránsito consultada el 12 / 8/2013 disponible en:

http://transitobucaramanga.gov.co/wpcontent/uploads/2013/02/RESOL2012/resolucion_4792012.pdf

⁹ Ibid.

¹⁰ Resolución 165 de 2013, disponible en: http://66.7.217.23/~transito/wp-content/uploads/2013/03/Resolucion_1652013.pdf

Sentido único de circulación vial
Sur-Norte a la Carrera 33 (Paralela) entre Calles 54 y 52B.
Norte –Sur a la carrera 31 entre calles 49 y 54.
Sur-Norte a la Carrera 29 entre Calles 51 y 49.
Norte-Sur a la Carrera 27A entre Calles 50 y 51.
Oriente-Occidente a la Calle 50 entre Carreras 29 y 27
Occidente-Oriente a la Calle 51 entre Carreras 27A y 29
Oriente-Occidente a la Calle 52B entre Carreras 33 y 31.
Occidente- Oriente a la Calle 54 entre Carreras 31 y 33.
Occidente-Oriente a la Calle 50 entre Carreras 29 y 31.
Occidente-Oriente a la Calle 32 con Carrera 28
Occidente-Oriente a la Calle 33 con Carrera 28
Sur-Norte a la Carrera 16 con Calle 37.
Sur-Norte a la Carrera 17 con Calle 31.

3.1.6 Velocidad

Límites de velocidad en zonas urbanas público. En vías urbanas las velocidades máximas serán de sesenta (60) kilómetros por hora excepto cuando las autoridades competentes por medio de señales indiquen velocidades distintas. [34]

Teniendo en cuenta que la matriz de tiempos es arrojada en base a google maps y este establece la velocidad de acuerdo al histórico de cada tramo.

3.1.7 Restricciones de capacidad

Con el fin de realizar un análisis de datos históricos para determinar la capacidad vehicular requerida, se determina el número de la muestra a analizar, estos datos se procesan en un diagrama a de cajas y bigotes para aislar puntos atípicos, posteriormente se aplica una prueba de normalidad de Kolmogorov-smirnov (KS) , para establecer la distribución de los datos con el objetivo de

realizar un gráfico de límites de control por medio del cual se podrá determinar si la capacidad del vehículo es suficiente o no.

Para una población conocida y finita, la muestra necesaria es más pequeña y su tamaño se determina mediante la fórmula:

$$n = \frac{N}{1 + \frac{e^2(N-1)}{z^2 pq}}$$

n = tamaño de la muestra que se desea conocer.

N = tamaño conocido de la población, en este caso se poseen datos desde enero del 2011 hasta marzo 2013 correspondiente a 481 días.

α = 5%, nivel de confianza 95% $z=1.96$ **e** = 5%

Se asume que $pq = (.50 * .50) = .25$

$$n = \frac{481}{1 + \frac{(0.05^2) * (481 - 1)}{(1.96^2) * (0.25)}} = 213.8 \approx 214 \text{ días}$$

Se analizará el tiempo comprendido entre junio 2012 hasta marzo del 2013. Correspondiente a 223 días, ya que no todos los días del mes se disponen recolecciones a la meseta de Bucaramanga, una vez determinado el tamaño de la muestra se realiza un diagrama de cajas y bigotes mediante el software estadístico minitab por mes figura 11 y total figura 12.

Mediante este diagrama se puede observar:

- ✓ El mes de marzo presenta una mayor dispersión de los datos.
- ✓ Permite identificar y excluir los datos atípicos presentes en cada mes
- ✓ Existe una gran dispersión de los datos, como era de esperarse puesto que la recolección se realiza a diversos clientes y necesidades de recolección.

Figura 11. Diagrama de cajas y bigotes por mes.

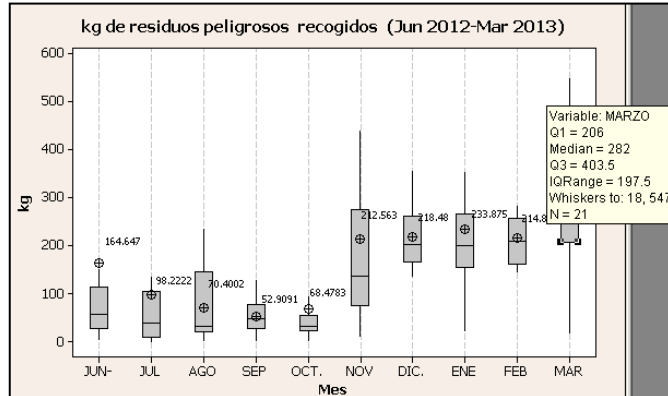
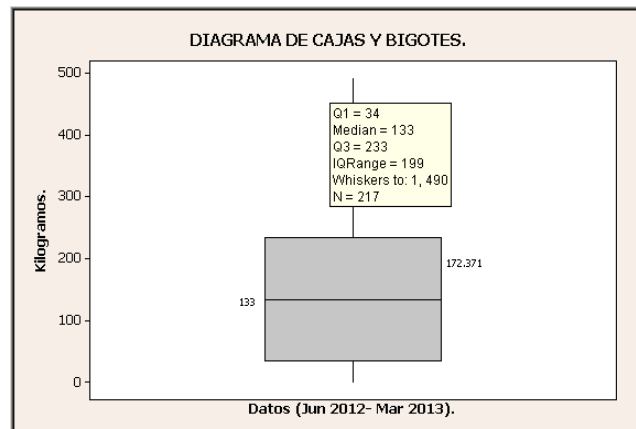


Figura 12. Diagrama de cajas y bigotes total



Una vez excluidos los puntos atípicos se realizará una prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-smirnov (KS) con el objetivo de establecer si la muestra es normal o no y posteriormente realizar un gráfico de control apropiado a su distribución.

Hipótesis a contrastar.

$H_0 =$ Los datos analizados siguen una distribución normal.

$H_1 =$ Los datos analizados no siguen una distribución normal.

Estadístico de contraste.

$$D = \sup_{1 \leq i \leq n} \left| \hat{F}_n(x_i) - F_0(x_i) \right|$$

Dónde:

x_i = Es el i-esimo valor observado en la muestra (cuyos valores se han ordenado previamente de menor a mayor).

$F_n^{\wedge}(x_i)$ = Es un estimador de la probabilidad de observar valores menores o iguales que x_i .

$F_0(x)$ = Es la probabilidad de observar los valores menores o iguales de x_i .

El p-valor se define como:

$$P - \text{valor} = P(D > D_{obs}/H_0 \text{ es cierta})$$

De tal forma, para un nivel de significación α , la regla de decisión para este contraste es=

✓ Si $p - \text{valor} \geq \alpha \Rightarrow \text{Aceptar } H_0$

✓ Si $p - \text{valor} < \alpha \Rightarrow \text{Rechazar } H_0$

$p - \text{valor} < 0.005$ para un $\alpha = 5\%$ por lo tanto rechazamos de la prueba de hipótesis e identificamos la distribución mediante el software minitab figura 13.

Descriptive Statistics

N	N*	Mean	StDev	Median	Minimum	Maximum	Skewness	Kurtosis
207	0	135.336	111.826	123	1	462	0.729393	-0.228048

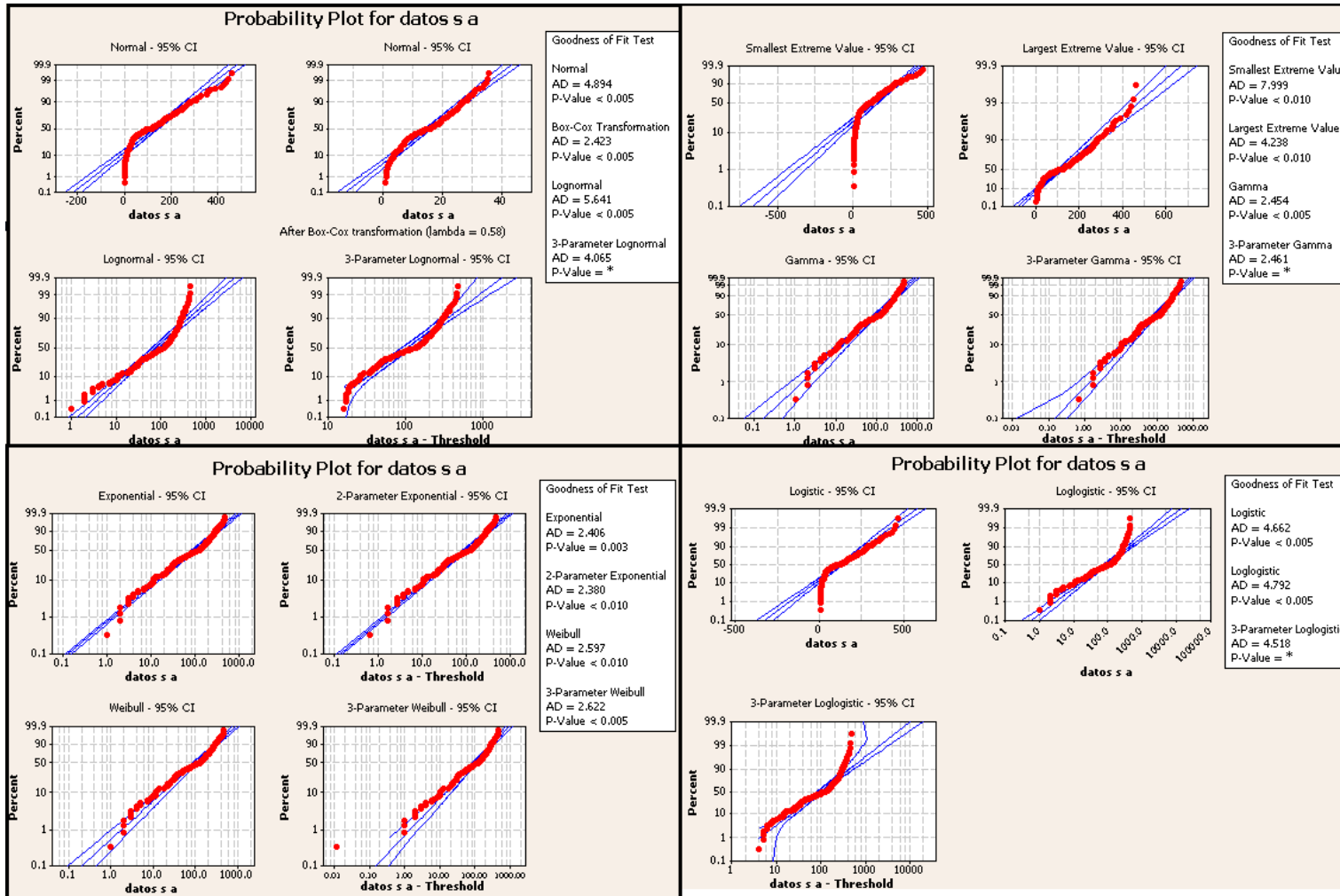
Box-Cox transformation: Lambda = 0.584382

Goodness of Fit Test

Distribution	AD	P	LRT P
Normal	4.894	<0.005	
Box-Cox Transformation	2.423	<0.005	
Lognormal	5.641	<0.005	
3-Parameter Lognormal	4.065	*	0.000
Exponential	2.406	0.003	
2-Parameter Exponential	2.380	<0.010	0.302
Weibull	2.597	<0.010	
3-Parameter Weibull	2.622	<0.005	0.150
Smallest Extreme Value	7.999	<0.010	
Largest Extreme Value	4.238	<0.010	
Gamma	2.454	<0.005	
3-Parameter Gamma	2.461	*	0.347
Logistic	4.662	<0.005	
Loglogistic	4.792	<0.005	
3-Parameter Loglogistic	4.518	*	0.320

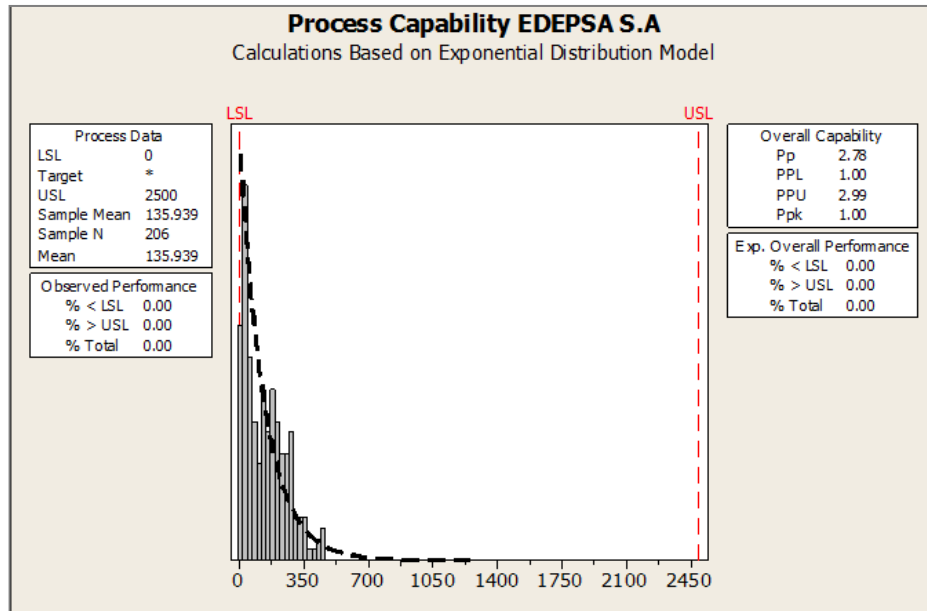
La distribución que más se ajusta a la muestra es exponencial con una AD 2.406 y un p-valor 0.003.

Figura 13. Distribución de la muestra



Se realizará un gráfico de control basados en la distribución encontrada, el límite superior se establece en 2500 kilogramos que es la capacidad del vehículo como se ve en la figura 14.

Figura 14. Gráfico de control de capacidad.



Se tomó una muestra de 206 datos excluyendo datos atípicos, con una media de 135.9 y un máximo de 462 kilogramos, por lo cual es posible afirmar que el porcentaje de utilización del vehículo no ha superado el 19% de su capacidad correspondiente a 2500 kilogramos, indicando subutilización del recurso.

La cantidad de residuos peligrosos a recoger se desconoce al momento de realizar la programación, considerándose una demanda probabilística, factor que no es considerado ya la probabilidad de que se supere el límite superior es cercano a cero y por lo tanto no se considerarán restricciones de capacidad en el modelo a desarrollar.

3.1.8 Descripción del modelo

El modelo se basa en la asignación de una ruta de recolección de residuos hospitalarios a fin de reducir costos de transporte, desarrollando una programación diaria que optimice el recorrido reduciendo la distancia del recorrido entre cada uno de los nodos a visitar de la ruta, por otra parte, es probable que ocurran eventos no cuantificables que lleguen a generar diferencias entre los resultados entre la simulación y el recorrido real.

Se dispone de un conjunto de nodos localizados sobre un mapa que representan los 287 clientes hospitalarios ubicados en la meseta de Bucaramanga con una determinada necesidad y frecuencia de recolección, por tal motivo se desea hallar la ruta que permita visitar todos los nodos asignados a la programación ruteada una sola vez durante el recorrido, buscando que el costo total de la ruta sea mínimo.

A continuación se definen los nodos empleados en el modelo:

- ✓ **Origen:** será el nodo donde inicie la ruta. En este problema en particular se dice que es el depósito o garaje de donde parte el vehículo que realizará la recolección ubicado en la calle 53 # 17-19 de Bucaramanga.
- ✓ **Clientes:** Este problema está sometido a restricciones temporales de servicio o ventanas de tiempo, donde cada cliente posee un intervalo $[a_i, b_i]$. en el cual podrá ser realizada la recolección, si el vehículo llega demasiado pronto a la cita con el cliente deberá esperar, pero nunca se iniciará el servicio si no llega a tiempo, en este caso cada cliente será un nodo asignado a la ruta que tendrá asociada una frecuencia y una ventana de tiempo, la planta de tratamiento se tomará como el último cliente a visitar

con una frecuencia diaria, esta se encuentra ubicada en la Zona industrial Chimita Girón Santander Calle 2 # 3ª 69 (7,095106; -73,171472).

- ✓ **Llegada:** Será el nodo donde finalice la ruta, en este caso será el depósito o garaje.

De acuerdo a las definiciones mostradas en el capítulo dos, y teniendo en cuenta las características y limitaciones del modelo se encontró que el problema del agente viajero con ventanas de tiempo (**TSPTW**) es el que se ajunta al caso de estudio.

3.1.9 Formulación del modelo de optimización

A continuación se detallan los distintos parámetros y variables del modelo.

No se consideran tiempos de espera del vehículo cuando arriban a los clientes ya que estos son despreciables.

F , Es la duración de la jornada en minutos que inicia desde las 7:30 hasta las 5:15 pm, momento en el cual el vehículo arriba al garaje, considerando una hora de holgura, se estipulan 525 minutos.

Para cada arco $A \in (i, j)$ se definen:

Parámetros	
C_{ij}	Costo de la función objetivo asociado de viajar desde el punto i al punto j , donde los puntos corresponden a las entidades. Estos costos se estipulan de acuerdo a una ponderación del tiempo, la distancia y la urgencia de visitar el cliente.
Variables	
x_{ij}	1, si el arco $(i, j) \in A$ 0 en otro caso.

Para cada nodo $V = \{0, \dots, n\}$ se definen:

Parámetros	
a_i	Tiempo más cercano, de inicio de servicio en el cliente i
b_i	Tiempo más lejano de inicio de servicio, o el fin de la ventana correspondiente al cliente i .
E	Salida del depósito más temprano posible. Se considerara a las 7:30am para el modelo el valor es el minuto 0 de la jornada.
L	Llegada al depósito más tardía posible. Se considerara a las 17:15 para el modelo el valor es el minuto 525 de la jornada.
S_i	Tiempo que toma recoger los residuos peligrosos al cliente i , este tiempo se estableció en 17 minutos para los clientes grandes, 5 para pequeños y medianos y 30 minutos para la planta de tratamiento.
Variables	
W_i	Instante del día en que se inicia a cargar los residuos peligrosos de la entidad i o cliente actual.
W_j	Instante en que el vehículo inicia a servir al cliente j o cliente siguiente.

La planta de tratamiento será tomada como un cliente, cuya ventana de tiempo es suficientemente grande para que el modelo lo tome inmediatamente antes de llegar al garaje.

Función objetivo

$$\text{Min} \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} * X_{ij}$$

Restricciones:

El vehículo sale del garaje 0.

$$\sum_{j \in \Delta+(0)} X_{0j} \leq 1 \quad (1)$$

El vehículo regresa al garaje al terminar la jornada.

$$\sum_{i \in \Delta+(n+1)} X_{i,n+1} = 1 \quad (2)$$

Asignación de los clientes a la ruta.

$$\sum_{j \in \Delta+(i)} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in N \quad (3)$$

Dado $N = v \setminus \{0, n+1\}$ que representa el conjunto de clientes exceptuando la bodega, asigna los clientes exactamente una vez a la ruta. $j \in \Delta+(i)$ Es el conjunto de grafos completos que parten de i y llegan a j .

No pueden existir sub tours entre dos clientes.

$$X_{ij} + X_{ji} \leq 1 \quad \forall (i, j) \in N, (4)$$

Los demás sub tours son eliminados por las restricciones de ventanas de tiempo.

Secuencia de los tiempos de atención

$$X_{ij}(w_i + s_i + t_{ij} - w_j) \leq 0 \quad \forall (i, j) \in A (5)$$

Impone que el tiempo de atención del cliente j , debe ser mayor o igual al tiempo de arribo al cliente i más el tiempo de descarga, más el tiempo de viaje desde i a j .

$$a_i \sum_{j \in \Delta+(i)} X_{ij} \leq w_i \leq b_i \sum_{j \in \Delta+(i)} X_{ij} ; \quad i \in N \quad (6)$$

La restricción (6) establece que el instante de llegada W_i sea dentro de la ventana de tiempo $[a_i, b_i]$ asociada a los nodos de cada cliente i .

$$E \leq W_i \leq L ; \quad i \in N (7)$$

La restricción (7) hace que cada cliente sea visitado dentro del intervalo de tiempo general $[a_0, b_0] = [a_{n+1}, b_{n+1}] = [E, L]$, asociada a los nodos de llega y salida del depósito.

El inicio del servicio a cada cliente debe ser anterior del final del día laboral.

$$w_i \leq F \quad \forall i \in N \quad (8).$$

Impone una cota superior de tiempo con la que cuenta el modelo para poder realizar la recolección, conocida la jornada laboral.

Naturaleza de las variables

$$X_{ij} \in \{0,1\}, w_i \geq 0 ; \forall i \in N, (i,j) \in A \quad (9)$$

$A \in (i,j)$ Es el conjunto de arcos con $i \neq j$.

3.2 TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN MATEMÁTICAS APLICADAS

Los métodos a emplear en la construcción de la ruta Edepsa ESA se seleccionaron mediante la definición de criterios comunes que calificaran al conjunto de heurísticas consultadas según la revisión bibliográfica revisada anteriormente, la formulación matemática empleada se orientó a la minimización de costos, por consiguiente las heurísticas tienen esta función, es importante considerar el acceso a la información literaria respecto al problema a abordar, la factibilidad de escribir en algoritmo en lenguaje de programación y la eficiencia al realizar este proceso.

Métodos exactos: Dada la complejidad de los problemas, solo las instancias con pocos clientes pueden ser resueltas de forma consistente por métodos exactos. En este tipo de metodologías, suele resolverse alguna relajación del problema y utilizar un esquema de ramificación y acotamiento (Branch and Bound). También se emplean otros métodos como el algoritmo de planos de corte de Gomory, o el de descomposición de Benders,

Teniendo en cuenta la complejidad de los métodos exactos para la resolución de problemas con un gran número de nodos, y la necesidad de la empresa de obtener soluciones rápidas mediante un aplicativo de fácil utilización, se opta por desarrollar el problema mediante métodos aproximados.

Se seleccionaron dos heurísticas de construcción, dos de mejora y una meta heurística, eligiendo aquellos para las cuales se encontró mayor información, presentaron enfoque temporal y permitía ser modelado computacionalmente, en la tabla 11 encontrará las técnicas de optimización a desarrollar en la aplicación de ruteo para la empresa Edepsa E.S.P

Tabla 11. Algoritmos desarrollados en la aplicación de ruteo

Heurística del vecino más cercano con enfoque temporal
Heurísticas de inserción más barata.
Método Optimización 2-opt
Método Optimización 3-opt
Metaheurística de Búsqueda Tabú

4. SOFTWARE PARA EL PROBLEMA DEL AGENTE VIAJERO CON VENTANAS DE TIEMPO

4.1 INTRODUCCIÓN

En términos generales un problema de ruteo vehicular posee un gran conjunto de variables, restricciones y ecuaciones que deben ser resueltas por medio de herramientas y métodos matemáticos. La complejidad de este tipo de problema hace indispensable el uso de herramientas computacionales para traducir del lenguaje matemático de cada expresión a un lenguaje computacional orientado al desarrollo de algoritmos que ofrezcan soluciones en el menor tiempo posible.

El hecho de considerar un problema del tipo NP-hard y abordarlo mediante el paradigma heurístico, hace preciso recurrir a elementos de sentido común, programación y ciencias básicas. Por tal motivo para el desarrollo de este tipo de herramientas computacionales se hace necesario adquirir un conjunto de conocimientos de forma coaxial tales como investigación de operaciones, matemática aplicada, habilidad en el desarrollo de estructuras computacionales, entre otras, para ofrecer alternativas de solución de alto desempeño.

Para efectos del presente trabajo se ha desarrollado una aplicación de ruteo vehicular para dar solución al Problema del Agente Viajero con ventanas de Tiempo para la empresa de recolección de residuos peligrosos Edepsa Soluciones Ambientales con el objetivo de minimizar el costo de transporte y aumentar el nivel de servicio de la empresa de recolección en la ciudad de Bucaramanga.

La aplicación de ruteo vehicular se desarrolló porque era necesario crear una herramienta que mejorara la eficiencia del proceso de recolección RESPEL de acuerdo al costo de transporte, empleando para su desarrollo herramientas confiables de libre aplicación como tal es el caso de google maps, mysql y un lenguaje de programación en PHP.

Inicialmente se buscó emplear métodos exactos con el fin de encontrar una solución óptima al problema planteado, sin embargo la cantidad de restricciones aumentaba considerablemente el tiempo de respuesta, y por esta razón emplear este tipo de métodos no fue una opción atractiva para ser utilizado en la simulación del modelo propuesto.

Para el desarrollo de la aplicación se incorporaron 2 Heurísticas de Construcción, la heurística del vecino más cercano y la heurística de la inserción más barata, se emplearon 2 heurísticas de mejora 2-opt y 3-opt y una meta heurística, búsqueda tabú, que se encuentran alineados con los objetivos del proyecto, y sirven de base comparativa para analizar el desempeño del caso de estudio propuesto.

4.2 DISEÑO DEL SOFTWARE TSPTW

El desarrollo expuesto en este proyecto tiene por propósitos, facilitar la solución de problemas reales (TSPTW), el cálculo de rutas, y su gestión. En este desarrollo informático se integran tres elementos, un sistema de información geográfica (Google maps), información en una base de datos Mysql de clientes, los modelos matemáticos y técnicas de optimización combinatoria que conjuntamente permiten resolver los problemas de rutas para el transporte vehicular con ventanas horarias.

En el presente capítulo se exponen las herramientas necesarias para llevar a cabo el desarrollo de la aplicación que se encuentra disponible en internet, y de igual forma se describen aquellas características e interacciones necesarias entre los elementos que componen su estructura funcional. En el mismo sentido, el conocimiento sobre la utilización de esta aplicación será guiada mediante un instructivo disponible en el ANEXO X, asegurando que el usuario final mantenga un aprendizaje claro y conciso en su experiencia y desempeño. Por último se dará a conocer la construcción de una ruta de recolección de Edepsa soluciones

ambientales que reforzará el conocimiento aprendido, dando a entender la importancia del uso de este tipo de herramientas.

El éxito en la gestión logística depende de la capacidad de integración (información y sistemas, proveedores y clientes, recursos y decisiones, etc). Por ello, en este proyecto se ha prestado especial interés a la integración necesaria para la optimización del transporte y su gestión.

4.2.1 Componentes

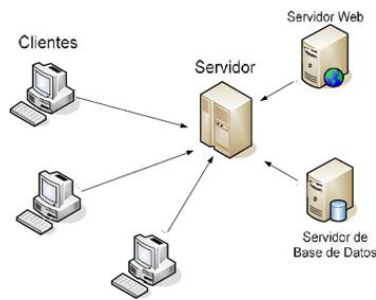
El programa combina e integra tres componentes: **Cliente web** (la información del sistema logístico), **Sistema de información geográfica** (aplicación de información geográfica Google maps), y **servidor apache** (servidor en el que encuentra alojada toda la información del sistema empresarial necesaria para crear y resolver los modelos matemáticos mediante técnicas de optimización combinatoria).

4.2.1.1 Cliente Web

Se denomina como clientes web a aquellas computadoras host que tienen instalado un software que les permite solicitar información a un servidor web y mostrar la información obtenida.

En un mismo sentido un cliente web es considerado como aquel usuario que posee un beneficio a través de la web, haciendo uso de servicios específicos y funcionalidades que provee conjuntamente el servidor web, en otras palabras el cliente web está en la capacidad de suministrar datos de entrada, enviar solicitudes para el procesamiento de la información a través de un servidor web y finalmente obtener los datos de salida que requiere, ver figura 15.

Figura 15. Cliente web



Fuente: [27]

Características

Entre las principales características que debe poseer un cliente web tenemos:

- Comunicación con los servidores a través de una red.
- Los servidores esperan la llegada de solicitudes generadas por el cliente.
- El cliente le hace peticiones al servidor, el cual procesa dicho requerimiento y retorna los resultados al cliente apropiado.
- La interacción entre cliente y servidor es generalmente representada empleando diagramas de secuencia.
- Se puede conectar a varios servidores a la vez.
- Normalmente interactúa directamente mediante una interfaz gráfica de usuario.^[28]

Requisitos Funcionales

- Ordenador Personal
- Conexión a Internet
- Navegador Web

En vista de su estructura funcional, el cliente web solo requiere de un teclado y mouse para ingresar la información relacionada con el cliente y de una pantalla para visualizar el resultado del procesamiento de los datos que se ejecuta al interior del servidor web en este caso preferiblemente Mozilla Firefox. Un usuario

en condiciones normales se encuentra en la posibilidad de utilizar cualquier tipo de sistema operativo con una capacidad de almacenamiento de 250 MB y una memoria RAM de 128 MB como mínimo y de una conexión a internet de 6 Bits/s que permita el rápido acceso a páginas web.

Ventajas

- Centralización del control de los recursos, datos y accesos.
- La información suele ser almacenada bajo mayor seguridad
- Se puede aumentar la capacidad de los clientes.

4.2.1.2 Sistema de información geográfica (Api Google maps)

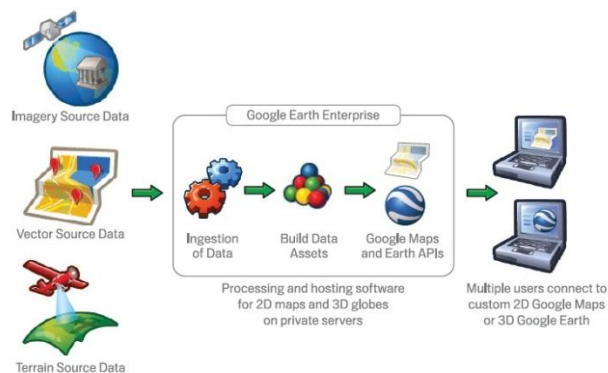
Un Sistema de Información Geográfica (SIG o GIS, en su acrónimo inglés) es una integración organizada de hardware, software, datos geográficos y personal, diseñado para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar en todas sus formas la información geográficamente referenciada con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión. El SIG funciona como una base de datos con información geográfica (datos alfanuméricos) que se encuentra asociada por un identificador común a los objetos gráficos de un mapa digital. De esta forma, señalando un objeto se conocen sus atributos e, inversamente, preguntando por un registro de la base de datos se puede saber su localización en la cartografía ^[29].

El api de google maps es una aplicación de servicio gratuito que permite manipular mapas para la consulta de rutas utilizando información geográfica real entre diferentes puntos territoriales. Por tal motivo fue empleado para la generación y el almacenamiento de la matriz de las distancias trazadas entre cada uno de los nodos (Clientes) ^[3]. Debido a la flexible plataforma que mantiene google para el desarrollo de sus aplicaciones, se permite utilizarlas libremente en la

programación de su código Fuente empleado para desarrollar herramientas de uso personal. De ahí que se ha podido crear una herramienta de ruteo vehicular basada en la ubicación de diferentes puntos geográficos de acuerdo a la longitud y latitud determinada para cada nodo. Dado que las distancias entre ciudades deben estar expresadas en unidad de tiempo, se utilizaron estimaciones de tiempo de viaje provistas por Google Maps, basadas en los límites de velocidad de cada segmento de ruta.

Las API de Google Maps proporcionan a los desarrolladores diversas formas de insertar Google Maps en páginas web. Además, han proporcionado un uso sencillo y una amplia personalización. Ver figura 16.

Figura 16. Sistema de información geográfica (api google maps)



Fuente: [3]

Actualmente se ofrecen varias API: API de JavaScript de Google Maps, API de Google Maps para Flash y el API de Google Static Maps, de acuerdo a la necesidad de cada desarrollador se pueden combinar varias de ellas sin ninguna interferencia en su código fuente.

Navegador Web El API de JavaScript de Google Maps es compatible con los siguientes navegadores disponibles en la tabla versiones del API de java Script.

Tabla 12. Versiones del API de Java Script

Versión	Compatibilidad
3 del API de Java Script de Google Maps	<ul style="list-style-type: none">• Internet Explorer 7.0 o versiones posteriores (Windows)• Firefox 3.0 o versiones posteriores (Windows, Mac OS X y Linux)• Safari 4 o versiones posteriores (Mac OS X e iOS)• Chrome (Windows, Mac OS X y Linux)• Android• BlackBerry 6• Dolfín 2.0 o versiones posteriores (Samsung Bada).
2 del API de Java Script de Google Maps	<ul style="list-style-type: none">• Internet Explorer 6.0 o versiones posteriores (Windows)• Firefox 2.0 o versiones posteriores (Windows, Mac OS X y Linux)• Safari 3.1 o versiones posteriores (Mac OS X e iOS)• Chrome (Windows)

Fuente: [3]

Condiciones de servicio: El API de google maps es una colección de servicios que permiten incluir mapas, geo-código, lugares y otros contenidos de google en páginas web o aplicaciones personales. En el momento de emplear el API de JavaScript de Google Maps se envía la siguiente información a google:

- Tamaño y ubicación para recuperar mosaicos de mapa y derechos de autor.
- Direcciones para asignación de identificadores geográficos.
- Solicitudes de elevaciones y rutas.
- Ubicaciones en las que se pueden buscar lugares.
- Archivos KML si se utilizan objetos KmlLayer versión 3 o GeoXml (versión 2) [3].

Limitaciones de Uso: Los sitios web y las aplicaciones que utilizan el API de Google Maps pueden generar de forma gratuita hasta 25.000 cargas de mapas al

día por cada servicio. Para garantizar que los sitios que experimentan aumentos de tráfico a corto plazo no se vean afectados de forma negativa por los límites de uso del API de Google Maps, estos límites solo se aplican a los sitios que hayan excedido el límite durante más de 90 días consecutivos, si un sitio web lucrativo supera constantemente los límites de uso diario del API de Google Maps, deberá adoptar una de las siguientes soluciones:

- Adquirir un límite adicional a través de la consola de las API de Google.
- Adquirir una licencia para el API de Google Maps for Business.
- Modificar tu sitio para reducir el uso a fin de disminuir los límites.

Matriz de distancia de Google Maps: El API de matriz de distancia de Google es un servicio que proporciona el tiempo y la distancia de viaje para una matriz de orígenes y destinos, la información devuelta se basa en la ruta recomendada entre los puntos de partida y llegada, según los cálculos del API de Google Maps, y se compone de dos filas que incluyen los valores de duración y de distancia para cada par.

La Versión 3 del API de Java Script de Google Maps permite visualizar una serie de muestras de códigos fuentes para la creación de herramientas por desarrolladores ^[30].

Gracias al API de matriz de distancia, los usuarios pueden encontrar las mejores rutas para vehículos y conocer el tiempo necesario para llegar a su destino. Por otra parte el Street View en el Api de Google Maps permite poseer una visión global de su destino. La información de la ruta se puede obtener transmitiendo el origen y el destino deseados al API de rutas, cada consulta enviada al API de matriz de distancia está limitada por el número de elementos permitidos, que se determina multiplicando el número de orígenes por el número de destinos.

Tabla 13. Limitaciones de uso del API de matriz de distancias.

API	API de matriz de distancia	API de Google Maps for Busines
LIMITES	<ul style="list-style-type: none"> • 100 elementos por consulta, • 100 elementos cada 10 segundos, • 2.500 elementos en un período de 24 horas. 	<ul style="list-style-type: none"> • 625 elementos por consulta, • Elementos en 10 segundos. • 100.000 elementos en un período de 24 horas.

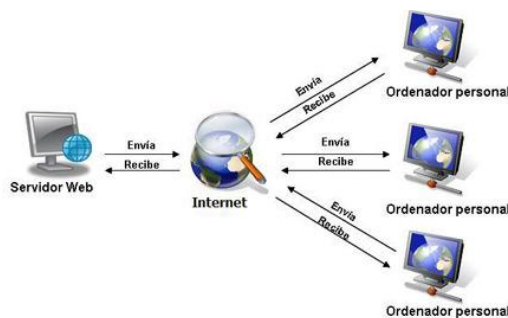
Fuente: Basado en [30]

Las URL del API de matriz de distancia tienen una restricción de 2.048 caracteres antes de la codificación URL. Dado que algunas URL del servicio del API de matriz de distancia pueden incluir varias ubicaciones.

4.2.1.3 Servidor apache

El servidor apache se basa en una plataforma de servicio web de fuente abierta que permite ejecutar un programa en una máquina respondiendo a solicitudes HTML de otros programas denominados clientes web. Posee una capacidad de almacenamiento virtual denominado Hosting Virtual, permite almacenar la información para acceder y hacer funcionar más de un sitio web en una sola máquina. Ver figura 17.

Figura 17. Servidor APACHE.



Fuente: [27]

Principales características

- Desarrollado para servidores Linux/Unix, y posteriormente configurado para ser funcional con Windows y otros sistemas operativos.
- Es un servidor web gratuito.
- Debe ser ejecutado a través de una interfaz de usuario.
- Permite admitir varias secuencias de comandos y módulos para la web.

Requisitos mínimos de funcionamiento

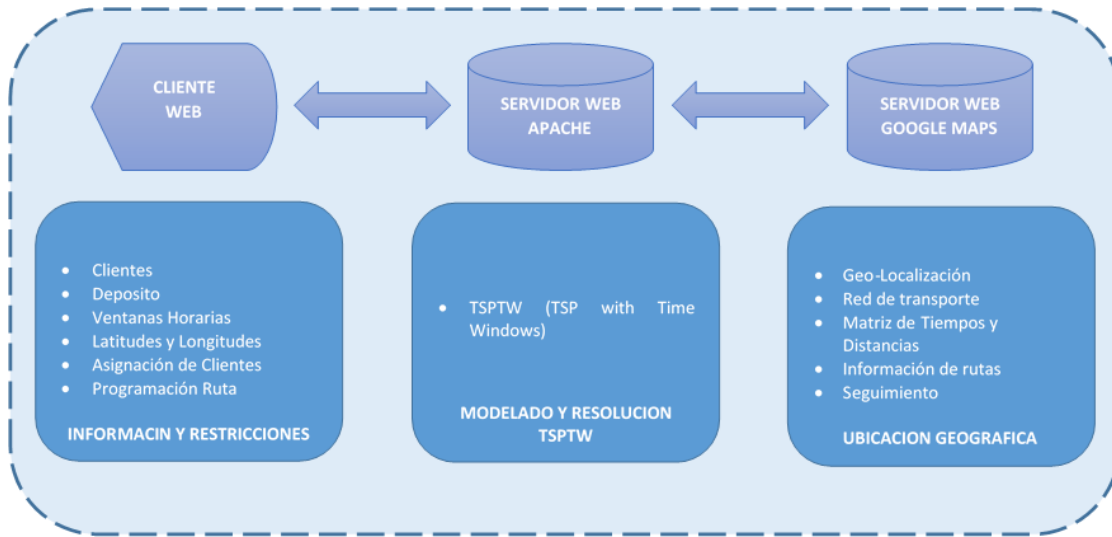
- Procesador: Pentium
- Memoria RAM: 64 MB
- Sistema Operativo: Microsoft Windows, GNU/Linux
- Tamaño de la instalación: 50 MB [31].

Ventajas

Entre las principales ventajas que se tomaron en cuenta para mantener el uso del servidor apache en la estructura del funcionamiento de la herramienta tenemos:

- Disponibilidad de código fuente
- Facilidad de acceso
- Mínima utilización de recursos
- Multiplataforma
- Extensible
- Modular
- Altamente configurable
- Destacado por su seguridad y rendimiento

Figura 18. Interacción entre componentes del software TSPTW



4.2.2 Herramientas computacionales

En el diseño de la **interfaz gráfica de usuario** se emplearon herramientas de asequible uso, que permitieron la creación de un entorno amigable, claro y sencillo en la práctica del desarrollo de la aplicación de ruteo vehicular, entre las herramientas utilizadas se encuentra el lenguaje de programación HTML, css3 y la herramienta JQuery. En el **almacenamiento de datos** se empleó el sistema de administración de base de datos relacionados MySQL. A continuación se encuentra la conceptualización, características y uso de las herramientas mencionadas anteriormente en el desarrollo de la aplicación.

El **lenguaje de programación** empleado fue PHP Es el acrónimo de Hipertexto Preprocesador, lenguaje para programar scripts, que se incrustan dentro del código HTML, su código fue usado gracias a características como, su código abierto, gratuito, multiplataforma, rápido, con una gran librería de funciones y documentación, compatibilidad con otras aplicaciones web, es esta la razón por el cual se empleó en el desarrollo de algoritmos que traducidos de lenguaje matemático a un lenguaje de programación permiten dar solución al TSPTW.

Interfaz gráfica de usuario

- **HTML:** Es el lenguaje de programación que se utiliza para el desarrollo de páginas web por internet y sus siglas en inglés (Hypertext Markup Language) traducen Lenguaje de Formato de Documentos para Hipertexto [32].

EL HTML se encarga de desarrollar una descripción sobre los contenidos que aparecen como textos y sobre su estructura, complementando dicho texto con diversos objetos (como fotografías, animaciones, etc.). El texto en él se crea a partir de etiquetas, también llamadas tags, que permiten interconectar diversos conceptos y formatos. Para la escritura de este lenguaje, se crean etiquetas que aparecen especificadas a través de corchetes o paréntesis angulares: < y >. Entre sus componentes, los elementos dan forma a la estructura esencial del lenguaje, ya que tienen dos propiedades (el contenido en sí mismo y sus atributos).

Por otra parte, cabe destacar que el HTML permite ciertos códigos que se conocen como scripts, los cuales brindan instrucciones específicas a los navegadores que se encargan de procesar el lenguaje. Entre los scripts que pueden agregarse, los más conocidos y utilizados son JavaScript y PHP.

- **Css3:** Es un lenguaje que se empleó para definir el estilo o la apariencia de las páginas web, escritas con HTML, y permite un mayor control en precisión sobre el aspecto de la misma, en otras palabras, el mismo sitio web puede variar totalmente de estética cambiando solo la CSS, sin tocar para nada los documentos HTML que lo componen.

Por último con CSS3 se tienen nuevos efectos que hacen que la parte visual de nuestra página sea de mayor agrado y aceptación, con sombras, transformaciones de figuras, creación sencilla de bordes y efectos 3D.

- **Jquery:** Es una herramienta considerado como un marco de desarrollo el cual contiene funcionalidades, librerías pre-desarrolladas, es decir es un conjunto de utilidades las cuales no necesariamente necesitan ser programadas y se pueden utilizar de una forma muy simplificada, con las cuales podremos lograr los mismos resultados, en menos tiempo sin necesidad de programar una funcionalidad completamente.

En el desarrollo de la interfaz gráfica de usuario el manejo de Jquery consiente agregar efectos y ciertas funcionalidades para el diseño de la ventana emergente que resulta tras agregar un nuevo cliente.

Almacenamiento de datos

- **MySQL:** Es un sistema de administración de base de datos relacionales, por lo tanto podríamos decir que es una aplicación que permite gestionar archivos llamados de bases de datos, empleando múltiples tablas para almacenar y organizar la información.[33]

MySQL fue escrito en C y C++ y destaca por su gran adaptación a diferentes entornos de desarrollo, permitiendo su interacción con los lenguajes de programación como PHP, Perl y Java y su integración en distintos sistemas operativos. [6]

Dentro de sus características de mayor envergadura podemos citar, que es un programa de libre aplicación, situación que nos permitió emplearlo en la administración de la información de los nodos (Clientes) como el respectivo nombre Comercial, dirección, teléfono, ubicación geográfica (Latitud – Longitud), horario de atención, y tiempo de servicio para la recolección, por otra parte permite almacenar y gestionar información relacionada con las distancias y tiempos de viaje que existe entra cada uno de los clientes.

4.2.3 Herramienta para el cálculo

4.2.3.1 Matriz de distancias

La matriz de distancias es considerada el corazón de este trabajo albergando la información correspondiente a las distancias entre los diferentes nodos que componen la matriz, y gracias a esta información es posible iterar estos datos y establecer cálculos a través de métodos que dan solución al TSPTW, como lo son las heurísticas y meta heurísticas, que expresados en algoritmos de programación permiten definir la funcionabilidad del programa.

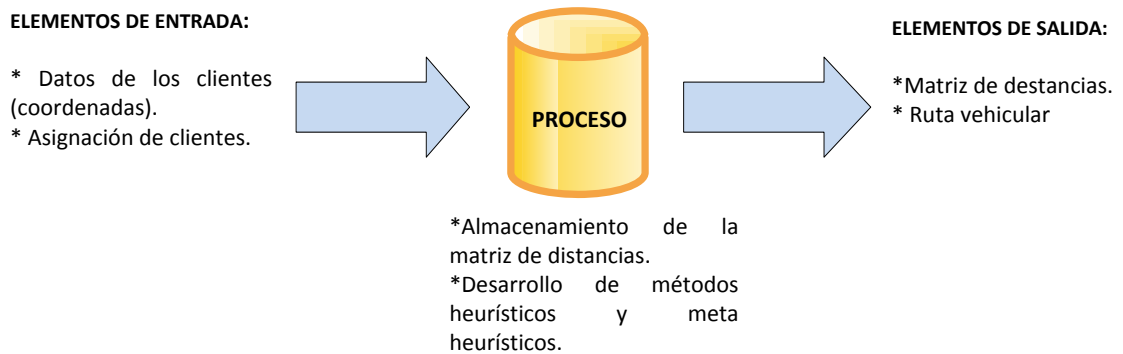
Como se mencionó con anterioridad el API de matriz de distancias de google es un servicio que proporciona el tiempo y la distancia de viaje para una matriz de orígenes y destinos. La información devuelta se basa en la ruta recomendada más corta entre los puntos de partida y llegada, de acuerdo a los cálculos del API de google Maps. Dicha información de la ruta deseada se obtiene transmitiendo el origen y el destino al **Api de Rutas**, es decir se envía una solicitud al Api de rutas con el fin de obtener una respuesta sobre la distancia que se desea conocer.

El proceso de solicitud de distancias, el formato de respuestas devueltas por el API de google maps, las ventajas de cada formato, los elementos raíz de la respuesta de la matriz de distancias y los códigos de estados se encuentran detallados en el ANEXO Y. *Generalidades de las solicitudes de la matriz de distancias.*

4.3 DESARROLLO DEL SOFTWARE TSPTW

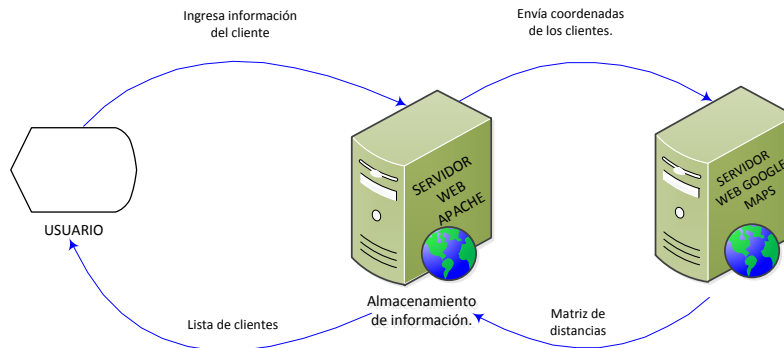
Para el desarrollo del programa se buscó obtener versatilidad y accesibilidad para que el usuario particularmente se encontrara en la posibilidad de utilizarlo en un entorno con un mínimo de recursos computacionales disponibles ver figura 19.

Figura 19. Diagrama entradas y salidas de la aplicación de rutas



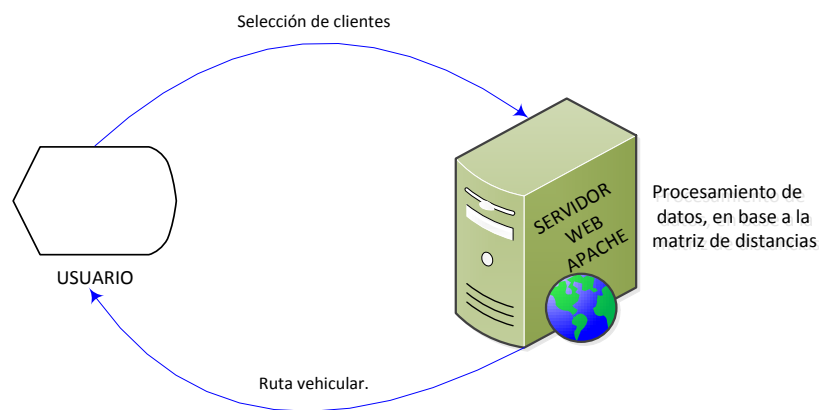
En la etapa de desarrollo se establecieron la interacción de 3 componentes en 2 fases, en la primera fase hay interacción entre **el cliente web** y **el servidor apache** registrando la información de cada cliente a través de la interfaz gráfica de usuario en la cual por medio de los parámetros de entrada de coordenadas longitud / latitud se establece la interacción entre el **servidor web apache** y el **servidor web de google maps**, interacción que se realiza mediante una solicitud de información relacionada con todas las distancias existentes entre cada uno de los nodos (Clientes) para obtener emparejamientos origen – destino, que es enviada al Api de matriz de distancias de google, almacenado datos de las respuestas, en una matriz a través de Mysql. Ver figura 20.

Figura 20. Diagrama de almacenamiento de datos



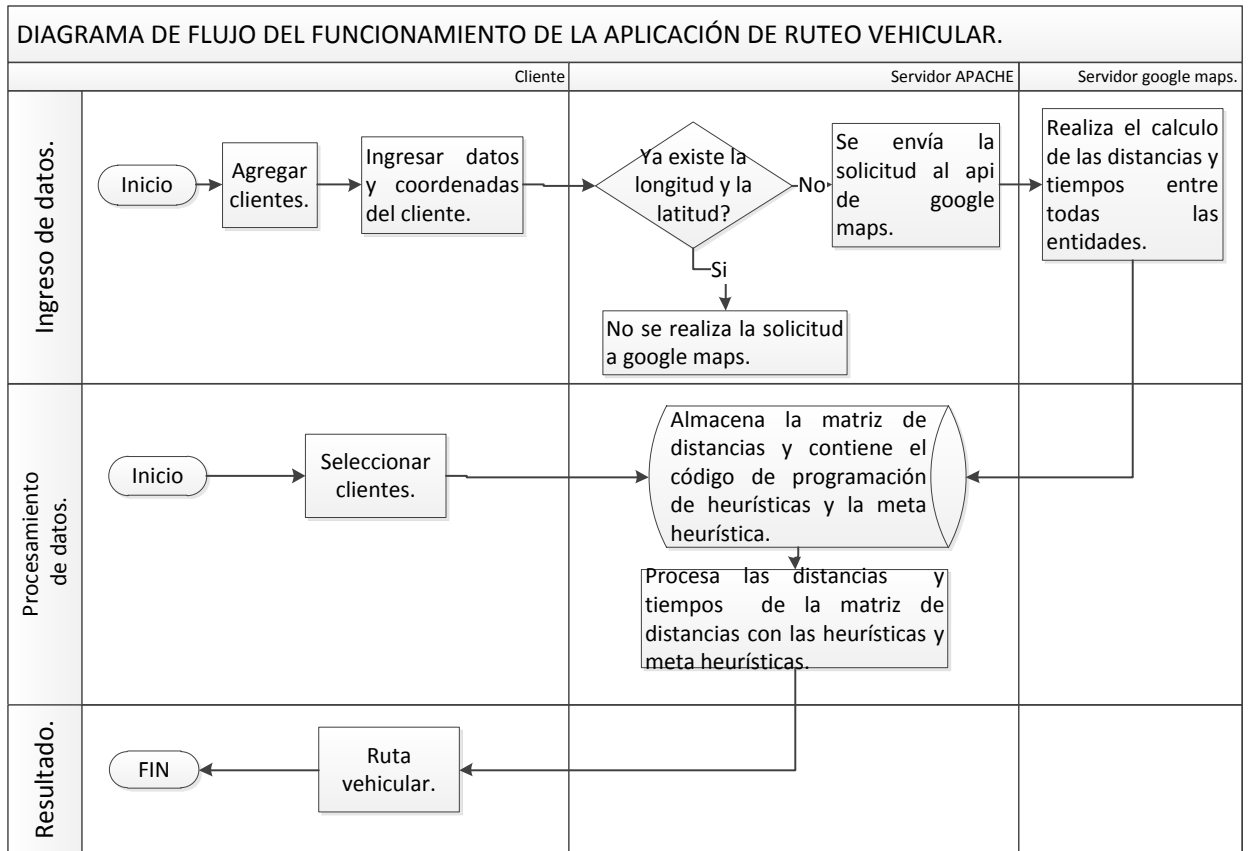
En la segunda fase se asignaron los clientes que conformarán una ruta de recolección específica como se ve en la figura 21 , a través del cliente web, y una vez seleccionados, se envía los datos relevantes al servidor web apache para que sean procesados mediante cálculos que se originan por medio de métodos matemáticos ya definidos con anterioridad, que dan solución al problema planteado, y que expresados en algoritmos computacionales, permiten conseguir una respuesta que en lo posible mejora en el transcurso del desarrollo de dichos métodos planteados.

Figura 21. Asignación de clientes a la ruta vehicular



Dentro del proceso de cálculo se tiene una estructura que permite comparar los resultados entre dos heurísticas de construcción (Vecino más cercano e inserción más barata), posteriormente el mejor resultado será tomado en cuenta para la ruta inicial empleada en 2 métodos heurísticos de mejora (2opt – 3opt) y consecutivamente a estos resultados se escoge la mejor alternativa como semilla en la ejecución de la meta heurística Búsqueda tabú. Al final se obtiene un resultado que de no ser el óptimo se estima que la respuesta sea muy cercana al mismo.

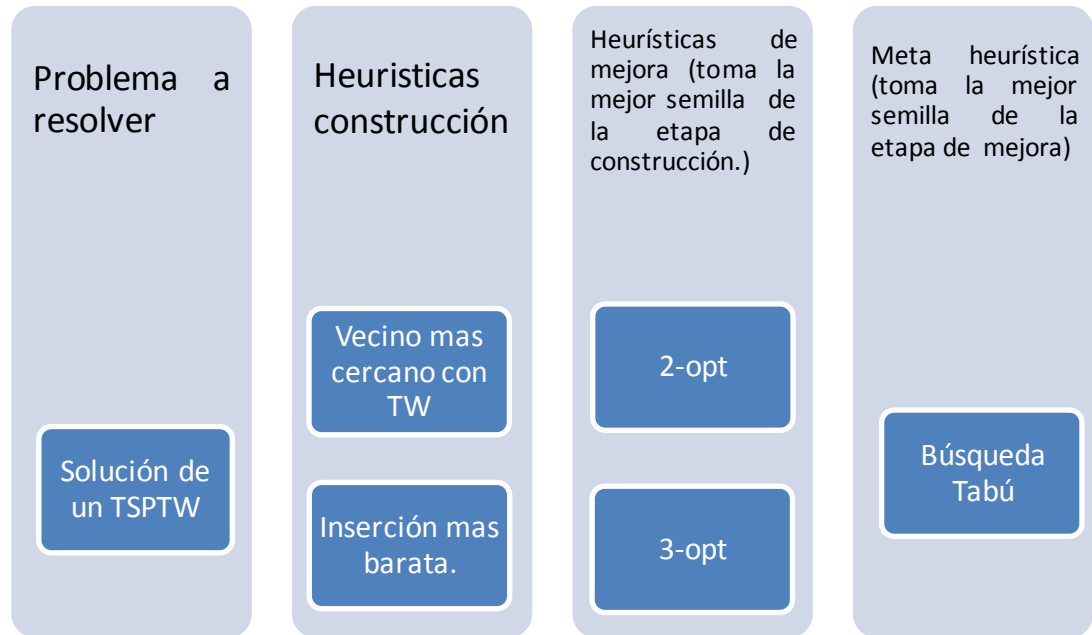
Figura 22. Diagrama de flujo del funcionamiento de la aplicación de ruteo vehicular



4.4 CONSTRUCCIÓN DE UNA RUTA DE RECOLECCIÓN EDEPSA SOLUCIONES AMBIENTALES.

En el ANEXO Z, se desarrollará una ruta de recolección de residuos peligrosos hospitalarios con ventanas de tiempo mediante la aplicación disponible en <http://www.ictsas.com/Mapas/index.php>, como se mencionó en la sección 4.3 el procesamiento de las heurísticas se llevará cabo como muestra en la figura 23

Figura 23. Proceso de construcción de una ruta mediante el aplicativo desarrollado



La selección de la semilla requerida se realiza comparando los costos la función:

$$c_{ij} = \delta_1 d_{ij} + \delta_2 T_{ij} + \delta_3 V_{ij} \quad (1.1)$$

Dónde:

- d_{ij} = Es la distancia que existe entre los clientes ij.
- T_{ij} = Es la diferencia de tiempo generada entre el fin del servicio del cliente i e inicio del servicio del cliente j, definida matemáticamente de la siguiente manera $T_{ij} = W_j - (W_i + s_i)$
- V_{ij} = Es denominada como la urgencia de atender al cliente, definida matemáticamente de la siguiente manera $V_{ij} = b_j - (W_j + s_i + t_{ij})$

El valor de los parámetros δ_1, δ_2 y δ_3 se definen de acuerdo al enfoque que se quiera dar al modelo como se definió en el capítulo dos, estos parámetros se editan antes de realizar el procesamiento del software. Finalmente la meta heurística Tabú es quien presenta la mejor solución, puesto que ha sido un proceso de mejora en la búsqueda de una buena solución al TSPTW.

5 IMPLEMENTACION

La implementación se llevó a cabo mediante dos fases, en la primera fase se definió la línea base¹¹ de la empresa Edepsa E.S.P, es decir aquel criterio asumido por el conductor para direccionar la visita a cada uno de los clientes, contrastando la información obtenida tras la ejecución de la ruta, con los resultados de la optimización que se aplicó para rutas de Bucaramanga del mes de octubre.

Con la primera fase se buscó medir en que porcentaje la aplicación del TSPTW podría arrojar mejores resultados sobre rutas ejecutadas con el objetivo de evaluar criterios y supuestos establecidos en la programación y cuantificar la mejora en que se incurre con la metodología propuesta.

En la segunda fase se implementó la herramienta TSPTW, tras encontrar resultados favorables en la primera fase, por tal motivo su uso se llevó a cabo mediante la programación del día a día para los clientes que fueron asignados a las rutas de Bucaramanga, actividades ejecutadas en los meses de noviembre y diciembre del año 2013, posteriormente los resultados se contrastaron para determinar la variación que se generó entre los datos optimizados y reales tras la implementación.

5.1 FASE 1

5.1.1. Definición de la línea base

Se define la línea base, en este caso, como la situación actual de la empresa con respecto al ruteo de vehículos, esto principalmente se puede ver en los siguientes aspectos: Tiempo de ruta, Distancia recorrida y nivel de servicio.

¹¹ La línea base se define como un conjunto de indicadores seleccionados para el seguimiento y la evaluación sistemática de políticas y programas.

Como se mencionó con anterioridad se desarrolló a modo de seguimiento de aquellas rutas que se ejecutaron objetivamente por la experiencia del conductor, obteniendo de tal forma los resultados de la tabla 14.

Tabla 14. Rutas de recolección ejecutada por el conductor mes octubre

FECHA	CPr / R	CA / R	CAT	TR (Hr)	DR (Km)	% Cump	% RO
02/10/2013	13	13	13	4,1	40,7	100%	100%
03/10/2013	16	16	15	7,6	79,7	100%	94%
05/10/2013	7	7	7	3,5	35,8	100%	100%
11/10/2013	12	11	11	4,5	29,8	92%	100%
12/10/2013	5	5	5	3,1	26,3	100%	100%
15/10/2013	11	11	10	4,5	42,7	100%	91%
16/10/2013	8	8	7	3,1	34,6	100%	88%
18/10/2013	18	17	17	4,9	51,9	94%	100%
19/10/2013	6	6	6	4,1	32,1	100%	100%
24/10/2013	10	10	10	3,6	36,0	100%	100%
26/10/2013	5	5	5	2,7	29,4	100%	100%
28/10/2013	6	6	5	3,7	28,9	100%	83%
31/10/2013	7	7	7	3,6	33,5	100%	100%
TOTAL	124	122	118	53,0	501,5	98%	97%

Donde:

- Las Fechas corresponden a cada uno de los días en los que se llevó a cabo cada una de las rutas en la ciudad de Bucaramanga.
- **CPr / R:** Número de Clientes programados por Ruta
- **CA / R:** Número de Clientes atendidos por Ruta
- **CAT:** Número de Clientes atendidos a Tiempo
- **TR:** Tiempo Real
- **DR:** Distancia Real
- **% Cump:** Porcentaje de Cumplimiento
- **% RO:** Porcentajes de Respuestas Oportunas

El tiempo real fue tomado según el formato de recolección empleado por los conductores en el cual se registran los tiempos (Hr) de llegada a cada uno de los nodos y la hora de finalización de la ruta. Por otra parte la distancia real (Km) fue tomada a partir del Kilometraje del vehículo registrado por el operario de acuerdo a la diferencia existente entre el final y el inicio del recorrido.

A partir de los datos recolectados para el mes de octubre del año 2013 se observa que para la ruta de Bucaramanga se programó un total de 124 clientes de los cuales fueron atendidos 122, respetando las ventanas horarios de 118 de ellos, es posible observar que el ruteo comprendido entre este lapso de tiempo varía entre 2,7 y 7,6 horas con un promedio de 4,1 horas / Ruta y de 26,3 a 79,7 Kilómetros para un promedio de 38,6 Kilómetros / Ruta.

5.1.2. Evaluación de criterios y supuestos

A continuación se enuncian los criterios y supuestos expuestos asumidos en la programación.

5.1.2.1 Ubicación del vehículo en cada recolección: Se establece que el conductor parquea el vehículo al frente de la entidad a la cual se le realizará el servicio, debido a motivos de movilidad en ocasiones el conductor debe parquear en un lugar estratégico que permita recogerles a todos los clientes del sector y retornar al vehículo, este suceso no es tenido en cuenta en el desarrollo de la programación.

5.1.2.2 Tiempo de almuerzo: El tiempo estipulado para el almuerzo es de 12pm a 13pm, y el lugar en el cual se almuerza es decisión del conductor, con el objetivo de establecer si una hora es suficiente para que el conductor se desplace a un lugar de su preferencia, almuerce y retorne al próximo punto de recolección

se evaluó este supuesto mediante los resultados obtenidos en octubre, arrojando un tiempo de almuerzo no superior a 60 minutos.

5.1.2.3 Congestión en la vía: Google maps contempla congestiones vehiculares, pero este criterio está sujeto a condiciones propias del desarrollo de la ruta, como es la ocurrencia de accidentes de tránsito, arreglos en la vía entre otras que representan un aumento en el tiempo de la ruta, esta posibilidad es asumida en la ejecución.

5.1.2.4 Tiempo de servicio: Se emplea $S_{i=5 \text{ min}}$ para pequeñas y medianas entidades y $S_{i=17 \text{ min}}$ para entidades con una recolección mayor a tres bolsas.

5.1.3. Resultados obtenidos con el modelo de optimización

En la obtención de los resultados se emplea el software con los criterios y supuestos, para el mes de octubre del 2013, con una función de costo que incluye la distancia, tiempo y la urgencia de atención con $\delta_1 = 0.5$, $\delta_2 = 0.45$, $\delta_3 = 0.05$ respectivamente, obtenido los resultados reflejados en la tabla 15.

Donde:

- CPr / R: Número de Clientes Programados por Ruta
- TO: Tiempo optimizado
- DO: Distancia optimizada
- %Cump: Porcentaje de Cumplimiento
- TC: Tiempo de Corrida

Tabla 15. Resultados de la ruta planeada mediante el mejor método de optimización desarrollado

Fecha	CPr / R	TO	DO (Km)	% Cump	TC
02/10/2013	13	3,8	33,8	100%	25
03/10/2013	16	6,6	58,0	100%	145
05/10/2013	7	3,0	28,9	100%	9
11/10/2013	12	4,1	28,9	100%	10
12/10/2013	5	2,5	23,7	100%	5
15/10/2013	11	3,2	23,8	100%	10
16/10/2013	8	2,8	29,2	100%	6
18/10/2013	18	4,8	42,9	100%	345
19/10/2013	6	2,6	27,5	100%	5
24/10/2013	10	3,0	31,8	100%	8
26/10/2013	5	2,3	22,2	100%	4
28/10/2013	6	3,4	24,3	100%	6
31/10/2013	7	2,5	25,8	100%	7
TOTAL	124	44,6	400,8	100%	45,0

Una vez obtenidos estos resultados se realizará un contraste de las dos situaciones para cuantificar las mejoras en las que se va a incurrir según las siguientes ecuaciones, los resultados se encuentran en la tabla 16.

$$\%MT = \frac{TR - TO}{TO} \quad (\text{Porcentaje de Mejora en Tiempo})$$

$$\%MD = \frac{DR - DO}{DO} \quad (\text{Porcentaje de Mejora en Distancia})$$

En vista de estas mejoras registradas se estima que en un escenario ideal empleando esta herramienta para el TSPTW se hubieran obtenido mejoras en la ejecución de la ruta en un 21,2 % para el tiempo de ruta y un 25.1 % para las distancias recorridas para el mes de octubre.

Tabla 16. Mejoras obtenidas al hacer uso del aplicativo

Fecha	TR – TO	DR - DO	% MT	% MD
02/10/2013	0.3	6.94	8.3%	20.5%
03/10/2013	1.0	21.71	15.7%	37.4%
05/10/2013	0.5	6.90	15.7%	23.9%
11/10/2013	0.4	0.90	9.8%	3.1%
12/10/2013	0.6	2.61	24.6%	11.0%
15/10/2013	1.3	18.94	42.2%	79.6%
16/10/2013	0.3	5.43	10.7%	18.6%
18/10/2013	0.1	9.05	2.0%	21.1%
19/10/2013	1.5	4.58	57.5%	16.7%
24/10/2013	0.6	4.16	21.2%	13.1%
26/10/2013	0.4	7.22	17.4%	32.5%
28/10/2013	0.3	4.56	7.6%	18.8%
31/10/2013	1.1	7.72	42.4%	29.9%
PROMEDIO	0.6	7.7	21.2%	25.1%

5.2 FASE 2

En esta etapa se realizó la replicación del modelo con el fin de analizar el comportamiento de los resultados computaciones le obtenidos por el software , y posteriormente se solicitó la colaboración del auxiliar logístico de la empresa quien tras seleccionar a los clientes, utilizaba la aplicación del TSPTW programando las rutas de recolección correspondientes, para los meses de Noviembre y Diciembre del 2013 y posteriormente daba seguimiento para dejar por sentadas las observaciones de aquellos eventos que no permitieron alcanzar el comportamiento ideal de la optimización.

5.2.1 Experimentación y replicación

Con el objetivo de realizar la replicación se probaron los siguientes escenarios:

Escenario 1: Un intervalo de tiempo (8:00-5:00 pm), con un costo asociado en función de la distancia recorrida, el tiempo y la urgencia de atención con $\delta_1 = 1$, $\delta_2 = 0$, $\delta_3 = 0$ respectivamente, para 10, 20, 30,40 y 50 clientes como se ve en la tabla 17.

Tabla 17. Escenario 1

INSTANCIAS	ESCENARIO 1: Un intervalo de tiempo					
	8:00-5:00 pm , Si $\langle > 0$					
	Costo					RUTA FINAL
	Vecino más cercano	Inserción	2-opt	3-opt	Búsqueda tabú	
10	31.30	34.12	30.04	31.30	29.60	0 10 7 8 6 2 1 5 4 3 9 11 0
20	53.54	1000.00	45.37	47.26	42.30	0 13 19 7 18 10 12 16 14 8 6 2 1 20 5 17 9 4 3 15 11 21 0
30	55.34	73.90	44.13	42.63	40.97	0 16 13 30 12 25 26 10 18 7 29 27 19 23 21 20 5 17 28 6 2 24 8 22 1 9 4 3 15 11 31 0
40	64.63	104.90	55.38	57.86	55.38	0 30 25 10 18 38 35 19 26 23 21 39 31 20 32 5 17 28 1 24 8 22 11 15 4 3 37 9 6 2 36 16 12 27 7 29 13 33 34 14 40 41 0
50	61.36	1000.00	61.36	61.36	56.55	0 30 25 48 10 18 38 35 19 26 44 27 42 43 7 29 20 45 21 31 39 32 47 5 17 28 1 24 8 22 23 2 6 46 41 9 37 4 3 15 16 12 49 13 33 34 14 36 40 11 50 0

Escenario 2: Dos franjas de tiempo (8:00-11:00) y (13:00-17:00) con un costo asociado en función de la distancia recorrida, el tiempo y la urgencia de atención con $\delta_1 = 0.45$, $\delta_2 = 0.45$, $\delta_3 = 1$ respectivamente, para 10, 20, 30,40 y 50 clientes como se ve en la tabla 18.

Escenario 3: Con ventanas de tiempo para cada cliente, con un costo asociado en función de la distancia recorrida, el tiempo y la urgencia de atención con $\delta_1 = 0.45$, $\delta_2 = 0.45$, $\delta_3 = 1$ respectivamente, para 10, 20, 30,40 y 50 clientes, los tiempos de servicio propios de la entidad, como se ve en la tabla 19

Tabla 18. Escenario 2

INSTANCIAS	ESCENARIO 2: Dos franjas de tiempo					
	(8:00-11:00) y (13:00-17:00) , Si ≤ 0					
	Costo					RUTA FINAL
	Vecino más cercano	Inserción	2-opt	3-opt	Búsqueda tabú	
10	210.39	188.74	172.52	173.00	172.51	0 12 4 7 2 3 1 5 8 6 9 11 0
20	341.76	1000.00	328.62	329.72	328.62	0 12 16 19 7 18 10 20 5 17 9 2 8 6 1 4 3 15 13 11 21 0
30	494.04	501.23	438.99	449.41	438.99	0 30 13 16 11 9 4 10 26 23 21 1 24 8 22 2 6 28 17 5 3 7 15 19 12 25 14 27 18 29 20 31 0
40	540.26	1000.00	478.42	481.70	481.70	0 30 12 25 40 36 11 16 13 26 10 23 21 39 31 20 29 35 18 38 7 15 14 33 34 27 19 1 32 5 17 28 22 6 2 24 8 9 37 3 4 41 0
50	556.39	1000.00	538.74	536.62	536.62	0 30 12 25 48 26 10 23 21 31 20 39 45 47 5 17 28 41 6 2 24 13 49 8 22 36 40 46 50 11 16 14 19 7 43 29 44 27 42 18 38 35 1 51 0

Tabla 19. Escenario 3

INSTANCIAS	ESCENARIO 3: Con TW para cada cliente					
	Con TW para cada cliente , Si ≤ 0					
	Costo					RUTA FINAL
	Vecino más cercano	Inserción	2-opt	3-opt	Búsqueda tabú	
10	246.19	257.85	207.17	209.00	207.17	0 2 7 4 10 8 3 5 6 1 9 11 0
20	402.82	432.57	312.97	306.18	306.18	0 13 10 19 16 14 18 7 20 5 17 9 6 1 2 8 3 4 15 11 12 21 0
30	543.03	1000.00	384.82	368.68	368.67	0 1 24 13 30 19 10 27 23 21 8 22 2 6 28 17 5 3 4 9 15 25 14 11 26 7 29 18 20 16 12 31 0
40	518.56	1000.00	459.48	458.83	458.83	0 13 37 25 40 3 4 9 28 17 5 32 27 19 10 23 21 39 31 20 29 18 38 35 14 33 7 26 36 11 16 30 12 22 24 8 2 6 1 41 0
50	576.64	1000.00	515.69	506.00	506.00	0 40 11 13 37 41 6 3 4 9 2 24 8 22 46 50 36 30 27 42 35 18 38 7 43 10 23 21 39 26 25 45 31 20 47 5 17 28 1 32 29 44 19 51 0

Escenario 4: Sin ventanas de tiempo: con un costo asociado en función de la distancia recorrida, el tiempo y la urgencia de atención con $\delta_1 = 1$, $\delta_2 = 0$, $\delta_3 = 0$ respectivamente, para 10, 20, 30,40 y 50 clientes, como se ve en la tabla 20.

Tabla 20. Escenario 4

INSTANCIAS	ESCENARIO 4: Sin TW					
	Sin TW , Si <> 0					
	Costo					RUTA FINAL
	Vecino más cercano	Inserción	2-opt	3-opt	Búsqueda tabú	
10	31.30	41.95	30.04	31.30	30.03	0 10 7 1 8 2 6 5 4 3 9 11 0
20	53.54	61.88	45.37	47.53	42.30	0 13 19 7 18 10 12 16 14 8 6 2 1 20 5 17 9 4 3 15 11 21 0
30	55.34	69.85	44.13	42.63	40.97	0 16 13 30 12 25 26 10 18 7 29 27 19 23 21 20 5 17 28 6 2 24 8 22 1 9 4 3 15 11 31 0
40	64.63	1000.00	64.63	64.63	64.63	0 30 25 10 18 38 35 19 26 23 21 39 31 20 32 5 17 28 1 24 8 22 2 6 9 37 3 4 15 11 40 36 16 12 27 7 29 13 33 34 14 41 0
50	51.21	1000.00	45.60	49.51	45.60	0 30 25 48 10 18 38 35 19 26 44 27 42 43 7 29 20 45 21 31 39 32 47 5 17 28 1 24 8 50 15 4 3 37 9 41 6 46 2 22 23 36 11 16 12 49 13 40 51 0

Existe otro escenario que consiste en ejecutar el software en computadoras de diferente IP y computadoras de igual IP, dicho escenario no se aplicó debido a que la aplicación funciona mediante un servidor como se explicó en la sección 4.3, por tal motivo siempre se estará ejecutando los modelos con la misma IP y con la misma referencia del computador, adicionalmente se realizó la validación del software en el ANEXO AA mediante la realización de un caso del TSPTW

5.2.2 Programación de rutas con el modelo de optimización

Se realizó la implementación del algoritmo que arrojó la mejor solución, para el periodo comprendido entre el mes de noviembre y diciembre en los días que la empresa estipuló ruta para la meseta de Bucaramanga con atención a más de 4 clientes, los resultados programados por la aplicación se ven reflejados en la siguiente tabla 21 con un 100% de cumplimiento tanto en la realización del servicio como en las ventanas de tiempo.

Tabla 21. Ruta programada por el modelo de optimización noviembre- diciembre.

Fecha	CPr / R	CE	TO	DO	TI	TC
01/11/2013	16	0	4.43	59.50	338	420
02/11/2013	7	0	2.70	27.60	457	6
05/11/2013	5	0	2.30	27.40	448	5
06/11/2013	8	0	2.70	37.30	421	7
09/11/2013	9	0	2.73	29.60	437	7
12/11/2013	9	0	4.80	32.90	291	8
13/11/2013	13	0	3.70	42.00	354	12
14/11/2013	13	0	4.20	41.50	379	35
15/11/2013	12	0	3.40	41.40	413	14
16/11/2013	8	0	7.00	30.10	112	5
18/11/2013	7	0	4.50	32.10	438	4
19/11/2013	17	0	7.30	101.00	226	14
20/11/2013	6	0	4.50	31.10	441	4
21/11/2013	9	0	8.50	42.10	401	8
22/11/2013	19	0	4.50	110.80	342	13
25/11/2013	6	0	2.30	28.70	414	4
27/11/2013	9	0	4.20	41.60	399	5
28/11/2013	12	0	3.60	34.10	383	13
29/11/2013	11	0	3.40	37.30	384	15
30/11/2013	9	0	3.30	33.60	422	11
04/12/2013	14	0	5.00	51.00	362	13
05/12/2013	8	0	2.40	32.50	464	5
06/12/2013	19	0	7.30	48.70	334	200
07/12/2013	6	0	2.80	31.10	417	3
10/12/2013	11	0	6.25	37.50	400	8
11/12/2013	7	0	3.30	30.50	446	6
12/12/2013	12	0	3.80	60.80	385	28
16/12/2013	14	0	4.65	53.10	341	43
17/12/2013	16	0	7.80	47.70	337	3
18/12/2013	7	0	7.25	48.70	427	4
19/12/2013	9	0	4.10	56.90	392	5
20/12/2013	13	0	4.00	39.50	374	40
21/12/2013	5	0	2.46	29.00	454	3
24/12/2013	10	0	3.50	36.7	397	8
30/12/2013	21	0	7.75	56.4	166	379
31/12/2013	7	0	2.5	39.7	444	5

Donde:

- **TI:** Tiempo ocioso o inactivo
- Los demás términos se define igual que en las tablas anteriores
- **CE:** Tiempos excluidos

5.2.3 Implementación de la ruta programada

La ejecución de la ruta la llevó a cabo el conductor quien realizó las recolecciones basados en la programación obtenida del método de optimización, además diligenció la información concerniente a las horas en la cuales se realizaba, los resultados de la implementación del algoritmo se encuentran en la tabla 22.

De acuerdo a la tabla se tiene que:

- N CA: Clientes atendidos
- N CAT: Clientes atendidos a tiempo.
- % Cum: Cumplimiento
- % RO: Respuestas oportunas
- TR: Tiempo real
- DR: Distancia real
- Los demás términos se define igual que en las tablas anteriores

5.2.3.1 Elementos exógenos a la ruta de recolección

Dentro de la implementación se presentaron situaciones fortuitas registradas por el conductor que ocasionaron una alteración en la ruta planeada, causando un retraso/disminución en el tiempo de ruta o un cambio en la secuencia de los nodos a visitar, estas situaciones se registran en la tabla 23.

Tabla 22. Resultados obtenidos de la implementación del modelo de optimización

Fecha	CPr / R	N. CA	N CAT	% Cump	% RO	TR	DR
01/11/2013	16	16	16.00	100%	100%	5.00	64.86
02/11/2013	7	7	7.00	100%	100%	2.60	29.53
05/11/2013	5	5	5.00	100%	100%	2.80	29.04
06/11/2013	8	8	8.00	100%	100%	3.20	44.51
09/11/2013	9	9	9.00	100%	100%	2.60	31.38
12/11/2013	9	9	9.00	100%	100%	4.30	35.91
13/11/2013	13	13	13.00	100%	100%	4.10	45.13
14/11/2013	13	13	13.00	100%	100%	4.60	43.99
15/11/2013	12	12	12.00	100%	100%	3.65	44.30
16/11/2013	8	7	7.00	88%	100%	6.90	38.40
18/11/2013	7	7	7.00	100%	100%	4.00	34.99
19/11/2013	17	17	17.00	100%	100%	7.63	108.07
20/11/2013	6	6	6.00	100%	100%	4.12	32.86
21/11/2013	9	9	9.00	100%	100%	7.50	42.23
22/11/2013	19	18	18.00	95%	100%	5.00	118.56
25/11/2013	6	6	6.00	100%	100%	3.00	31.28
27/11/2013	9	8	8.00	89%	100%	4.60	44.10
28/11/2013	12	12	12.00	100%	100%	4.00	40.39
29/11/2013	11	11	11.00	100%	100%	3.60	40.66
30/11/2013	9	9	9.00	100%	100%	2.80	35.95
04/12/2013	14	14	14.00	100%	100%	4.50	53.55
05/12/2013	8	8	8.00	100%	100%	2.70	35.43
06/12/2013	19	18	18.00	95%	100%	7.00	51.84
07/12/2013	6	7	7.00	117%	100%	3.30	42.63
10/12/2013	11	11	11.00	100%	100%	5.75	40.88
11/12/2013	7	7	7.00	100%	100%	3.46	32.64
12/12/2013	12	12	11.00	100%	92%	4.50	65.06
16/12/2013	14	14	14.00	100%	100%	4.40	56.18
17/12/2013	16	16	15.00	100%	94%	8.00	50.09
18/12/2013	7	7	5.00	100%	71%	6.50	52.11
19/12/2013	9	9	9.00	100%	100%	4.50	58.71
20/12/2013	13	13	13.00	100%	100%	4.50	42.88
21/12/2013	5	6	6.00	120%	100%	3.13	40.49
24/12/2013	10	9	9.00	90%	100%	3.10	38.90
30/12/2013	21	18	18	86%	100%	7.00	60.35
31/12/2013	7	7	7	100%	100%	3.30	45.68

Adicionalmente como resultado de elementos exógenos a la planeación, se presentan alteraciones en la programación de la ruta sugerida como lo son:

- ✓ La empresa realizó un cambio de secuencia a la ruta, puesto que considero elementos que no se miden en la función objetivo del algoritmo como lo es el porcentaje de ocupación del conductor.
- ✓ Ampliación en la ventana de tiempo de un cliente con el objetivo de realizar la visita en un horario anteriormente no permitido.

Tabla 23. Situaciones fortuitas presentes en el ruteo vehicular

Situación fortuita	IMPACTO	
	Tiempo de ruta	Cambio de secuencia
Retorno a nodo (Cliente) por incumplimiento de ventana horaria por parte del cliente.	✓	✓
Espera en un nodo con ventanas de tiempo disponibles.	✓	x
Tiempo de servicio menor por la no generación de residuos peligrosos.	✓	x
Tiempo de servicio menor por no prestar el servicio (entidad cerrada).	✓	x
Inserción de un nodo no programado con urgencia de recolección.	✓	✓
Cambio de recorrido por cierre de la vía o tráfico	✓	✓
Cambio de recorrido por mantenimiento a vehículo	✓	✓

Fuente: Información obtenida por el conductor del vehículo

5.2.3.2 Análisis de los resultados obtenidos por la implementación del modelo de optimización.

En la ejecución de las rutas programadas mediante el modelo de optimización se presentaron dos casos: en el primer caso la empresa aplicó las rutas según las

indicaciones dadas, en el segundo caso la empresa no siguió la programación completamente por los motivos que se encuentran en la tabla 23.

El objetivo del análisis consiste en establecer en que porcentaje realmente mejoran los resultados obtenidos tras la implementación, por tanto se analiza el 83.3% de los datos que corresponden a las rutas que se aplicaron según el modelo de optimización.

Es posible citar que el ruteo realizado entre este intervalo de tiempo vario según su comportamiento entre 2,6 y 8 horas con un promedio de 4,66 horas / Ruta y de 29,2 a 118.56 Kilómetros para un promedio de 48.38 Kilómetros / Ruta. Y con un porcentaje de cumplimiento que obedece a un 98%.

En la tabla 25 se da a conocer el porcentaje de las mejoras respecto al tiempo empleado y a la distancia recorrida, se muestra la columna programada y ejecutada donde “si” significa que la ejecución se realizó según la programación y “no” en caso contrario, y la columna diferencia del numeral donde “-” significa que $TR - TO$ es negativo debido a que se obtuvieron mejores resultados de los esperados y “+” en caso contrario para las rutas ejecutadas en el mes de noviembre y diciembre.

De acuerdo a los datos ofrecidos por la tabla 24, se tiene que la variación entre la programación del modelo propuesto y su implementación en cuanto al tiempo es del 10% en promedio y del 8% en cuanto a la distancia recorrida en kilómetros. De los casos en los cuales la ejecución de la ruta se llevó según las indicaciones del algoritmo de optimización, para el 46.67% el tiempo optimizado es mayor que el real, esta situación se presentó debido a las razones que se enlistan a continuación:

Tabla 24. Variación optimización vs implementación

Fecha	$ TR - TO $	DR - DO	% MT	% MD	Programada y ejecutada	Diferencia del numeral $TR - TO$
01/11/2013	0.57	5.36	12.9%	9.0%	Si	+
02/11/2013	0.10	1.93	3.7%	7.0%	Si	-
05/11/2013	0.50	1.64	21.7%	6.0%	Si	+
06/11/2013	0.50	7.21	18.5%	19.3%	No	+
09/11/2013	0.13	1.78	4.8%	6.0%	Si	-
12/11/2013	0.50	3.01	10.4%	9.1%	No	-
13/11/2013	0.40	3.13	10.8%	7.5%	Si	+
14/11/2013	0.40	2.49	9.5%	6.0%	Si	+
15/11/2013	0.25	2.90	7.4%	7.0%	Si	+
16/11/2013	0.10	8.30	1.4%	27.6%	Si	-
18/11/2013	0.50	2.89	11.1%	9.0%	Si	-
19/11/2013	0.33	7.07	4.5%	7.0%	Si	+
20/11/2013	0.38	1.76	8.4%	5.7%	Si	-
21/11/2013	1.00	0.13	11.8%	0.3%	Si	-
22/11/2013	0.50	7.76	11.1%	7.0%	Si	+
25/11/2013	0.70	2.58	30.4%	9.0%	Si	+
27/11/2013	0.40	2.50	9.5%	6.0%	Si	+
28/11/2013	0.40	6.29	11.1%	18.4%	Si	+
29/11/2013	0.20	3.36	5.9%	9.0%	Si	+
30/11/2013	0.50	2.35	15.2%	7.0%	Si	-
04/12/2013	0.50	2.55	10.0%	5.0%	Si	-
05/12/2013	0.30	2.93	12.5%	9.0%	Si	+
06/12/2013	0.30	3.14	4.1%	6.4%	Si	-
07/12/2013	0.50	11.53	17.9%	37.1%	No	+
10/12/2013	0.50	3.38	8.0%	9.0%	Si	-
11/12/2013	0.16	2.14	4.8%	7.0%	Si	+
12/12/2013	0.30	4.26	7.9%	7.0%	Si	+
16/12/2013	0.25	3.08	5.4%	5.8%	Si	-
17/12/2013	0.20	2.39	2.6%	5.0%	Si	+
18/12/2013	0.75	3.41	10.3%	7.0%	Si	-
19/12/2013	0.40	1.81	9.8%	3.2%	Si	+
20/12/2013	0.50	3.38	12.5%	8.5%	No	+
21/12/2013	0.67	11.49	27.2%	39.6%	No	+
24/12/2013	0.40	2.20	11.4%	6.0%	Si	-
30/12/2013	0.75	3.95	9.7%	7.0%	Si	-
31/12/2013	0.80	5.98	32.0%	15.1%	No	+
PROMEDIO	0.43	3.95	9.6%	7.7%		

- ✓ En el 40 % de los casos, el S_i es inferior a la media debido a que la entidad no generó residuos peligrosos, o no se realizó la recolección a causa de que el cliente no se encontraba generando un tiempo de servicio menor.
- ✓ En el 19% de los casos, no se presentó congestión en la vía.
- ✓ En el 16% de los casos la entidad abrió más temprano que lo establecido.
- ✓ En el 26% de los casos no se registraron observaciones.

De los casos en los cuales la ejecución de la ruta se llevó a cabo según las indicaciones del algoritmo de optimización, el 53.3% de estos, el tiempo real fue mayor que el tiempo estimado situación que se presentó debido a:

- ✓ En el 28 % de los casos el conductor tomo una pausa activa.
- ✓ En el 23.6 % de los casos el tiempo de espera en la entidad fue mayor, debió a la ausencia del encargado o a que la entidad se encontraba cerrada en el momento.
- ✓ En el 15.4% de los casos, el tiempo de servicio fue superior a los 5 minutos calculados.
- ✓ En el 12 % de los casos, se presentó más congestión en la vía que lo esperado.
- ✓ En el 21% de los casos no se presentaron observaciones.

En cuanto a la distancia recorrida por el vehículo en el 100% de los casos la distancia real fue mayor que la estimada situación presentada sin presentarse observaciones al respecto.

Al realizar este análisis en cuanto tiempo y distancia se permite identificar los factores que están ocasionando variaciones en el modelo y ajustar los parámetros de forma adecuada.

6. CONCLUSIONES

- Se adquirió y documentó la información relacionada con la recolección de residuos peligrosos Hospitalarios para los clientes del área de Bucaramanga de la empresa Edepsa S.A. tomando como información de mayor relevancia las coordenadas geográficas y las ventanas horarias de cada uno de los nodos del sistema.
- La matriz de distancias considerada como el motor de esta aplicación, se obtuvo generando un algoritmo computacional que permite capturar la información relacionada con las distancias existentes entre cada uno de los clientes a partir de coordenadas geográficas insertadas en la plataforma de google maps.
- En la bibliografía se exploraron documentos científicos relacionados con problemas de ruteo vehicular, específicamente sobre el problema del agente viajero con ventanas de tiempo, encontrando varios autores entre los cuales se hace mención a David L. Applegate, Robert E. Bixby, Vasek Chvatal y William J. Cook que a través de su libro “The traveling Salesman Problem: A Computacional Study” enfocando su trabajo en dar respuesta al TSP a partir de un punto de vista computacional desarrollando nuevas técnicas en respuesta a posibles cambios para instancias de gran tamaño.
- El problema de ruteo vehicular de Edepsa se abordó principalmente estudiando los elementos y restricciones que contiene el proceso de recolección de respel para definir el modelo de ruteo vehicular y dar paso al estudio de las características de cada uno de sus clientes que se consideran como demanda

definida generando rutas estocásticas a partir de la frecuencia y disponibilidad del servicio.

- Tras la implementación es posible afirmar que al comparar los resultados entre las 2 heurísticas de construcción, el vecino más cercano aportó una mejor respuesta con un 8% de mejora en la mayoría de los casos frente al método de aproximación de la inserción más barata. Posteriormente se utilizó la mejor solución como semilla en la aplicación de 2 heurísticas de mejora de las cuales la heurística 2-opt obtuvo un mejor resultado con un 4% frente al método 3-opt.
- Se infiere la obtención de un resultado final satisfactorio con un porcentaje de mejora de 5% para una instancia de 10 clientes y un 8 % para 50 clientes, utilizando la meta heurística tabú frente a la mejor solución dada por las heurísticas de construcción, tras emplear una estrategia que permitiera comparar soluciones entre dos heurísticas de construcción (El vecino más cercano y la inserción más barata), escoger la mejor respuesta e insertarla como semilla en 2 heurísticas de mejora (2-opt y 3 opt) y tomar la mejor respuesta como semilla en la meta heurística búsqueda tabú, con el fin de obtener un resultado que de no ser el óptimo se encontrara muy aproximado al mismo.
- La herramienta desarrollada para dar solución a problemas del tipo TSPTW arrojó resultados significativos para la fase I (contraste entre una situación real y una simulada), resultados de un 21.2 % para mejorar el tiempo de Ejecución en ruta y un 25.1 % de mejora en el recorrido, situación que permitió poner en marcha la implementación del modelo a partir del mes de Noviembre del 2013.
- El software de ruteo vehicular permite arrojar resultados que se aproximan al comportamiento de las actividades de la empresa en condiciones normales,

con una interfaz clara y amigable para el usuario como se vio en el ANEXO X, de esta forma cualquier persona con conocimientos básicos en computaciones se encuentra en la posibilidad de disponer de esta herramienta para mejorar el desempeño de la ruta de transporte.

7. RECOMENDACIONES

- Al analizar los datos obtenidos tras el proceso de implementación se encontraron diferencias entre la ruta programada mediante el método de optimización y su ejecución, el 46.67% de las variaciones en cuanto al tiempo corresponde a los casos en los cuales el valor optimizado es mayor que el real y el 53.3 % restante el tiempo optimizado es menor que el real, estas variaciones deben ser cuantificadas con el fin de ajustar los parámetros del modelo de forma adecuada.
- El problema se puede robustecer involucrando demanda estocástica, capacidad limitada del vehículo y compartimentos para separar productos.
- Modificar el software, con la idea que este tome en cuenta la hora en que se ejecuta la aplicación, con el fin de hacer el software ajustable a las horas de trabajo disponible y por ende a la situación real.
- El tiempo ocioso de la ruta en promedio es de 378 minutos, se sigue realizando una planeación estratégica que permita incluir diariamente un promedio de 30 clientes a la ruta, además de crear e integrar una programación de suministros a la ruta de recolección, de esta forma propiciar el uso eficiente del recurso.

- El proyecto se desarrolló enfocado a la atención de clientes en la ciudad de Bucaramanga, teniendo en cuenta que la matriz de distancias y tiempos es extraída de google maps y este presenta el mapa cartográfico de Bucaramanga, su área metropolitana entre otros, se presenta la oportunidad de ampliar esta forma de programación hacia los clientes hospitalarios de Edepsa en el área metropolitana de Bucaramanga.
- Emplear el software creado en problemas de ruteo en empresas enfocadas a la distribución, con el fin de establecer la funcionalidad del mismo en otros campos de la industria que se ajusten al problema del agente viajero con ventanas de tiempo.
- La herramienta se encuentra disponible en la web, y gracias a la facilidad para acceder a esta posibilita la aplicación de la misma en empresas que no posean un robusto inventario de computadores.

REFERENCIAS

- [1] Rogers & Tibben Lembke, (1998), Going backwards: Reverse logistics trends and practices, Reno, Nevada University, Reverse Logistics Executive Council, cp 1.
- [2] Dirección de tránsito de Bucaramanga, disponible en http://transitobucaramanga.gov.co/wpcontent/uploads/2013/02/RESOL2012/Resolucion_5752012.pdf consultado el 12/08/2013.
- [3] Página de google maps, Disponible en: <https://developers.google.com/maps/documentation/javascript/?hl=es> recuperado el 2/01/2013.
- [4] API de Java Script, información Disponible en <https://developers.google.com/maps/faq?hl=es> consultado el 2/01/2014.
- [5] Interfaz gráfica del usuario, disponible en la página: <http://www.hipertexto.info/documentos/html.htm> recuperado el 04/01/2014.
- [6] PEREZ, Alejandro, Desarrollo de herramienta web de gestión docente 2007 Pág 13. (Proyecto de grado) Escuela técnica superior de ingeniería de telecomunicación Universidad politécnica de Cartagena.
- [7] LOZADA DÍAZ, Adriana; CADENA, Ricardo Andrés, solución del problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo (VRPTW) mediante métodos heurísticos. Bucaramanga, Colombia. Recuperado el día 11 de Diciembre 2012 disponible en

http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/pags/cat/popup/pa_detalle_matbib.jsp?parametros=161274|%20|1|4

[8] GARCÍA, Francisco (2010) Desarrollo metodológico para la determinación de caminos mínimos en redes de tránsito y en tiempo real utilizando técnicas de aprendizaje computacional. Tesis de doctorado en ingeniería no publicada. Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia. Recuperado el día 10 de Noviembre 2012 de <http://www.bdigital.unal.edu.co/3525/1/franciscojaviergarciaorozco.2011.pdf>

[9] LEÓN MORENO Francisco (2008) planeación de rutas de distribución utilizando el algoritmo heurístico 2-optima, Artículo de planeación de rutas de distribución volumen 3. Universidad de Sonora, México. Recuperado el día 15 de octubre 2012 de la página de la universidad en el siguiente link <http://www.invurnus.uson.mx/revistas/articulos/1-I047AP%20Planeaci%C3%B3n%20de%20Rutas%20de%20Distribuci%C3%B3n.pdf>

[10] GOMEZ, David; RANGEL, Carlos, Formular las meta heurísticas búsqueda tabú y recocido simulado para la solución del CVRP (capacitated vehicle routing problem), Universidad Industrial Santander de, Bucaramanga, 2011.

[11] GALVIS, Jessica; JAIMES, Andrea; QUIROGA, Nataly estudio cuantitativo de tres aplicaciones diferentes del problema de ruteo de vehículos (VRP) en la universidad industrial de Santander, Bucaramanga, 2011

[12] TOLOSA José, colonia de hormigas fundamentación teórica y aplicaciones en la optimización de sistemas logísticos de ruteo con intervalos de recepción y tiempo de atención máximo, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2005

[13] Revista de la logística.com disponible en <http://www.revistadelogistica.com/La-logistica-reversa-o-inversa.asp> recuperado el 17/12/2013.

[14] Guía para la generación integral de Residuos Peligrosos. Fundamentos. Tomo I (p.16)

[15] TAHA, Handy A. Programación lineal entera. Investigación de operaciones: Novena edición. México: Person Educación México, 2012. 315 p.

[16] ZANCHEZ GARCIA, Miguel. Optimización Combinatoria. En: Optimización.PDF. 115 pág. [Consultado 11 de nov 2013] Disponible en <<http://www.sinewton.org/numeros/numeros/43-44/Articulo22.pdf>>

[17] CONTRERAS, Claudia; DIAZ, María. Métodos heurísticos para la solución de problemas de ruteo de vehículos con capacidad (VRP). Bucaramanga, 2010, 211 pág. Trabajo de Grado. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ing. fisicomecánicas. Estudios industriales.

[18] BAASE, Sara y VAN GELDER, Allen. Problemas NP-completos. Algoritmos computacionales Introducción al análisis y diseño. México: Pearson Educación, 2002. 561 pág.

[19] CONTRERAR, Claudia, DIAZ , María, Métodos heurísticos para la solución de problemas de ruteo de vehículos con capacidad (CVRP) , Universidad Industrial de Santander, Pág. 32 , Bucaramanga, 2010

[20] CORREA ESPINAL, Alexander; COGOLLO FLOREZ, Juan; LOPEZ SALAZAR, Juan; Solución de problemas de ruteo de vehículos con restricciones de capacidad usando la teoría de grafos.

[21] HAMDY A, Taha, Programación lineal entera. Investigación de operaciones, séptima edición, universidad de Arkansas, Fayetteville, México 2004. 361 P.

[22] PACHECO BONROSTRO, Joaquín Antonio. Problemas de rutas con ventanas de tiempo: Madrid, Capitulo 1 y capítulo 3, Universidad Complutense de Madrid, DTO. Estadística e Investigación Operativa, Facultad de Ciencias Matemáticas. Extraído el 22 de septiembre del 2012, Disponible en <http://eprints.ucm.es/tesis/19911996/X/2/X2008101.pdf>.

[23] COLMENARES, Daniel. Implementación de una heurística para el problema de planeación de rutas con ventanas de tiempo en sistemas de distribución. [pdf]. 2002; 11 pág. [Consultado 20 abril 2013]. Disponible en <http://dspace.uniandes.edu.co/xmlui/bitstream/handle/1992/178/mi_886.pdf?sequence=1>

[24] OLIVERA, Alfredo. Heurísticas para problemas de ruteo de vehículos. 2004, 4 volúmenes. Universidad de la república, Montevideo, Uruguay Instituto de computación, Consultado 06 enero 2013 Disponible <<http://es.scribd.com/doc/56258861/Heuristic>>

[25] CASTRO, Fabela. Algoritmo Genético con edades para resolver el TSP. San Nicolás de la Garza, 1999, 99 pág. (Tesis de Maestría). Universidad Autónoma de Nuevo León.

[26] RODRIGUEZ, Carlos. Algoritmos heurísticas y meta heurísticos para el problema de localización de generadores. (Curso Académico 2009-2010) Universidad Rey Juan Carlos.

[27] Tesis Formular las meta heurísticas búsqueda Tabú y recocido simulado para la solución del CVRP (Capacitated vehicle routing problem) Bucaramanga. 2011.

150 pág. (Proyecto de grado) Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías físico –mecánicas.

[27] Página google, disponible en <https://www.google.com.co/search?q=cliente+web&source> el 30/12/2013.

[28] Diccionario informático, Alegsá .com.ar disponible en: <http://www.alegsa.com.ar/Dic/cliente%20servidor.php> recuperado el 29/12/2013.

[29] Sistemas de información geográfica Disponible en: <http://langleruben.wordpress.com/%C2%BFque-es-un-sig/> recuperado el 2/01/2014

[30] API de google maps, matriz de distancias disponible en Disponible en: <https://developers.google.com/maps/documentation/distancematrix/?hl=es> recuperado el 02/01/2014.

[31] Servidor APACHE, Disponible en: <http://httpd.apache.org/docs/2.0/es/install.html> recuperado el 03/01/2013.

[32] LAMARCA, María Jesús, HTML, disponible en <http://www.hipertexto.info/documentos/html.htm> recuperado el 04/01/2014

[33] Página de MSQL, Disponible en: <http://www.mysql.com/news-and-events/web-seminars/?lang=en> recuperado el 01/01/2014

[34] Página de Transito de Bucaramanga, código de transito de Colombia artículo 106 <http://www.colombia.com/noticias/codigotransito/t3c11.asp> consultado el [06/15/2013](#)

BIBLIOGRAFIA

API de google maps, matriz de distancias disponible en Disponible en: <https://developers.google.com/maps/documentation/distancematrix/?hl=es> recuperado el 02/01/2014.

API de Java Script, información Disponible en <https://developers.google.com/maps/faq?hl=es> consultado el 2/01/2014.

BAASE, Sara y VAN GELDER, Allen. Problemas NP-completos. Algoritmos computacionales Introducción al análisis y diseño. México: Pearson Educación, 2002. 561 pág.

CASTRO, Fabela. Algoritmo Genético con edades para resolver el TSP. San Nicolás de la Garza, 1999, 99 pág. (Tesis de Maestría). Universidad Autónoma de Nuevo León.

COLMENARES, Daniel. Implementación de una heurística para el problema de planeación de rutas con ventanas de tiempo en sistemas de distribución. [pdf]. 2002; 11 pág. [Consultado 20 abril 2013]. Disponible en <http://dspace.uniandes.edu.co/xmlui/bitstream/handle/1992/178/mi_886.pdf?sequence=1>

CONTRERAS, Claudia; DIAZ, María. Métodos heurísticos para la solución de problemas de ruteo de vehículos con capacidad (VRP). Bucaramanga, 2010, 211 pág. Trabajo de Grado. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ing. fisicomecánicas. Estudios industriales.

CORREA ESPINAL, Alexander; COGOLLO FLOREZ, Juan; LOPEZ SALAZAR, Juan; Solución de problemas de ruteo de vehículos con restricciones de capacidad usando la teoría de grafos.

Diccionario informático, Alegs .com.ar disponible en: <http://www.alegsa.com.ar/Dic/cliente%20servidor.php> recuperado el 29/12/2013.

Dirección de tránsito de Bucaramanga, disponible en http://transitobucaramanga.gov.co/wpcontent/uploads/2013/02/RESOL2012/Resolucion_5752012.pdf consultado el 12/08/2013.

GALVIS, Jessica; JAIMES, Andrea; QUIROGA, Nataly estudio cuantitativo de tres aplicaciones diferentes del problema de ruteo de vehículos (VRP) en la universidad industrial de Santander, Bucaramanga, 2011

GARCÍA, Francisco (2010) Desarrollo metodológico para la determinación de caminos mínimos en redes de tránsito y en tiempo real utilizando técnicas de aprendizaje computacional. Tesis de doctorado en ingeniería no publicada. Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia. Recuperado el día 10 de Noviembre 2012 de <http://www.bdigital.unal.edu.co/3525/1/franciscojaviergarciaorozco.2011.pdf>

GOMEZ, David; RANGEL, Carlos, Formular las meta heurísticas búsqueda tabú y recocido simulado para la solución del CVRP (capacitated vehicle routing problem), Universidad Industrial Santander de, Bucaramanga, 2011.

Google, disponible en <https://www.google.com.co/search?q=cliente+web&source> el 30/12/2013.

Guía para la generación integral de Residuos Peligrosos. Fundamentos. Tomo I (p.16)

HAMDY A, Taha, Programación lineal entera. Investigación de operaciones, séptima edición, universidad de Arkansas, Fayetteville, México 2004. 361 P.

Interfaz gráfica del usuario, disponible en la página:
<http://www.hipertexto.info/documentos/html.htm> recuperado el 04/01/2014.

LAMARCA, María Jesús, HTML, disponible en
<http://www.hipertexto.info/documentos/html.htm> recuperado el 04/01/2014

LEÓN MORENO Francisco (2008) planeación de rutas de distribución utilizando el algoritmo heurístico 2-optima, Artículo de planeación de rutas de distribución volumen 3. Universidad de Sonora, México. Recuperado el día 15 de octubre 2012 de la página de la universidad en el siguiente link
<http://www.invurnus.uson.mx/revistas/articulos/1-I047AP%20Planeaci%C3%B3n%20de%20Rutas%20de%20Distribuci%C3%B3n.pdf>

LOZADA DÍAZ, Adriana; CADENA, Ricardo Andrés, solución del problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo (VRPTW) mediante métodos heurísticos. Bucaramanga, Colombia. Recuperado el día 11 de Diciembre 2012 disponible en
http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/pags/cat/popup/pa_detalle_matbib.jsp?parametros=161274|%20114

OLIVERA, Alfredo. Heurísticas para problemas de ruteo de vehículos. 2004, 4 volúmenes. Universidad de la república, Montevideo, Uruguay Instituto de

computación, Consultado 06 enero 2013 Disponible
<<http://es.scribd.com/doc/56258861/Heuristic>>

PACHECO BONROSTRO, Joaquín Antonio. Problemas de rutas con ventanas de tiempo: Madrid, Capitulo 1 y capítulo 3, Universidad Complutense de Madrid, DTO. Estadística e Investigación Operativa, Facultad de Ciencias Matemáticas. Extraído el 22 de septiembre del 2012, Disponible en <http://eprints.ucm.es/tesis/19911996/X/2/X2008101.pdf>.

Página de google maps, Disponible en: <https://developers.google.com/maps/documentation/javascript/?hl=es> recuperado el 2/01/2013.

Página de MSQL, Disponible en: <http://www.mysql.com/news-and-events/web-seminars/?lang=en> recuperado el 01/01/2014

Página de Transito de Bucaramanga, código de transito de Colombia artículo 106 <http://www.colombia.com/noticias/codigotransito/t3c11.asp> consultado el 06/15/2013

PEREZ, Alejandro, Desarrollo de herramienta web de gestión docente 2007 Pág 13. (Proyecto de grado) Escuela técnica superior de ingeniería de telecomunicación Universidad politécnica de Cartagena.

Revista de la logística.com disponible en <http://www.revistadelogistica.com/La-logistica-reversa-o-inversa.asp> recuperado el 17/12/2013.

RODRIGUEZ, Carlos. Algoritmos heurísticas y meta heurísticos para el problema de localización de generadores. (Curso Académico 2009-2010) Universidad Rey Juan Carlos.

ROGERS & TIBBEN LEMBKE, (1998), GOING BACKWARDS, Reverse logistics trends and practices, Reno, Nevada University, Reverse Logistics Executive Council, cp 1.

Servidor APACHE, Disponible en: <http://httpd.apache.org/docs/2.0/es/install.html>
recuperado el 03/01/2013.

Sistemas de información geográfica Disponible en:
<http://langleruben.wordpress.com/%C2%BFque-es-un-sig/> recuperado el 2/01/2014

TAHA, Handy A. Programación lineal entera. Investigación de operaciones: Novena edición. México: Person Educación México, 2012. 315 p.

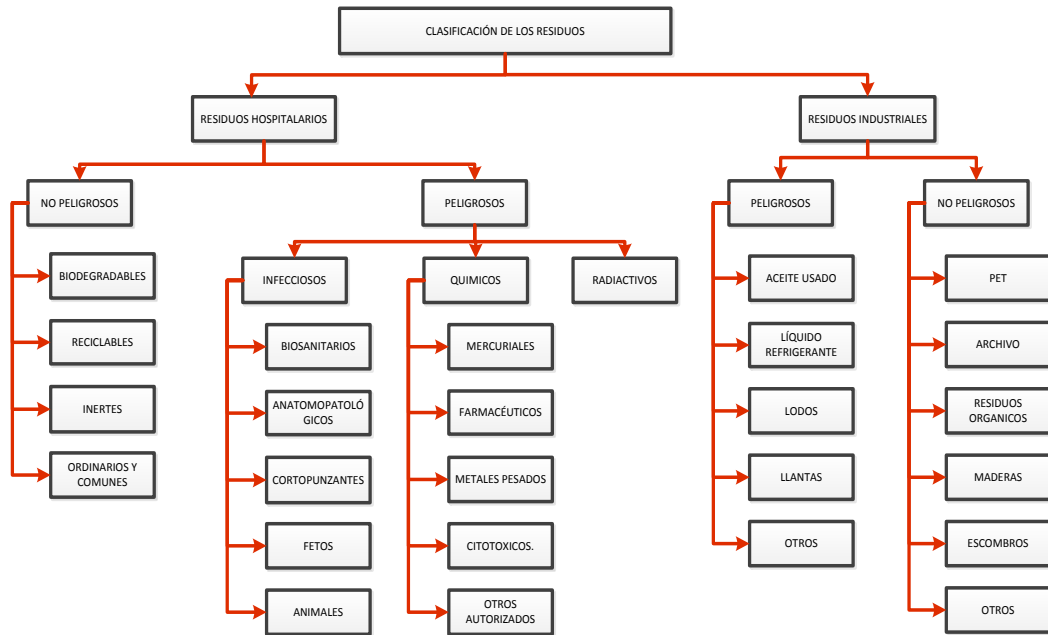
Tesis Formular las meta heurísticas búsqueda Tabú y recocido simulado para la solución del CVRP (Capacitated vehicle routing problem) Bucaramanga. 2011. 150 pág. (Proyecto de grado) Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías físico –mecánicas.

TOLOSA José, colonia de hormigas fundamentación teórica y aplicaciones en la optimización de sistemas logísticos de ruteo con intervalos de recepción y tiempo de atención máximo, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2005

ZANCHEZ GARCIA, Miguel. Optimización Combinatoria. En: Optimización.PDF. 115 pág. [Consultado 11 de nov 2013] Disponible en <
<http://www.sinewton.org/numeros/numeros/43-44/Articulo22.pdf>>

ANEXO A. CLASIFICACIÓN DE RESIDUOS

Figura 1. Clasificación de residuos manipulados por la empresa Edepsa.



ANEXO B.DECRETO 2676 DE 29 DE JULIO DE 2011

MINISTERIO DE COMERCIO, INDUSTRIA Y TURISMO

Por el cual se da cumplimiento a los compromisos adquiridos por Colombia en virtud del Protocolo Modificatorio al Tratado de Libre Comercio entre los Estados Unidos Mexicanos, la República de Colombia y la República de Venezuela

El Presidente de la República de Colombia, en ejercicio de sus facultades y en especial las que le confiere los artículos 189 numerales 11 y 25 y 224 de la Constitución Política y con sujeción a lo previsto en las Leyes 6 de 1971, 7 de 1991, 172 de 1994 y 1457 de 2011

CONSIDERANDO

Que en desarrollo de los mecanismos previstos en el Artículo 23-02 numerales 1 y 2 del "Tratado de Libre Comercio entre la República de Colombia, la República de Venezuela y los Estados Unidos Mexicanos" (en adelante "el Tratado"), el 11 de junio de 2010 los Estados Unidos Mexicanos y la República de Colombia suscribieron el "Protocolo modificadorio al Tratado de Libre Comercio entre los Estados Unidos Mexicanos, la República de Colombia y la República de Venezuela, firmado en la ciudad de Cartagena de Indias, Colombia el trece de junio de mil novecientos noventa y cuatro" (en adelante, el "Protocolo"), aprobado mediante Ley 1457 de 2011, en el cual, entre otros, reafirmaron los compromisos establecidos en materia de acceso de bienes al mercado, incluyendo la obligación de eliminar progresivamente los impuestos a la importación sobre bienes originarios, así como el no incrementar ningún impuesto de importación existente, ni adoptar ningún impuesto de importación nuevo sobre bienes originarios (ad-valorem y específico).

Que el Artículo 12 del Protocolo establece, que su entrada en vigor se producirá treinta (30) días después de la fecha de la última comunicación por escrito, a través de la vía diplomática, en que las Partes se hayan notificado la conclusión de sus respectivos procedimientos legales internos para la entrada en vigor del Protocolo, sin perjuicio que Colombia lo aplique de manera provisional, de conformidad con su legislación nacional.

Que haciendo uso del canal Diplomático, la Embajada de México en Colombia notificó al Gobierno Colombiano mediante Nota No. Col-02078, que su Gobierno dio cumplimiento a los requisitos exigidos por su legislación nacional para la entrada en vigor del Protocolo, con la aprobación mediante Decreto de la Cámara de Senadores del Honorable Congreso de La Unión, en ejercicio de la facultad que le confiere el artículo 76 fracción I de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, publicado en el Diario Oficial, el 30 de junio de 2011.

Que el Artículo 12 del Protocolo permite que la República de Colombia aplique provisionalmente sus disposiciones, de conformidad con su legislación nacional.

Que el Tratado y el Protocolo fueron suscritos en el marco de la Asociación Latinoamericana de Integración -ALADI-.

Que el Tratado de Montevideo del año 1980, por medio del cual se instituye la Asociación Latinoamericana de Integración, ALADI, fue aprobado por el Congreso de la República mediante la Ley 45 de 1981.

Que es necesario dar aplicación provisional a los compromisos adquiridos en el citado Protocolo.

Que en mérito de lo expuesto,

DECRETA

Artículo 1. Aplicar provisionalmente a partir del 2 de agosto de 2011, el Protocolo Modificatorio al Tratado de Libre Comercio entre los Estados Unidos Mexicanos, la República de Colombia y la República de Venezuela, suscrito el 11 de junio de 2010 por los Estados Unidos Mexicanos y la República de Colombia, cuyo texto es el siguiente:

PROTOCOLO MODIFICATORIO AL TRATADO DE LIBRE COMERCIO ENTRE LOS ESTADOS UNIDOS MEXICANOS, LA REPÚBLICA DE COLOMBIA Y LA REPÚBLICA DE VENEZUELA, FIRMADO EN LA CIUDAD DE CARTAGENA DE INDIAS, COLOMBIA EL TRECE DE JUNIO DE MIL NOVECIENTOS NOVENTA Y CUATRO

Los Estados Unidos Mexicanos y la República de Colombia (en adelante denominados las "Partes");

DECIDIDOS a profundizar sus relaciones comerciales, mejorando las condiciones de acceso a mercados para diversos bienes del Tratado de Libre Comercio entre los Estados Unidos Mexicanos, la República de Colombia y la República de Venezuela (en adelante denominado el "Tratado de Libre Comercio");

COMPROMETIDOS en facilitar el intercambio comercial y responder a los cambios en los procesos productivos y la relocalización de la proveeduría de insumos en la región;

DESEANDO otorgar mayor dinamismo al Tratado de Libre Comercio;

CONSIDERANDO las recomendaciones formuladas por la Comisión Administradora del Tratado de Libre Comercio mediante las Decisiones 57, 58, 59 y 60, y

TENIENDO EN CUENTA la denuncia de la República Bolivariana de Venezuela al Tratado de Libre Comercio, que lo dejó sin efectos entre ese país y las Partes a partir del 19 de noviembre de 2006;

Han acordado lo siguiente:

PARTE I

MODIFICACIÓN AL NOMBRE DEL TRATADO DE LIBRE COMERCIO

Artículo 1. Se modifica el nombre del Tratado de Libre Comercio por "Tratado de Libre Comercio entre los Estados Unidos Mexicanos y la República de Colombia".

PARTE II

ACCESO A MERCADO

Artículo 2. Se adiciona una Sección A Bis y una Sección B Bis al Programa de Desgravación establecido en el Anexo 1 al artículo 3-04 del Tratado de Libre Comercio y se incorporan las desgravaciones arancelarias para diversos bienes originarios, como se establece en el Anexo 1 al presente Protocolo.

Artículo 3. Se adiciona un Artículo 3-08 Bis y un Anexo al artículo 3-08 Bis al Tratado de Libre Comercio, como se establece en el Anexo 2 al presente Protocolo.

Artículo 4. Se adiciona una Sección F y un Artículo 3-14 al Tratado de Libre Comercio, como se establece en el Anexo 3 al presente Protocolo.

Artículo 5. Se adiciona un Artículo 5-04 Bis y un Anexo al artículo 5-04 Bis al Tratado de Libre Comercio, como se establece en el Anexo 4 al presente Protocolo.

Artículo 6. Para la determinación del origen de los bienes a los que se refieren los Artículos 2 y 5 del presente Protocolo se aplicará, según corresponda, lo dispuesto en el Capítulo VI (Reglas de Origen) del Tratado de Libre Comercio.

PARTE III

REGLAS DE ORIGEN

Artículo 7. Se modifican las reglas específicas de origen de la Sección B del Anexo al artículo 6-03 del Tratado de Libre Comercio, como se establece en el Anexo 5 al presente Protocolo.

Artículo 8. Se modifican los artículos 6-20, 6-23, 6-24, 6-25 y 6-26 y el Anexo al artículo 6-21 del Tratado de Libre Comercio, como se establece en el Anexo 6 al presente Protocolo.

Artículo 9. Se adiciona un Artículo 6-08 Bis al Tratado de Libre Comercio, como se establece en el Anexo 7 al presente Protocolo.

Artículo 10. Se modifica el Artículo 7-02 del Tratado de Libre Comercio, como se establece en el Anexo 8 al presente Protocolo.

PARTE IV

ADMINISTRACIÓN DEL TRATADO

Artículo 11. Se modifica el Artículo 20-01 y el Anexo 1 al artículo 20-01 del Tratado de Libre Comercio, como se establece en el Anexo 9 al Presente Protocolo.

PARTE V

ENTRADA EN VIGOR

Artículo 12. El presente Protocolo entrará en vigor treinta (30) días después de la fecha de la última comunicación por escrito, a través de la vía diplomática, en que las Partes se hayan notificado la conclusión de sus respectivos procedimientos legales internos para la entrada en vigor de este Protocolo.

Lo establecido en el párrafo anterior no impedirá que la República de Colombia, de conformidad con su legislación nacional, aplique provisionalmente el presente Protocolo.

Al entrar en vigor el presente Protocolo, las modificaciones y adiciones previstas en el mismo constituirán parte integral del Tratado de Libre Comercio, de conformidad con lo dispuesto en su Artículo 23-02.

El presente Protocolo continuará en vigor mientras el Tratado de Libre Comercio esté vigente. Con la terminación del Tratado de Libre Comercio, también se dará por terminado el presente Protocolo.

EN FE DE LO CUAL, los infrascritos, debidamente autorizados por sus respectivos gobiernos, firman el presente Protocolo.

Firmado simultáneamente en Bogotá D.C. y Ciudad de México, el once de junio de dos mil diez, en dos ejemplares originales, siendo ambos igualmente auténticos.

Por la República de Colombia	Por los Estados Unidos Mexicanos
LUIS GUILLERMO PLATA PÁEZ	GERARDO RUIZ MATEOS
Ministro de Comercio, Industria y Turismo	Secretario de Economía

Bienes del sector agropecuario:

1. Desgravación inmediata a partir de la entrada en vigor del presente Protocolo para los bienes originarios clasificados en las siguientes fracciones arancelarias de Colombia. A los bienes sujetos a la desgravación inmediata conforme a este párrafo, no le será aplicable el Mecanismo de Estabilización de Precios (MEP) o Sistema Andino de Franja de Precios (SAFP)

2. Desgravación lineal a partir del tercer año de la entrada en vigor del presente Protocolo para los bienes originarios clasificados en las siguientes fracciones arancelarias de Colombia.

Nota: Además de los aranceles preferenciales establecidos para cada año a la fracción arancelaria 1516.20.00.00 del cuadro anterior, se deberá aplicar una preferencia arancelaria adicional de doce por ciento (12%), con objeto de incorporar la PAR negociada por las Partes en el marco de la ALADI, de conformidad con el artículo 3-04 (4) del Tratado.

3. Desgravación lineal a partir de la entrada en vigor del presente Protocolo para los bienes originarios clasificados en las siguientes fracciones arancelarias de Colombia:

Nota: Además de los aranceles preferenciales establecidos para cada año a las fracciones arancelarias del cuadro anterior, se deberá aplicar una preferencia arancelaria adicional de doce por ciento (12%), con objeto de incorporar la PAR negociada por las Partes en el marco de la ALADI, de conformidad con el artículo 3-04 (4) del Tratado.

4. Desgravación lineal a partir de la entrada en vigor del presente Protocolo para los bienes originarios clasificados en las siguientes fracciones arancelarias de Colombia:

Nota: Además de los aranceles preferenciales establecidos para cada año a las fracciones arancelarias del cuadro anterior, se deberá aplicar una preferencia arancelaria adicional de doce por ciento (12%), con objeto de incorporar la PAR negociada por las Partes en el marco de la ALADI, de conformidad con el artículo 3-04 (4) del Tratado.

Bienes del sector no agropecuario:

5. Desgravación inmediata a partir de la entrada en vigor del presente Protocolo para los bienes originarios clasificados en las siguientes fracciones arancelarias de Colombia:

6. Desgravación lineal a partir de la entrada en vigor del presente Protocolo para el bien originario clasificado en la siguiente fracción arancelaria de Colombia:

7. Desgravación lineal a partir de la entrada en vigor del presente Protocolo para los bienes originarios clasificados en las siguientes fracciones arancelarias de Colombia:

Sección B Bis- Lista de desgravación de México

Bienes del sector agropecuario:

1. Desgravación inmediata a partir de la entrada en vigor del presente Protocolo para los bienes originarios clasificados en las siguientes fracciones arancelarias de México:

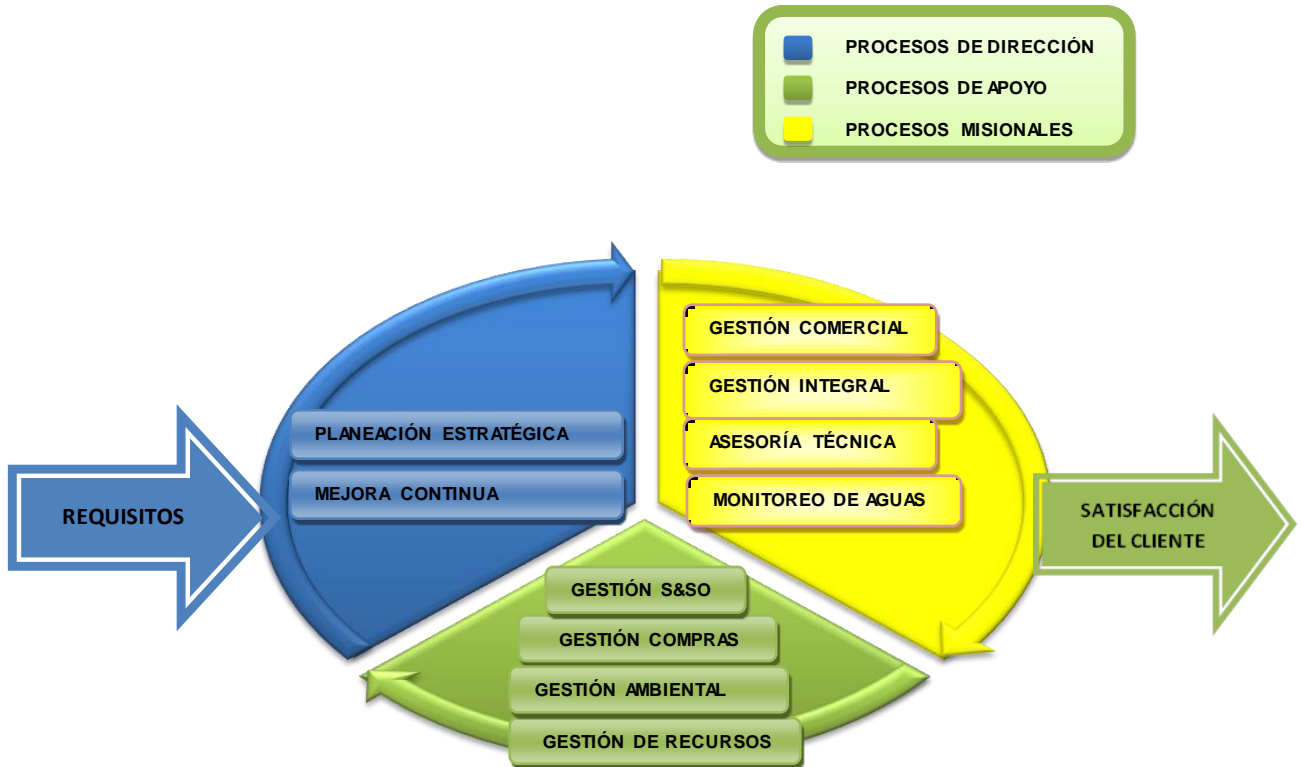
2. Desgravación lineal a partir del tercer año de la entrada en vigor del presente Protocolo para los bienes originarios clasificados en las siguientes fracciones arancelarias de México

Nota: Además de los aranceles preferenciales establecidos para cada año a las fracciones arancelarias del cuadro anterior, se deberá aplicar una preferencia arancelaria adicional de veintiocho por ciento (28%), con objeto de incorporar la PAR negociada por las Partes en el marco de la ALADI, de conformidad con el artículo 3-04 (4) del Tratado.

3. Desgravación lineal a partir de la entrada en vigor del presente Protocolo para los bienes originarios clasificados en las siguientes fracciones arancelarias de México

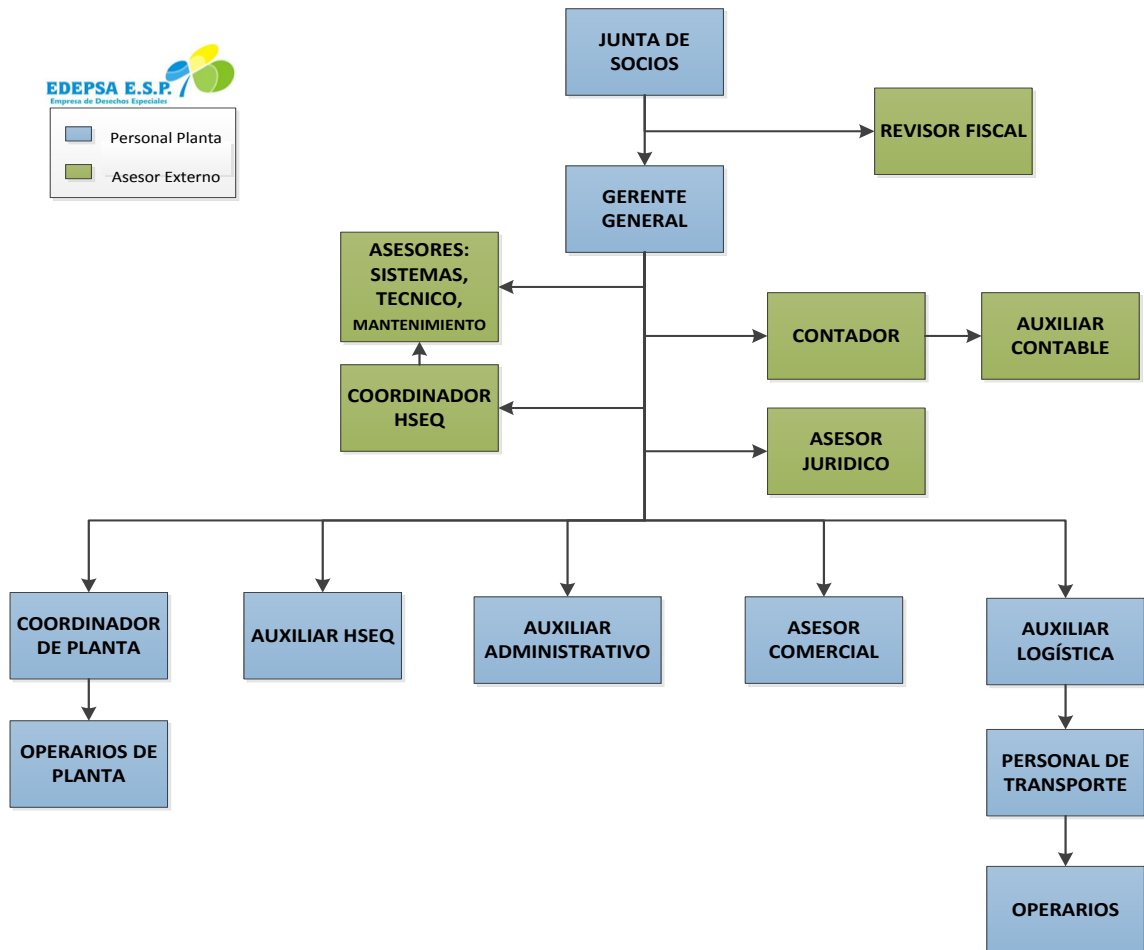
ANEXO D. MAPA DE PROCESOS DE EDEPSA ESP SOLUCIONES AMBIENTALES

1.3 MAPA DE PROCESOS



ANEXO E. ESTRUCTURA ORGANIZACIONAL DE EDEPSA ESP SOLUCIONES AMBIENTALES

Figura 5-1. Diagrama de la estructura organizacional



**ANEXO F. DESCRIPCION DE CARGOS DEL PERSONAL DIRECTO E
INDIRECTO DE EDEPSA ESP SOLUCIONES AMBIENTALES**

Tabla A6-1. Personal Directo de EDEPSA ESP Soluciones Ambientales

CARGO	DESCRIPCION	No.
Gerente	Debe velar por el funcionamiento eficaz del sistema integrado de gestión, obtener información clara y concisa sobre cambios presentes en su cumplimiento del marco legal y mantener excelentes relaciones sociales con sus clientes, proveedores y demás partes interesadas.	1
Auxiliar HSEQ	Su responsabilidad se centra en velar por la satisfacción del cliente, mantener espacios de trabajos seguros para el bienestar y la protección del personal interno y aquellas partes interesadas dentro de las instalaciones de la empresa. Por otra parte debe dar seguimiento y control al cumplimiento del marco legal de las operaciones, buscando la reducción del impacto ambiental generado por sus actividades. En el mismo sentido debe emitir las actas de disposición final y brindar acompañamiento a los clientes, para asegurar el correcto manejo de los residuos peligrosos.	1
Auxiliar Administrativo	Se encuentra a cargo de la elaboración de los contratos, facturación, el cobro y cartera y el suministro de la documentación necesaria a clientes.	1
Auxiliar Logístico	Debe prever los recursos necesarios y administrarlos para garantizar un eficaz cumplimiento del servicio.	1
Asesor Comercial	Establece relaciones comerciales con nuevos clientes y se encarga de gestionar su afiliación. De igual forma da seguimiento a la operación para evaluar la satisfacción por el servicio adquirido.	1
Jefe de Planta	Coordinar y direccionar las actividades en la planta de tratamiento de disposición final de residuos.	1
Jefe de Conductores	Se encuentra a cargo de la ejecución de la ruta de recolección asignada y de velar por el correcto mantenimiento y funcionamiento de los vehículos.	1
Conductor / Operario	Realiza labores de conductor cuando se le es asignada una ruta de recolección de residuos y obligaciones de operario en planta en el momento de ser imprescindible su participación.	2
CARGO	DESCRIPCION	No.

Operarios	Deben recibir los residuos entregados por el cliente, cargar el vehículo, descargar en la planta de tratamiento, almacenar cada residuo según sus características, y dar disposición final de acuerdo al tratamiento aplicado.	6
Mensajería	Entrega la facturación, cobro y cartera y demás diligencias que sean necesarias para el funcionamiento de las actividades de la empresa.	1

Tabla A6-2. Personal Directo de EDEPSA ESP Soluciones Ambientales

CARGO	DESCRIPCIÓN	No.
Revisor Fiscal	El código de comercio de Colombia en su artículo 211 contempla que el revisor fiscal responderá de los perjuicios que ocasione a la sociedad, a sus asociados o a terceros, por negligencia o dolo en el cumplimiento de sus funciones.	1
Contador	Responsable de la planificación, organización y coordinación de todas relacionadas con el área contable, con el objetivo de obtener las consolidaciones y estados financieros requeridos por la organización.	1
Auxiliar Contable	Las funciones del auxiliar contable deben estar relacionadas con las tareas propias de la contabilidad, como puede ser la causación de los diferentes hechos económicos de la empresa.	1
Asesor Jurídico	Le corresponde asesorar y asistir al Instituto en asuntos de carácter legal; aconsejar oportunamente a las autoridades con respecto a las consideraciones legales que pudieran afectar el funcionamiento de la Institución.	1
HSEQ	Encargado de llevar a cabo el adecuado funcionamiento del Sistema Integrado de Gestión (SIG), dar direccionamiento a sus procesos y evaluar oportunidades de mejora en el desarrollo de las actividades de la organización.	1
Mantenedor de Equipos de Planta	Realizar mantenimiento preventivo a los equipos de la planta	1

Tabla A6-3 Número de personal Directo según lugar de trabajo de Edepsa Soluciones Ambientales

Infraestructura	Gerente	Auxiliar HSEQ	Auxiliar Administrativo	Auxiliar Logístico	Asesor Comercial	Jefe de Planta	Jefe de Conductores	Conductor / Operario	Operario	Mensajería
Sede Bucaramanga	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1
Sede Cúcuta	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0
Girón	0	0	0	0	0	1	1	2	6	0

ANEXO G. COBERTURA DEL SERVICIO DE RECOLECCIÓN DE RESIDUOS DE EDEPSA ESP A NIVEL NACIONAL

Los clientes poseen una ubicación física fija, sujeta a cambios geográficos en consecuencia a modificaciones en las políticas internas que puede adoptar cada empresa como: cambio de razón social, aperturas de nuevos mercados, traslados y demás estrategias que pueden influir en su operación. La frecuencia del servicio de recolección para cada cliente se establece contractualmente de acuerdo a la necesidad que él mismo considera prudente para el almacenamiento de sus residuos peligrosos generados, que fluctúan de acuerdo a su actividad económica y que posteriormente serán entregados para su adecuada disposición final en un intervalo de tiempo no mayor a 3 meses.

Figura A7-1. Cobertura Edepsa ESP



Tabla A7-1. Codificación de municipios por departamento

COD.	DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	
11	Cundinamarca	<ul style="list-style-type: none"> • Santa Fe de Bogotá 	
81	Arauca	<ul style="list-style-type: none"> • Arauca • Arauquita • Cravo Norte 	<ul style="list-style-type: none"> • Puerto Rondón • Saravena
68	Santander	<ul style="list-style-type: none"> • Bucaramanga • Barbosa • Barrancabermeja • Cabrera • California • Capitanejo • Cerrito • Charala • Concepción • El Carmen de Chucuri • Floridablanca • Girón • Guapota • Guepsa • La Paz • Lebrija 	<ul style="list-style-type: none"> • Macaravita • Málaga • Matanza • Mogotes • Piedecuesta • Puerto Wilches • Sabana de Torres • San Andrés • San Gil • San José de Miranda • San Miguel • Santa Bárbara • Socorro • Surata • Vélez • Vetas
54	Norte de Santander	<ul style="list-style-type: none"> • Cúcuta • Cachira • Chinacota • Chitaga 	<ul style="list-style-type: none"> • Gramalote • Pamplona • Pamplonita
05	Antioquia	<ul style="list-style-type: none"> • Yondo 	<ul style="list-style-type: none"> • La Unión
15	Boyacá	<ul style="list-style-type: none"> • Sogamoso 	
47	Magdalena	<ul style="list-style-type: none"> • Ciénaga 	
76	Valle del Cauca	<ul style="list-style-type: none"> • Cali 	

ANEXO H. CLASIFICACIÓN DE LOS CLIENTES DE EDEPSA ESP

Parámetro	Clasificación de los clientes
Según Naturaleza Jurídica	<ul style="list-style-type: none"> • Persona Natural • Persona Jurídica
Según tipo de sociedad	<ul style="list-style-type: none"> • Sociedad de Responsabilidad Limitada • Sociedad Anónima • Sociedad Por Acciones Simplificadas • Empresa Estatal • Empresa Extranjera • ONG • Otras
Según tipo de servicio	<ul style="list-style-type: none"> • Hospitalario • Industrial
Según Cantidad de Residuos generados	<ul style="list-style-type: none"> • 10 kg/Bolsa – Bolsa Normal (N) • 20 Kg/Bolsa – Bolsa Grande (G) • 30 Kg/Bolsa – Bolsa Extra Grande (EG) • 1 Kg Cortopunzante – Guardián 1 Litro (G1) • 2.9 Kg Cortopunzante – Guardián 2.9 Litros (G2.9)
Según Frecuencia de Recolección	<ul style="list-style-type: none"> • Diaria • Bisemanal • Trisemanal • Semanal • Quincenal • Cada 20 Días • Mensual • Cada 45 días • Bimensual • Trimensual • Según Necesidad
Según estado de Actividad	<ul style="list-style-type: none"> • Activo • Inactivo

	<ul style="list-style-type: none"> • Suspendido 	
Según tipo de Residuo.	<ul style="list-style-type: none"> • Residuo peligroso 	Hospitalario
		Industriales
	<ul style="list-style-type: none"> • Residuos No peligrosos 	Reciclables.
Según tipo de Cobro	<ul style="list-style-type: none"> • Por Cantidad • Por Peso 	
Según Ubicación Geográfica	<ul style="list-style-type: none"> • Barrio • Municipio • Ciudad • Departamento 	
Según Beneficio	<ul style="list-style-type: none"> • Producto • Servicio 	

Edepsa soluciones ambientales realiza la gestión integral de residuos respel a clientes industriales y hospitalarios, los primeros pertenecen al sector industrial generando residuos en cantidades aleatorias para quienes el proceso inicia con una solicitud de recolección, indicando las características propias del material a manipular como el estimado del volumen, el personal encargado de la entrega, la ubicación del lugar en el cual se encuentran almacenados, entre otros.

Los segundos clientes pertenecen al sector salud, en este grupo se encuentran hospitales, salas de belleza, centros de estética, consultorios médicos y odontológicos, veterinarias, droguerías, entre otras entidades relacionadas, que generan diversas cantidades de residuos peligrosos con una determinada frecuencia, estos son depositados en bolsas o en guardianes según sea el tipo de residuo a manipular.

ANEXO I. PORTAFOLIO DE PRODUCTOS Y SERVICIOS

Tabla A9-1. Portafolio de productos

PORTAFOLIO DE PRODUCTOS				
				
				
<ul style="list-style-type: none">• Kit de derrames (Hidrocarburos, sangre, químicos y otros)• Material Absorbente a granel• Bolsa y guardianes para corto-punzantes• Recipientes para el Almacenamiento de residuos• Señalización Interna• Extintores, Botiquines, Elementos de Protección Personal				

Tabla A9-2. Portafolio de servicios

PORTAFOLIO DE SERVICIOS	
<ul style="list-style-type: none">• Gestión Integral de residuos Hospitalarios, Industriales y Reciclables.• Monitoreo de Agua residual para análisis físico, químico, microbiológico y biológico.• Asesoría y capacitación en gestión de RESPEL• Asistencia técnica en salud ocupacional y medio ambiente• Biorremediación de suelos y aguas• Auditorías Ambientales	

ANEXO J. NÚMERO DE CLIENTES DE EDPSA ESP POR MUNICIPIO

COBERTURA POR MUNICIPIO	ESTADO ENTIDADES		TOTAL GENERAL	
	Nº. ACTIVO	Nº. INACTIVO	TOTAL	PORCENTAJE DE PARTICIPACION
BARBOSA	11	11	22	1.99%
BARRANCABERMEJA	37	2	39	3.53%
BUCARAMANGA	362	156	518	46.92%
CABRERA	1	0	1	0.09%
CALIFORNIA	4	2	6	0.54%
CAPITANEJO	3	1	4	0.36%
CARMEN DE CHUCURI	2	0	2	0.18%
CERRITO	2	0	2	0.18%
CHARALA	1	0	1	0.09%
CONCEPCION	2	0	2	0.18%
FLORIDABLANCA	99	42	141	12.77%
GIRON	92	29	121	10.96%
GUAPOTA	1	0	1	0.09%
GUEPSA	6	0	6	0.54%
LA PAZ	1	0	1	0.09%
LEBRIJA	27	5	32	2.90%
MACARAVITA	1	0	1	0.09%
MALAGA	19	6	25	2.26%
MATANZA	1	0	1	0.09%
MOGOTES	1	1	2	0.18%
PIEDRECUESTA	78	29	107	9.69%
PUERTO WILCHES	4	0	4	0.36%
SABANA TORRES	2	1	3	0.27%
SAN ANDRES	1	0	1	0.09%
SAN GIL	36	1	37	3.35%
SAN JOSE DE MIRANDA	1	0	1	0.09%
SAN MIGUEL	1	0	1	0.09%
SANTA BARBARA	1	1	2	0.18%
SOCORRO	10	2	12	1.09%
SURATA	1	0	1	0.09%
VELEZ	4	1	5	0.45%
VETAS	2	0	2	0.18%
TOTAL	814	290	1104	

	73.73%	26.27%	100.00%
--	--------	--------	---------

Se escogió a Bucaramanga como el foco del Proyecto en vista de que es el municipio que posee mayor participación de clientes. Por tal motivo se observó el comportamiento de la ruta habitual de las líneas de recolección Hospitalario e Industrial y se obtuvo la información de la **tabla A10-2**

Tabla A10-2 Cobertura en Bucaramanga

MUNICIPIO	TIPO DE RESIDUO		TOTAL
	N° CLIENTES HOSPITALARIOS	N° CLIENTES INDUSTRIALES	
BUCARAMANGA	328	34	362
	90.61%	9.39%	100%

En vista de la información presentada en la **tabla A10-3** se sustrajo de la base de datos de clientes la información concerniente a los clientes de la Línea de Recolección Hospitalaria debido a que este grupo posee una mayor participación e influencia en el Municipio de Bucaramanga con un porcentaje del 90.61% que corresponde a 328 clientes generadores de residuos peligrosos hospitalarios.

Tabla A10-3 Frecuencia de recolección.

FRECUENCIA DE RECOLECCION EN DIAS	N° ENTIDADES PARA BUCARAMANGA	PORCENTAJE DE PARTICIPACION
1	1	0.30%
3	2	0.61%
8	11	3.35%
15	10	3.05%
20	1	0.30%
30	135	41.16%
45	2	0.61%
60	133	40.55%
90	33	10.06%
TOTAL	328	100.00%

ANEXO K DIAGRAMA RADAR

El desarrollo de la herramienta cuantitativa se llevo a cabo a través de la metodología “DNA en Logistik” para el análisis, diagnóstico, planeación, diseño, ejecución y mejora de proyectos logísticos, con la cual se desarrollo el esquema radial, que se basa en la evaluación de los procesos y las subareas respectivas a través de preguntas puntuales cuantificadas, que posteriormente son evaluadas y analizadas mediante un diagrama radial, con el propósito de detectar el proceso del área Logística con mayor vulnerabilidad frente a sus requerimientos de operación.

Esta herramienta de evaluación fue aplicada al auxiliar logístico de la empresa Edepsa Soluciones ambientales, responsable del correcto funcionamiento de los procesos y actividades relacionadas con el área en cuestión.

TABLA A11-1. Diagnóstico logístico empresarial

DIAGNÓSTICO LOGÍSTICO EMPRESARIAL
OBJETIVOS 1. Evaluar la situación de su empresa. 2. Identificar necesidades de mejora.
INSTRUCCIONES PARA DILIGENCIAR EL DIAGNÓSTICO El autodiagnóstico está estructurado en seis (6) procesos de gestión del área Logística de la empresa, a saber: 1. Aprovechamiento. 2. Tratamiento RESPEL. 3. Gestión de Inventarios. 4. Talento Humano. 5. Transporte. 6. Sistemas de Información.
CALIFICACIÓN A cada área corresponden una serie de enunciados, que usted debe calificar de 1 a 5, de acuerdo con la siguiente escala: 1. Corresponde a aquellas acciones que no realiza en su empresa. 2. Corresponde a aquellas acciones que ha planeado hacer y están pendientes de realizar. 3. Corresponde a aquellas acciones que realiza, pero no se hacen de manera estructurada (plan). 4. Corresponde a aquellas acciones que realiza de manera estructurada y planeada. 5. Corresponde a aquellas acciones que realiza de manera estructurada, planeada y cuentan con acciones de mejoramiento continuo.
Al final encontrará un resultado en forma de "telaraña" que le permitirá identificar los procesos de gestión en los que el área de logística tiene un mejor desempeño, así como en las que existen mayores oportunidades de mejora.

Tabla A11-2. Aprovevisionamiento.

1. APROVISIONAMIENTO		CALIFICACIÓN
No.	A. CATEGORIZACIÓN Y SELECCIÓN DE PRODUCTO	90%
1.1	Son categorizados (identificar, describir y catalogar), los distintos productos de la empresa o componentes de la lista de materiales.	5
1.2	Se administran las categorías o familias de productos.	5
1.3	Se diseña y utiliza una ficha sobre la descripción de cada producto / Material.	3
1.4	Se encuentra definido un portafolio de Productos / Servicios.	5
1.5	Hay selección de nuevos productos / Materiales con una determinada frecuencia en el mercado.	4
1.6	Se definen criterios para la selección de productos.	5
No.	B. SELECCIÓN Y DESARROLLO DE PROVEEDORES	77%
1.7	Existen Procedimientos documentados para la selección de proveedores supervizados y auditados periodicamente.	4
1.8	Se definen criterios para la evaluación de proveedores.	3
1.9	Se establecen un número adecuado de parametros para la selección de proveedores.	4
1.10	Se establece y mantiene una relación con los proveedores.	4
1.11	Los proveedores cuentan con algún tipo de certificación.	3
1.12	Se realiza retroalimentación con proveeduría para reducir impactos	4
1.13	Se formaliza e instruye la negociación con nuevos proveedores.	5
No.	C. APROVISIONAMIENTO Y ABASTO	78%
1.14	Se estima o Pronostica la demanda para el abastecimiento.	4
1.15	Se considera el comportamiento histórico de las ventas en el pronóstico de la demanda.	3
1.16	Se calcula el aprovisionamiento considerando el nivel de inventario.	4
1.17	Se toma en cuenta el tiempo e entrega del proveedor para el calculo del lote y la frecuencia.	4
1.18	Al analizar el cálculo del aprovisionamiento se consideran las restricciones logísticas.	3
1.19	Se calcula el lote optimo de abastecimiento.	3
1.20	Hay establecimiento del nivel de inventario necesario (Nivel de servicio) para cubrir la operación logística.	4
1.21	Se desarrolla y mantiene un plan de aprovisionamiento.	4
1.22	El area cuenta con politicas, normas y procedimientos a detalle para regular el abasto y la relación comercial con proveedores.	5
1.23	Se establecen condiciones controladas para el seguimiento y verificación de las ordenes de compra.	5
1.24	El proceso de abastecimiento posee y mantiene herramientas de soporte para asegurar el correcto funcionamiento del area Logistica.	4

Tabla A11-3. Tratamiento respel.

2. TRATAMIENTO RESPEL		CALIFICACIÓN
No.	A. PLANIFICACIÓN	97%
2.1	La empresa tiene un programa escrito y detallado de adquisición de maquinaria y tecnología para ser ejecutado en el futuro previsible.	4
2.2	El proceso de tratamiento RESPEL de la empresa es adecuado para destruir desechos peligrosos con prácticas seguras y eficaces para proporcionar calidad en el servicio y costos competitivos.	5
2.3	El tratamiento de disposición final es flexible para permitir cambios en la destrucción de residuos peligrosos, en función de satisfacer los requerimientos necesarios del proceso.	5
2.4	El planeamiento de la disposición final está basado en pronósticos de generación de residuos peligrosos.	5
2.5	La empresa posee medidas de control para el flujo de contaminantes (desde la recepción de los residuos peligrosos hasta la entrega para disposición final) para conocer el estado y avance de las órdenes de servicio.	5
2.6	La maquinaria y la tecnología de la empresa le permiten mayor competitividad a nivel nacional en calidad y precio.	5
2.7	Se evalúa con frecuencia la posibilidad de desarrollar mejores practicas de trabajo y adquisición de tecnología que proporcione resultados eficientes.	5
No.	B. CAPACIDAD	94%
2.8	La empresa conoce la capacidad de utilización de su maquinaria y equipo de trabajo, definiendo su rango deseado.	5
2.9	La empresa tiene planes de contingencia para ampliar su capacidad de destrucción más allá de su potencial actual, para responder a futuras demandas superiores.	5
2.10	La ubicación de la planta es ideal para garantizar actividades de trabajo seguras evitando riesgos potenciales a partes involucradas.	5
2.11	La empresa cuenta con una infraestructura idónea para garantizar el soporte de actividades operativas.	5
2.12	Los trabajos efectuados en la planta de disposición final cuentan con indicadores de desempeño que permitan cuantificar los costos de operación.	4
2.13	La distribución física de la planta es totalmente flexible a las variaciones del trabajo.	4
2.14	Se poseen procedimientos documentados de métodos de trabajo y utilización de maquinaria.	5
No.	C. MANTENIMIENTO	80%
2.15	Se realiza un programa de mantenimiento preventivo a todos los quipos y maquinaria y los resultados son debidamente documentados.	4
2.16	La empresa mantiene un inventario de partes y repuestos claves para equipos críticos.	4
2.17	Los operarios de los equipos participan en su mantenimiento	4
2.18	La empresa mantiene su programa de mantenimiento bajo el concepto de mantenimiento predictivo.	3
2.19	La empresa establece su programa de mantenimiento bajo el concepto de Mantenimiento Productivo total.	3
2.20	La empresa tiene seguro contra incendio y otras calamidades devastadoras, así como de un lucro cesante adecuado.	5
2.21	Se establecen responsables para asegurar el cumplimiento de los programas de mantenimiento.	5

Tabla A11-4. Gestión de inventarios.

3. GESTIÓN DE INVENTARIOS		CALIFICACIÓN
No.	A. RECEPCIÓN DE MATERIALES	75%
3.1	Con los proveedores se programan entregas de material con una determinada frecuencia, para mantener el inventario en un nivel óptimo según necesidades.	4
3.2	Se establece ficha técnica para el control de recepción de materiales, garantizando el buen estado y las características físicas necesarias.	3
3.3	En el sistema de almacenamiento y administración de inventarios se establecen políticas que permiten el uso, control y la rotación de estos.	4
3.4	Se establecen indicadores de gestión que permitan el cálculo y la toma de decisiones para evitar posibles faltantes de materiales.	1
3.5	Se establece un programa para evaluar periódicamente el inventario físico de materiales que permitan el correcto funcionamiento de las operaciones logísticas.	4
3.6	Se asignan tiempos límites para realizar la descarga de materiales por proveedor.	4
3.7	Existe un procedimiento para el ingreso de proveedores y los encargados se encuentran capacitados.	5
3.8	Una vez ingresada la mercancía se emiten los reportes pertinentes con la descripción detallada de la misma.	5
No.	B. ALMACENAMIENTO	72%
3.9	Existe un área delimitada, visualizada y asignada para producto que ha sido recibido y está por ingresar al almacén	3
3.10	Se desarrollan políticas para la distribución y acomodo específico del tipo de mercancía recibida dentro del almacén con personal capacitado para llevarlo a cabo.	4
3.11	Se posee un sistema de coordenadas que permite identificar la ubicación del material dentro del almacén.	2
3.12	Se asignan productos dentro del almacén de acuerdo a su rotación.	4
3.13	Existe un organigrama y un documento que acota las responsabilidades del personal de almacén, de forma que todas las funciones estén cubiertas.	5
No.	C. CONTROL DE INVENTARIOS	69%
3.14	Se poseen listas de los diferentes status, con políticas bien definidas para cada mercancía dentro del almacén (Cuarentena, piloto, prueba, obsoleto, etc.)	2
3.15	Dentro de la administración de los diferentes Productos / Materiales se evita su mezcla en una misma ubicación dentro del almacén.	5
3.16	Se posee un sistema de conteo cíclico basado en metodologías y políticas como la clasificación ABC entre otras.	2
3.17	El área posee políticas y procedimientos claros para ejercer control detectando y reportando cualquier discrepancia dentro del inventario.	5
3.18	Se cuenta con un responsable para realizar ajustes dentro del almacén y llevar a cabo los debidos registros de su causa y aplicación.	5
3.19	Se posee un sistema que permite rastrear los movimientos de los materiales que se encuentran caracterizados.	3
3.20	Se llevan a cabo indicadores estadísticos y tareas para mejorar la confiabilidad del inventario en conjunto con otras áreas de la organización.	2

Tabla A11-5. Talento Humano.

4. TALENTO HUMANO		CALIFICACIÓN
No.	A. ASPECTOS GENERALES	96%
4.1	La empresa tiene un organigrama escrito e implantado donde las líneas de autoridad y responsabilidad están claramente definidas.	5
4.2	La empresa tiene un políticas y manuales de procedimientos escritos, conocidos y acatados por todo el personal.	5
4.3	La empresa constituye una junta directiva que lidera la empresa.	5
4.4	La empresa cumple con todos los requisitos legales vigentes.	5
4.5	Se diseñan y mantienen filtros específicos para determinar el perfil adecuado del cargo a desempeñar en la vinculación de nuevos trabajadores.	4
No.	B. CAPACITACIÓN	90%
4.6	Se establecen programas definidos para la capacitación de todo el personal periódicamente.	5
4.7	Se establecen criterios claves para la remuneración y promoción del personal mediante la definición de la escala salarial.	4
No.	C. CULTURA ORGANIZACIONAL	100%
4.8	Existe una buena comunicación oral y escrita a través de los diferentes niveles de la compañía.	5
4.9	La empresa logra motivación y sentido de pertenencia en su personal.	5
4.10	El trabajo en equipo es estimulado a través de todos los niveles de la organización.	5
4.11	La empresa ha establecido programas e incentivos para mejorar el clima laboral.	5
4.12	Se realizan con frecuencia actividades lúdicas, sociales y recreativas.	5
No.	D. SALUD Y SEGURIDAD INDUSTRIAL	95%
4.13	La empresa cuenta con un programa de salud ocupacional implementado (plan de prevención de enfermedades ocupacionales, seguridad laboral, planes de emergencia, etc.).	5
4.14	La planta, la maquinaria, los equipos y los procesos están diseñados para procurar un ambiente de trabajo seguro.	4
4.15	Se establecen, ejecutan y mantienen registros de ausentismos ocasionados por accidentes laborales, enfermedades profesionales y otros.	5
4.16	Se provee al personal del equipo necesario para la ejecución de las actividades operativas y elementos de protección personal con una determinada frecuencia anual.	5

Tabla A11-6. Transporte

5. TRANSPORTE		CALIFICACIÓN
No.	A. PROGRAMACIÓN	52%
5.1	Se planean los requerimientos de transporte a partir de los históricos.	3
5.2	La programación se realiza por medio de técnicas y métodos estandarizados y puede contarse con una aplicación que automatice el sistema.	2
5.3	Existen métodos definidos por la organización para seleccionar el modo de transporte con la capacidad mas conveniente.	3
5.4	La información relevante para la planeación de las rutas generadas es recolectada y administrada por un sistema de información que permite incorporar ajustes en tiempo real.	2
5.5	Las ordenes de Servicio se consolidan según políticas de recolección, carga, costos entre otras restricciones.	4
5.6	Existe un sistema que permite seleccionar el tipo de transporte óptimo considerando todas las variable y restricciones, evaluando los diferentes tipos de alternativas.	3
5.7	Se planean las rutas de transporte a partir de herramientas que definen los parámetros necesarios (distancias, tiempos de recolección, flujos de tránsito, sentido de las vías, restricción de cargas, entre otros) para evaluar el comportamiento del sistema y de igual forma obtener soluciones factibles de ejecución en tiempo real.	2
5.8	La programación de la ruta es flexible a cambios repentinos en la operación de transporte.	3
5.9	El sistema realiza una planeación dinámica considerando todos los puntos de origen, transición y destino para minimizar el costo total de transporte.	2
5.10	Se establecen indicadores de gestión medibles y cuantificables para la toma de decisiones.	2
No.	B. SELECCIÓN DEL TRANSPORTE	75%
5.11	Mediante una ficha técnica se identifica el perfil del transportista donde se incluye la información del perfil, la calificación de su desempeño y otros indicadores.	4
5.12	La empresa administra y actualiza con cierta periodicidad una lista de requerimientos mínimos para la asignación de transportistas a las diferentes rutas programadas.	3
5.13	Se contempla como herramienta de verificación una lista de chequeo vehicular para observar el estado actual de los vehículos antes de realizar el recorrido programado.	5
5.14	Se cuenta con una estimación o proyección de costos vehiculares para generar presupuestos de viaje a corto y largo plazo.	4
5.15	Los recorridos se realizan de forma centralizada y en periodos definidos, con métodos establecidos, tomando en cuenta el volumen, niveles de servicio y frecuencia.	4
5.16	Se cuenta con un sistema de información pertinente para dar a conocer a los transportistas los requerimientos necesarios para ejecutar la operación de transporte en el menor tiempo posible.	3
5.17	La empresa realiza evaluaciones a los conductores en forma periódica y estandarizada, identificando el nivel de servicio proporcionado.	3
5.18	La empresa entrega un informe a fin de retroalimentar el servicio proporcionado y solicita acciones de mejora para su seguimiento.	4
No.	C. CARGA Y DOCUMENTACIÓN	71%
5.19	El encargado de la programación de la ruta debe establecer procedimientos para efectuar seguimiento y control del programa de ruta asegurando su cumplimiento.	3
5.20	Se monitorean los vehículos para atender posibles imprevistos y generar una mejor administración de recursos.	3
5.21	La empresa posee cláusulas vehiculares de aseguramiento.	5
5.22	Se registran y miden horarios de llegadas a clientes, acceso y salidas de transportes al punto de descarga.	4
5.23	Se registra localmente información que se utiliza para evaluar el cumplimiento del conductor	4
5.24	Para cada transporte cargado se emite un mapa que especifica el orden y secuencia de carga a detalle.	2
5.25	Existe un protocolo de seguimiento y actualización de información de visita a clientes.	4
5.26	Hay un checklist de documentación que se verifica antes de ejecutar cada ruta programada.	4
5.27	Se cuentan con dispositivos tecnológicos y móviles para brindar soporte en el almacenamiento y analisis de información relacionada con el cliente y operaciones del debido proceso.	3
No.	D. MONITOREO DE RUTAS VEHICULARES	76%
5.28	Se establece comunicación con el vehículo en caso de surgir alguna contingencia	4
5.29	Cuenta con tecnología para dar seguimiento permanente al transporte desde el momento en el que inicia su recorrido.	3
5.30	Se cuenta con registros que permitan asegurar que los vehículos cumplan con las rutas previamente establecidas.	4
5.31	Hay políticas que establecen el medio y la frecuencia con que se comunican el status del servicio al cliente.	4
5.32	Los diversos escenarios de contingencias son documentados y analizados, ejecutando acciones inmediatas y correctivas en caso de su existencia.	4
No.	E. VISITA Y RECOLECCIÓN A CLIENTES / DESTINO	73%
5.33	El conductor registra todas las llegadas del transporte a destino.	5
5.34	Se cuenta con dispositivos móviles que permiten capturar la firma electrónica del cliente al momento de la recolección.	1
5.35	Se establecen registros que almacenan la información del tipo y cantidad de residuo recolectado y calidad del servicio prestado entre otros.	5
5.36	El área de logística y el transportista documentan las políticas y horarios de disponibilidad de los clientes para ejecutar la interacción del servicio en un procedimiento para cada ruta.	4
5.37	Por procedimiento el transportista, se comunica con el área logística para reportar motivos de la cancelación del servicio a través de algún medio pertinente y eficaz.	3
5.38	La empresa le facilita a la ruta de recolección los medios de comunicación necesarios para el continuo suministro de información relevante al proceso.	4

Tabla A11-7. Sistemas de información.

6. SISTEMAS DE INFORMACIÓN		CALIFICACIÓN
No.	A. PLANEACIÓN DEL SISTEMA	67%
6.1	El sistema de información de la empresa está diseñado para satisfacer los requerimientos funcionales de información de la Gerencia General y de todos los departamentos en forma oportuna y confiable.	3
6.2	La empresa está actualizada en materia de nuevos desarrollos en programas y equipos de cómputo y tiene el personal capacitado para manejarlos.	3
6.3	El diseño técnico y funcional del sistema responde a las necesidades de información de la empresa y es óptimo con relación al tiempo de proceso y seguridad.	4
No.	B. ENTRADAS	87%
6.4	Se generan y archivan adecuadamente los documentos de soporte (ordenes de servicio, entradas y salidas de almacén, comprobantes de egreso, recibos de caja, facturas, etc.) en las diferentes áreas de la empresa.	4
6.5	La captura de información genera operaciones simultáneas en las diferentes áreas de la empresa evitando la doble digitación de las transacciones en los diferentes sistemas.	5
6.6	La empresa cuenta con información contable oportuna y confiable que alimente el sistema logístico	4
No.	C. PROCESOS	87%
6.7	Como política, la empresa realiza sistemáticamente copias de respaldo (back-ups) de sus archivos más importantes y los almacena en sitios seguros.	5
6.8	Existen procedimientos de contingencia, manuales o automatizados, en caso de pérdidas de fluido eléctrico o fallas en el equipo de proceso.	4
6.9	La empresa se preocupa por mantener información actualizada sobre las características de la cadena de abastecimiento en la que se encuentra el negocio	4
No.	D. SALIDAS	87%
6.10	La información generada por el sistema es confiable, oportuna, clara y útil y es usada para la toma de decisiones.	4
6.11	La Gerencia ha definido reportes que indiquen el tipo de datos requeridos para el proceso de toma de decisiones.	5
6.12	La gerencia revisa periódicamente aspectos relativos a la importancia de la logística para el desarrollo competitivo de la empresa.	4

Tabla A11-8. Calificación

CALIFICACIÓN			
RANGO	30%	50%	70%
DESEMPEÑO	BAJO (B)	MEDIO (M)	ALTO (A)

La calificación del desempeño es definida por la empresa de acuerdo a los rangos establecidos en el desarrollo de su sistema integrado de gestión

Tabla A11-9. Resultados diagnósticos.

DIAGNÓSTICO			
#	PROCESO	CALIFICACIÓN TOTAL	EVALUACIÓN
1	APROVISIONAMIENTO	A	80.83%
2	TRATAMIENTO RESPEL	A	90%
3	GESTIÓN DE INVENTARIOS	A	72%
4	TALENTO HUMANO	A	96%
5	TRANSPORTE	M	68%
6	SISTEMAS DE INFORMACIÓN	A	82%

A raíz de este resultado se observa una oportunidad de mejora en el proceso de transporte, que obtiene la calificación más baja del pre-diagnostico con una evaluación del 68% y se ubica en un rango de desempeño Medio para la Organización.

A partir de la Información del diagrama radial, se recalca nuevamente debilidad en el proceso de transporte con una apreciación del 68% como proceso logístico, situación que permite plantear estrategias y definir herramientas para aumentar el desempeño del transporte. Por otra parte es interesante cuestionar si el transporte en el marco de sus actividades, influye de forma significativa al interactuar con los demás procesos involucrados.

Figura A11-1. Calificación de los procesos logísticos.

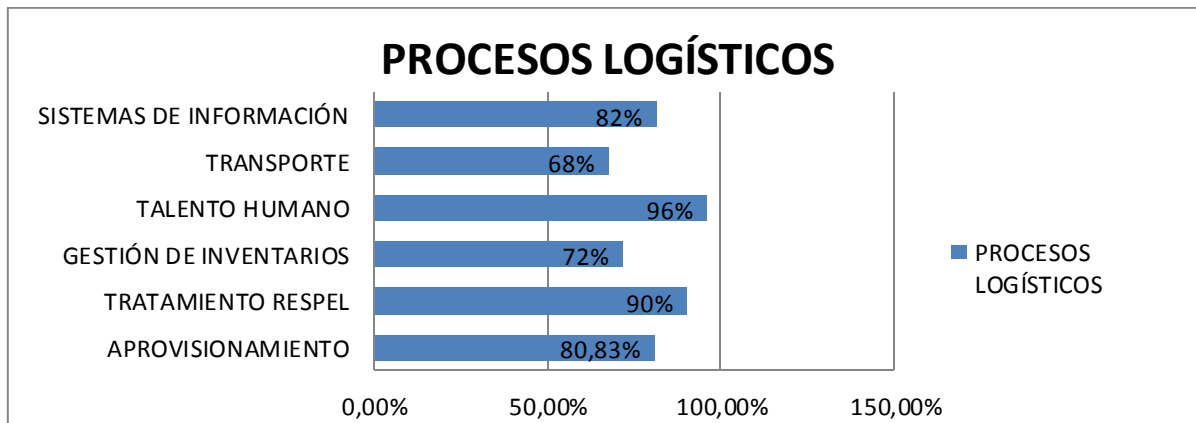
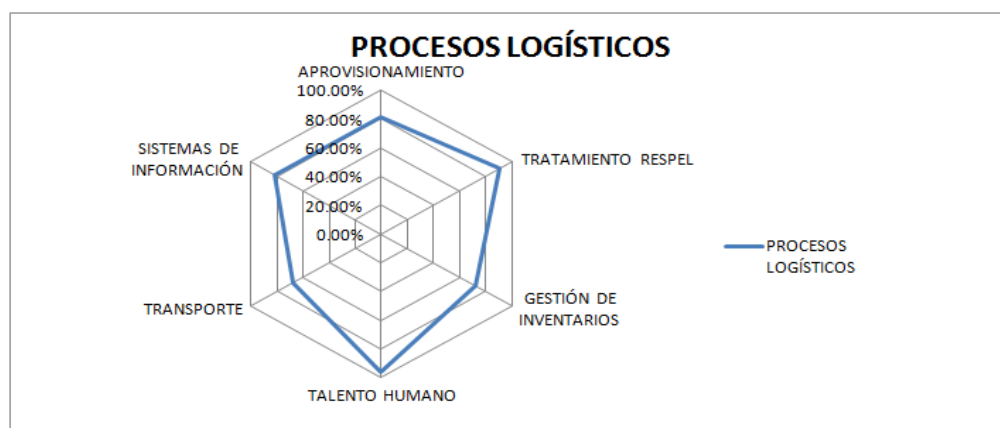


Figura A11-2. Diagrama radial

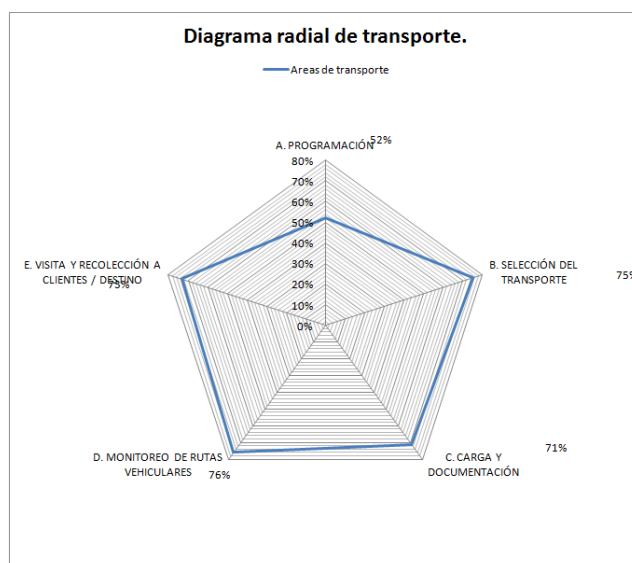


Para obtener una comprensión de mayor detalle respecto al diagnostico radial desarrollado en la **tabla A11-10** de arriba, se estudio la interacción de las diferentes actividades presentes en el proceso de transporte, obteniendo así, los siguientes resultados.

Tabla A11-10. Evaluación de transporte

5. TRANSPORTE	EVALUACIÓN
A. PROGRAMACIÓN	52%
B. SELECCIÓN DEL TRANSPORTE	75%
C. CARGA Y DOCUMENTACIÓN	71%
D. MONITOREO DE RUTAS VEHICULARES	76%
E. VISITA Y RECOLECCIÓN A CLIENTES / DESTINO	73%

Figura A11-3. Diagrama radial de transporte.



EVALUACIÓN DE RESULTADOS

La información suministrada por el Diagrama Radial de transporte permite analizar la interacción de las diferentes actividades presentes en el proceso, de lo cual se puede relacionar el más bajo desempeño con un 52% a la actividad de programación, encargada primordialmente en generar la programación del transporte, asignando entidades a las rutas vehiculares para llevar a cabo la visita a cada uno de los clientes para realizar la recolección de los residuos.

ANEXO L. ENCUESTAS DE SATISFACCION DEL CLIENTE.

Edepsa ESP Soluciones Ambientales le proporciono al proyecto de grado una muestra de 57 encuestas de satisfacción, realizadas a una población de 328 clientes del área de Bucaramanga de la línea de recolección de residuos hospitalarios, para evaluar la aceptación a partir de los resultados.

Definición de la Muestra

De acuerdo a las 57 encuestas proporcionadas, se declara un nivel de confianza del 90% para un $\alpha = 10\%$, de acuerdo a la siguiente ecuación, para una población conocida y finita.

$$n = \frac{N}{1 + \frac{e^2(N-1)}{z^2pq}}$$

Donde: n = tamaño de la muestra que deseamos conocer.

N = tamaño conocido de la población, en este caso en este caso se poseen 328 clientes hospitalarios en la ciudad de Bucaramanga.

Para un $\alpha = 10\%$, nivel de confianza 90 % $z=1.65$ $e = 10\%$

$$n = \frac{328}{1 + \frac{(0.1^2) * (328 - 1)}{(1.65^2) * (0.25)}} = \approx 57 \text{ clientes encuestados}$$

Tabla A12- 1 . Sistema de Calificación

SIGLA	DESCRIPCIÓN	CALIFICACIÓN
N	Nunca	1
CN	casi nunca	2
RV	rara vez	3
CF	con frecuencia	4
S	siempre	5

ENCUESTA DE SATISFACCIÓN A CLIENTES	
OBJETIVO	Realizar un seguimiento a la prestación del servicio de recolección de residuos peligrosos y determinar el grado de satisfacción de los clientes en conformidad con el mismo.
APRECIADO CLIENTE	Con el propósito de medir el servicio al cliente y de mejorar actividades de RESPEL, lo invitamos a participar en esta encuesta de satisfacción para obtener la información necesaria de acuerdo a su percepción y conocimiento en base a la opinión que posee respecto a las actividades del servicio brindado por la empresa EDEPSA ESP Soluciones Ambientales
PROCESO:	Recolección de Residuos Peligrosos
ENCARGADO:	Auxiliar Logístico

ITEM	PREGUNTA	N	CN	RV	CS	S	OBS.
		1	2	3	4	5	
1	¿El vehículo está en perfectas condiciones y es apto para la recolección de residuos peligrosos?						
2	¿Se recolectan en su totalidad la cantidad de residuos peligrosos generados?						
3	¿Se le entregan los suministros en las cantidades y tamaños adecuados?						
4	¿Se entregan los suministros en buen estado y oportunamente?						
5	¿Se cumple con las frecuencias de recolección en las fechas establecidas?						
6	¿El servicio de recolección se realiza en los horarios acordados?						
7	¿Cuándo adquiere el servicio es atendido con buen trato y con cordialidad?						
8	¿Cuándo solicita el servicio se le brinda respuesta rápida y oportuna a sus necesidades de recolección?						
9	¿La recolección se realiza en el menor tiempo posible?						
10	¿Cuál es su grado de satisfacción respecto a la prestación del servicio de recolección?						

A continuación encontrara la tabla A12-2 en la cual se encuentran registrados la calificación dada por los 57 clientes.

Clientes	ENCUESTA DE SATISFACCION									
	Nº.1	Nº.2	Nº.3	Nº.4	Nº.5	Nº.6	Nº.7	Nº.8	Nº.9	Nº.10
20	5	5	5	5	4	4	5	5	4	4
21	5	5	5	5	4	5	5	5	5	5
31	5	5	5	5	1	5	5	5	2	3
32	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
35	5	5	5	5	5	3	5	5	4	4
40	5	5	5	5	3	5	5	3	5	4
44	5	5	5	5	3	3	5	5	5	3
47	5	5	5	5	4	4	5	5	4	5
64	5	5	5	5	5	5	5	5	3	4
68	5	5	2	3	3	4	3	5	4	3
69	5	5	5	5	5	5	5	3	5	5
74	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4
82	5	5	5	5	5	4	5	5	5	5
85	5	5	5	5	5	5	5	5	4	5
93	5	5	5	5	5	5	5	3	5	4
97	5	5	5	5	4	4	4	5	5	5
99	5	5	5	5	2	5	5	5	4	5
112	5	5	2	5	5	5	2	5	5	4
117	5	5	5	5	3	3	5	5	5	4
127	5	5	5	5	3	3	5	5	3	3
131	5	5	5	5	5	4	5	5	5	5
137	5	5	5	5	4	2	5	5	4	5
139	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
148	5	5	5	5	4	5	5	5	4	4
153	5	5	5	5	3	5	5	4	5	4
190	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4
210	5	5	5	5	4	4	5	5	3	5
214	5	5	5	5	3	5	5	5	5	5
222	5	5	5	5	3	4	5	4	5	4
235	5	5	5	5	1	2	5	5	2	2
243	5	5	5	5	5	5	4	5	5	4
248	5	5	5	5	4	3	5	4	3	3
249	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

Cientes	Nº.1	Nº.2	Nº.3	Nº.4	Nº.5	Nº.6	Nº.7	Nº.8	Nº.9	Nº.10
296	4	5	4	5	4	4	4	4	4	4
329	5	5	5	5	2	4	5	5	2	3
331	5	5	5	5	3	4	5	5	5	5
342	5	5	5	5	2	5	5	5	3	4
348	5	5	5	5	4	3	5	5	4	4
376	5	5	5	5	5	5	5	3	5	5
380	5	5	5	5	4	5	5	5	5	4
385	5	5	5	5	4	4	5	5	3	5
386	5	5	5	5	3	5	5	5	5	5
388	5	5	5	5	3	5	5	3	5	4
402	5	5	5	5	1	2	5	5	2	2
416	5	5	5	5	4	5	5	5	5	4
417	5	5	5	5	4	3	5	5	3	3
418	5	5	5	5	5	5	5	4	5	5
429	5	5	4	5	4	4	4	5	4	4
431	5	5	5	5	3	5	5	5	2	3
436	5	5	5	5	5	4	5	5	4	5
446	5	5	5	5	2	5	5	5	3	4
447	5	5	5	5	4	3	4	3	4	4
478	5	5	5	5	4	5	5	5	4	5
480	5	5	5	5	5	4	5	5	3	4
494	5	5	5	5	4	5	4	5	4	4
595	5	5	5	5	5	5	5	4	3	4
841	5	5	5	5	5	4	5	5	4	5

Tabla A12-3. Número de encuestas por pregunta y criterio de evaluación

PREGUNTAS	NUNCA	CASI NUNCA	RARA VEZ	CON FRECUENCIA	SIEMPRE
Nº.1	0	0	0	1	56
Nº.2	0	0	0	0	57
Nº.3	0	2	0	2	53
Nº.4	0	0	1	0	56
Nº.5	3	4	12	18	20
Nº.6	0	3	8	16	30
Nº.7	0	1	1	6	49
Nº.8	0	0	6	6	45
Nº.9	0	5	10	16	26
Nº.10	0	2	8	25	22

EVALUACIÓN DE RESULTADOS

La empresa Edepsa Soluciones ambientales ha establecido en su sistema integrado de gestión una meta de cumplimiento para el indicador de satisfacción al cliente en valores mayores al 95%.

De acuerdo a este juicio valorativo se declara que hay inconformidad en los numerales 8, 9, 6 y 5, preguntas relacionadas con la atención directa del cliente.

A continuación se muestran los resultados obtenidos.

Tabla A12-3. Número de encuestas por pregunta y criterio de evaluación

PREGUNTAS	NUNCA	CASI NUNCA	RARA VEZ	CON FRECUENCIA	SIEMPRE
Nº.1	0	0	0	1	56
Nº.2	0	0	0	0	57
Nº.3	0	2	0	2	53
Nº.4	0	0	1	0	56
Nº.5	3	4	12	18	20
Nº.6	0	3	8	16	30
Nº.7	0	1	1	6	49
Nº.8	0	0	6	6	45
Nº.9	0	5	10	16	26
Nº.10	0	2	8	25	22

Tabla A12-4. Límites de Evaluación por criterio.

Criterio	Calculo	Rango	Porcentaje
Nunca	$57 * 1$	0 – 57	20%
Casi Nunca	$57 * 2$	58 – 114	40 %
Rara vez	$57 * 3$	115 – 171	60 %
Con Frecuencia	$57 * 4$	171 – 228	80 %
Siempre	$57 * 5$	229 - 285	100 %

TablaA12-5.Resultados Totales

Preguntas	Puntaje Total	%	Calificación
Nº.1	285	100 %	Siempre
Nº.2	284	99,6 %	Siempre
Nº.3	283	99,2 %	Siempre
Nº.4	277	97,1 %	Siempre
Nº.5	244	85,6 %	Siempre
Nº.6	238	83,5 %	Siempre
Nº.7	267	93 %	Siempre
Nº.8	219	76 %	Con Frecuencia
Nº.9	234	82 %	Siempre
Nº.10	274	96 %	Siempre

Figura A12-1.Encuesta de satisfacción

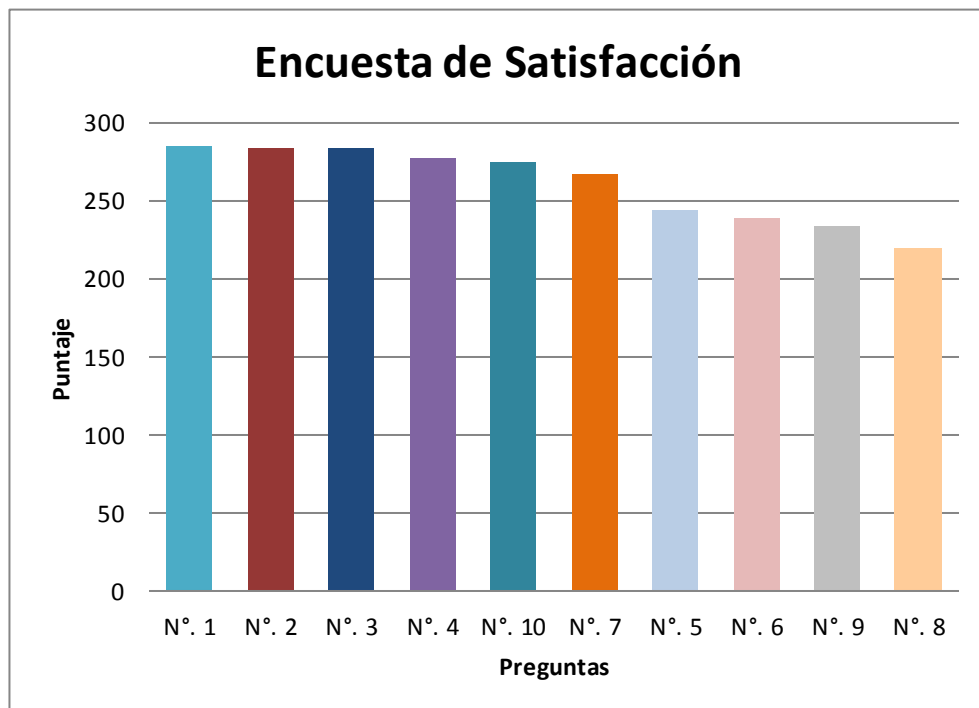
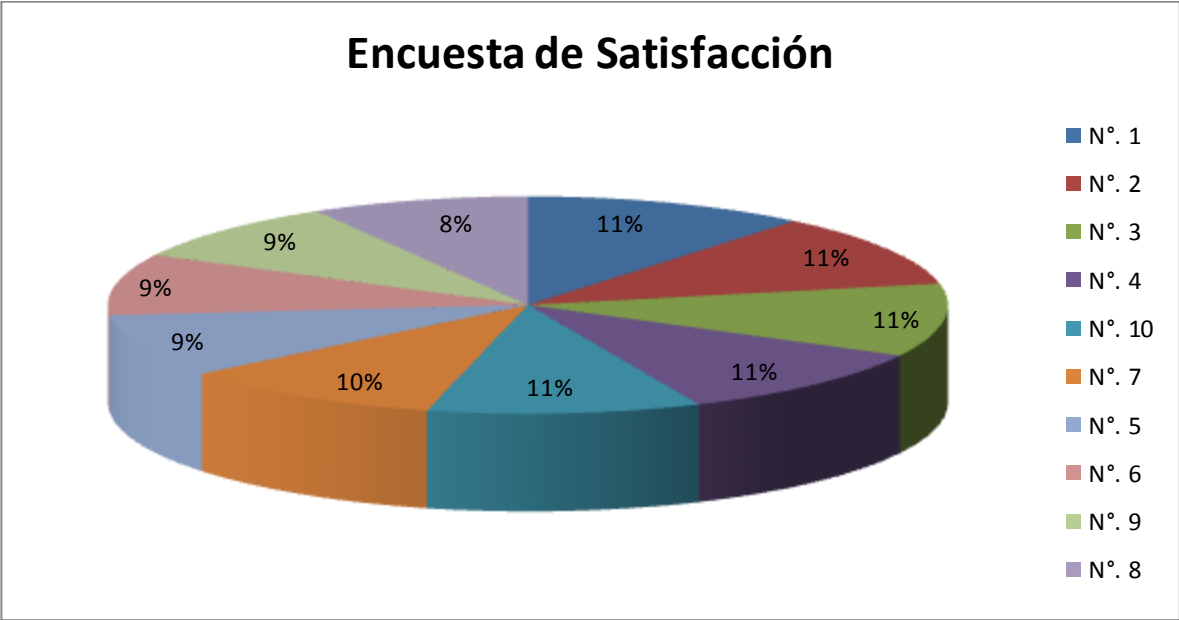


Figura A12-2. Resultados encuesta de satisfacción



ANEXO M DIAGRAMA CAUSA – EFECTO

1. Análisis del problema.

La insatisfacción de los clientes por el servicio prestado es el problema que hoy aqueja a las empresas debido a la disposición de oferta que posee el mercado en algunos sectores constituidos. Situación que puede incidir en la cancelación del servicio prestado por parte de Edepsa (Contrato de Cumplimiento), generando de esta forma una reducción de la rentabilidad y una pérdida de credibilidad en su imagen corporativa.

1.1 Causas

Talento Humano: El perfil y la formación del talento humano del departamento de logística no es el adecuado, porque no posee conocimiento previo de herramientas y métodos para crear una factible política de inventarios para el aprovisionamiento y distribución de insumos y de igual forma para realizar una efectiva programación de la ruta de recolección.

Recolección RESPEL: Los conductores y operarios se encuentran en la primera línea de contacto con el cliente, por esta razón deben cumplir con una excelente calidad en el servicio para asegurar su permanencia con la organización. Por consiguiente una inadecuada programación en las rutas de recolección y un análisis erróneo en la capacidad de servicio prestado generaría retrasos e incumplimientos que de una u otra forma afectarían la relación entre el cliente y la primera línea de contacto creando desconfianza y desmotivación.

Sistema de información: El sistema de información es fundamental en una organización para sincronizar los procesos que convergen en el objetivo corporativo de la empresa, sin un adecuado sistema de información habrá

tergiversación de la información, flujo de comunicación cortado, desactualización, confusión y malentendidos con los clientes, por este motivo es necesario poseer una adecuada herramienta ofimática(Sistema ERP) que permita la sincronización armonizada entre los diferentes procesos de la organización.

Dotación de Insumos: La empresa dentro del contrato Comercial se encuentra en la obligación de la distribución de los insumos que sean necesarios para con sus clientes, con el fin de facilitar su proceso de almacenamiento de residuos peligrosos, sin embargo se presentan olvidos por parte de los operadores logísticos, errores en la ficha de verificación de insumos por distribuir y una desorganizada planeación en la compra de insumos con altos costos por reaprovisionamiento.

1.2 Efectos

Organización: La organización se ve afectada por la ejecución tardía de sus actividades, funciones y procedimientos con ausencia de un adecuado cronograma de tareas que permitan proyectar las labores a realizar. Hay inconsistencias en la organización y el orden de la documentación que permiten crear priorización en la escala del servicio prestado por la empresa

Cliente: El cliente expresa inconformidad por el inadecuado servicio que recibe, haciéndolo saber a través de quejas, reclamos, exigencias en la oportuna recolección de sus residuos peligrosos y en la pertinente dotación de suministros para sus labores de gestión ambiental.

Documentación: La documentación se ve afectada por el inexacto flujo de información que afecta la veracidad en el registro y la documentación de los formatos que tienen relación directa con el cliente, entre algunas observaciones se evidencian ciertas inconsistencias en la tarifa de cobro por desactualización en la

renovación de los contratos, incorrecta asignación de las cantidades de los suministros a distribuir e inconsistencias en las direcciones de los clientes por falta de seguimiento y control en la operación.

Proveedores: Algunas consecuencias son el aprovisionamiento tardío que genera demora en la distribución de insumos para con sus clientes, el reaprovisionamiento por deficientes políticas de inventarios que se ven reflejadas en el aumento de los costos de operación que influyen indirectamente en gestión del procesos de almacenamiento de residuos peligrosos por parte de los usuarios de la organización.

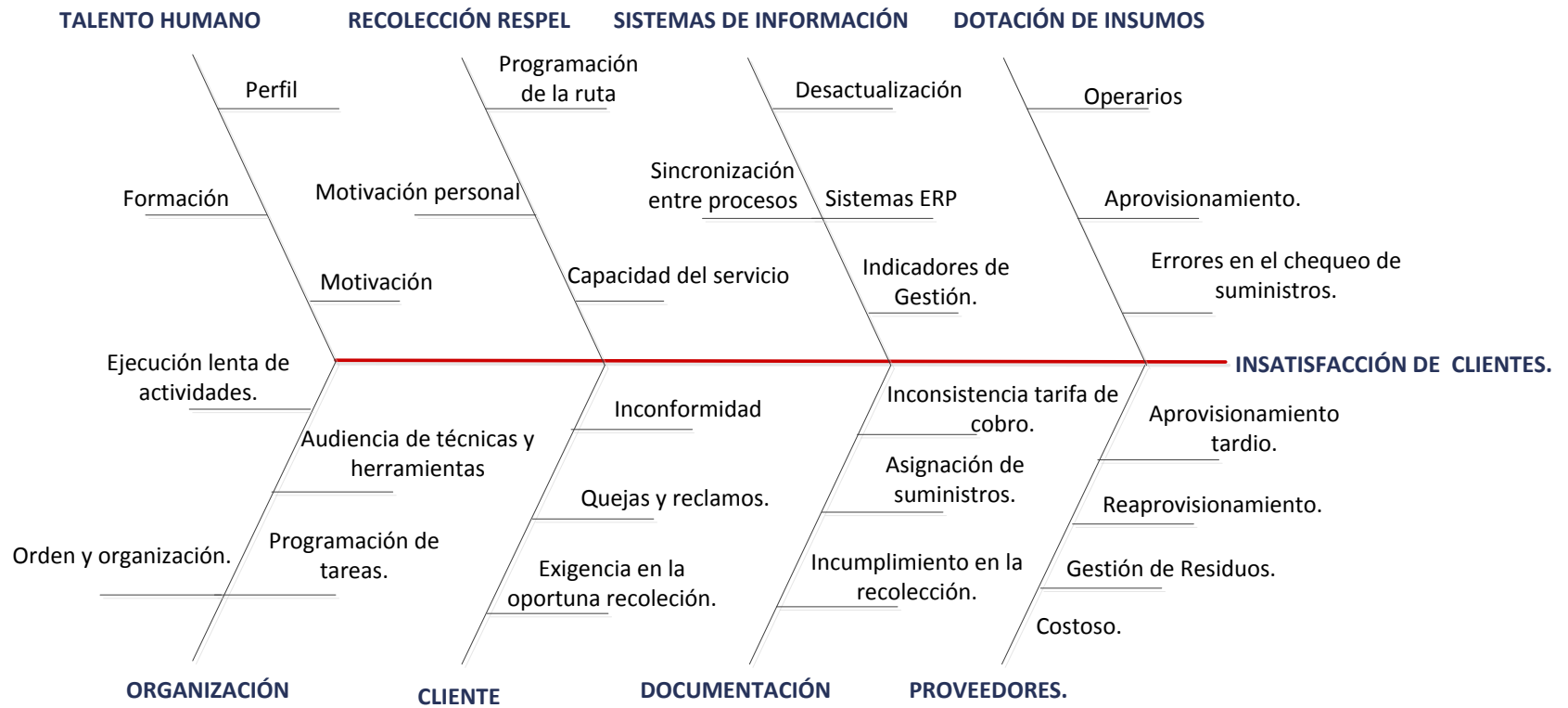
La ruta de recolección es programada ineficientemente debido a inconsistencias en la asignación de entidades ubicadas en lugares con grandes distancias entre sí, razón por la cual el tiempo empleado en dicha recolección es mayor al deseado aumentando los gastos de la empresa.

Este proyecto se centrara en la realización de las rutas de recolección de la línea hospitalaria de la meseta de Bucaramanga que comprende residuos infecciosos y químicos, asimismo en la rama de los residuos infecciosos se encuentran los biosanitarios, anatomopatológicos, corto punzantes, restos animales, miembros y fetos, y en cuanto a los residuos químicos se encuentra la manipulación de elementos mercuriales, farmacéuticos y otros autorizados.

1.3 Diagrama Ishikawa

Una vez establecidas las causas y efectos se realiza el diagrama Ishikawa como se ve en la figura a13-1.

Figura A13-1. Diagrama Ishikawa



ANEXO N PROCESO DE LA GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS PELIGROSOS:

- **Asignación de clientes:** Consiste en la selección de los clientes a quienes se les realizará el servicio de recolección y enlistará en el documento “Ruta de Recolección Hospitalaria”. El proceso es realizado con un día de anterioridad bajo la responsabilidad del auxiliar logístico.

La política de selección de clientes es variable dependiendo de la frecuencia de recolección que se estipuló en el contrato, el área de influencia en que se desenvuelve, la actividad económica y de la solicitud de los clientes a causa de su generación de residuos.

- **Programación de rutas:** Consiste en establecer la secuencia de recolección a los clientes, dicha secuencia es determinada por el conductor basado en su experiencia y conocimiento de la vía, en la **tabla A14-1** se encuentran los horarios de las rutas de recolección, sujetos a cambios debido a las necesidades del cliente.

Los clientes reciben una llamada previa para concretar el servicio e incluirlos a la ruta de recolección. Por otra parte se presentan casos especiales de usuarios que poseen horarios con muy poca flexibilidad para atender y entregar los residuos peligrosos generados, por tal motivo se ve afectado el cumplimiento del servicio brindado, causando insatisfacción que en ocasiones ha provocado la desafiliación de usuarios disminuyendo en tal medida la rentabilidad financiera de Edepsa Soluciones Ambientales.

- **Recolección de residuos peligrosos:** Una vez realizada la programación de la ruta, inicia el proceso de recolección de residuos peligrosos para la cual el conductor asignado solicita la cantidad de insumos necesarios, los elementos de protección personal, los viáticos y la ruta de recolección.

Tabla A14-1. Horarios rutas de recolección de residuos hospitalarios

RUTA	PROGRAMACIÓN
Girón	Lunes, martes o miércoles de la primera semana del mes.
Piedecuesta	En el transcurso de la última semana del Mes
Bucaramanga	Se lleva a cabo entre los días lunes, martes, jueves y viernes, de acuerdo a la frecuencia de recolección por cada usuario.
Málaga	En el intervalo de la segunda semana del mes, se verifica la frecuencia de recolección de los respectivos usuarios y el costo presupuestado para el viaje.
San Gil	Se desarrolla durante la última semana del mes, se verifica la frecuencia de recolección y el costo presupuestado para el viaje.
California	Se realiza para la tercera semana del mes, se verifica la frecuencia de recolección y el costo presupuestado para el viaje.
Lebrija -Yondo - Barranca Sabana de Torres Puerto Wilches	Se realiza el primer día de la semana del Mes según calendario laboral, de acuerdo a las frecuencias y a las necesidades que requieren los clientes.

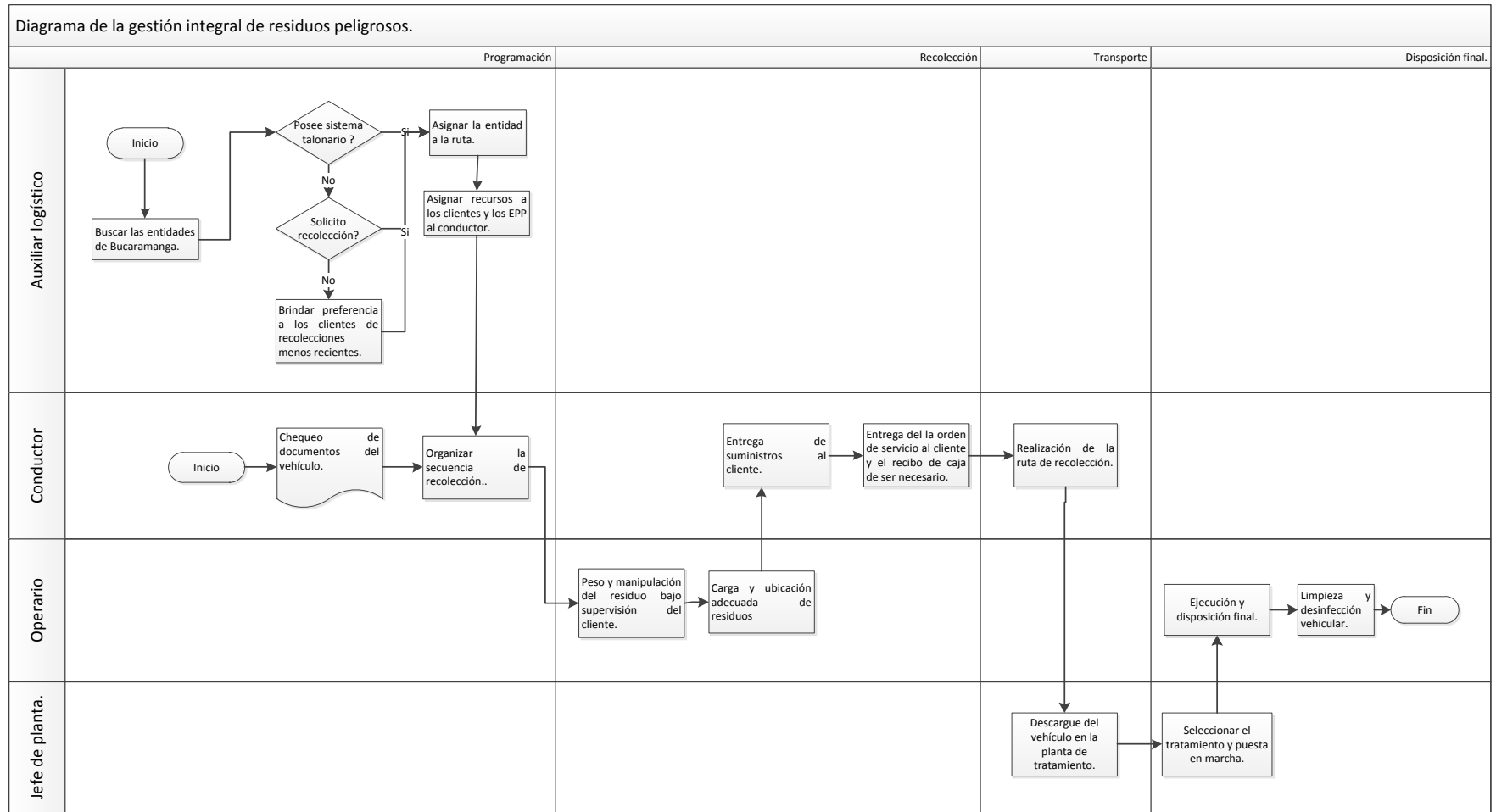
- **Transporte de residuos peligrosos:** Cuando el vehículo se encuentra en movimiento, el conductor porta un manifiesto de transporte, en el cual especifica el remitente o cliente, transportador, destinatario, tipo de residuos y peso, por otra parte el conductor debe mantener una hoja de seguridad de residuos transportados, para el buen manejo de ellos.

En caso de accidentes el conductor o el operario se comunica inmediatamente con EDEPSA E.S.P. e informa sobre lo ocurrido, igualmente la empresa comunica a la autoridad ambiental y pone en marcha un plan de contingencia o de emergencias

Al finalizar la ruta de recolección el vehículo es conducido a la planta de tratamiento donde se realiza el descargue de los desechos, pesado y posterior almacenamiento en el cuarto frío, actividad que se encuentra bajo la responsabilidad de los operarios de planta, descargados los residuos peligrosos, el conductor debe lavar con hipoclorito el furgón con el fin de esterilizarlo.

ANEXO O. DIAGRAMA GESTION INTEGRAL DE RESIDUOS PELIGROSOS

Figura 15-1. Diagrama de gestión integral de residuos peligrosos.



ANEXO P. GENERADORES RESPEL

Las fuentes van desde la industria hasta el comercio, pasando por la agricultura, la asistencia médica y el hogar, a continuación encontrara algunas *fuentes o sectores generadoras de RESPEL*:

GENERADOR RESPEL	SECTOR
Actividades productivas	<ul style="list-style-type: none"> • Sector industrial. • Minero- energético. • Agroindustrial. • Infraestructura, etc
Sector de servicios	<ul style="list-style-type: none"> • Salud • Transporte. • Laboratorios. • Investigación • Administración pública, etc
Sociedad de consumo	<ul style="list-style-type: none"> • Pilas • Baterías • Envases de plaguicidas • Solventes. • Lámparas de mercurio • Desechos electrónicos, etc
Hogares	<ul style="list-style-type: none"> • limpiadores domésticos • Cosméticos • Productos para mantenimiento del hogar, etc.
Sector Industrial	

ANEXO Q. PROBLEMAS DE OPTIMIZACIÓN

Dentro de los problemas de optimización se encuentran los métodos clásicos disponibles en la tabla A17-1.

Existen decisiones que no pueden ser representadas de forma adecuada mediante variables continuas. Por ejemplo, las decisiones de inversión son variables discretas, la fórmula matemática de algunos problemas de optimización especiales por no incluir alguno de los componentes se presenta en la tabla A17-2.

Tabla A17 -2. Problemas especiales de optimización

Problema mixto complementario (mixed complementary problem) MCP	$x^T F(x) = 0$ $x \in R^n$ $F: R^n \rightarrow R^n$
Optimización no lineal sin restricciones	$\min_x f(x)$ $f: R^n \rightarrow R$
Ajuste no lineal mínimo cuadrático.	
Programación multiobjetivo (multiobjective programming)	$\min_x (f_1(x), \dots, f_k(x))$ $Ax = b$ $x \geq 0$ $x \in R^n, c \in R^n, A \in R^{m \times n}, b \in R^m$ $f_i(x) : R^n \rightarrow R$

Las aplicaciones de programación lineal (PLE) caen dentro de dos categorías: directa y transformada. En la categoría directa, la naturaleza de la situación impide la asignación de valores fraccionarios a las variables del modelo. En la categoría transformada se utilizan variables enteras auxiliares para convenir analíticamente situaciones insolubles en modelos que se pueden resolver por medio de algoritmos de optimización disponibles^[15].

Tabla A17-1. Problemas clásicos de optimización

Programación lineal (Linear programming) LP		$\min_x c^t x$ $Ax = b$ $x \geq 0$ $x \in R^n, c \in R^n, A \in R^{m \times n}, b \in R^m$
Programación lineal entera. (PLE)	Programación entera pura (pure integer programming) PIP	Todas las variables son enteras.
	Programación entera binaria (binary integer programming) BIP	Si todas las variables son binarias.
	Programación lineal entera mixta (Mixed integer programming) MIP Si algunas son enteras o binarias y el resto continuas.	$\min_x c^t x + d^T y$ $Ax + By = b$ $x, y \geq 0$ $x \in Z^n, y \in R^t, c \in R^n, d \in R^t$ $A \in R^{m \times n}, B \in R^{m \times t}, b \in R^m$
Programación cuadrática (quadratic programming) QP		$\min_x c^t x + \frac{1}{2} x^T Q x$ $Ax = b$ $x \geq 0$ $x \in R^n, c \in R^n, A \in R^{m \times n}$ $Q \in R^{n \times n}, b \in R^m$
Programación no lineal (non linear programming) NLP		$\min_x f(x)$ $g(x) = 0; h(x) \leq 0$ $l \leq x \leq u$ $f: R^n \rightarrow R \quad g, h: R^n \rightarrow R^m$

Fuente: http://www.gams.com/docs/contributed/modelado_en_gams.pdf

**ANEXO R. ESTUDIOS MÁS POSICIONADOS A TRAVÉS DE LA HISTORIA ENTRE
2006-2010**

Partiendo de la tabla. (Tipos de TSP, métodos y enfoques empleados) los 10 estudios más posicionados sobre el TSP través de la historia, cuyos periodos de publicación oscilan entre 1971 y 1999, han abordado el TSP original. Respecto a 2006-2010, dos de los 10 documentos que forman parte del Top 10 de lo más citado, abordan el TSP original, en tanto que los demás se enfocan en las siguientes variaciones: PTSP (dos estudios), m-TSP (dos estudios), TSPDL (un estudio), TSPTW (un 40 estudio) y DTSP (un estudio) y GTSP (un estudio).

Tabla A28-1. Tipos de TSP, métodos y enfoques empleados

Autores	Año	Tipo	Método(s) basado(s) en:	Campo de inspiración	Tamaño Máx. probado
Held, M. y Karp, R.	1971	TSP	Relajación lagrangiana	Ramificación y acotamiento	64
Cerny, V.	1985	TSP	Recocido simulado, Método de Montecarlo	Termodinámica	200
Angeniol, B., de La Croix, V. y Le Texier, J.	1988	TSP	Mapas autoorganizados de Kohonen, Red neuronal	Biofísica del cerebro	1000
Laporte, G.	1991	TSP	N/A	N/A	N/A
Reinelt, G.	1991	TSP	N/A	N/A	N/A
Bentley, J.	1992	TSP	Inserción (vecino más cercano, ...), basados en árboles y búsqueda local (2-opt, 3-opt)	Estrategias rápidas de inicialización y búsqueda de vecindades	1000000
Fogel, D.	1993	TSP	Programación evolutiva	Evolución biológica	1000
Dorigo, M. y Gambardella, L.	1997	TSP	Sistema de Colonia de Hormigas, 3-opt (Búsqueda local)	Comportamiento de hormigas reales y búsqueda de vecindades	1577

Autores	Año	Tipo	Método(s) basado(s) en:	Campo de inspiración	Tamaño Máx. probado
Stuetzle, T. y Hoos, H.	1997	TSP	Sistema de Hormigas Max-Min, 2-opt, 3-op.	Comportamiento de hormigas reales y búsqueda de vecindades	783
Larrañaga, P. et al.	1999	TSP	Algoritmos genéticos. GENITOR	Evolución biológica y su base genético-molecular	48
Bektas, T.	2006	m-TSP	N/A	N/A	N/A
Carter, A. y Ragsdale, C.	2006	m-TSP	Algoritmos genéticos	Evolución biológica y su base genético-molecular	150
Snyder, L y Daskin, M.	2006	GTSP	Algoritmos genéticos y 2-opt (Búsqueda local)	Evolución biológica y su base genético-molecular; búsqueda de vecindades	442
Campell, A.	2006	PTSP	Segregación de clientes y resolución del problema Reducido.	Fragmentación urbana	1000
Nguyen, H., et al.	2007	TSP	Algoritmos genéticos, LK (Búsqueda local)	Evolución biológica y su base genético-molecular, búsqueda de vecindades	1904711
Liu, Y.	2007	PTSP	Búsqueda dispersa Híbrido. Con búsqueda local (aceptación por umbrales)	Métodos evolutivos (Estrategias sistemáticas para combinar reglas de decisión), búsqueda de vecindades	100
Carrabs, F., Cordeau, J. y Laporte, G.	2007	TSPPDL	Búsqueda de entorno variable y operadores de búsqueda local	Cambios sistemáticos de entorno dentro de una búsqueda de vecindades	721

Autores	Año	Tipo	Método(s) basado(s) en:	Campo de inspiración	Tamaño Máx. probado
Ohlmann, J. y Thomas, B.	2007	TSPTW	Variante del Recocido simulado: (Compressed annealing).	Recocido del acero, Métodos de penalización	200
Duan, H. y Yu, X.	2007	TSP	Sistema de Colonia de Hormigas y Algoritmos meméticos	Comportamiento de hormigas reales y Evolución cultural de los individuos	51
Savla, K., Frazzoli, E. y Bullo, F.	2008	DTSP	Alternating Algorithm. Algoritmo de aproximación de factor constante	Solución óptima del TSP Simétrico. Algoritmos de aproximación	N/A

Fuente: tesis, Heurísticas inspiradas en el análisis sistémico del vecino más cercano.

ANEXO S. POSIBLES FORMULACIONES DEL TSP

El problema puede formularse como:

$$\min \sum_{(i,j) \in E} c_{ij} x_{ij} \quad (1.1)$$

el costo total de la solución es la suma de los costos de los arcos utilizados

$$\text{s. a. } \sum_{j \in \Delta^+(i)} c_{ij} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in V \quad (1.2)$$

$$\sum_{i \in \Delta^-(j)} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in V \quad (1.3)$$

$$\sum_{i \in S, j \in \Delta^+(i)/S} x_{ij} \geq 1 \quad \forall S \subset V \quad (1.4)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall (i,j) \in E \quad (1.5)$$

Esta formulación fue propuesta por Dantzing, Fulkerson y Johnson, las variables binarias x_{ij} indican si el arco (i, j) es utilizado en la solución, las restricciones (1.2) indica que la ruta debe abandonar cada nodo una sola vez, la restricción (1.3) indica que la ruta debe llegar a cada nodo una sola vez, finalmente la restricción (1.4) es llamada restricción de eliminación de sub-tours e indican que todo subconjunto de nodos S debe ser abandonado al menos una vez. Esta solución viola la restricción 1.4 para $S = \{0, 1, 2\}$, existen diferentes tipos de restricciones de eliminación de sub-tours

Segunda posible formulación del (TSP)

Formulación: un individuo tiene que visitar $n-1$ ciudades específicas partiendo de una ciudad inicial y volver a ella, de forma que la ruta elegida sea la más corta o más barata), en el que cada ciudad del tour se visita exactamente una vez.

En esencia, el problema es un modelo de asignación con restricciones adicionales que garantizan la exclusión de subviajes en la solución óptima. En forma específica, en el caso con n ciudades se define.

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si se llega de la ciudad } i \text{ a la ciudad } j \\ 0, & \text{en cualquier otro caso.} \end{cases}$$

Si d_{ij} es la distancia de la ciudad i a la ciudad j , el modelo del agente viajero es el siguiente:

$$\text{Minimizar } z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} x_{ij}, \quad d_{ij} = \infty \text{ para } i = j$$

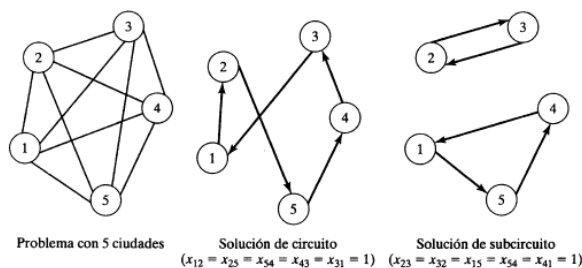
Sujeta a:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

La restricción (1) define que de cada nodo se sale una sola vez, de la restricción (2) indica que a cada nodo solo se llega una vez, En general el problema de asignación producirá soluciones de subcircuito, más que un circuito completo que abarque todas las n ciudades. En la figura A8-1. Se demuestra un problema con 5 ciudades. Los arcos representan rutas en dos sentidos. También se ve en la figura una solución de circuito y subcircuito del modelo de asignación asociado. Si las asignaciones forman una solución de circuito, el circuito es óptimo. En caso contrario se agregan más restricciones al modelo de asignación para eliminar los subcircuitos. Más adelante en esta sección se describirá el uso de estas restricciones [21].

Figura A19-1. Ejemplo TSP con 5 ciudades, soluciones de circuito y subcircuito.



Fuente: libro. Programación lineal entera, por Handy A.

Tercera posible formulación del (TSP)

Sea c_{ij} la distancia de la ciudad i a la j , y las variables:

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{si el tramo } k \text{ va de la ciudad } i \text{ a la } j \\ 0, & \text{en caso contrario.} \end{cases}$$

La función a minimizar será:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n c_{ij} x_{ijk}$$

Sujeto a las siguientes condiciones:

$$\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \sum_{k=1}^n x_{ijk} = 1, \quad i = 1, \dots, n; \text{ (de cada ciudad solo se sale una vez)}$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n x_{ijk} = 1, \quad k = 1, \dots, n; \text{ (cada tramo } k \text{ solo se une dos ciudades)}$$

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n \sum_{k=1}^n x_{ijk} = 1, \quad j = 1, \dots, n; \text{ (a cada ciudad solo llega una vez)}$$

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n x_{ijk} = \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq j}}^n x_{jrk+1}, \quad j = 1, \dots, n; \quad k = 1, \dots, n-1;$$

El punto de llegada del tramo k es el punto de partida del tramo $k+1$

$$\sum_{j=2}^n x_{1ji} = 1; \quad \text{(en el primer paso se sale de 1),}$$

$$\sum_{j=2}^n x_{j1n} = 1; \quad \text{(en el último paso se llega a 1),}$$

ANEXO T. TSPTW POSIBLES FORMULACIONES.

Posible formulación TSPTW [15]

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si se va inmediatamente despues de } i \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad i, j = 1, \dots, n$$

El problema se formula como sigue:

$$\min \sum_{i,j=1}^n d_{ij} x_{ij}$$

Sujeto a
$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \quad i = 1, \dots, n;$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} - \sum_{j=1}^n x_{ji} = 0, \quad i = 1, \dots, n;$$

$$x_{ij} = 1 \rightarrow D_i + t_{ij} \leq D_j, \quad i = 2, \dots, n; \quad j = 1, \dots, n$$

$$x_{ij} = 1 \rightarrow D_j \geq e_i + t_{ij}, \quad j = 2, \dots, n;$$

$$e_i \leq D_i \leq L_i, \quad i = 1, \dots, n;$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \quad i, j = 1, \dots, n.$$

Otra posible formulación del (TSPTW)

Sea $G = (N, A)$ un grafo, donde $N = \{0, 1, \dots, n\}$ es el conjunto de n nodos mas el centro de distribución $\{0\}$ y el conjunto de arcos es $A = \{(i, j) : i, j \in N, i \neq j\}$. Las ventanas de tiempo están representadas con $[e_i, l_i]$ y, para cada arco $(i, j) \in A$ un costo asociado (c_{ij}) y un tiempo de recorridos (t_{ij}) . La matriz de tiempos de recorrido es simétrica $(t_{ij} = t_{ji})$ y con valores enteros positivos $(t_{ij} > 0)$. [23]

$$\min \sum_{(i,j) \in EA} c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

Sujeto a

$$\sum_{j \in N} X_{ij} = 1 \quad \forall i \in N \quad (2)$$

$$\sum_{i \in N} X_{ji} = 1 \quad \forall j \in N \quad (3)$$

Si $X_{ij} = 1$ entonces $p_i + t_{ij} \leq p_j \quad \forall (i,j) \in A \quad (4)$

$$e_i \leq p_i \leq l_i \quad \forall i \in N \quad (5)$$

$$X_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall (i,j) \in A \quad (6)$$

La variable p_i representa el tiempo de partida desde el nodo i . Las ecuaciones 2 y 3 definen un problema de asignación de dimensión $(n + 1)$. Las ecuaciones 4 y 5 representan las restricciones de ventanas de tiempo. Usando una constante grande M , la restricción puede ser linealizada de la siguiente manera.

$$M(1 - X_{ij}) \geq p_i + t_{ij} - p_j \quad \forall (i,j) \in A \quad (7)$$

Debido a que en este caso la definición del problema asegura que:

$$p_i + t_{ij} - p_j \leq l_i + t_{ij} - e_j$$

Entonces se elige un M de acuerdo a la siguiente definición:

$$M = \max \{ l_i + t_{ij} - e_j, 0 \}$$

Se define un tiempo de espera a priori ϖ_{ij} el cual es el tiempo máximo posible de espera entre dos nodos.

$$\varpi_{ij} = \max \{ e_j - e_i - t_{ij}, 0 \}$$

El verdadero tiempo de espera se define como:

$$\omega_j = \max \{ e_j - p_i - t_{ij}, 0 \} \leq \max \{ 0, e_j - e_i - t_{ij} \} = \bar{\omega}_{ij}$$

$$\omega_j \leq \bar{\omega}_{ij}$$

ANEXO U. GENERALIDADES DE ALGUNAS META HEURÍSTICAS

a) Algoritmo de recocido simulado

El recocido simulado (RS) escapa del atrapa miento en un óptimo local Utilizando una condición de probabilidad que acepta o rechaza un movimiento inferior (Siempre se acepta un mejor movimiento). La idea de determinar la probabilidad de aceptación del siguiente movimiento de búsqueda se explica como sigue:

$$\text{Maximizar o minimizar } z = F(s), s \in S$$

A medida que la cantidad de iteraciones se incrementa, el **RS** busca una determinación más selectiva de estrategias de solución utilizando un parámetro ajustable T , llamado **temperatura**, es decir se hace progresivamente más pequeño de acuerdo con un **programa de temperatura**.

b) Algoritmo genético

El algoritmo genético (AG) imita el proceso de evolución biológica de “sobrevivencia del más apto”. Cada solución factible de un problema se considera como un **cromosoma** codificado por un conjunto de **genes**, La idea general del AG es seleccionar dos padres a partir de una población. Los genes de los dos padres se **crusan** entonces y (posiblemente) **mutan** para producir dos hijos. La descendencia reemplaza a los dos cromosomas más débiles (menos aptos) en la población, y el proceso de seleccionar nuevos padres se repite.

c) Algoritmo de colonia de hormigas

(Ant systems) inspirados en la estrategia empleadas por las colonias de hormigas para buscar alimentos. Por cada camino que recorre la hormiga en busca de su alimento libera Feromonas a su paso, la cantidad de esta depende de la longitud del camino y la calidad del alimento encontrado. Si una hormiga no detecta la presencia de feromona se mueve aleatoriamente; pero si percibe dicha sustancia, decidirá con alta probabilidad moverse por los trayectos con más cantidad, lo que a su vez provocara un aumento de la feromona depositada en esa zona. De este proceso emerge un comportamiento denominado auto catalítico: cuanto más hormigas sigan cierto trayecto, más atractivo este se vuelve para ellas.

d) Meta-heurística hibrida de la colonia de hormigas y la búsqueda tabú

De acuerdo a la literatura, uno de los enfoques más competitivos para el VRPTW es la meta-heurística de la colonia de hormigas (ACO) y la búsqueda Tabú (TS). Sin embargo, algunos problemas poseen un enfoque de ventanas de tiempo y grupos-dependientes denominado (VRPTWCD) *vehicle routing problem with time windows and cluster-dependent tour starts*, este implica la necesidad de una extensión a estos enfoques. Segundo, la heurística puede ser utilizada para un cálculo eficiente de soluciones iniciales, pero necesita la búsqueda local (como un sinónimo de búsqueda en la vecindad) componente de la optimización encargado de lograr mejores soluciones.

ANEXO V. CONCEPTOS CLAVES DE LA BÚSQUEDA TABÚ.

Tabla A22-1. Conceptos claves de búsqueda tabú.

Elemento	Definición
Vecindad	<p>Se puede definir como el conjunto de todas las soluciones que se pueden encontrar a partir de una solución s' por medio de un movimiento σ, un movimiento puede ser una inserción, un intercambio puede ser una inserción, un intercambio o una eliminación de componentes en una solución s.</p> $N(s) = \{s' \in S: s \xrightarrow{\sigma} s'\}$ <p>Donde, $N(s)$ Representa la vecindad con respecto a s. S Representar una solución tomada del espacio de soluciones S. s' Es el vecino de s generado a partir del movimiento σ.</p>
Lista Tabú	<p>Es una lista creada para guardar una memoria de los movimientos que no se permiten (movimientos tabú) en la actual iteración. Esto con el fin de evitar movimientos que regresen a un punto de altura iteración anterior y de esta manera producir ciclos en la búsqueda. El buen manejo de la lista tabú nos lleva a explorar nuevas regiones.</p> <p>La lista puede contener:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Soluciones visitadas recientemente • Movimientos realizados recientemente • Atributos o características que tenían las soluciones visitadas. <p>Un movimiento permanece como tabú solo durante un cierto número de iteraciones. Pasadas estas iteraciones, la búsqueda puede estar en una región diferente y los movimientos guardados en la lista se pueden liberar del status tabú.</p>

Elemento	Definición
Criterios de Aspiración	<p>Permite omitir las restricciones tabú, con el fin de eliminar la clasificación tabú a un movimiento, cuando la solución de este es mejor que la solución obtenida hasta el momento.</p> <p>Por Default: Si todos los movimientos posibles son clasificados como tabú, entonces se selecciona el movimiento “menos tabú”.</p> <p>Por objetivo: Una aspiración de movimiento se satisface, permitiendo que un movimiento x sea un candidato para seleccionarse si, por ejemplo:</p> $F(x) < \text{mejor costo (En un problema de minimización)}$ <p>Por Dirección de Búsqueda: Un atributo de aspiración para la solución “s” se satisface si la dirección en “s” proporciona un mejoramiento y el actual movimiento en un movimiento de mejora. Entonces “s” se considera un candidato.</p>
Estrategia de intensificación	<p>El objetivo es explorar más detalladamente una zona determinada del espacio de soluciones con la posibilidad de encontrar en este conjunto una solución o un grupo de soluciones mejores que las conocidas.</p> <p>Una manera sencilla de hacerlo es disminuir el tamaño de la lista tabú, de manera que se permitan más movimientos de retroceso con el fin de explorar más detalladamente una determinada zona. Llevar a cabo este procedimiento puede generar ciclos por lo que hay que tener cierto cuidado al hacerlo.</p> <p>Otra estrategia planteada puede ser la de tomar un conjunto de buenas soluciones encontradas usando el algoritmo básico y repetir el algoritmo de búsqueda, tomando con solución inicial cada una de estas buenas soluciones.</p>

Elemento	Definición
Estrategia de Diversificación	Cuando una solución no se puede mejorar después de un determinado número de iteraciones es conveniente emplear el criterio de diversificación con el fin de generar soluciones que agreguen atributos o características significativamente diferentes a los encontrados en soluciones anteriores.
Criterio de parada.	Se establece al inicio del problema y se pueden usar los siguientes supuestos: <ul style="list-style-type: none"> • Establecer un número fijo de iteraciones sin que se mejore la última solución encontrada. • Estipular un tiempo límite de procesamiento del algoritmo. Fijar un número determinado de iteraciones

Fuente: [27]

ANEXO W. Cálculo del tiempo de servicio para pequeñas y medianas entidades

Fecha	Código	T. servicio
02/10/2013	20	2,9
02/10/2013	29	2,7
02/10/2013	99	1,9
02/10/2013	130	3,3
02/10/2013	253	5,5
02/10/2013	371	2,7
02/10/2013	418	3,3
02/10/2013	447	3,6
02/10/2013	613	4,9
02/10/2013	658	4,3
02/10/2013	829	2,1
02/10/2013	1001	4,0
03/10/2013	48	6,3
03/10/2013	117	3,2
03/10/2013	131	2,2
03/10/2013	135	4,4
03/10/2013	259	6,5
03/10/2013	288	3,3
03/10/2013	342	3,9
03/10/2013	376	3,6
03/10/2013	402	4,9
03/10/2013	595	4,4
03/10/2013	774	1,8
03/10/2013	962	2,3
03/10/2013	1027	2,1
03/10/2013	1057	2,9
03/10/2013	1068	3,5
05/10/2013	68	4,9
05/10/2013	74	4,6
05/10/2013	148	3,4
05/10/2013	200	4,9
05/10/2013	376	4,7
05/10/2013	436	3,6
06/10/2013	200	5,6
06/10/2013	202	4,1

Fecha	Código	T. servicio
06/10/2013	436	2,6
06/10/2013	1067	5,1
11/10/2013	64	4,8
11/10/2013	74	4,6
11/10/2013	85	3,8
11/10/2013	202	1,9
11/10/2013	259	2,5
11/10/2013	371	4,0
11/10/2013	478	3,6
11/10/2013	613	4,9
11/10/2013	774	4,1
11/10/2013	908	4,0
11/10/2013	950	5,5
12/10/2013	68	6,5
12/10/2013	200	2,9
12/10/2013	436	5,6
12/10/2013	950	2,8
15/10/2013	23	3,5
15/10/2013	32	6,3
15/10/2013	65	3,6
15/10/2013	82	3,0
15/10/2013	135	4,9
15/10/2013	137	2,5
15/10/2013	367	4,9
15/10/2013	661	2,0
15/10/2013	989	1,8
15/10/2013	1001	4,9
16/10/2013	111	5,4
16/10/2013	329	4,1
16/10/2013	398	2,7
16/10/2013	613	3,4
16/10/2013	962	4,7
16/10/2013	964	4,0
18/10/2013	47	4,2
18/10/2013	74	4,9
18/10/2013	131	4,5
18/10/2013	211	4,9
18/10/2013	243	3,0
18/10/2013	259	4,6
18/10/2013	288	5,0

18/10/2013	293	4,9
Fecha	Código	T. servicio
18/10/2013	342	2,6
18/10/2013	371	4,3
18/10/2013	388	4,8
18/10/2013	447	2,2
18/10/2013	613	4,9
18/10/2013	774	2,9
18/10/2013	828	6,3
18/10/2013	830	2,1
18/10/2013	950	2,3
19/10/2013	68	6,8
19/10/2013	93	3,3
19/10/2013	200	5,1
19/10/2013	436	5,2
19/10/2013	567	6,3
24/10/2013	21	2,5
24/10/2013	65	5,9
24/10/2013	76	5,7
24/10/2013	97	3,1
24/10/2013	209	3,0
24/10/2013	311	6,3
24/10/2013	375	6,6
24/10/2013	379	4,9
24/10/2013	812	5,4
28/10/2013	22	4,2
28/10/2013	148	2,9
28/10/2013	317	6,7
28/10/2013	329	3,1
28/10/2013	1059	3,9
31/10/2013	316	3,7
31/10/2013	388	5,2
31/10/2013	446	3,7
31/10/2013	447	4,9
31/10/2013	661	2,0
31/10/2013	782	4,5
		3,8
		1,3

Teniendo en cuenta que la media está en 3,8 y su desviación esta en 1,3 se estipula el S_i en 5 minutos.

Calculo del tiempo de servicio para grandes entidades.

Fecha	Codigo	ti
02/10/2013	785	11,2
03/10/2013	785	12,8
05/10/2013	785	18,6
06/10/2013	785	13,7
11/10/2013	785	13,6
12/10/2013	785	10,4
15/10/2013	785	25,6
16/10/2013	580	25,3
16/10/2013	785	17,5
18/10/2013	785	25,2
19/10/2013	785	15,0
24/10/2013	785	12,2
28/10/2013	785	14,6
31/10/2013	785	16,6
		16,6

Se estipula el S_i en 17 minutos para grandes empresas.

ANEXO X. INSTRUCTIVO DEL USO DE LA APLICACIÓN DE RUTEO

La aplicación empleada en el ruteo vehicular se encuentra disponible en internet, en el siguiente link <http://www.ictsas.com/Mapas/index.php> , el procesamiento de la ejecución del programa puede realizarse desde cualquier dispositivo que tenga un navegador web preferiblemente Mozilla Firefox con acceso a internet , en cualquier momento del día, este aplicativo se encuentra alojado en el servidor APACHE.

1. Ingresar datos

Para la ejecución del programa se emplea como base datos relacionados a los clientes como los son nombre, dirección, teléfono, horario de atención y las coordenadas latitudinales, estas últimas servirán en la creación de la matriz de distancias y de tiempos que procesa google maps, el ingreso de estos datos se realiza de dos formas:

- *Ingreso de datos mediante un documento Excel.*

Figura A24 - 1. Pestaña Inicio



Fuente: Aplicación de ruteo disponible en: <http://www.ictsas.com/Mapas/clientes.php>

Para acceder a dicho proceso se escoge la opción inicio, en esta pestaña se selecciona el archivo Excel que contiene los clientes con sus respectivos datos

como se muestra en la tabla A24-1. Una vez ingresados los datos, se ejecuta el programa para máximo 50 clientes, puesto que google maps solo permite 2500 búsquedas por día lo que equivale a una matriz de 50 * 50.

Tabla A24-1. Datos a ingresar

COD	Nombre	Dirección	Latitud	Longitud	Si	Ventana_M	Ventana_T
1	GARAJE	CALLE NUMERO 17 53	7.109463	-73.119915	0	7:30-12:00	12:00-17:15
20	SALON ROSMY CABALLERO	CLL 32 # 29-27	7.125773	-73.116093	17	8:00-12:00	12:00-7:00
21	DROGUERIA SANEDIL	CRA 24 N°31-04	7.124304	-73.120669	17	8:30-12:30	13:00-20:30
22	DROGUERIA MODERNA	CRA 22 # 9 - 14	7.137593	-73.125411	17	7:00-12:00	12:00-20:00
23	DROGUERIA TICO	CLL 8 # 20 - 57	7.138436	-73.126679	17	8:00-12:00	14:30-20:00
29	DROGUERIA ALEMANA LOS PINOS	CRA 33 # 14 - 02	7.134239	-73.112646	17	7:30-12:00	12:00-20:00
31	CLUB DE LEONES DE BUCARAMANGA	CLL 30 N° 26-55	7.125997	-73.119657	17	8:00-12:00	14:00-18:00
32	CENTRO DE ESPECIALISTAS LOGROS IPS	CRA 34 # 51- 79	7.113759	-73.109873	17	7:00-12:00	14:00-18:00
36	CONSULTORIO MEDICO JOSE GABRIEL JAIMES	CLL 35 # 24 - 26	7.121267	-73.119134	17	8:00-12:00	14:00-17:00
37	ESTETICA MANTILLA	CRA 24 # 19 - 63	7.129483	-73.122058	17	8:00-12:00	12:00-18:00

- *Ingreso de datos mediante la base de datos de la aplicación.*

En la Pestaña clientes encontrara el listado de clientes registrados. Ver figura 32, en esta pestaña se dispone de tres opciones

Posibilidad	Imagen
Agregar clientes	1
Modificar clientes	2
Eliminar clientes	3

En el caso de agregar un nuevo cliente, aparecerá el siguiente formulario ingreso de clientes figura A24-3 donde se registran y guardan los datos solicitados.

Figura A24-2. Listado de clientes

Codigo	Nombre	Direccion	Email	T.	Servicio	Ventana de tiempo AM	Ventana de tiempo PM	Editar/Eliminar
1	GARAJE	CALLE 53 NUMERO 17		0		7:30-12:00	12:00-17:15	
20	SALON ROSMY CABALLERO	CLL 32 # 29-27		17		8:00-12:00	12:00-7:00	
21	DROGUERIA SANEDIL	CRA 24 N#31-04		17		8:30-12:30	13:00-20:30	

Fuente: Aplicación de ruteo disponible en: <http://www.ictsas.com/Mapas/clientes.php>

Figura A24-3. Formulario de ingreso de clientes

Registrar Nuevo Cliente

Codigo

Nombre

Direccion

Email

Telefono

Latitud

Longitud

Tiempo de Servicio

Ventana de tiempo A.M

Ventana de tiempo P.M

Por día puede ingresar cuantos clientes permita google maps, hasta un máximo de 2500 búsquedas, ya que con cada cliente la matriz de distancias y de tiempos se alimenta.

2 Procesamiento de datos

Dentro de las pestañas del aplicativo se encuentra simulación como se ve en la figura 35, allí está alojada la base de datos en la cual se encuentra los clientes de la empresa, ingresados con anterioridad, en esta pestaña son seleccionados y se digita el α y δ (ver figura A24-4) con los cuales se procesan los algoritmos de inserción y vecino más cercano.

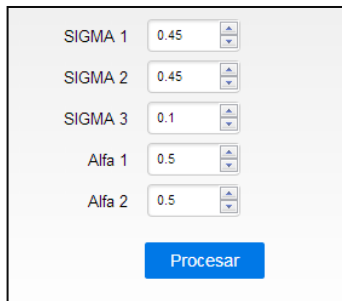
Figura A24-4. Pestaña simulación

Codigo	Nombre	Direccion	Email	T. Servicio	Ventana de tiempo AM	Ventana de tiempo PM	Seleccionar
1	GARAJE	CALLE 53 NUMERO 17		0	7:30-12:00	12:00-17:15	<input checked="" type="checkbox"/>
20	SALON ROSMY CABALLERO	CLL 32 # 29-27		17	8:00-12:00	12:00-7:00	<input type="checkbox"/>
21	DROGUERIA SANEDIL	CRA 24 NÂ°31-04		17	8:30-12:30	13:00-20:30	<input type="checkbox"/>
22	DROGUERIA MODERNA	CRA 22 # 9 - 14		17	7:00-12:00	12:00-20:00	<input type="checkbox"/>

Fuente: Aplicación de ruteo disponible en:

<http://www.ictsas.com/Mapas/simulacionbasedatos.php>

Figura A24-5. Asignación de valores



SIGMA 1	0.45
SIGMA 2	0.45
SIGMA 3	0.1
Alfa 1	0.5
Alfa 2	0.5

Procesar

Fuente: Aplicación de ruteo disponible en:
<http://www.ictsas.com/Mapas/simulacionbasedatos.php>

La base de datos contiene 283 clientes hospitalarios activos de Bucaramanga con los que cuenta Edepsa soluciones ambientales, esta base de datos es dinámica y puede eliminarse, modificarse o agregar hasta 1250 clientes contemplando la expansión de la empresa y posibilitando la futura aplicación del mismo software en la creación de rutas de recolección para residuos industriales.

Mediante esta opción es posible ejecutar el software las veces que se requiera al día, ya que la base de datos contiene la matriz de distancias y tiempos almacenados de todos los clientes.

Una vez ingresados los datos, se ejecuta el programa, este mostrara los la lista de clientes, la matriz de distancias, de tiempos y los resultados de los algoritmos programados que son vecino más cercano con enfoque temporal, algoritmo de inserción, algoritmo 2 optimal, 3 optimal y la mata heurística Tabú. A continuación encontrara las figuras correspondientes.

Figura A24-6. Lista de clientes

Lista de clientes						
Codigo	Nombre	Direccion	Email	T. Servicio	Ventana de tiempo AM	Ventana de tiempo PM
1	GARAJE	CALLE 53 NUMERO 17		0	7:30-12:00	12:00-17:15
20	SALON ROSMY CABALLERO	CLL 32 # 29-27		17	8:00-12:00	12:00-7:00
21	DROGUERIA SANEDIL	CRA 24 NÂ°31-04		17	8:30-12:30	13:00-20:30
22	DROGUERIA MODERNA	CRA 22 # 9 - 14		17	7:00-12:00	12:00-20:00
23	DROGUERIA TICO	CLL 8 # 20 - 57		17	8:00-12:00	14:30-20:00
29	DROGUERIA ALEMANA LOS PINOS	CRA 33 # 14 - 02		17	7:30-12:00	12:00-20:00
31	CLUB DE LEONES DE BUCARAMANGA	CLL 30 NÂ° 26-55		17	8:00-12:00	14:00-18:00
32	CENTRO DE ESPECIALISTAS LOGROS IPS	CRA 34 # 51- 79		17	7:00-12:00	14:00-18:00
36	CONSULTORIO MEDICO JOSE GABRIEL JAIMES	CLL 35 # 24 - 26		17	8:00-12:00	14:00-17:00
37	ESTETICA MANTILLA	CRA 24 # 19 - 63		17	8:00-12:00	12:00-18:00

Figura A24-7. Matriz de distancias

Matriz de distancia							
Origen/Destino	GARAJE	SALON ROSMY CABALLERO	DROGUERIA SANEDIL	DROGUERIA MODERNA	DROGUERIA TICO	DROGUERIA ALEMANA LOS PINOS	CLUB DE LEONES DE BUCARAMANGA
GARAJE	100000	10,3 km	3,7 km	2,9 km	4,3 km	4,2 km	4,2 km
SALON ROSMY CABALLERO	7,5 km	100000	11,5 km	13,0 km	13,5 km	14,2 km	12,8 km
DROGUERIA SANEDIL	3,3 km	13,8 km	100000	1,2 km	2,6 km	3,2 km	1,3 km
DROGUERIA MODERNA	3,6 km	13,8 km	0,8 km	100000	2,8 km	3,8 km	2,0 km
DROGUERIA TICO	4,5 km	10,8 km	2,4 km	2,3 km	100000	0,7 km	1,9 km
DROGUERIA ALEMANA LOS PINOS	4,5 km	10,9 km	2,6 km	2,5 km	0,2 km	100000	2,1 km
CLUB DE LEONES DE BUCARAMANGA	4,5 km	10,8 km	1,3 km	1,7 km	1,9 km	2,4 km	100000

Figura A24-8. Matriz de tiempos

Matriz de tiempo							
Origen/Destino	GARAJE	SALON ROSMY CABALLERO	DROGUERIA SANEDIL	DROGUERIA MODERNA	DROGUERIA TICO	DROGUERIA ALEMANA LOS PINOS	CLUB DE LEONES DE BUCARAMANGA
GARAJE	100000	17 min	8 min	7 min	10 min	9 min	12 min
SALON ROSMY CABALLERO	15 min	100000	14 min	17 min	19 min	19 min	18 min
DROGUERIA SANEDIL	11 min	19 min	100000	6 min	9 min	11 min	6 min
DROGUERIA MODERNA	9 min	17 min	4 min	100000	10 min	11 min	8 min
DROGUERIA TICO	11 min	20 min	12 min	9 min	100000	3 min	8 min
DROGUERIA ALEMANA LOS PINOS	11 min	21 min	13 min	10 min	1 min	100000	9 min
CLUB DE LEONES DE BUCARAMANGA	10 min	20 min	6 min	6 min	6 min	8 min	100000

Figura A24-9. Resultados del vecino más cercano

Resultados Simulación Vecino mas cercano				
Costo = $0.45 * d_{ij} + 0.45 * T_{ij} + 0.1 * V_{ij}$ Hora inicio Simulacion = 07:30 Hora Fin Simulacion = 5:15 PM				
Ubicación actual	Hora llegada	Hora Salida	Tiempo de Ocio	Próximo Destino
GARAJE	7:30 AM	7:54 AM	24	ESTETICA MANTILLA
ESTETICA MANTILLA	8:00 AM	8:17 AM	0	DROGUERIA MODERNA
DROGUERIA MODERNA	8:20 AM	8:37 AM	0	CENTRO DE ESPECIALISTAS LOGROS IPS
CENTRO DE ESPECIALISTAS LOGROS IPS	8:40 AM	8:57 AM	0	CLUB DE LEONES DE BUCARAMANGA
CLUB DE LEONES DE BUCARAMANGA	9:03 AM	9:20 AM	0	DROGUERIA TICO
DROGUERIA TICO	9:26 AM	9:43 AM	0	DROGUERIA ALEMANA LOS PINOS
DROGUERIA ALEMANA LOS PINOS	9:46 AM	10:03 AM	0	FORMAS ESTETICA FACIAL Y CORPORAL
FORMAS ESTETICA FACIAL Y CORPORAL	10:09 AM	10:26 AM	0	CONSULTORIO MEDICO JOSE GABRIEL JAIMES

Figura A24-10. Resultados de algoritmo de inserción

Resultados Simulación inserción				
ruta	puntos	Mejor W	Mejor I	
ruta	0 10	11	2	
ruta	0 10 11	1	1	
ruta	0 1 10 11	9	1	
ruta	0 9 1 10 11	8	1	
ruta	0 8 9 1 10 11	5	1	
ruta	0 5 8 9 1 10 11	3	1	
ruta	0 3 5 8 9 1 10 11	7	8	
ruta	0 3 5 8 9 1 10 11 7	4	4	
ruta	0 3 5 8 4 9 1 10 11 7	2	1	
ruta	0 2 3 5 8 4 9 1 10 11 7	6	8	
ruta	0 2 3 5 8 4 9 1 6 10 11 7			

Ruta obtenida
0 2 3 5 8 4 9 1 6 10 11 7 12 0

DROGUERIA SANEDIL	8:30 AM	8:47 AM	0	DROGUERIA MODERNA
DROGUERIA MODERNA	8:53 AM	9:10 AM	0	DROGUERIA ALEMANA LOS PINOS
DROGUERIA ALEMANA LOS PINOS	9:21 AM	9:38 AM	0	CONSULTORIO MEDICO JOSE GABRIEL JAIMES

Figura A24-11. Resultados de algoritmo 2-opt

Resultados Simulación 2 opt		
costos iguales a 1000000 quiere decir que ruta es restringida por ventana de tiempo		
ruta	puntos	Costo
Ruta construida	0 9 3 7 6 4 5 10 8 11 2 1 12 0	278.4303
Ruta Base	0 9 3 7 6 4 5 10 8 11 2 1 12 0	278.4303
Ruta 1	0 3 9 7 6 4 5 10 8 11 2 1 12 0	279.487283333
Ruta 2	0 7 3 9 6 4 5 10 8 11 2 1 12 0	279.669916667
Ruta 3	0 6 7 3 9 4 5 10 8 11 2 1 12 0	281.086566667
Ruta 4	0 4 6 7 3 9 5 10 8 11 2 1 12 0	1000000
Ruta 5	0 5 4 6 7 3 9 10 8 11 2 1 12 0	302.884
Ruta 6	0 10 5 4 6 7 3 9 8 11 2 1 12 0	279.257116667
Ruta 7	0 8 10 5 4 6 7 3 9 11 2 1 12 0	276.8328
Ruta 8	0 11 8 10 5 4 6 7 3 9 2 1 12 0	1000000
Ruta 9	0 2 11 8 10 5 4 6 7 3 9 1 12 0	1000000
Ruta 10	0 1 2 11 8 10 5 4 6 7 3 9 12 0	262.610416667

Figura A24-12. Resultados del algoritmo 3-opt

Resultados Simulación 3 opt		
ruta	puntos	Costo
Ruta construida	0 9 3 7 6 4 5 10 8 11 2 1 12 0	278.4303
Ruta Base	0 9 3 7 6 4 5 10 8 11 2 1 12 0	278.4303
Ruta 1	0 3 7 9 6 4 5 10 8 11 2 1 12 0	1000000
Ruta 2	0 7 6 9 3 4 5 10 8 11 2 1 12 0	1000000
Ruta 3	0 6 4 9 3 7 5 10 8 11 2 1 12 0	1000000
Ruta 4	0 4 5 9 3 7 6 10 8 11 2 1 12 0	1000000
Ruta 5	0 5 10 9 3 7 6 4 8 11 2 1 12 0	306.836683333
Ruta 6	0 10 8 9 3 7 6 4 5 11 2 1 12 0	1000000
Ruta 7	0 8 11 9 3 7 6 4 5 10 2 1 12 0	1000000
Ruta 8	0 11 2 9 3 7 6 4 5 10 8 1 12 0	1000000
Ruta 9	0 2 1 9 3 7 6 4 5 10 8 11 12 0	251.20095

Figura A24-13. Resultados algoritmo búsqueda Tabú.

Resultados Simulación tabu		
ruta	puntos	Costo
Ruta Base	0 2 1 6 5 4 10 7 3 9 11 8 12 0	234.965916667
Ruta 1	0 1 2 6 5 4 10 7 3 9 11 8 12 0	269.90865
Ruta 2	0 6 1 2 5 4 10 7 3 9 11 8 12 0	253.23805
Ruta 3	0 5 6 1 2 4 10 7 3 9 11 8 12 0	285.851416667
Ruta 4	0 4 5 6 1 2 10 7 3 9 11 8 12 0	257.245016667
Ruta 5	0 10 4 5 6 1 2 7 3 9 11 8 12 0	259.692966667
Ruta 6	0 7 10 4 5 6 1 2 3 9 11 8 12 0	260.563483333
Ruta 7	0 3 7 10 4 5 6 1 2 9 11 8 12 0	265.298133333
Ruta 8	0 9 3 7 10 4 5 6 1 2 11 8 12 0	268.718833333
Ruta 9	0 11 9 3 7 10 4 5 6 1 2 8 12 0	286.05435
Ruta 10	0 8 11 9 3 7 10 4 5 6 1 2 12 0	267.248516667
Ruta 11	0 2 6 1 5 4 10 7 3 9 11 8 12 0	236.052
Ruta 12	0 2 5 6 1 4 10 7 3 9 11 8 12 0	237.406383333

De los algoritmos ejecutados aplicara a la ruta de recolección que arroje mejores resultados.

ANEXO Y. GENERALIDADES DE LAS SOLICITUDES DE LA MATRIZ DE DISTANCIAS

Solicitudes de matriz de distancia: Una solicitud del API de matriz de distancia tiene el siguiente formato:

<http://maps.googleapis.com/maps/api/distancematrix/output?parameters>

Para este caso en particular el Output es considerado como **Json** que indica el formato de salida en Notación de objetos Java Script (Java Script Object Notation, JSON). El API posee parámetros de solicitud para la matriz de distancias es ilustrados en la figura A25-1.

- **Respuestas de matriz de Distancias**

Las respuestas a las consultas del API de matriz de distancia se devuelven en el formato que indica la marca de output en la ruta de solicitud de la URL.

Salida JSON: A continuación, se muestra una solicitud HTTP de ejemplo de la distancia y la duración del viaje con origen en Origen A y Origen B y destino en Destino A y Destino B.

<http://maps.googleapis.com/maps/api/distancematrix/json?origins=OrigenA|OrigenB=DestinoA|DestinoB&mode=driving>

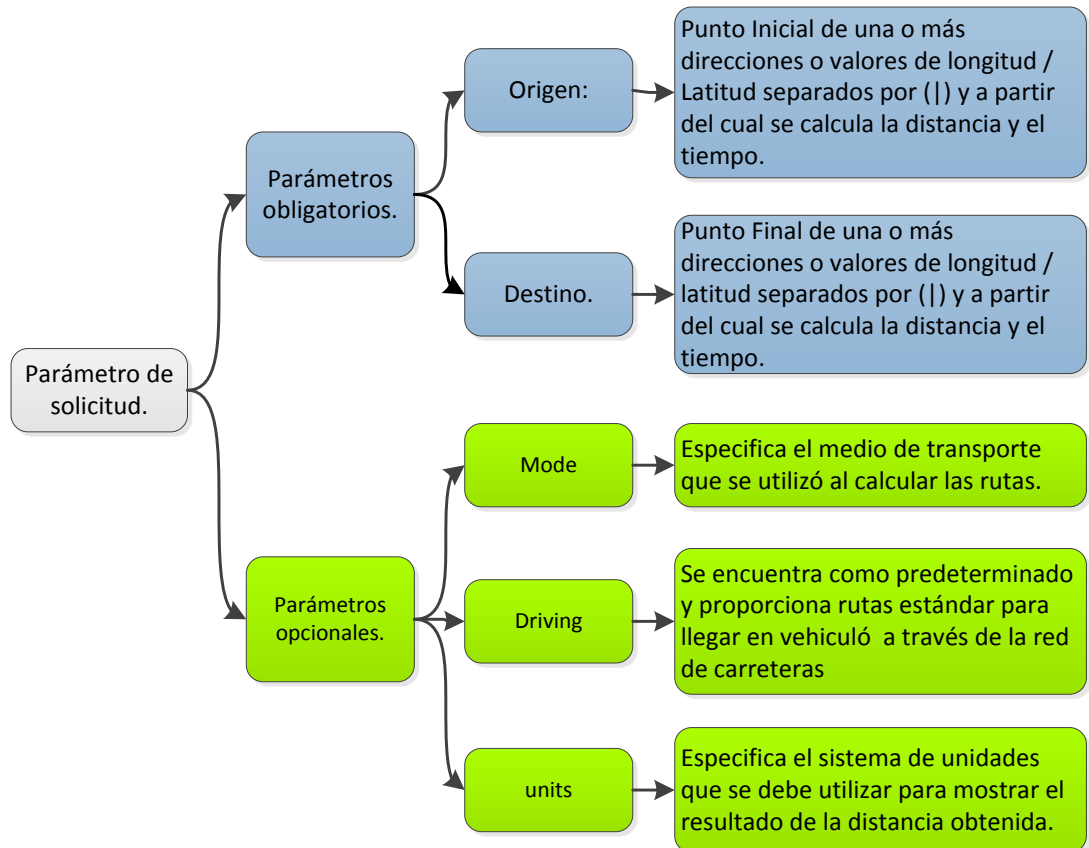
Esta solicitud devuelve cuatro elementos: dos orígenes por dos destinos

De Origen A a Destino A	De Origen A a Destino B
De Origen B a Destino A	De Origen B a Destino B

Los resultados devueltos se indican en filas, cada una de las cuales contienen un origen emparejado con cada destino.

Se debe tener en cuenta que estos valores se deben analizar si se requiere extraer valores de ellos. Análisis que es relativamente sencillo al considerar que la extensión JSON es en gran medida ligero en comparación con la XML.

Figura A25-1. Diagrama de parámetros de solicitud.



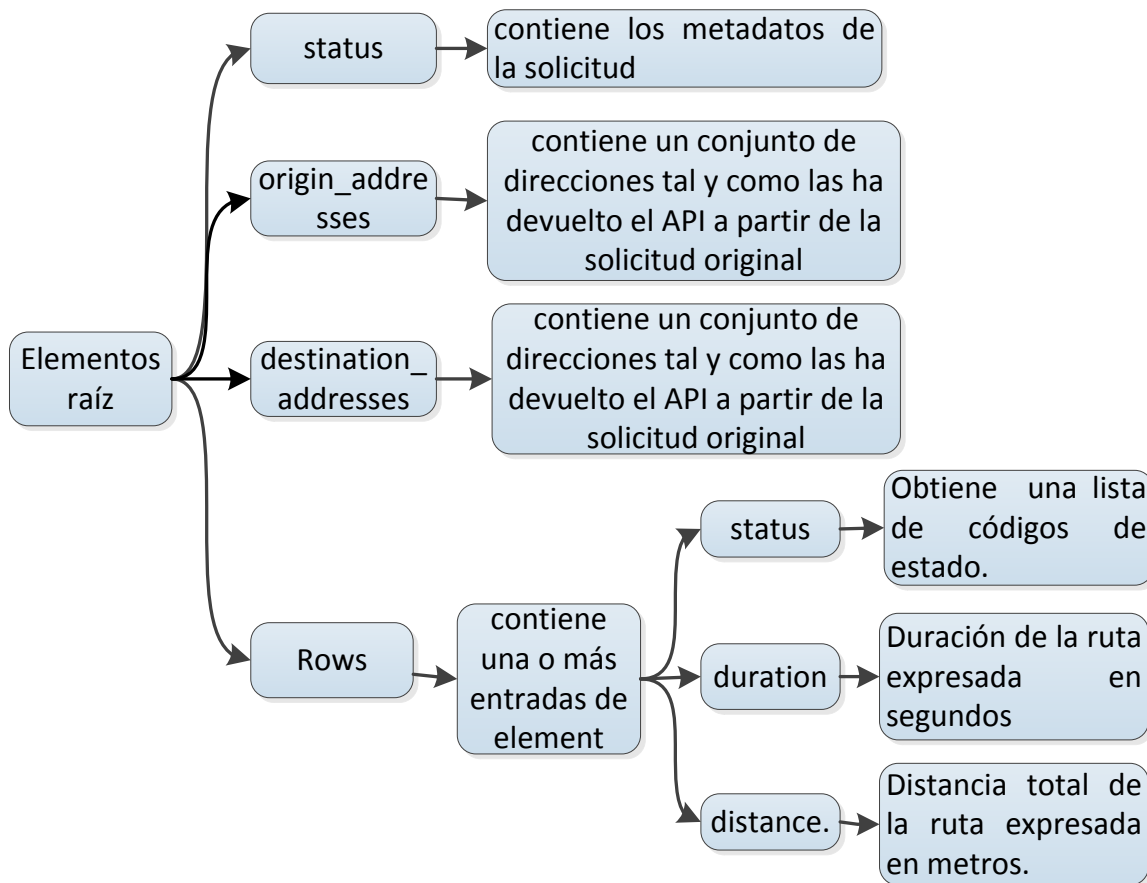
Fuente: Basado en [3]

Procesar JSON con JavaScript: **JSON** (JavaScript Object Notation) presenta una ventaja evidente en el sentido de que la respuesta que proporciona es ligera. El análisis de este tipo de resultados resulta muy sencillo en JavaScript, ya que el formato ya es un objeto JavaScript válido. Json puede contener varios valores, en este caso se desea capturar todos los valores posibles a emplear en el conjunto **results**, por el contrario si únicamente se desea devolver el primer resultado se emplea (**results [0]**).

Las respuestas de matriz de distancia incluyen los elementos de raíz que se indican en la figura A25-2, la matriz ubica los resultados en un conjunto de rows JSON. Aunque no se devuelva ningún resultado (como ocurre cuando no existen orígenes o destinos), se devolverá un conjunto vacío.

Las filas se ordenan de acuerdo con los valores del parámetro de origen (**origin**) de la solicitud. Cada fila se corresponde con un origen y cada elemento (**element**) de esa fila se corresponde con el emparejamiento del origen con un valor del punto de destino (**destination**).

Figura A25-2. Diagrama elementos de respuesta de matriz de distancia



Fuente: Basado en [3]

- **Códigos de estado**

Los campos **status** del objeto de respuesta contienen el estado de la solicitud y pueden contener información útil sobre depuración. El API de matriz de rutas devuelve un campo de estado de nivel superior con información sobre la solicitud en general y un campo de estado para cada campo de elemento con información sobre un par de origen y destino concreto ver en el tabla A25-1.

Tabla A25-1. Estado de solicitudes de API matriz de rutas.

Estado	Concepto
OK	La respuesta contiene un resultado result válido.
INVALID_REQUEST	La solicitud enviada no era válida
MAX_ELEMENTS_EXCEEDED	El producto de orígenes y destinos supera el límite por consulta.
OVER_QUERY_LIMIT	El servicio ha recibido demasiadas solicitudes de la aplicación en el tiempo permitido
REQUEST_DENIED	El servicio ha denegado el uso del servicio de matriz de distancia a la aplicación
UNKNOWN_ERROR	No se ha podido procesar una solicitud de matriz de distancia debido a un error del servidor
NOT_FOUND	El origen o destino de este par no se puede codificar de forma geográfica
ZERO_RESULTS	No se pudo encontrar ninguna ruta entre el origen y el destino.

Fuente: Basado en [3]

**ANEXO Z. CONSTRUCCIÓN DE UNA RUTA DE RECOLECCIÓN EDEPSA
SOLUCIONES AMBIENTALES.**

Para el desarrollo del problema se dispone de un conjunto de clientes dispersos en la ciudad de Bucaramanga como se ve en la *tabla A26-1*.

Tabla A26-1. Clientes asignados a la creación de ruta

Cód.	NOMBRE	DIRECCIÓN	Si	MAÑANA		TARDE	
				ai	bi	ai	bi
0	GARAJE	CALLE 53 NUMERO 17	0	7:30	12:00	12:00	17:15
1	CENTRO DE ESPECIALISTAS LOGROS IPS	CRA 34 # 51- 79	17	8:00	12:00	14:00	18:00
2	DROGUERIA I MISCELANIA MARIA PAZ	CLL 15 BN # 4 – 57	17	8:00	12:00	15:00	21:00
3	Con Odontológico CASIMIRO JAIMES	AV BUCAROS # 60 - 09 CONS 202	17	0:00	00:00	14:00	18:00
4	DROGUERIA 20 JULIO COLSANDER	CRA 11 # 15 – 02	17	8:00	12:00	14:30	21:00
5	DROGUERIA SUPER DESCUENTOS	CLL 34 # 35 – 58	17	8:00	12:00	12:00	20:00
6	SIAMA LTDA	CRA 24 # 36 – 11	17	8:00	12:00	14:00	18:00
7	BUCADENTS	CLL 35 # 24 – 05	17	9:00	12:00	14:30	18:00
8	MARIA MAGRETH CIA LTDA	CLL 46 No. 35A-16	17	8:00	12:00	12:00	20:00
Cód.	NOMBRE	DIRECCIÓN	Si	ai	bi	ai	bi
9	DROGUERIA GRANADOS 5 LA 27	CRA 27 #18 – 05	17	8:00	12:00	14:00	20:00
10	VITALITTE S.A.S	CRA 30 # 58 – 38	17	8:30	12:00	0:00	00:00
11	DROGUERIA GRANADOS ALBANIA	CLL 32 # 46 -33	17	8:00	12:00	14:00	21:00
12	SWING SPA	CLL 34 # 32- 65	17	7:30	12:00	12:00	19:30
13	planta de tratamiento	Calle 2 # 3ª – 69, Z indus chimita en girón	30	8:00	12:00	12:00	20:00

El cuadro muestra la dirección de los clientes, el tiempo de servicio y las ventanas de tiempo, tanto en la mañana como en la tarde, los límites inferior y superior de los intervalos de tiempo se denominan a_i y b_i respectivamente, s_i es el

valor del tiempo de servicio que para los clientes será de 17 minutos y para la planta de tratamiento será de 30 minutos.

La matriz de distancias y tiempos tablas A26-2 y A26-3 respectivamente se calculan usando las coordenadas latitudinales correspondientes a cada cliente, extraídas de google maps mediante la aplicación disponible en la web, en la tabla se muestra las distancias que existen entre el cliente i y el cliente j, los algoritmos a ejecutar emplean estas matrices para crear la matriz de costos.

Tabla A26-2. Matriz de Distancias en kilómetros.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0	100000	3,0 km	6,4 km	1,6 km	5,7 km	2,6 km	2,1 km	2,2 km	3,4 km	3,8 km	1,9 km	4,9 km	4,2 km	10,3 km
1	2,4 km	100000	8,2 km	3,6 km	7,5 km	1,5 km	2,5 km	2,6 km	0,7 km	3,2 km	1,3 km	2,3 km	1,8 km	13,3 km
2	6,6 km	8,3 km	100000	7,9 km	3,8 km	7,5 km	6,1 km	6,0 km	8,0 km	5,0 km	8,2 km	7,6 km	7,0 km	14,1 km
3	1,7 km	3,0 km	7,9 km	100000	7,1 km	4,7 km	3,6 km	3,6 km	4,2 km	5,3 km	1,8 km	6,4 km	5,7 km	13,0 km
4	3,5 km	5,2 km	3,9 km	4,8 km	100000	4,4 km	3,0 km	2,9 km	4,9 km	3,4 km	5,1 km	4,5 km	3,9 km	9,8 km
5	5,0 km	1,7 km	7,5 km	6,3 km	6,7 km	100000	1,2 km	1,2 km	0,9 km	2,0 km	2,5 km	0,8 km	0,3 km	14,0 km
6	1,8 km	2,1 km	6,2 km	3,1 km	5,4 km	1,3 km	100000	0,5 km	1,8 km	1,7 km	3,1 km	1,8 km	2,2 km	13,3 km
7	3,6 km	2,2 km	6,1 km	4,9 km	5,3 km	1,4 km	0,1 km	100000	1,9 km	1,6 km	3,2 km	2,8 km	2,1 km	13,4 km
8	2,9 km	0,8 km	8,8 km	3,6 km	8,0 km	0,9 km	1,9 km	2,1 km	100000	2,7 km	1,7 km	1,7 km	1,2 km	13,5 km
9	3,7 km	3,0 km	6,2 km	5,0 km	2,2 km	2,8 km	1,5 km	1,4 km	2,7 km	100000	4,0 km	2,9 km	2,2 km	10,1 km
10	1,8 km	1,3 km	7,7 km	3,0 km	6,9 km	2,6 km	2,8 km	2,5 km	2,1 km	3,2 km	100000	4,3 km	3,6 km	12,5 km
11	4,8 km	2,5 km	7,3 km	6,1 km	6,5 km	0,8 km	2,5 km	2,4 km	1,7 km	3,5 km	5,3 km	100000	1,1 km	11,2 km
12	2,6 km	2,1 km	7,0 km	3,9 km	3,3 km	0,9 km	1,0 km	0,9 km	1,3 km	1,8 km	3,5 km	1,2 km	100000	13,8 km
13	7,5 km	10,8 km	14,2 km	9,1 km	16,2 km	11,8 km	12,2 km	11,7 km	11,3 km	12,3 km	9,8 km	13,4 km	12,8 km	100000

Tabla A26-3. Matriz de tiempos en minutos

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0	100000	13 min	13 min	5 min	12 min	13 min	6 min	7 min	12 min	10 min	6 min	12 min	10 min	17 min
1	13 min	100000	21 min	16 min	19 min	6 min	13 min	12 min	3 min	12 min	8 min	10 min	8 min	22 min
2	13 min	23 min	100000	15 min	11 min	20 min	15 min	14 min	22 min	16 min	17 min	18 min	16 min	22 min
3	8 min	17 min	20 min	100000	18 min	16 min	13 min	13 min	15 min	15 min	9 min	16 min	14 min	20 min
4	7 min	17 min	12 min	9 min	100000	14 min	9 min	8 min	16 min	11 min	11 min	12 min	10 min	17 min
5	13 min	7 min	19 min	15 min	17 min	100000	8 min	8 min	3 min	10 min	13 min	4 min	3 min	22 min
6	8 min	11 min	15 min	10 min	13 min	9 min	100000	2 min	9 min	9 min	7 min	11 min	7 min	17 min
7	8 min	11 min	15 min	11 min	13 min	9 min	1 min	100000	10 min	8 min	8 min	9 min	7 min	17 min
8	13 min	4 min	22 min	15 min	20 min	4 min	11 min	12 min	100000	11 min	10 min	8 min	6 min	22 min
9	8 min	12 min	15 min	11 min	11 min	11 min	4 min	4 min	11 min	100000	8 min	10 min	8 min	19 min
10	9 min	8 min	18 min	13 min	16 min	9 min	9 min	8 min	8 min	8 min	100000	9 min	7 min	19 min
11	10 min	11 min	17 min	13 min	15 min	4 min	8 min	7 min	7 min	8 min	13 min	100000	7 min	21 min
12	11 min	10 min	19 min	13 min	14 min	6 min	5 min	5 min	7 min	7 min	10 min	8 min	100000	19 min
13	15 min	18 min	20 min	14 min	22 min	18 min	17 min	18 min	18 min	17 min	12 min	18 min	16 min	100000

1 Heurística del Vecino más cercano con enfoque temporal.

El algoritmo se realizó en base a la siguiente ecuación de costos

$$c_{ij} = \delta_1 d_{ij} + \delta_2 T_{ij} + \delta_3 V_{ij} \quad (1.1)$$

Se definió los siguientes parámetros

$$\delta_1 = 0.45$$

$$\delta_2 = 0.45$$

$$\delta_3 = 0.1$$

Dónde:

- d_{ij} = Es la distancia que existe entre los clientes ij.
- T_{ij} = Es la diferencia de tiempo generada entre el fin del servicio del cliente i e inicio del servicio del cliente j, definida matemáticamente de la siguiente manera $T_{ij} = W_j - (W_i + s_i)$
- V_{ij} = Es denominada como la urgencia de atender al cliente, definida matemáticamente de la siguiente manera $V_{ij} = b_j - (W_j + s_i + t_{ij})$

El valor de los parámetros se define de acuerdo al enfoque que se quiera dar al modelo, en esta ocasión se garantiza el servicio a clientes cuya ventana superior está alejada del horizonte de planeación de rutas partiendo del garaje y se calcula el costo de dirigirse a todos los clientes.

Generación de la ruta parcial.

La heurística inicia en el garaje de la empresa, seguidamente selecciona el cliente que represente menor costo teniendo en cuenta la distancia entre cada entidad, el tiempos y la urgencia de llegada establecida por las ventanas de tiempo, este tiempo se tomará como minutos transcurridos a partir de las 7:30

donde inicia la simulación como se puede ver en la tabla A26-4 para la jornada de la tarde y la mañana.

Tabla A26-4. Ventanas de tiempo en minutos

Cód.	ai	bi	ai	bi
0	0	270	270	585
1	30	270	390	630
2	30	270	450	810
3	0	0	390	630
4	30	270	420	810
5	30	270	270	750
6	30	270	390	630
7	90	270	420	630
8	30	270	270	750
9	30	270	390	750
10	60	270	0	0
11	30	270	390	810
12	0	270	270	708
13	30	270	270	750

Calculo de costos respecto al depósito

C_{ijM} =costo de ij en la ventana de tiempo de la mañana

C_{ijT} =costo de ij en la ventana de tiempo de la tarde

$$C_{01M} = (0.45 * 3) + (0.45 * 13) + (0.1 * 257) = 32.9$$

$$C_{01T} = (0.45 * 3) + (0.45 * 13) + (0.1 * 617) = 68.9$$

$$C_{02M} = (0.45 * 6.4) + (0.45 * 13) + (0.1 * 257) = 34.4$$

$$C_{02T} = (0.45 * 6.4) + (0.45 * 13) + (0.1 * 630) = 70.4$$

$$C_{03T} = (0.45 * 1.6) + (0.45 * 5) + (0.1 * 625) = 65.47$$

$$C_{04M} = (0.45 * 2.6) + (0.45 * 12) + (0.1 * 265) = 33.07$$

$$C_{04T} = (0.45 * 2.6) + (0.45 * 12) + (0.1 * 805) = 87.07$$

$$C_{05M} = (0.45 * 2.6) + (0.45 * 13) + (0.1 * 257) = 32.72$$

$$C_{05T} = (0.45 * 2.6) + (0.45 * 13) + (0.1 * 737) = 80.72$$

$$\begin{aligned}
c_{06M} &= (0.45 * 2.1) + (0.45 * 6) + (0.1 * 264) = 30.05 \\
c_{06T} &= (0.45 * 2.1) + (0.45 * 6) + (0.1 * 624) = 66.045 \\
c_{07M} &= (0.45 * 2.2) + (0.45 * 7) + (0.1 * 263) = 30.44 \\
c_{07T} &= (0.45 * 2.2) + (0.45 * 7) + (0.1 * 623) = 66.44 \\
c_{08M} &= (0.45 * 3.4) + (0.45 * 12) + (0.1 * 258) = 32.73 \\
c_{08T} &= (0.45 * 3.4) + (0.45 * 12) + (0.1 * 738) = 80.73 \\
c_{09M} &= (0.45 * 3.8) + (0.45 * 10) + (0.1 * 260) = 32.21 \\
c_{09T} &= (0.45 * 3.8) + (0.45 * 10) + (0.1 * 740) = 80.21 \\
c_{010M} &= (0.45 * 1.9) + (0.45 * 6) + (0.1 * 264) = 29.95 \\
c_{011M} &= (0.45 * 4.9) + (0.45 * 12) + (0.1 * 258) = 33.40 \\
c_{011T} &= (0.45 * 4.9) + (0.45 * 12) + (0.1 * 798) = 87.40 \\
c_{012M} &= (0.45 * 4.2) + (0.45 * 10) + (0.1 * 260) = 32.39 \\
c_{012T} &= (0.45 * 4.2) + (0.45 * 10) + (0.1 * 698) = 76.19 \\
c_{013M} &= (0.45 * 10.3) + (0.45 * 17) + (0.1 * 253) = 37.59 \\
c_{013T} &= (0.45 * 10.3) + (0.45 * 17) + (0.1 * 733) = 85.59
\end{aligned}$$

El primer cliente a visitar es el cliente 10 correspondiente a la empresa Vitalitte S.A.S, que inicia su actividad a las 8:30 así que el camión debe espera hasta este momento para iniciar el servicio por lo tanto el $W_{10} = 60$. El tiempo requerido para prestar el servicio $s = 17$ y el nuevo tiempo de recorrido es $T = W_{10} + s = 60 + 17 = 87$ minutos.

Ruta parcial: 0 – 10 – 0

En la siguiente iteración, se calcula el costo de dirigirse desde el cliente 10 hasta los clientes faltantes:

$$\begin{aligned}
c_{10\ 0M} &= (0.45 * 1.8) + (0.45 * 9) + (0.1 * 167) = 21.56 \\
c_{10\ 0T} &= (0.45 * 1.8) + (0.45 * 9) + (0.1 * 482) = 53.06 \\
c_{10\ 1M} &= (0.45 * 1.3) + (0.45 * 8) + (0.1 * 168) = 20.99 \\
c_{10\ 1T} &= (0.45 * 1.3) + (0.45 * 8) + (0.1 * 648) = 68.99 \\
c_{10\ 2M} &= (0.45 * 7.7) + (0.45 * 18) + (0.1 * 158) = 27.36
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
c_{10\ 2T} &= (0.45 * 7.7) + (0.45 * 18) + (0.1 * 518) = 63.36 \\
c_{10\ 3T} &= (0.45 * 6.9) + (0.45 * 16) + (0.1 * 523) = 59.5 \\
c_{10\ 4M} &= (0.45 * 6.9) + (0.45 * 16) + (0.1 * 160) = 26.8 \\
c_{10\ 4T} &= (0.45 * 6.9) + (0.45 * 16) + (0.1 * 700) = 80.3 \\
c_{10\ 5M} &= (0.45 * 2.6) + (0.45 * 9) + (0.1 * 167) = 21.92 \\
c_{10\ 5T} &= (0.45 * 2.6) + (0.45 * 9) + (0.1 * 647) = 69.92 \\
c_{10\ 6M} &= (0.45 * 2.8) + (0.45 * 9) + (0.1 * 167) = 22.01 \\
c_{10\ 6T} &= (0.45 * 2.8) + (0.45 * 9) + (0.1 * 527) = 58.01 \\
c_{10\ 7M} &= (0.45 * 2.5) + (0.45 * 8) + (0.1 * 168) = 21.53 \\
c_{10\ 7T} &= (0.45 * 2.5) + (0.45 * 8) + (0.1 * 528) = 57.52 \\
c_{10\ 8M} &= (0.45 * 2.1) + (0.45 * 8) + (0.1 * 168) = 21.34 \\
c_{10\ 8T} &= (0.45 * 2.1) + (0.45 * 8) + (0.1 * 648) = 69.34 \\
c_{10\ 9M} &= (0.45 * 3.2) + (0.45 * 8) + (0.1 * 168) = 21.84 \\
c_{10\ 9T} &= (0.45 * 3.2) + (0.45 * 8) + (0.1 * 648) = 69.84 \\
c_{10\ 11M} &= (0.45 * 4.3) + (0.45 * 9) + (0.1 * 167) = 22.68 \\
c_{10\ 11T} &= (0.45 * 4.3) + (0.45 * 9) + (0.1 * 707) = 76.68 \\
c_{10\ 12M} &= (0.45 * 3.6) + (0.45 * 7) + (0.1 * 169) = 21.67 \\
c_{10\ 12T} &= (0.45 * 3.6) + (0.45 * 7) + (0.1 * 607) = 65.47 \\
c_{10\ 13M} &= (0.45 * 12.5) + (0.45 * 19) + (0.1 * 157) = 29.8 \\
c_{10\ 13T} &= (0.45 * 12.5) + (0.45 * 19) + (0.1 * 637) = 77.8
\end{aligned}$$

El segundo cliente a visitar con el menor costo corresponde a la empresa Centro de Especialistas Logros IPS (1), que inicia su actividad a las 8:30 así que el camión arriba en el instante $W_1 = 85$ después de iniciada la labor. Se inserta el cliente en la ruta parcial como sigue.

Ruta parcial: 0 – 10 – 1 – 0

De esta forma se continúa con el algoritmo hasta obtener toda la ruta como se ve en el tabla A26-5.

Tabla A26-5. Ruta generada por el vecino más cercano

Costo = $0.45 * d_{ij} + 0.45 * T_{ij} + 0.1 * V_{ij}$
 Hora inicio Simulación =
 07:30
 Hora Fin Simulación = 5:15
 PM

Cliente actual	Hora llegada	Hora Salida	Tim Esp	Próximo Destino
GARAJE	07:30 a.m.	08:24 a.m.	54	VITALITTE S.A.S
VITALITTE S.A.S	08:30 a.m.	08:47 a.m.	0	CENTRO DE ESPECIALISTAS LOGROS IPS
CENTRO DE ESPECIALISTAS LOGROS IPS	08:55 a.m.	09:12 a.m.	0	MARIA MAGRETH CIA LTDA
MARIA MAGRETH CIA LTDA	09:15 a.m.	09:32 a.m.	0	DROGUERIA SUPER DESCUENTOS
DROGUERIA SUPER DESCUENTOS	09:35 a.m.	09:52 a.m.	0	SWING SPA
SWING SPA	09:55 a.m.	10:12 a.m.	0	BUCADENTS
BUCADENTS	10:17 a.m.	10:34 a.m.	0	SIAMA LTDA
SIAMA LTDA	10:35 a.m.	10:52 a.m.	0	DROGUERIA GRANADOS 5 LA 27
Cliente actual	Hora llegada	Hora Salida	Tim Esp	Próximo Destino
DROGUERIA GRANADOS 5 LA 27	11:01 a.m.	11:18 a.m.	0	DROGUERIA GRANADOS ALBANIA
DROGUERIA GRANADOS ALBANIA	11:28 a.m.	01:48 p.m.	123	CONSULTORIO odontológico CASIMIRO JAIMES
CONSULTORIO odontológico CASIMIRO JAIMES	02:00 p.m.	02:17 p.m.	0	DROGUERIA 20 JULIO COLSANDER
DROGUERIA 20 JULIO COLSANDER	02:35 p.m.	02:52 p.m.	0	DROGUERIA I MISCELANIA MARIA PAZ
DROGUERIA I MISCELANIA MARIA PAZ	03:04 p.m.	03:21 p.m.	0	planta de tratamiento
planta de tratamiento	03:43 p.m.	04:13 p.m.	0	GARAJE

Tiempo de ocio del camión = 223 minutos

Ruta Final : 0 – 10 – 1 – 8 – 5 – 12 – 7 – 6 – 9 – 11 – 3 – 4 – 2 – 13 – 0

Costo = 318.6350667

2. Heurística de inserción más barata

El algoritmo se corre basado en la siguiente ecuación de costos:

$$c_1(v_i, w) = \alpha_1 c_{11}(v_i, w) + \alpha_2 c_{12}(v_i, w) \quad (2.1)$$

$$c_{11}(v_i, w) = d_{iw} + d_{w,i+1} - u d_{i,i+1} \quad 0 \leq u \leq 1 \quad (2.3)$$

$$c_{12}(v_i, w) = b_{i+1}^w - b_{i+1} \quad (2.4)$$

$$c_2(v_i, w) = \lambda d_{0w} - c_1(v_i, w) \quad (2.5)$$

Dónde: b_{i+1}^w indica el tiempo de arribo al nodo $i + 1$ cuando el cliente w es insertado en la ruta.

d_{ij} es la distancia entre los nodos i y j

Se definió los siguientes parámetros:

$$\alpha_1 = 0.6$$

$$\alpha_2 = 0.4$$

$$\lambda = 1$$

$$u = 1$$

El valor de los parámetros se estableció con el objetivo de disminuir el retardo que genera la inclusión de los clientes a la ruta.

La heurística de inserción más barata inicia con una semiruta conformada por el garaje y un cliente seleccionado aleatoriamente.

Semiruta inicial:

Ruta	Clientes
ruta	0 - 11 - 13- 0

Selección del segundo cliente a insertar: En la siguiente se observa los costos de $c_2(v_i, w)$ para todos los posibles clientes a seleccionar en el modelo teniendo que este puede ser insertado en el Intervalo $[0, 11]$ ó $[11, 13]$.

0-w-11-13-0	
CLIENTE	COSTO
1	-1.64
2	-6.66
3	-3.86
4	-2.28
5	1.50
6	0.70
7	0.54
8	0.08
9	-0.48
10	-0.08
12	1.90

0-11-w-13-0	
CLIENTE	COSTO
1	-4.56
2	-6.92
3	-7.94
4	-1.76
5	-1.56
6	-2.26
7	-1.76
8	-2.20
9	-0.04
10	-6.46
12	-0.02

El cliente seleccionado es el 12 con un costo de 1.9 teniendo en cuenta que debe seleccionarse el cliente con mayor costo, de tal forma que privilegie el cliente para el cual crear una ruta individual es demasiado costoso.

$$c_2(v_i, 12) = 1d_{02} - c_1(v_i, 2) = 4.2 - 2.3 = 1.9$$

Ubicación del cliente en la ruta: Una vez seleccionado el cliente este es insertado en la posición más barata mediante la siguiente ecuación:

$$c_1(v_i, w) = \alpha_1 c_{11}(v_i, w) + \alpha_2 c_{12}(v_i, w) \quad (2.1)$$

- *Costo en caso de insertarse en 0-12-11-13-0*

$$c_{11}(v_i, 12) = d_{012} + d_{12,11} - d_{011} = 4.2 + 1.2 - 4.9 = 0.5$$

$$c_{12}(v_i, 12) = b_{11}^{12} - b_{11} = 17 - 12 = 5$$

$$c_1(v_i, 12) = \alpha_1 c_{11}(v_i, 12) + \alpha_2 c_{12}(v_i, 12) = (0.6 * 0.5) + (0.4 * 5) = 2.3$$

- *Costo en caso de insertarse en 0-11-12-13-0*

$$c_{11}(v_i, 12) = d_{11,12} + d_{12,13} - d_{11,13} = 1.1 + 13.8 - 11.2 = 3.7$$

$$c_{12}(v_i, 12) = b_{13}^{12} - b_{13} = 38 - 33 = 5$$

$$c_1(v_i, 12) = \alpha_1 c_{11}(v_i, 12) + \alpha_2 c_{12}(v_i, 12) = (0.6 * 3.7) + (0.4 * 5) = 4.2$$

Ruta	COSTO
0-w-11-13-0	2.3
0-11-w-13-0	4.2

De esta forma se insertaran los demás clientes, la selección e inserción se verán reflejadas en la tabla A26-6 con sus respectivos costos.

Tabla A26-6. Iteraciones del algoritmo de inserción más barata

# de inser	Cliente seleccionado	Costo de selección $c_2(v_i, w)$	Ubicación del cliente	Costo de Inserción. $c_1(v_i, w)$
1	12	1.9	0-12-11-13-0	2.30
2	5	1.5	0-12-5-11-13	1.10
3	6	0.84	0-6- 12-5-11-13-0	1.26
4	7	1.28	0-7- 6 -12-5- 11-13-0	0.92
5	8	0.62	0-7- 6 -12-8-5- 11-13-	2.78
6	9	-0.04	0-7- 6 -12-8-5-11-9-13-0	3.84
7	4	0.96	0-7- 6 -12-8-5- 11-9-4-13-0	4.74
8	2	0.86	-7- 6 -12-8-5- 11-9-4-2-13-0	5.54
9	1	-0.24	0-7- 6 -12-8-1-5- 11-9-4-2-13-0	3.24
10	10	-2.22	0-10-7-6-12-8-1-5-11-9-4-2-13-0	4.12
11	3	-	0-3-10-7- 6 -12-8-1-5-11-9-4-2-13-0	4.10

Finalmente se obtiene la ruta 0 – 3 – 10 – 7 – 6 – 12 – 8 – 1 – 5 – 11 – 9 – 4 – 2 – 13 – 0, Dicha ruta es totalizada con la ecuación del vecino más cercano con el fin de realizar una comparación más apropiada obteniendo así un costo de 1000 puesto que incumple una restricción de tiempo.

3. Método Optimización 2-optimal.

El algoritmo dos óptimo se realiza empleando como base la mejor ruta encontrada entre el vecino más cercano y el algoritmo de inserción

Heurística	Ruta	Costo
Vecino más cercano	0 10 1 8 5 12 7 6 9 11 3 4 2 13 0	318.64
Inserción	0-3-10-7- 6 -12-8-1-5-11-9-4-2-13-0	1000.0

En este caso la ruta con el menor costo asociado es la ruta generada por el método del vecino más cercano.

Ahora se seleccionan dos aristas no adyacentes y son retiradas de la ruta inicial, para proponer dos aristas diferentes formando una nueva ruta, el movimiento debe respetar las restricciones temporales y adicionalmente el costo asociado debe ser menor al costo de la ruta inicial, a continuación se presentan los posibles inter cambios dos opt que pueden ser realizados en la tabla A26-7.

Tabla A26-7. Primer intercambio 2 opt

	Ruta	Costo
Base	0 10 1 8 5 12 7 6 9 11 3 4 2 13 0	318.64
1	0 1 10 8 5 12 7 6 9 11 3 4 2 13 0	344.76
2	0 8 1 10 5 12 7 6 9 11 3 4 2 13 0	348.71
3	0 5 8 1 10 12 7 6 9 11 3 4 2 13 0	351.40
4	0 12 5 8 1 10 7 6 9 11 3 4 2 13 0	368.26
5	0 7 12 5 8 1 10 6 9 11 3 4 2 13 0	323.52
6	0 6 7 12 5 8 1 10 9 11 3 4 2 13 0	316.50
7	0 9 6 7 12 5 8 1 10 11 3 4 2 13 0	336.99
8	0 11 9 6 7 12 5 8 1 10 3 4 2 13 0	347.31
9	0 3 11 9 6 7 12 5 8 1 10 4 2 13 0	1000000
10	0 4 3 11 9 6 7 12 5 8 1 10 2 13 0	1000000
11	0 2 4 3 11 9 6 7 12 5 8 1 10 13 0	1000000
12	0 10 8 1 5 12 7 6 9 11 3 4 2 13 0	318.79
13	0 10 5 8 1 12 7 6 9 11 3 4 2 13 0	319.58
14	0 10 12 5 8 1 7 6 9 11 3 4 2 13 0	320.78
15	0 10 7 12 5 8 1 6 9 11 3 4 2 13 0	317.85
16	0 10 6 7 12 5 8 1 9 11 3 4 2 13 0	321.93
17	0 10 9 6 7 12 5 8 1 11 3 4 2 13 0	319.18
18	0 10 11 9 6 7 12 5 8 1 3 4 2 13 0	317.27
19	0 10 3 11 9 6 7 12 5 8 1 4 2 13 0	2301741
20	0 10 4 3 11 9 6 7 12 5 8 1 2 13 0	2301749
21	0 10 2 4 3 11 9 6 7 12 5 8 1 13 0	2301741
22	0 10 1 5 8 12 7 6 9 11 3 4 2 13 0	318.67
23	0 10 1 12 5 8 7 6 9 11 3 4 2 13 0	318.45
24	0 10 1 7 12 5 8 6 9 11 3 4 2 13 0	319.45
25	0 10 1 6 7 12 5 8 9 11 3 4 2 13 0	319.66
26	0 10 1 9 6 7 12 5 8 11 3 4 2 13 0	316.75
27	0 10 1 11 9 6 7 12 5 8 3 4 2 13 0	315.97

	Ruta	Costo
34	0 10 1 8 9 6 7 12 5 11 3 4 2 13 0	316.39
35	0 10 1 8 11 9 6 7 12 5 3 4 2 13 0	318.85
36	0 10 1 8 3 11 9 6 7 12 5 4 2 13 0	2301767
37	0 10 1 8 4 3 11 9 6 7 12 5 2 13 0	2301765
38	0 10 1 8 2 4 3 11 9 6 7 12 5 13 0	2301750
39	0 10 1 8 5 7 12 6 9 11 3 4 2 13 0	320.72
40	0 10 1 8 5 6 7 12 9 11 3 4 2 13 0	319.96
41	0 10 1 8 5 9 6 7 12 11 3 4 2 13 0	318.17
42	0 10 1 8 5 11 9 6 7 12 3 4 2 13 0	316.79
43	0 10 1 8 5 3 11 9 6 7 12 4 2 13 0	2301764
44	0 10 1 8 5 4 3 11 9 6 7 12 2 13 0	2301758
45	0 10 1 8 5 2 4 3 11 9 6 7 12 13 0	2301738
46	0 10 1 8 5 12 6 7 9 11 3 4 2 13 0	318.80
47	0 10 1 8 5 12 9 6 7 11 3 4 2 13 0	317.85
48	0 10 1 8 5 12 11 9 6 7 3 4 2 13 0	315.00
49	0 10 1 8 5 12 3 11 9 6 7 4 2 13 0	348.48
50	0 10 1 8 5 12 4 3 11 9 6 7 2 13 0	335.03
51	0 10 1 8 5 12 2 4 3 11 9 6 7 13 0	325.57
52	0 10 1 8 5 12 7 9 6 11 3 4 2 13 0	319.07
53	0 10 1 8 5 12 7 11 9 6 3 4 2 13 0	316.41
54	0 10 1 8 5 12 7 3 11 9 6 4 2 13 0	351.53
55	0 10 1 8 5 12 7 4 3 11 9 6 2 13 0	334.35
56	0 10 1 8 5 12 7 2 4 3 11 9 6 13 0	320.85
57	0 10 1 8 5 12 7 6 11 9 3 4 2 13 0	317.71
58	0 10 1 8 5 12 7 6 3 11 9 4 2 13 0	345.18
59	0 10 1 8 5 12 7 6 4 3 11 9 2 13 0	339.50
60	0 10 1 8 5 12 7 6 2 4 3 11 9 13 0	310.96
61	0 10 1 8 5 12 7 6 9 3 11 4 2 13 0	343.35

	Ruta	Costo
28	0 10 1 3 11 9 6 7 12 5 8 4 2 13 0	2301765
29	0 10 1 4 3 11 9 6 7 12 5 8 2 13 0	2301767
30	0 10 1 2 4 3 11 9 6 7 12 5 8 13 0	2301755
31	0 10 1 8 12 5 7 6 9 11 3 4 2 13 0	319.03
32	0 10 1 8 7 12 5 6 9 11 3 4 2 13 0	320.25
33	0 10 1 8 6 7 12 5 9 11 3 4 2 13 0	320.16

	Ruta	Costo
62	0 10 1 8 5 12 7 6 9 4 3 11 2 13 0	318.60
63	0 10 1 8 5 12 7 6 9 2 4 3 11 13 0	303.46
64	0 10 1 8 5 12 7 6 9 11 4 3 2 13 0	306.62
65	0 10 1 8 5 12 7 6 9 11 2 4 3 13 0	277.83
66	0 10 1 8 5 12 7 6 9 11 3 2 4 13 0	306.38

De los posibles intercambios realizados a la ruta, la ruta 65 es el movimiento encontrado de menor costo y este es inferior al originado por la ruta inicial, ahora esta ruta se tomará como base para la siguiente iteración mostrada en la tabla A26-8.

Tabla A26-8. Segunda iteración 2 opt

	Ruta	Costo
Base	0 10 1 8 5 12 7 6 9 11 2 4 3 13 0	277.83
1	0 1 10 8 5 12 7 6 9 11 2 4 3 13 0	303.09
2	0 8 1 10 5 12 7 6 9 11 2 4 3 13 0	307.44
3	0 5 8 1 10 12 7 6 9 11 2 4 3 13 0	310.33
4	0 12 5 8 1 10 7 6 9 11 2 4 3 13 0	308.39
5	0 7 12 5 8 1 10 6 9 11 2 4 3 13 0	297.71
6	0 6 7 12 5 8 1 10 9 11 2 4 3 13 0	275.66
7	0 9 6 7 12 5 8 1 10 11 2 4 3 13 0	293.82
8	0 11 9 6 7 12 5 8 1 10 2 4 3 13 0	308.55
9	0 2 11 9 6 7 12 5 8 1 10 4 3 13 0	303.59
10	0 4 2 11 9 6 7 12 5 8 1 10 3 13 0	1000000
11	0 3 4 2 11 9 6 7 12 5 8 1 10 13 0	1000000
12	0 10 8 1 5 12 7 6 9 11 2 4 3 13 0	277.98
13	0 10 5 8 1 12 7 6 9 11 2 4 3 13 0	278.74
14	0 10 12 5 8 1 7 6 9 11 2 4 3 13 0	280.40
15	0 10 7 12 5 8 1 6 9 11 2 4 3 13 0	276.98
16	0 10 6 7 12 5 8 1 9 11 2 4 3 13 0	281.07
17	0 10 9 6 7 12 5 8 1 11 2 4 3 13 0	278.32
18	0 10 11 9 6 7 12 5 8 1 2 4 3 13 0	278.46
19	0 10 2 11 9 6 7 12 5 8 1 4 3 13 0	290.40
20	0 10 4 2 11 9 6 7 12 5 8 1 3 13 0	301.02
21	0 10 3 4 2 11 9 6 7 12 5 8 1 13 0	1000000

	Ruta	Costo
34	0 10 1 8 9 6 7 12 5 11 2 4 3 13 0	275.53
35	0 10 1 8 11 9 6 7 12 5 2 4 3 13 0	278.01
36	0 10 1 8 2 11 9 6 7 12 5 4 3 13 0	319.65
37	0 10 1 8 4 2 11 9 6 7 12 5 3 13 0	2301705
38	0 10 1 8 3 4 2 11 9 6 7 12 5 13 0	2301757
39	0 10 1 8 5 7 12 6 9 11 2 4 3 13 0	279.87
40	0 10 1 8 5 6 7 12 9 11 2 4 3 13 0	279.14
41	0 10 1 8 5 9 6 7 12 11 2 4 3 13 0	277.34
42	0 10 1 8 5 11 9 6 7 12 2 4 3 13 0	277.74
43	0 10 1 8 5 2 11 9 6 7 12 4 3 13 0	2301728
44	0 10 1 8 5 4 2 11 9 6 7 12 3 13 0	2301709
45	0 10 1 8 5 3 4 2 11 9 6 7 12 13 0	2301758
46	0 10 1 8 5 12 6 7 9 11 2 4 3 13 0	278.42
47	0 10 1 8 5 12 9 6 7 11 2 4 3 13 0	274.48
48	0 10 1 8 5 12 11 9 6 7 2 4 3 13 0	271.83
49	0 10 1 8 5 12 2 11 9 6 7 4 3 13 0	283.48
50	0 10 1 8 5 12 4 2 11 9 6 7 3 13 0	277.28
51	0 10 1 8 5 12 3 4 2 11 9 6 7 13 0	342.36
52	0 10 1 8 5 12 7 9 6 11 2 4 3 13 0	278.27
53	0 10 1 8 5 12 7 11 9 6 2 4 3 13 0	276.93
54	0 10 1 8 5 12 7 2 11 9 6 4 3 13 0	302.34
55	0 10 1 8 5 12 7 4 2 11 9 6 3 13 0	297.65

	Ruta	Costo
22	0 10 1 5 8 12 7 6 9 11 2 4 3 13 0	277.82
23	0 10 1 12 5 8 7 6 9 11 2 4 3 13 0	278.05
24	0 10 1 7 12 5 8 6 9 11 2 4 3 13 0	279.06
25	0 10 1 6 7 12 5 8 9 11 2 4 3 13 0	278.79
26	0 10 1 9 6 7 12 5 8 11 2 4 3 13 0	275.88
27	0 10 1 11 9 6 7 12 5 8 2 4 3 13 0	278.29
28	0 10 1 2 11 9 6 7 12 5 8 4 3 13 0	363.97
29	0 10 1 4 2 11 9 6 7 12 5 8 3 13 0	2301787
30	0 10 1 3 4 2 11 9 6 7 12 5 8 13 0	2301752
31	0 10 1 8 12 5 7 6 9 11 2 4 3 13 0	278.17
32	0 10 1 8 7 12 5 6 9 11 2 4 3 13 0	279.45
33	0 10 1 8 6 7 12 5 9 11 2 4 3 13 0	279.77

	Ruta	Costo
56	0 10 1 8 5 12 7 3 4 2 11 9 6 13 0	347.93
57	0 10 1 8 5 12 7 6 11 9 2 4 3 13 0	276.85
58	0 10 1 8 5 12 7 6 2 11 9 4 3 13 0	313.92
59	0 10 1 8 5 12 7 6 4 2 11 9 3 13 0	317.19
60	0 10 1 8 5 12 7 6 3 4 2 11 9 13 0	345.00
61	0 10 1 8 5 12 7 6 9 2 11 4 3 13 0	323.72
62	0 10 1 8 5 12 7 6 9 4 2 11 3 13 0	290.14
63	0 10 1 8 5 12 7 6 9 3 4 2 11 13 0	343.13
64	0 10 1 8 5 12 7 6 9 11 4 2 3 13 0	304.23
65	0 10 1 8 5 12 7 6 9 11 3 4 2 13 0	318.64
66	0 10 1 8 5 12 7 6 9 11 2 3 4 13 0	281.12

La nueva ruta encontrada corresponde a la ruta 48 con un costo asociado de 271.83.

Nueva ruta: 0 – 10 – 1 – 8 – 5 – 12 – 11 – 9 – 6 – 7 – 2 – 4 – 3 – 13 – 0

Una vez obtenida la ruta se continuará iterando hasta que el algoritmo no encuentre mejores soluciones, a continuación se presenta la tabla A26-9 donde se encuentran las siguientes iteraciones de este ejerció.

Tabla A26-9. Iteraciones del algoritmo dos opt.

Iteraciones	Ruta	Costo
Vecino cercano	0 10 1 8 5 12 7 6 9 11 3 4 2 13 0	318.64
Primera	0 10 1 8 5 12 7 6 9 11 2 4 3 13 0	277.83
Segunda	0 10 1 8 5 12 11 9 6 7 2 4 3 13 0	271.83
Tercera	0 10 1 8 5 12 11 9 6 7 4 2 3 13 0	262.00
Cuarta	0 10 1 8 5 12 11 7 6 9 4 2 3 13 0	260.24
Quinta	0 10 1 8 12 5 11 7 6 9 4 2 3 13 0	259.51
Sexta	0 10 1 8 11 5 12 7 6 9 4 2 3 13 0	259.11
Séptima.	0 10 8 1 11 5 12 7 6 9 4 2 3 13 0	258.97
Octava.	0 10 11 1 8 5 12 7 6 9 4 2 3 13 0	258.79

Finalmente se encuentra la ruta 2 –opt con un costo asociado de 258.7 mostrada en la tabla A26-10

Tabla A26-10. Ruta 2-optima

Ubicación actual	Hr llegada	Hr Salida	Tm Ocio	Próximo Destino
GARAJE	07:30 a.m.	08:24 a.m.	54	VITALITTE S.A.S
VITALITTE S.A.S	08:30 a.m.	08:47 a.m.	0	DROGUERIA GRANADOS ALBANIA
DROGUERIA GRANADOS ALBANIA	08:56 a.m.	09:13 a.m.	0	CENTRO ESPECIALISTAS LOGROS IPS
CENTRO ESPECIALISTAS LOGROS IPS	09:23 a.m.	09:40 a.m.	0	MARIA MAGRETH CIA LTDA
MARIA MAGRETH CIA LTDA	09:43 a.m.	10:00 a.m.	0	DROGUERIA SUPER DESCUENTOS
DROGUERIA SUPER DESCUENTOS	10:04 a.m.	10:21 a.m.	0	SWING SPA
SWING SPA	10:23 a.m.	10:40 a.m.	0	BUCADENTS
BUCADENTS	10:46 a.m.	11:03 a.m.	0	SIAMA LTDA
SIAMA LTDA	11:03 a.m.	11:20 a.m.	0	DROGUERIA GRANADOS 5 LA 27
DROGUERIA GRANADOS 5 LA 27	11:29 a.m.	11:46 a.m.	0	DROGUERIA 20 JULIO COLSANDER
DROGUERIA 20 JULIO COLSANDER	11:57 a.m.	02:48 p.m.	154	DROGUERIA MISCELANIA MARIA PAZ
DROGUERIA MISCELANIA MARIA PAZ	03:00 p.m.	03:17 p.m.	0	CONS ODON CASIMIRO JAIMES
CONS ODON CASIMIRO JAIMES	03:32 p.m.	03:49 p.m.	0	planta de tratamiento
planta de tratamiento	04:09 p.m.	04:39 p.m.	0	GARAJE
GARAJE	04:55 p.m.	05:15 p.m.	20	

Tiempo de ocio del camión = 228 minutos

Ruta 2 – opt: 0 – 10 – 11 – 1 – 8 – 5 – 12 – 7 – 6 – 9 – 4 – 2 – 3 – 13 – 0

4. Método Optimización 3-optimal.

La ruta semilla corresponde a la aplicada en el algoritmo 2-opt, seguidamente se seleccionan tres aristas no adyacentes de la ruta inicial y son reemplazadas por nuevas aristas formando una nueva ruta, esta debe respetar las restricciones temporales y adicionalmente el costo asociado debe ser menor al costo de la ruta inicial correspondiente a 318.63, a continuación se lista los intercambios 3 óptimos posibles a realizar en la tabla A26-11.

Tabla A26-11. Primera iteración 3 opt.

Ruta	Intercambio	Costo
Base	0 10 1 8 5 12 7 6 9 11 3 4 2 13 0	318.64
1	0 1 8 10 5 12 7 6 9 11 3 4 2 13 0	348.81
2	0 8 5 10 1 12 7 6 9 11 3 4 2 13 0	348.07
3	0 5 12 10 1 8 7 6 9 11 3 4 2 13 0	350.74
4	0 12 7 10 1 8 5 6 9 11 3 4 2 13 0	322.34
5	0 7 6 10 1 8 5 12 9 11 3 4 2 13 0	293.86
6	0 6 9 10 1 8 5 12 7 11 3 4 2 13 0	344.11
7	0 9 11 10 1 8 5 12 7 6 3 4 2 13 0	339.54
8	0 11 3 10 1 8 5 12 7 6 9 4 2 13 0	1000000
9	0 3 4 10 1 8 5 12 7 6 9 11 2 13 0	1000000
10	0 4 2 10 1 8 5 12 7 6 9 11 3 13 0	308.72
11	0 10 8 5 1 12 7 6 9 11 3 4 2 13 0	319.13
12	0 10 5 12 1 8 7 6 9 11 3 4 2 13 0	319.85
13	0 10 12 7 1 8 5 6 9 11 3 4 2 13 0	320.92
14	0 10 7 6 1 8 5 12 9 11 3 4 2 13 0	314.87
15	0 10 6 9 1 8 5 12 7 11 3 4 2 13 0	316.79
16	0 10 9 11 1 8 5 12 7 6 3 4 2 13 0	310.92
17	0 10 11 3 1 8 5 12 7 6 9 4 2 13 0	2301743
18	0 10 3 4 1 8 5 12 7 6 9 11 2 13 0	2301736
19	0 10 4 2 1 8 5 12 7 6 9 11 3 13 0	300.67
20	0 10 1 5 12 8 7 6 9 11 3 4 2 13 0	319.22
21	0 10 1 12 7 8 5 6 9 11 3 4 2 13 0	319.64

Ruta	Intercambio	Costo
28	0 10 1 8 12 7 5 6 9 11 3 4 2 13 0	320.70
29	0 10 1 8 7 6 5 12 9 11 3 4 2 13 0	318.49
30	0 10 1 8 6 9 5 12 7 11 3 4 2 13 0	318.52
31	0 10 1 8 9 11 5 12 7 6 3 4 2 13 0	311.21
32	0 10 1 8 11 3 5 12 7 6 9 4 2 13 0	2301757
33	0 10 1 8 3 4 5 12 7 6 9 11 2 13 0	2301764
34	0 10 1 8 4 2 5 12 7 6 9 11 3 13 0	306.76
35	0 10 1 8 5 7 6 12 9 11 3 4 2 13 0	319.92
36	0 10 1 8 5 6 9 12 7 11 3 4 2 13 0	319.96
37	0 10 1 8 5 9 11 12 7 6 3 4 2 13 0	313.60
38	0 10 1 8 5 11 3 12 7 6 9 4 2 13 0	2301750
39	0 10 1 8 5 3 4 12 7 6 9 11 2 13 0	2301765
40	0 10 1 8 5 4 2 12 7 6 9 11 3 13 0	310.26
41	0 10 1 8 5 12 6 9 7 11 3 4 2 13 0	319.11
42	0 10 1 8 5 12 9 11 7 6 3 4 2 13 0	314.74
43	0 10 1 8 5 12 11 3 7 6 9 4 2 13 0	332.68
44	0 10 1 8 5 12 3 4 7 6 9 11 2 13 0	349.78
45	0 10 1 8 5 12 4 2 7 6 9 11 3 13 0	310.33
46	0 10 1 8 5 12 7 9 11 6 3 4 2 13 0	318.25
47	0 10 1 8 5 12 7 11 3 6 9 4 2 13 0	332.03
48	0 10 1 8 5 12 7 3 4 6 9 11 2 13 0	352.79
49	0 10 1 8 5 12 7 4 2 6 9 11 3 13 0	315.88

Ruta	Intercambio	Costo
22	0 10 17 6 8 5 12 9 11 3 4 2 13 0	317.30
23	0 10 16 9 8 5 12 7 11 3 4 2 13 0	315.78
24	0 10 19 11 8 5 12 7 6 3 4 2 13 0	309.91
25	0 10 11 13 8 5 12 7 6 9 4 2 13 0	2301760
26	0 10 13 4 8 5 12 7 6 9 11 2 13 0	2301761
27	0 10 14 2 8 5 12 7 6 9 11 3 13 0	314.08

Ruta	Intercambio	Costo
50	0 10 18 5 12 7 6 11 3 9 4 2 13 0	337.34
51	0 10 18 5 12 7 6 3 4 9 11 2 13 0	348.38
52	0 10 18 5 12 7 6 4 2 9 11 3 13 0	315.25
53	0 10 18 5 12 7 6 9 3 4 11 2 13 0	344.80
54	0 10 18 5 12 7 6 9 4 2 11 3 13 0	290.14
55	0 10 18 5 12 7 6 9 11 4 2 3 13 0	304.23

Nueva ruta: 0 – 10 – 18 – 5 – 12 – 7 – 6 – 9 – 4 – 2 – 11 – 3 – 13 – 0

De los movimientos se seleccionó la ruta 54 con un costo de 290.14 esta ruta será la base para la siguiente iteración y el proceso continuará hasta no encontrar mejores soluciones factibles, en la siguiente tabla A26-12 se muestra las iteraciones realizadas en el desarrollo de este ejercicio.

Tabla A36-12. Iteraciones del algoritmo 3 optimo

Iteración	Ruta	Costo
Vecino cercano	0 10 18 5 12 7 6 9 11 3 4 2 13 0	318.64
Ruta 1	0 10 18 5 12 7 6 9 4 2 11 3 13 0	290.14
Ruta 2	0 7 6 10 18 5 12 9 4 2 11 3 13 0	254.11

Finalmente se encuentra la siguiente ruta 3 – opt con un costo asociado de 254.11 en la tabla A26-13

Tabla A26-13. Ruta generada por el algoritmo 3 opt

Ubicación actual	Hr. Llegada	Hr. Salida	Tim Ocio	Próximo Destino
GARAJE	07:30 a.m.	08:53 a.m.	83	BUCADENTS
BUCADENTS	09:00 a.m.	09:17 a.m.	0	SIAMA LTDA
SIAMA LTDA	09:17 a.m.	09:34 a.m.	0	VITALITTE S.A.S

Ubicación actual	Hr. llegada	Hr. Salida	Tim Ocio	Próximo Destino
VITALITTE S.A.S	09:41 a.m.	09:58 a.m.	0	CENTRO DE ESPECIALISTAS LOGROS IPS
CENTRO DE ESPECIALISTAS LOGROS IPS	10:07 a.m.	10:24 a.m.	0	MARIA MAGRETH CIA LTDA
MARIA MAGRETH CIA LTDA	10:26 a.m.	10:43 a.m.	0	DROGUERIA SUPER DESCUENTOS
DROGUERIA SUPER DESCUENTOS	10:47 a.m.	11:04 a.m.	0	SWING SPA
SWING SPA	11:07 a.m.	11:24 a.m.	0	DROGUERIA GRANADOS 5 LA 27
DROGUERIA GRANADOS 5 LA 27	11:31 a.m.	11:48 a.m.	0	DROGUERIA 20 JULIO COLSANDER
DROGUERIA 20 JULIO COLSANDER	11:59 a.m.	02:48 p.m.	152	DROGUERIA I MISCELANIA MARIA PAZ
DROGUERIA I MISCELANIA MARIA PAZ	03:00 p.m.	03:17 p.m.	0	DROGUERIA GRANADOS ALBANIA
DROGUERIA GRANADOS ALBANIA	03:35 p.m.	03:52 p.m.	0	CONS ODONTOLOGICO CASIMIRO JAIMES
CONS ODONTOLOGICO CASIMIRO JAIMES	04:05 p.m.	04:22 p.m.	0	planta de tratamiento
planta de tratamiento	04:42 p.m.	05:15 p.m.	3	

Tiempo de ocio del camión 238 minutos

Ruta 3 - opt: 0 - 7 - 6 - 10 - 1 - 8 - 5 - 12 - 9 - 4 - 2 - 11 - 3 - 13 - 0

5. Meta heurística de Búsqueda Tabú

En la aplicación de la meta heurística de búsqueda tabú se emplearan los siguientes pasos:

1. Parte de una ruta inicial, en nuestro caso tomamos como semilla la mejor ruta generada entre el algoritmo 2-optimal y 3-optimal.

Heurística	Ruta	Costo
Dos optimal	0 10 11 1 8 5 12 7 6 9 4 2 3 13 0	258.79
Tres optimal	0 7 6 10 1 8 5 12 9 4 2 11 3 13 0	254.11

2. Realizar búsqueda en la vecindad mediante el método dos optimal tabla A26-14

Tabla A26-14. Búsqueda en la vecindad (primera iteración)

ruta	puntos	Costo
Base	0 7 6 10 1 8 5 12 9 4 2 11 3 13 0	254.11
1	0 6 7 10 1 8 5 12 9 4 2 11 3 13 0	274.12
2	0 10 6 7 1 8 5 12 9 4 2 11 3 13 0	278.87
3	0 1 10 6 7 8 5 12 9 4 2 11 3 13 0	318.03
4	0 8 1 10 6 7 5 12 9 4 2 11 3 13 0	322.80
5	0 5 8 1 10 6 7 12 9 4 2 11 3 13 0	325.65
6	0 12 5 8 1 10 6 7 9 4 2 11 3 13 0	312.26
7	0 9 12 5 8 1 10 6 7 4 2 11 3 13 0	324.42
8	0 4 9 12 5 8 1 10 6 7 2 11 3 13 0	322.75
9	0 2 4 9 12 5 8 1 10 6 7 11 3 13 0	311.57
10	0 1 12 4 9 12 5 8 1 10 6 7 3 13 0	275.28
11	0 3 1 12 4 9 12 5 8 1 10 6 7 13 0	1000000
12	0 7 10 6 1 8 5 12 9 4 2 11 3 13 0	292.50
13	0 7 1 10 6 8 5 12 9 4 2 11 3 13 0	291.73
14	0 7 8 1 10 6 5 12 9 4 2 11 3 13 0	293.05
15	0 7 5 8 1 10 6 12 9 4 2 11 3 13 0	295.14
16	0 7 12 5 8 1 10 6 9 4 2 11 3 13 0	295.85
17	0 7 9 12 5 8 1 10 6 4 2 11 3 13 0	296.84
18	0 7 4 9 12 5 8 1 10 6 2 11 3 13 0	279.84

ruta	puntos	Costo
33	0 7 6 10 12 5 8 1 9 4 2 11 3 13 0	297.08
34	0 7 6 10 9 12 5 8 1 4 2 11 3 13 0	300.12
35	0 7 6 10 4 9 12 5 8 1 2 11 3 13 0	284.40
36	0 7 6 10 2 4 9 12 5 8 1 11 3 13 0	316.49
37	0 7 6 10 11 2 4 9 12 5 8 1 3 13 0	2306390
38	0 7 6 10 3 11 2 4 9 12 5 8 1 13 0	2306366
39	0 7 6 10 1 5 8 12 9 4 2 11 3 13 0	294.93
40	0 7 6 10 1 12 5 8 9 4 2 11 3 13 0	296.48
41	0 7 6 10 1 9 12 5 8 4 2 11 3 13 0	301.81
42	0 7 6 10 1 4 9 12 5 8 2 11 3 13 0	310.21
43	0 7 6 10 1 2 4 9 12 5 8 11 3 13 0	2306411
44	0 7 6 10 1 1 12 4 9 12 5 8 3 13 0	2306344
45	0 7 6 10 1 3 11 2 4 9 12 5 8 13 0	2306381
46	0 7 6 10 1 8 12 5 9 4 2 11 3 13 0	295.43
47	0 7 6 10 1 8 9 12 5 4 2 11 3 13 0	301.28
48	0 7 6 10 1 8 4 9 12 5 2 11 3 13 0	311.48
49	0 7 6 10 1 8 2 4 9 12 5 11 3 13 0	2306351
50	0 7 6 10 1 8 11 2 4 9 12 5 3 13 0	2306324
51	0 7 6 10 1 8 3 11 2 4 9 12 5 13 0	2306375

ruta	puntos	Costo
19	0 7 2 4 9 12 5 8 1 10 6 11 3 13 0	1000000
20	0 7 11 2 4 9 12 5 8 1 10 6 3 13 0	1000000
21	0 7 3 11 2 4 9 12 5 8 1 10 6 13 0	1000000
22	0 7 6 1 10 8 5 12 9 4 2 11 3 13 0	292.98
23	0 7 6 8 1 10 5 12 9 4 2 11 3 13 0	294.19
24	0 7 6 5 8 1 10 12 9 4 2 11 3 13 0	295.52
25	0 7 6 12 5 8 1 10 9 4 2 11 3 13 0	295.65
26	0 7 6 9 12 5 8 1 10 4 2 11 3 13 0	298.02
27	0 7 6 4 9 12 5 8 1 10 2 11 3 13 0	1000000
28	0 7 6 2 4 9 12 5 8 1 10 11 3 13 0	1000000
29	0 7 6 11 2 4 9 12 5 8 1 10 3 13 0	1000000
30	0 7 6 3 11 2 4 9 12 5 8 1 10 13 0	1000000
31	0 7 6 10 8 15 12 9 4 2 11 3 13 0	294.06
32	0 7 6 10 5 8 1 12 9 4 2 11 3 13 0	295.85

ruta	puntos	Costo
52	0 7 6 10 1 8 5 9 12 4 2 11 3 13 0	297.97
53	0 7 6 10 1 8 5 4 9 12 2 11 3 13 0	2306328
54	0 7 6 10 1 8 5 2 4 9 12 11 3 13 0	2306330
55	0 7 6 10 1 8 5 11 2 4 9 12 3 13 0	2306298
56	0 7 6 10 1 8 5 3 11 2 4 9 12 13 0	2306364
57	0 7 6 10 1 8 5 12 4 9 2 11 3 13 0	296.01
58	0 7 6 10 1 8 5 12 2 4 9 11 3 13 0	290.59
59	0 7 6 10 1 8 5 12 11 2 4 9 3 13 0	273.30
60	0 7 6 10 1 8 5 12 3 11 2 4 9 13 0	328.23
61	0 7 6 10 1 8 5 12 9 2 4 11 3 13 0	279.58
62	0 7 6 10 1 8 5 12 9 11 2 4 3 13 0	253.47
63	0 7 6 10 1 8 5 12 9 3 11 2 4 13 0	318.52
64	0 7 6 10 1 8 5 12 9 4 11 2 3 13 0	284.03
65	0 7 6 10 1 8 5 12 9 4 3 11 2 13 0	293.83
66	0 7 6 10 1 8 5 12 9 4 2 3 11 13 0	254.18

Una vez generados los vecinos factibles es seleccionado el mejor en cuanto a costo aunque no sea mejor que la solución inicial, en este caso corresponde a la ruta 62 con un costo de 253.47 y será tomada como base para la siguiente iteración.

Ruta : 0 – 7 – 6 – 10 – 1 – 8 – 5 – 12 – 9 – 11 – 2 – 4 – 3 – 13 – 0

Adicionalmente se registra el movimiento en la lista Tabú tabla A36-15, evitando que se incurran en ciclos ya que no se repiten movimientos registrados en ella.

Tabla A26-15. Lista Tabú

Ruta	Intercambio 2 -optimal.
BASE	0 7 6 10 1 8 5 12 9 4 2 11 3 13 0
B2	0 7 6 10 1 8 5 12 9 11 2 4 3 13 0

La lista tabú almacena las últimas 30 búsquedas, y su criterio de parada ocurre cuando el algoritmo evalúa todos los vecinos posibles.

Tabla A26-15. Búsqueda en la vecindad (Segunda iteración).

Ruta	Intercambio 2 -optimal	Costo
Base	0 7 6 10 1 8 5 12 9 11 2 4 3 13 0	253.47
1	0 6 7 10 1 8 5 12 9 11 2 4 3 13 0	273.48
2	0 10 6 7 1 8 5 12 9 11 2 4 3 13 0	278.22
3	0 1 10 6 7 8 5 12 9 11 2 4 3 13 0	302.96
4	0 8 1 10 6 7 5 12 9 11 2 4 3 13 0	307.32
5	0 5 8 1 10 6 7 12 9 11 2 4 3 13 0	310.58
6	0 12 5 8 1 10 6 7 9 11 2 4 3 13 0	308.68
7	0 9 12 5 8 1 10 6 7 11 2 4 3 13 0	307.14
8	0 11 9 12 5 8 1 10 6 7 2 4 3 13 0	304.96
9	0 2 11 9 12 5 8 1 10 6 7 4 3 13 0	300.66
10	0 4 2 11 9 12 5 8 1 10 6 7 3 13 0	276.08
11	0 3 4 2 11 9 12 5 8 1 10 6 7 13 0	1000000
12	0 7 10 6 1 8 5 12 9 11 2 4 3 13 0	294.75
13	0 7 1 10 6 8 5 12 9 11 2 4 3 13 0	293.99
14	0 7 8 1 10 6 5 12 9 11 2 4 3 13 0	295.31
15	0 7 5 8 1 10 6 12 9 11 2 4 3 13 0	297.40
16	0 7 12 5 8 1 10 6 9 11 2 4 3 13 0	297.71
17	0 7 9 12 5 8 1 10 6 11 2 4 3 13 0	296.31
18	0 7 1 19 12 5 8 1 10 6 2 4 3 13 0	275.74
19	0 7 2 11 9 12 5 8 1 10 6 4 3 13 0	1000000
20	0 7 4 2 11 9 12 5 8 1 10 6 3 13 0	1000000
21	0 7 3 4 2 11 9 12 5 8 1 10 6 13 0	1000000
22	0 7 6 1 10 8 5 12 9 11 2 4 3 13 0	294.84
23	0 7 6 8 1 10 5 12 9 11 2 4 3 13 0	296.45
24	0 7 6 5 8 1 10 12 9 11 2 4 3 13 0	297.78
25	0 7 6 12 5 8 1 10 9 11 2 4 3 13 0	297.91
26	0 7 6 9 12 5 8 1 10 11 2 4 3 13 0	296.10
27	0 7 6 11 9 12 5 8 1 10 2 4 3 13 0	1000000
28	0 7 6 2 11 9 12 5 8 1 10 4 3 13 0	1000000
29	0 7 6 4 2 11 9 12 5 8 1 10 3 13 0	1000000
30	0 7 6 3 4 2 11 9 12 5 8 1 10 13 0	1000000
31	0 7 6 10 8 15 12 9 11 2 4 3 13 0	296.31
32	0 7 6 10 5 8 1 12 9 11 2 4 3 13 0	297.71

Ruta	Intercambio 2 -optimal	Costo
33	0 7 6 10 12 5 8 1 9 11 2 4 3 13 0	299.34
34	0 7 6 10 9 12 5 8 1 11 2 4 3 13 0	295.78
35	0 7 6 10 11 9 12 5 8 1 2 4 3 13 0	279.07
36	0 7 6 10 2 11 9 12 5 8 1 4 3 13 0	367.21
37	0 7 6 10 4 2 11 9 12 5 8 1 3 13 0	2306393
38	0 7 6 10 3 4 2 11 9 12 5 8 1 13 0	2306366
39	0 7 6 10 1 5 8 12 9 11 2 4 3 13 0	296.79
40	0 7 6 10 1 12 5 8 9 11 2 4 3 13 0	298.34
41	0 7 6 10 1 9 12 5 8 11 2 4 3 13 0	295.61
42	0 7 6 10 1 11 9 12 5 8 2 4 3 13 0	303.69
43	0 7 6 10 1 2 11 9 12 5 8 4 3 13 0	2306409
44	0 7 6 10 1 4 2 11 9 12 5 8 3 13 0	2306349
45	0 7 6 10 1 3 4 2 11 9 12 5 8 13 0	2306382
46	0 7 6 10 1 8 12 5 9 11 2 4 3 13 0	297.69
47	0 7 6 10 1 8 9 12 5 11 2 4 3 13 0	294.82
48	0 7 6 10 1 8 11 9 12 5 2 4 3 13 0	303.22
49	0 7 6 10 1 8 2 11 9 12 5 4 3 13 0	2306357
50	0 7 6 10 1 8 4 2 11 9 12 5 3 13 0	2306358
51	0 7 6 10 1 8 3 4 2 11 9 12 5 13 0	2306376
52	0 7 6 10 1 8 5 9 12 11 2 4 3 13 0	296.72
53	0 7 6 10 1 8 5 11 9 12 2 4 3 13 0	254.65
54	0 7 6 10 1 8 5 2 11 9 12 4 3 13 0	2306334
55	0 7 6 10 1 8 5 4 2 11 9 12 3 13 0	2306336
56	0 7 6 10 1 8 5 3 4 2 11 9 12 13 0	2306365
57	0 7 6 10 1 8 5 12 11 9 2 4 3 13 0	251.58
58	0 7 6 10 1 8 5 12 2 11 9 4 3 13 0	322.81
59	0 7 6 10 1 8 5 12 4 2 11 9 3 13 0	274.75
60	0 7 6 10 1 8 5 12 3 4 2 11 9 13 0	328.90
61	0 7 6 10 1 8 5 12 9 2 11 4 3 13 0	281.50
62	0 7 6 10 1 8 5 12 9 4 2 11 3 13 0	254.11
63	0 7 6 10 1 8 5 12 9 3 4 2 11 13 0	321.35
64	0 7 6 10 1 8 5 12 9 11 4 2 3 13 0	279.46
65	0 7 6 10 1 8 5 12 9 11 3 4 2 13 0	293.86
66	0 7 6 10 1 8 5 12 9 11 2 3 4 13 0	256.76

En este caso el mejor vecino es la ruta 57, con un costo de 251.58 menor que el de la ruta base de 254.11, por lo tanto se toma como la nueva ruta base teniendo en cuenta el criterio de aspiración, a continuación se presentan la tabla A26-16 con las iteraciones realizadas en el desarrollo de este ejercicio con la ruta generada y el costo asociado.

Tabla A26-16. Iteraciones de la meta heurística búsqueda Tabú

Ruta	Intercambio 2 -optimal.	Costo
3- optimal	0 7 6 10 1 8 5 12 9 4 2 11 3 13 0	254.11
B2	0 7 6 10 1 8 5 12 9 11 2 4 3 13 0	253.47
B3	0 7 6 10 1 8 5 12 11 9 2 4 3 13 0	251.58
B4	0 7 6 10 1 8 5 11 12 9 2 4 3 13 0	250.22
B5	0 7 6 10 1 8 11 5 12 9 2 4 3 13 0	249.45
B6	0 7 6 10 8 1 11 5 12 9 2 4 3 13 0	250.20
B7	0 7 6 10 1 8 11 5 12 9 2 4 3 13 0	249.45
B8	0 7 6 10 1 8 5 11 12 9 2 4 3 13 0	250.22
B9	0 7 6 10 1 8 11 5 12 9 2 4 3 13 0	249.45
B10	0 7 6 10 1 8 12 5 11 9 2 4 3 13 0	251.20
B11	0 7 6 10 1 8 11 5 12 9 2 4 3 13 0	249.45
B12	0 7 6 10 11 8 1 5 12 9 2 4 3 13 0	251.23
B13	0 7 6 10 1 8 11 5 12 9 2 4 3 13 0	249.45
B14	0 7 6 10 1 8 11 5 12 9 2 3 4 13 0	252.74
B15	0 7 6 10 1 8 11 5 12 9 2 4 3 13 0	249.45
B16	0 6 7 10 1 8 11 5 12 9 2 4 3 13 0	269.85
B17	0 7 6 10 1 8 11 5 12 9 2 4 3 13 0	249.45
B18	0 7 6 10 1 8 11 5 12 2 9 4 3 13 0	272.75
B19	0 7 6 10 1 8 11 5 12 9 2 4 3 13 0	249.45
B20	0 7 6 10 1 8 11 5 12 9 4 2 3 13 0	273.42
B21	0 7 6 10 1 8 11 5 12 9 2 4 3 13 0	249.45
B22	0 10 6 7 1 8 11 5 12 9 2 4 3 13 0	274.60
B23	0 7 6 10 1 8 11 5 12 9 2 4 3 13 0	249.45
B24	0 7 9 12 5 11 8 1 10 6 2 4 3 13 0	275.23
B25	0 7 10 1 8 11 5 12 9 6 2 4 3 13 0	247.80
B26	0 7 10 1 8 11 5 12 4 2 6 9 3 13 0	254.33
B27	0 7 10 1 8 11 5 12 9 6 2 4 3 13 0	247.80
B28	0 7 10 1 8 11 5 12 9 2 6 4 3 13 0	261.04
B29	0 7 10 1 8 11 5 12 9 6 2 4 3 13 0	247.80

Ruta	Intercambio 2 -optimal.	Costo
B30	0 7 1 10 8 115 129 6 2 4 3 13 0	270.81
B31	0 7 10 1 8 115 129 6 2 4 3 13 0	247.80
B32	0 7 10 1 8 115 129 4 2 6 3 13 0	270.93
B33	0 7 10 1 8 115 129 6 2 4 3 13 0	247.80
B34	0 7 10 1 11 8 5 129 6 2 4 3 13 0	272.31
B35	0 7 10 1 8 115 129 6 2 4 3 13 0	247.80

Ruta	Intercambio 2 -optimal.	Costo
B36	0 7 8 1 10 115 129 6 2 4 3 13 0	272.52
B37	0 7 10 1 8 115 129 6 2 4 3 13 0	247.80
B38	0 7 11 8 1 10 5 129 6 2 4 3 13 0	273.07
B39	0 7 10 1 8 115 129 6 2 4 3 13 0	247.80
B40	0 7 10 1 5 11 8 129 6 2 4 3 13 0	273.79
B41	0 7 10 1 8 115 129 6 2 4 3 13 0	247.80
B42	0 7 5 11 8 1 10 129 6 2 4 3 13 0	274.33
B43	0 7 10 1 8 115 129 6 2 4 3 13 0	247.80
B44	0 7 10 5 11 8 1 129 6 2 4 3 13 0	274.50
B45	0 7 10 1 8 115 129 6 2 4 3 13 0	247.80
B46	0 7 12 5 11 8 1 10 9 6 2 4 3 13 0	274.51
B47	0 7 10 1 8 115 129 6 2 4 3 13 0	247.80
B48	0 7 10 1 8 11 12 5 9 6 2 4 3 13 0	274.63
B49	0 7 10 1 8 115 129 6 2 4 3 13 0	247.80
B50	0 7 9 12 5 11 8 1 10 6 2 4 3 13 0	275.23
B51	0 7 10 1 8 115 129 6 2 4 3 13 0	247.80
B52	0 7 10 1 12 5 11 8 9 6 2 4 3 13 0	275.27
B53	0 7 10 1 8 115 129 6 2 4 3 13 0	247.80
B54	0 7 10 1 8 11 5 9 12 6 2 4 3 13 0	275.55
B55	0 7 10 1 8 115 129 6 2 4 3 13 0	247.80
B56	0 7 10 1 8 9 12 5 11 6 2 4 3 13 0	275.62
B57	0 7 10 1 8 115 129 6 2 4 3 13 0	247.80
B58	0 7 10 12 5 11 8 1 9 6 2 4 3 13 0	276.50
B59	0 7 10 1 8 115 129 6 2 4 3 13 0	247.80
B60	0 7 10 1 9 12 5 11 8 6 2 4 3 13 0	276.80
B61	0 7 10 1 8 115 129 6 2 4 3 13 0	247.80
B62	0 7 10 1 8 11 9 12 5 6 2 4 3 13 0	276.98
B63	0 7 10 1 8 115 129 6 2 4 3 13 0	247.80
B64	0 7 10 6 9 12 5 11 8 1 2 4 3 13 0	277.05

Ruta	Intercambio 2 -optimal.	Costo
B70	0 7 10 1 8 115 12 6 9 2 4 3 13 0	284.95
B71	0 7 10 1 8 115 129 6 2 4 3 13 0	247.80
B72	0 7 10 1 8 115 129 6 3 4 2 13 0	287.29
B73	0 7 10 1 8 115 129 6 2 4 3 13 0	247.80
B74	0 7 10 1 8 6 9 12 5 11 2 4 3 13 0	293.57
B75	0 7 10 1 8 115 129 6 2 4 3 13 0	247.80
B76	0 1 10 7 8 115 129 6 2 4 3 13 0	294.81
B77	0 7 10 1 8 115 129 6 2 4 3 13 0	247.80
B78	0 7 10 1 6 9 12 5 11 8 2 4 3 13 0	301.19
B79	0 7 10 1 8 115 129 6 2 4 3 13 0	247.80
B80	0 7 10 1 8 11 6 9 12 5 2 4 3 13 0	301.63
B81	0 7 10 1 8 115 129 6 2 4 3 13 0	247.80
B82	0 7 10 1 8 115 129 3 4 2 6 13 0	301.82
B83	0 7 10 1 8 115 129 6 2 4 3 13 0	247.80
B84	0 2 6 9 12 5 11 8 1 10 7 4 3 13 0	302.52
B85	0 7 10 1 8 115 129 6 2 4 3 13 0	247.80
B86	0 9 12 5 11 8 1 10 7 6 2 4 3 13 0	303.58
B87	0 7 10 1 8 115 129 6 2 4 3 13 0	247.80
B88	0 8 1 10 7 115 129 6 2 4 3 13 0	304.30
B89	0 7 10 1 8 115 129 6 2 4 3 13 0	247.80
B90	0 1 18 1 10 7 5 129 6 2 4 3 13 0	304.41
B91	0 7 10 1 8 115 129 6 2 4 3 13 0	247.80
B92	0 12 5 11 8 1 10 7 9 6 2 4 3 13 0	305.91
B93	0 7 10 1 8 115 129 6 2 4 3 13 0	247.80
B94	0 5 11 8 1 10 7 129 6 2 4 3 13 0	306.98
B95	0 7 10 1 8 115 129 6 2 4 3 13 0	247.80
B96	0 7 10 1 8 115 12 3 4 2 6 9 13 0	308.87
B97	0 7 10 1 8 115 129 6 2 4 3 13 0	247.80
B98	0 7 10 2 6 9 12 5 11 8 1 4 3 13 0	323.91

Ruta	Intercambio 2 -optimal.	Costo
B65	0 7 10 1 8 11 5 12 9 6 2 4 3 13 0	247.80
B66	0 7 10 9 12 5 11 8 1 6 2 4 3 13 0	277.44
B67	0 7 10 1 8 11 5 12 9 6 2 4 3 13 0	247.80
B68	0 4 2 6 9 12 5 11 8 1 10 7 3 13 0	278.56
B69	0 7 10 1 8 11 5 12 9 6 2 4 3 13 0	247.80

Ruta	Intercambio 2 -optimal.	Costo
B99	0 7 10 1 8 11 5 12 9 6 2 4 3 13 0	247.80
B100	0 7 10 4 2 6 9 12 5 11 8 1 3 13 0	341.72
B101	0 7 10 1 8 11 5 12 9 6 2 4 3 13 0	247.80
B102	0 7 10 1 2 6 9 12 5 11 8 4 3 13 0	363.39
B103	0 7 10 1 8 11 5 12 9 6 2 4 3 13 0	247.80

Finalmente mediante el criterio de parada, el algoritmo se detiene 40 iteraciones después de tomar la ruta B69 como ruta base sin presentar mejoras adicionales mostradas en la tabla A36-17.

Ruta final: 0 – 7 – 10 – 1 – 8 – 11 – 5 – 12 – 9 – 6 – 2 – 4 – 3 – 13 – 0

Tabla A26-17. Ruta Final Búsqueda Tabú

Ubicación actual	Hora Llegada	Hora Salida	Tiempo de Ocio	Próximo Destino
GARAJE	07:30 a.m.	08:53 a.m.	83	BUCADENTS
BUCADENTS	09:00 a.m.	09:17 a.m.	0	SIAMA LTDA
SIAMA LTDA	09:17 a.m.	09:34 a.m.	0	VITALITTE S.A.S
VITALITTE S.A.S	09:41 a.m.	09:58 a.m.	0	CENTRO DE ESPECLOGROS IPS
CENTRO DE ESPELOGROS IPS	10:07 a.m.	10:24 a.m.	0	MARIA MAGRETH CIA LTDA
MARIA MAGRETH CIA LTDA	10:26 a.m.	10:43 a.m.	0	DROGUERIA SUPER DESCUENTOS
DROGUERIA SUPER DESCUENTOS	10:47 a.m.	11:04 a.m.	0	SWING SPA
SWING SPA	11:07 a.m.	11:24 a.m.	0	DROG GRANADOS 5 LA 27
DROGUERIA GRANADOS 5 LA 27	11:31 a.m.	11:48 a.m.	0	DROGUERIA 20 JULIO COLSANDER
DROGUERIA 20 JULIO COLSANDER	11:59 a.m.	02:48 p.m.	152	DROGUERIA I MISCELANIA MARIA PAZ
DROGUERIA I MISCELANIA MARIA PAZ	03:00 p.m.	03:17 p.m.	0	DROGUERIA GRANADOS ALBANIA
DROGUERIA GRANADOS ALBANIA	03:35 p.m.	03:52 p.m.	0	CONSULTORIO odontológico CASIMIRO JAIMES
CONSULTORIO odontológico CASIMIRO JAIMES	04:05 p.m.	04:22 p.m.	0	planta de tratamiento
planta de tratamiento	04:42 p.m.	05:15 p.m.	3	GARAJE

Tiempo de ocio del camión = 238 min

anexo AA .VALIDACIÓN DE LA APLICACIÓN DE RUTEO

- Clientes y ventanas horarias

Lista de clientes												
Cod	EM	Nombre	Direccion	s_i	Ventana de tiempo AM				Ventana de tiempo PM			
					a_i		b_i		a_i		b_i	
0	1	GARAJE	CALLE 53 NUMERO 17	0	7:30	0	12:00	270	12:00	270	17:15	585
1	65	VIHONCO IPS SALUD	CLL 54 # 31 - 30	17	7:00	0	11:00	210	12:00	270	17:00	570
2	230	MERCAQUIMICOS	CLL 33 # 16 - 44	5	8:00	30	10:00	150	12:00	270	17:00	570
3	785	CLINICA CHICAMOCHA	CLL 40 N° 27A	17	7:30	0	08:00	30	0:00	0	00:00	0
4	1111	PELUQUERIA FENIX	CARRERA 33A # 30A -31	5	9:00	90	12:00	270	13:00	330	15:00	450
5	2	planta de tratamiento	Calle 2 # 3ª - 69	30	8:00	30	12:00	270	12:00	270	20:00	750

- Matriz de distancias y de tiempos

O/D	0	1	2	3	4	5
0	10000	3	1,7	1,6	2,8	10,3
1	2,4	10000	3,5	1,3	2,5	12,9
2	2,6	2,9	10000	2,3	2,7	9
3	2,7	1,6	2,4	10000	1,2	9,5
4	4,3	2,7	3,1	1,8	10000	10,7
5	7,5	10,9	11,8	10,8	12	10000

O/D	0	1	2	3	4	5
0	10000	10	4	5	9	17
1	10	10000	9	4	8	19
2	6	12	10000	7	8	15
3	7	7	8	10000	4	17
4	10	9	8	7	10000	19
5	15	16	14	14	18	10000

- Algoritmo del vecino más cercano con enfoque temporal.

El algoritmo se realizó en base a la siguiente ecuación de costos

$$c_{ij} = \delta_1 d_{ij} + \delta_2 T_{ij} + \delta_3 V_{ij} \quad (1.1)$$

Se definió los siguientes parámetros

$$\delta_1 = 0.45$$

$$\delta_2 = 0.45$$

$$\delta_3 = 0.1$$

Se parte del garaje y se establece el costo de ir a los demás clientes, a continuación se observa el costo del ir del garaje al cliente 1.

SUMAR.SI X ✓ f_x =SUMAPRODUCTO(L11:N11,L3:N3)

O/D	0	1	2	3	4	5
0	100000	3	1.7	1.6	2.8	10.3
1	2.4	100000	3.5	1.3	2.5	12.9
2	2.6	2.9	100000	2.3	2.7	9
3	2.7	1.6	2.4	100000	1.2	9.5
4	4.3	2.7	3.1	1.8	100000	10.7
5	7.5	10.9	11.8	10.8	12	100000

sigma 1 sigma 2 sigma 3
0.45 0.45 0.1

CLIENTE 1			
wj	wi	si	Tij
10	0	0	10
bj	wj	tij	si
210	10	10	0
dij	Tij	Vij	cij
3	10	190	=+SUMA

A continuación se listan los costos de ir del garaje a los demás clientes.

Origen	Destino	costo
0	0	1000
0	1	24.85
0	2	16.76
0	3	4.97
0	4	6.51
0	5	35.88

Seleccionado el cliente 3 establecemos los costos de ir a los demás clientes



El resultado de la aplicación concuerda con esta respuesta como verán en la siguiente imagen.

Resultados Simulación Vecino mas cercano

Costo = 0.45 *dij + 0.45 *Tij + 0.1 *Vij
 Hora inicio Simulacion = 07:30
 Hora Fin Simulacion = 5:15 PM

Ubicación actual	Hora llegada	Hora Salida	Tiempo de Ocio	Próximo Destino
GARAJE	7:30 AM	7:30 AM	0	CLINICA CHICAMOCHA
CLINICA CHICAMOCHA	7:35 AM	7:52 AM	0	MERCAQUIMICOS
MERCAQUIMICOS	8:00 AM	8:05 AM	0	VIHONCO IPS SALUD
VIHONCO IPS SALUD	8:17 AM	8:51 AM	17	PELUQUERIA FENIX
PELUQUERIA FENIX	9:00 AM	9:05 AM	0	planta de tratamiento
planta de tratamiento	9:23 AM	9:53 AM	0	GARAJE
GARAJE	10:09 AM	5:15 PM	426	

- Algoritmo de inserción

Se define la ecuación de la siguiente forma

$$c_1(v_i, w) = \alpha_1 c_{11}(v_i, w) + \alpha_2 c_{12}(v_i, w) \quad (2.1)$$

$$c_{11}(v_i, w) = d_{iw} + d_{w,i+1} - ud_{i,i+1} \quad (2.3)$$

$$c_{12}(v_i, w) = b_{i+1}^w - b_{i+1} \quad (2.4)$$

$$c_2(v_i, w) = \lambda d_{0w} - c_1(v_i, w) \quad (2.5)$$

Dónde: b_{i+1}^w indica el tiempo de arribo al nodo $i + 1$ cuando w es insertado en la ruta.

d_{ij} es la distancia entre los nodos i y j

$$\alpha_1, \alpha_2, u, \lambda \geq 0 \text{ y } \alpha_1 + \alpha_2 = 1$$

Se crea la ruta seleccionando el cliente mediante la fórmula (2.5), El mejor costo es ubicado en la tabla como Mejor W, inmediatamente se emplea la fórmula (2.5) y se ubica en la tabla como Mejor I.

ruta	puntos	Mejor W	Mejor I
ruta	0 3 5	1	1
ruta	0 1 3 5	4	2
ruta	0 1 4 3 5	2	3
ruta	0 1 4 2 3 5		

Una vez creada la secuencia, se ajustan las visitas a las ventanas orarías y se obtiene la siguiente ruta.

Ubicación actual	Hora llegada	Hora Salida	Tiempo de Ocio	Próximo Destino
GARAJE	7:30 AM	8:51 AM	81	PELUQUERIA FENIX
PELUQUERIA FENIX	9:00 AM	9:05 AM	0	VIHONCO IPS SALUD
VIHONCO IPS SALUD	9:14 AM	5:15 PM	464	CLINICA CHICAMOCHA

Al ingresar la ruta a las ventanas horarias encontramos que no es posible visitar algunos clientes y esto genera una multa indicando que no es una ruta recomendable.

Nodos sin visitar	
nodo	
2	MERCAQUIMICOS
3	CLINICA CHICAMOCHA
5	planta de tratamiento
Tiempo de ocio del camión = 545 minutos	
Costo Insercion: 1000000	

• Algoritmo 2-

opt.

Mediante la ecuación anterior se establece que el programa está calculando el costo relacionado de la forma correcta se emplea el costo del vecino mas cercano, a continuación se muestran los posibles intercambios de la ruta creada, los costos iguales a 1000000 quiere decir que ruta es restringida por ventana de tiempo.

ruta	puntos	Costo
Ruta construida	0 3 2 1 4 5 0	118.36
Ruta Base	0 3 2 1 4 5 0	118.36
Ruta 1	0 2 3 1 4 5 0	10,000.00
Ruta 2	0 1 2 3 4 5 0	10,000.00
Ruta 3	0 4 1 2 3 5 0	10,000.00
Ruta 4	0 3 1 2 4 5 0	115.08
Ruta 5	0 3 4 1 2 5 0	89.88
Ruta 6	0 3 2 4 1 5 0	106.75
Ruta Base	0 3 4 1 2 5 0	89.88
Ruta 1	0 4 3 1 2 5 0	1,000.00
Ruta 2	0 1 4 3 2 5 0	1,000.00
Ruta 3	0 2 1 4 3 5 0	1,000.00
Ruta 4	0 3 1 4 2 5 0	105.70
Ruta 5	0 3 2 1 4 5 0	118.36
Ruta 6	0 3 4 2 1 5 0	93.98

Ruta del vecino más

Se establece que la mejor ruta es la ruta 5 y esta respuesta concuerda con el software como se ve a continuación. Con un costo de 89.88

Ubicación actual	Hora llegada	Hora Salida	Tiempo de Ocio	Próximo Destino
GARAJE	7:30 AM	7:30 AM	0	CLINICA CHICAMOCHA
CLINICA CHICAMOCHA	7:35 AM	8:56 AM	64	PELUQUERIA FENIX
PELUQUERIA FENIX	9:00 AM	9:05 AM	0	VIHONCO IPS SALUD
VIHONCO IPS SALUD	9:14 AM	9:31 AM	0	MERCAQUIMICOS
MERCAQUIMICOS	9:40 AM	9:45 AM	0	planta de tratamiento
planta de tratamiento	10:01 AM	10:31 AM	0	GARAJE
GARAJE	10:46 AM	5:15 PM	389	

- **Algoritmo 3-opt**

Basados en la misma Ecuación de costos se muestran los posibles intercambios 3 opt. Con un costo de 93.97

ruta	puntos	Costo
Ruta construida	0 3 2 1 4 5 0	118.3573
Ruta Base	0 3 2 1 4 5 0	118.3573
Ruta 1	0 2 1 3 4 5 0	1000
Ruta 2	0 1 4 3 2 5 0	1000
Ruta 3	0 3 1 4 2 5 0	105.70015
Ruta Base	0 3 1 4 2 5 0	105.70015
Ruta 1	0 1 4 3 2 5 0	1000
Ruta 2	0 4 2 3 1 5 0	1000
Ruta 3	0 3 4 2 1 5 0	93.97583
Ruta Base	0 3 4 2 1 5 0	93.97583
Ruta 1	0 4 2 3 1 5 0	1000
Ruta 2	0 2 1 3 4 5 0	1000
Ruta 3	0 3 2 1 4 5 0	118

Ruta del vecino más

Primera iteración

Segunda iteración

Se puede observar las iteraciones de la ruta construida en primera instancia se obtiene como menor costo la ruta tres con un costo de 105.7 , esta es tomada como base para la segunda iteración donde la mejor ruta es la tercera conformación con un costo de 93.97, esta ruta contrasta con la aplicación como se ve a continuación.

Ubicación actual	Hora Llegada	Hora Salida	Tiempo de Ocio	Próximo Destino
GARAJE	7:30 AM	7:30 AM	0	CLINICA CHICAMOCHA
CLINICA CHICAMOCHA	7:35 AM	8:56 AM	64	PELUQUERIA FENIX
PELUQUERIA FENIX	9:00 AM	9:05 AM	0	MERCAQUIMICOS
MERCAQUIMICOS	9:13 AM	9:18 AM	0	VIHONCO IPS SALUD
VIHONCO IPS SALUD	9:31 AM	9:48 AM	0	planta de tratamiento
planta de tratamiento	10:06 AM	10:36 AM	0	GARAJE
GARAJE	10:51 AM	5:15 PM	384	

- **Meta Heurística búsqueda tabú**

Esta meta heurística toma como base la mejor entre la heurística de mejora 2-opt y 3-opt e inicia a realizar las iteraciones como se ve en la siguiente lista:

Ruta	puntos	Costo
Ruta Base	0 3 4 1 2 5 0	89.88
Ruta 1	0 4 3 1 2 5 0	1,000.00
Ruta 2	0 1 4 3 2 5 0	1,000.00
Ruta 3	0 2 1 4 3 5 0	1,000.00
Ruta 4	0 3 1 4 2 5 0	105.70
Ruta 5	0 3 2 1 4 5 0	118.36
Ruta 6	0 3 4 2 1 5 0	93.98
Ruta Base	0 3 4 2 1 5 0	93.98
Ruta 1	0 4 3 2 1 5 0	1,000.00
Ruta 2	0 2 4 3 1 5 0	1,000.00
Ruta 3	0 1 2 4 3 5 0	1,000.00
Ruta 4	0 3 2 4 1 5 0	106.75
Ruta 5	0 3 1 2 4 5 0	115.08
Ruta 6	0 3 4 1 2 5 0	89.88
Ruta Base	0 3 4 1 2 5 0	89.88
Ruta 1	0 4 3 1 2 5 0	1,000.00
Ruta 2	0 1 4 3 2 5 0	1,000.00
Ruta 3	0 2 1 4 3 5 0	1,000.00
Ruta 4	0 3 1 4 2 5 0	105.70
Ruta 5	0 3 2 1 4 5 0	118.36
Ruta 6	0 3 4 2 1 5 0	93.98
Ruta Base	0 3 1 4 2 5 0	105.70
Ruta 1	0 1 3 4 2 5 0	10,000.00
Ruta 2	0 4 1 3 2 5 0	10,000.00
Ruta 3	0 2 4 1 3 5 0	10,000.00
Ruta 4	0 3 4 1 2 5 0	89.88
Ruta 5	0 3 2 4 1 5 0	106.75
Ruta 6	0 3 1 2 4 5 0	115.08

Mejor ruta generada (2-opt)

1ª iteración

2ª iteración

3ª iteración

Lista Tabú

Ruta	puntos	Costo
Ruta Base	0 3 4 1 2 5 0	89.88
Ruta 1	0 4 3 1 2 5 0	10,000.00
Ruta 2	0 1 4 3 2 5 0	10,000.00
Ruta 3	0 2 1 4 3 5 0	10,000.00
Ruta 4	0 3 1 4 2 5 0	105.70
Ruta 5	0 3 2 1 4 5 0	118.36
Ruta 6	0 3 4 2 1 5 0	93.98
Ruta Base	0 3 2 1 4 5 0	118.36
Ruta 1	0 2 3 1 4 5 0	10,000.00
Ruta 2	0 1 2 3 4 5 0	10,000.00
Ruta 3	0 4 1 2 3 5 0	10,000.00
Ruta 4	0 3 1 2 4 5 0	115.08
Ruta 5	0 3 4 1 2 5 0	89.88
Ruta 6	0 3 2 4 1 5 0	106.75
Ruta Base	0 3 4 1 2 5 0	89.88
Ruta 1	0 4 3 1 2 5 0	1,000.00
Ruta 2	0 1 4 3 2 5 0	1,000.00
Ruta 3	0 2 1 4 3 5 0	1,000.00
Ruta 4	0 3 1 4 2 5 0	105.70
Ruta 5	0 3 2 1 4 5 0	118.36
Ruta 6	0 3 4 2 1 5 0	93.98

4º

5º

6º

nodo1	nodo 2
2	4
4	2
1	4
4	1
2	1
1	2

Luego de 6 iteraciones se han explorado todos los vecinos sin obtener mejora adicional por tal motivo se obtiene como resultado la ruta con costo 89.88.

Resultados Simulación tabu

Ubicación actual	Hora llegada	Hora Salida	Tiempo de Ocio	Próximo Destino
GARAJE	7:30 AM	7:30 AM	0	CLINICA CHICAMOCHA
CLINICA CHICAMOCHA	7:35 AM	8:56 AM	64	PELUQUERIA FENIX
PELUQUERIA FENIX	9:00 AM	9:05 AM	0	VIHONCO IPS SALUD
VIHONCO IPS SALUD	9:14 AM	9:31 AM	0	MERCAQUIMICOS
MERCAQUIMICOS	9:40 AM	9:45 AM	0	planta de tratamiento
planta de tratamiento	10:01 AM	10:31 AM	0	GARAJE
GARAJE	10:46 AM	5:15 PM	389	

ANEXO AB. ARTÍCULO “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE RUTAS DE RECOLECCIÓN DE RESIDUOS HOSPITALARIOS PARA LA EMPRESA EDEPSA S.A.S”

Johan Guevara, Est. de Ing. Industrial; Adriana Vargas, Est. de Ing. Industrial
Universidad Industrial de Santander, Facultad de ingenierías fisicomecánicas,
Escuela de estudios industriales y empresariales, Programa de ingeniería industrial.
Jg.ing.uis@gmsil.com, amvargas.uis.ing@gmail.com
Bucaramanga, Santander, Colombia
Enero-2014

RESUMEN

Se presenta la implementación de un modelo de optimización combinatoria en la empresa Edepsa ESP, resultado de la consulta de cinco métodos de solución: la heurística del vecino más cercano, la de inserción más barata, los algoritmos de mejora 2-opt y 3-opt y finalmente la meta heurística tabú. La aplicación empleada para el diseño de rutas de recolección se desarrolló en herramientas de libre aplicación como google maps, mysql y un lenguaje de programación en PHP.

Palabras clave: TSP con ventanas de tiempo, heurísticas de construcción, heurísticas de mejora, meta heurísticas

ABSTRACT

It presents the implementation of a combinatorial optimization model in the company Edepsa ESP, like result of a five viable methods query: the nearest neighbor's heuristics, the cheapest insertion, the enhancement of algorithms 2-opt and 3-opt and finally the tabu search metaheuristic. The application used for this collection route design was developed through free applications like Google maps, Mysql and a PHP programming language.

Palabras clave: TSP with time windows, construction heuristics, enhancement heuristics, metaheuristic.

1. Introducción

Los residuos peligrosos son considerados como fuentes de riesgo para el medio ambiente y la salud, estos residuos generados a partir de actividades industriales, agrícolas, de servicios y aun de las actividades domésticas, constituyen un tema ambiental de especial importancia en razón de su volumen cada vez creciente como consecuencia del proceso de desarrollo económico.

En Colombia la gestión ambiental sostenible de los residuos o desechos peligrosos, en adelante RESPEL está orientado hacia el tratamiento y disposición final, el tratamiento tiene como objetivo principal separar y concentrar los residuos con el fin de recuperar materias primas para su incorporación al ciclo económico productivo, y reducir la cantidad, volumen y peligrosidad como actividad previa a una disposición final.

Dicho tratamiento es brindado por empresas especializadas como Edepsa soluciones ambientales encargadas de la recolección y disposición de estos materiales, el proyecto se enfoca en el diseño y la implementación de rutas de recolección de residuos hospitalarios a partir de una planeación táctica.

Para abordar la problemática encontrada, se inicia con el conocimiento de los factores relevantes del problema para continuar con el análisis de métodos exactos y heurísticas clásicas del problema TSP con ventanas de tiempo, con el propósito de encontrar una solución práctica dentro del marco de referencia planteado.

Concluida la etapa de diseño de rutas llevada a cabo mediante un software de ruteo vehicular se realiza la implementación y se cuantifica la mejora alcanzada.

2. PROBLEMA DEL AGENTE VIAJERO CON VENTANAS DE TIEMPO.

Básicamente el TSPTW es un TSP en el que cada ciudad lleva asociado un intervalo de tiempo $[e_i, l_i] = 1, \dots, n$, en el que tiene que ser visitada: si se llega a la ciudad i antes del instante e_i hay que esperar hasta ese momento, y nunca se puede llegar más tarde del instante l_i , se supone que el tiempo de salida inicial es e_i . [1] Donde d_{ij} y t_{ij} es la distancia y el tiempo entre la ciudad i y la ciudad j respectivamente, y D_i es el tiempo de llegada a la ciudad i .

2.1 Formulación del modelo de optimización en el caso Edepsa ESP

No se consideran tiempos de espera del vehículo cuando arriban a los clientes ya que estos son despreciables.

F , Es la duración de la jornada en minutos que inicia desde las 7:30 hasta las 5:15 pm, momento en el cual el vehículo arriba al garaje, considerando una hora de holgura, se estipulan 525 minutos.

Para cada arco $A \in (i, j)$ se definen:

Parámetros	
C_{ij}	Costo de la función objetivo asociado de viajar desde el punto i al punto j , donde los puntos corresponden a las entidades. Se estipulan de acuerdo a una ponderación del tiempo, la distancia y la urgencia de visitar el cliente.
Variables	
x_{ij}	1, si el arco $(i, j) \in A$ 0 en otro caso.

Para cada nodo $V = \{0, \dots, n\}$ se definen:

Parámetros	
a_i	Tiempo más cercano, de inicio de servicio en el cliente i
b_i	Tiempo más lejano de inicio de servicio, o el fin de la ventana correspondiente al cliente i .
E	Salida del depósito más temprano posible. Se considerara a las 7:30am para el modelo el valor es el minuto 0 de la jornada.
L	Llegada al depósito más tardía posible. Se considerara a las 17:15 para el modelo el valor es el minuto 525 de la jornada.
S_i	Tiempo que toma recoger los residuos peligrosos al cliente i , este tiempo se estableció en 17 minutos para los clientes y 30 minutos para la planta de tratamiento.

Variables	
W_i	Instante del día en que se inicia a cargar los residuos peligrosos de la entidad i o cliente actual.
W_j	Instante en que el vehículo inicia a servir al cliente j o cliente siguiente.

La planta de tratamiento será tomada como un cliente, cuya ventana de tiempo es suficientemente grande para que el modelo lo tome inmediatamente antes de llegar al garaje.

Función objetivo

$$\text{Min} \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} * X_{ij}$$

Restricciones:

El vehículo sale del garaje 0.

$$\sum_{j \in \Delta+(0)} X_{0j} \leq 1 \quad (1)$$

El vehículo regresa al garaje al terminar la jornada.

$$\sum_{i \in \Delta+(n+1)} X_{i,n+1} = 1 \quad (2)$$

Asignación de los clientes a la ruta.

$$\sum_{j \in \Delta+(i)} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in N \quad (3)$$

Dado $N = v \setminus \{0, n+1\}$ que representa el conjunto de clientes exceptuando la bodega, asigna los clientes exactamente una vez a la ruta. $j \in \Delta+(i)$ Es el conjunto de grafos completos que parten de i y llegan a j .

No pueden existir sub tours entre dos clientes.

$$X_{ij} + X_{ji} \leq 1 \quad \forall (i,j) \in N, \quad (6)$$

Los demás sub tours son eliminados por las restricciones de ventanas de tiempo. Secuencia de los tiempos de atención.

$$X_{ij}(w_i + s_i + t_{ij} - w_j) \leq 0 \quad \forall (i,j) \in A \quad (7)$$

Impone que el tiempo de atención del cliente j , debe ser mayor o igual al tiempo de arribo al cliente i más el tiempo de descarga, más el tiempo de viaje desde i a j .

$$a_i \sum_{j \in \Delta+(i)} X_{ij} \leq W_i \leq b_i \sum_{j \in \Delta+(i)} X_{ij} ; i \in N \quad (8)$$

La restricción (8) establece que el instante de llegada W_i sea dentro de la ventana de tiempo $[a_i, b_i]$ asociada a los nodos de cada cliente i .

$$E \leq W_i \leq L ; i \in N \quad (9)$$

La restricción (9) hace que cada cliente sea visitado

dentro del intervalo de tiempo general $[a_0, b_0] = [a_{n+1}, b_{n+1}] = [E, L]$, asociada a los nodos de llega y salida del depósito.

El inicio del servicio a cada cliente debe ser anterior del final del día laboral.

$$w_i \leq F \quad \forall i \in N \quad (10).$$

Impone una cota superior de tiempo con la que cuenta el modelo para poder realizar la recolección, conocida la jornada laboral. Naturaleza de las variables

$$x_{ij} \in \{0,1\}, w_i \geq 0 ; \forall i \in N, (i,j) \in A \quad (11)$$

$A \in (i,j)$ Es el conjunto de arcos con $i \neq j$.

3. LOGÍSTICA DE LA GESTIÓN RESPEL EN COLOMBIA

Residuos peligrosos: residuos peligrosos, se refiere a los residuos que debido a su peligrosidad intrínseca (tóxico, corrosivo, reactivo, inflamable, explosivo, infeccioso, eco tóxico) pueden causar daños a la salud o al ambiente [2]. Por lo tanto, la definición no depende del estado físico, ni del manejo al que será sometido posteriormente a su generación.

El ciclo de manejo de los RESPEL empieza con un generador, en una sociedad moderna los residuos peligrosos provienen de un gran número de fuentes que van desde la industria hasta el comercio, pasando por la agricultura, la asistencia médica y el hogar

En Colombia el manejo RESPEL está orientado más hacia el tratamiento y disposición final más que a la prevención y el aprovechamiento” [3] por tal motivo la actividad logística a la cual se centran los esfuerzos es la logística de recolección, actividad que realiza la empresa de Edepsa Soluciones ambientales, a continuación se muestra la figura 11 donde se observa la recuperación de valor en el manejo de los residuos, reiterando la logística de recolección como un elemento que arregla valor a las organizaciones que lo realizan.

Figura 11: Estrategias Manejo de residuos.



Fuente: [4]

Desde el momento en que se generan los RESPEL, hasta su ingreso en una instalación para su disposición final, los RESPEL siguen el acondicionamiento, el almacenamiento y transporte.

4. TECNICAS DE OPTIMIZACION COMBIANTORIA APLICADAS PARA LA CONSTRUCCION DE RUTAS DE EDEPSA ESP

La heurística está diseñada para encontrar buenas soluciones aproximaciones de problemas combinatorios difíciles. Una heurística es una técnica de búsqueda directa que utiliza regla favorables prácticas para localizar soluciones mejoradas, la ventaja de la heurística es que en general determina (buenas) soluciones con rapidez, utilizando reglas de soluciones simples, La desventaja es que la calidad de la solución (con respecto a la óptima) suele desconocerse.

Las primeras generaciones de heurística se basan en la regla de búsqueda codiciosa que dicta que se mejore el valor de la función objetivo con cada movimiento de búsqueda. La búsqueda termina en un óptimo local donde ya no son posibles más mejoras.

En la década de 1980, una nueva generación de meta heurísticas busco mejora la calidad de las soluciones heurísticas al permitir la búsqueda de una trampa de escape en óptimos locales. La ventaja obtenida se logra a expensas de los cálculos incrementados. [5]

4.1 Heurísticas de construcción de rutas.

Estas crean una solución factible mediante la inserción de nodos, iniciando con la unión de dos ciudades, para después añadir los nodos restantes uno por uno, de tal forma que el costo de la ruta se incremente mínimamente. Existen algunas variaciones dependiendo de cuáles son los nodos que se eligen al iniciar, y cuales se insertan en cada etapa.

4.1.1 Heurística del vecino más cercano con enfoque temporal

El algoritmo halla una solución basada en la cercanía de dos nodos o clientes adyacentes. En el enfoque temporal de la heurística del vecino más cercano, se usa una métrica o medida que hace un balance ponderado entre la cercanía geográfica de los clientes y el tiempo recorrido respectivo de un nodo a otro, en esta aproximación, un cliente cercano geográficamente no implica factibilidad en términos de tiempo, por esta razón el costo de la ruta al insertar un cliente hace un balance entre los dos parámetros, y asigna los clientes a la ruta dando prioridad

a aquellos cuyo "balance" sea menor. Si se tiene una ruta $(0, \dots, u_i, \dots, 0)$ se define el costo de insertar el cliente u_j a continuación de u_i en la ruta como:

$$c_{ij} = \delta_1 d_{ij} + \delta_2 T_{ij} + \delta_3 V_{ij} \quad (1.1)$$

$$\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 = 1$$

$$T_{ij} = W_j - (W_i + s_i) \quad (1.2)$$

$$V_{ij} = b_j - (W_j + s_i + t_{ij}) \quad (1.3)$$

d_{ij} , distancia directa entre dos nodos y mide su cercanía geográfica (se asume que cada unidad de distancia es equivalente a una unidad de tiempo).

T_{ij} , Indica la diferencia entre la hora de comienzo del servicio j y la del fin de servicio en i , midiendo la cercanía de los clientes en términos temporales. Este parámetro minimiza el menor tiempo de recorrido y el menor tiempo de espera entre dos clientes.

V_{ij} , Mide la urgencia de realizar la inserción. Se define como la diferencia entre la hora de arribo a j (sin incluir la espera) y la última hora a la que podría arribar dicho cliente. Prioriza los clientes a insertar teniendo en cuenta la diferencia de tiempo más tardía para servir al cliente j . valores cercanos a 0 indican que dentro de "pocas" iteraciones, el cliente j no podrá ser insertado en esta ruta.

Diferentes valores de δ_1, δ_2 y δ_3 arrojan resultados distintos, según el enfoque que se quiera dar al modelo. Si se busca insertar los clientes en las rutas minimizando su cercanía geográfica, se dará menor valor a δ_1 , en cambio si se priorizan clientes por su cercanía temporal, menores valores de δ_2 guiarán la heurística a que forme rutas con valores ponderados de tiempo y distancia menores, si existen clientes cuyo tiempo de servicio más tardío está alejado del horizonte de planeación de rutas, el coeficiente δ_3 , debe ser menor para que se garantice el servicio a clientes críticos.

4.1.2 Heurística inserción más barata

Las heurísticas de inserción proponen varios criterios de inserción (criterios de inserción I, II y III) que minimizan de forma ponderada el criterio de distancia y tiempo que supone la inclusión de un cliente. Estas métricas están relacionadas con los costos en los que se incurre a la introducción al introducir un nuevo nodo.

Dada una ruta inicial de clientes, debe elegirse un parámetro de inserción que permita intercalar el mejor nodo en el lugar adecuado del recorrido. Con esta inclusión los tiempos de llegada a los clientes son modificados [6]

Se considera la ventaja de visitar a un cliente dentro de una ruta parcial y no en una ruta específica para él. En este caso se tiene:

$$c_1(v_i, w) = \alpha_1 c_{11}(v_i, w) + \alpha_2 c_{12}(v_i, w) \quad (2.1)$$

$$c_{11}(v_i, w) = d_{iw} + d_{w,i+1} - u d_{i,i+1} \quad (2.3)$$

$$c_{12}(v_i, w) = b_{i+1}^w - b_{i+1} \quad (2.4)$$

$$c_2(v_i, w) = \lambda d_{0w} - c_1(v_i, w) \quad (2.5)$$

Donde: b_{i+1}^w indica el tiempo de arribo al nodo $i + 1$ cuando w es insertado en la ruta.

d_{ij} es la distancia entre los nodos i y j

$$\alpha_1, \alpha_2, u, \lambda \geq 0 \text{ y } \alpha_1 + \alpha_2 = 1$$

Para calcular la mejor inserción se tiene en cuenta dos factores. Por un lado c_{11} mide el ahorro en la distancia si se insertan w entre v_i y v_{i+1} . Además c_{12} , tiene en cuenta el retardo que provoca insertar el cliente nuevo en la ruta el tiempo adicional es llamado también Push Forward.

c_1 = Determina la posición más barata donde se puede insertar el nuevo cliente.

c_2 = Selecciona el cliente a insertar tomando el valor de C_1 y la distancia del cliente al depósito, de esta manera se privilegia a los clientes para los que sería demasiado crear una ruta individual escogiendo el de mayor c_2 .

El mejor lugar de inserción es aquel que minimice una combinación entre la extra-distancia y extra tiempo de inserción.

α_1, α_2 Determinan el enfoque de la heurística. Si en la inserción pesan variables temporales, entonces se dará mayor ponderación α_2 y si es más importante optimizar la distancia, se dará prioridad a α_1 .

4.2 Heurísticas de mejora de rutas

Se basa en modificaciones simples, operaciones de intercambio y movimientos, a partir de un recorrido. El objetivo de estas metodologías es producir un recorrido mejorado. Alternativamente, podemos ver lo anterior como un proceso de búsqueda de vecindad, cada ruta tiene una vecindad asociada, es decir, recorridos que se pueden producir con un simple movimiento, de esta manera, se lleva a cabo búsquedas, ya que al hacer modificaciones al vecindario se obtienen soluciones que mejoran la función objetivo.

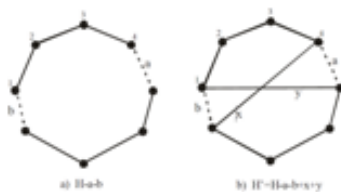
El algoritmo se detiene cuando la solución no puede ser mejorada, entre estos métodos se encuentran los algoritmos de búsqueda local también llamadas heurísticas codiciosas, que en general se aplican en

problemas cuya solución requiere tiempo exponencial, ya que tienen la propiedad de analizar a su vecino, concluir si la solución dada es óptima y encontrar una solución en tiempo polinomial, también es aplicable al TSP con buenos resultados^[7].

4.2.1 Método Optimización 2-opt

Esta es una de las heurísticas más exitosas para obtener una solución cercana al problema del TSP ya que puede encontrar soluciones cercanas a la óptima para un problema de tamaño considerable, En Cada ruta que se va obteniendo, el vector (NP_i) puede calcularse utilizando $\theta(n^2)$ operaciones a partir de la matriz (VP_{ij}) . El algoritmo parte de un circuito Hamiltoniano, cuyo costo de recorrido será optimizado, en cada paso el algoritmo de búsqueda local selecciona dos aristas, las retira e inserta dos nuevas de la mejor manera posible, sin crear sub rutas.

Figura 1. Unión de nodos para formar un camino 2-optimal.

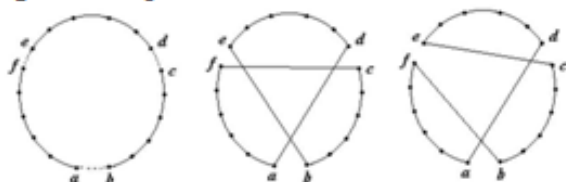


Fuente: [8]

4.2.2 Método Optimización 3-opt

Este algoritmo, al igual que el anterior, intenta encontrar una mejor ruta entre un conjunto de puntos dados. Su objetivo es similar al algoritmo 2-opt, aunque en este caso se trata de un algoritmo un poco más complejo, ya que las operaciones en lugar de hacerlas con dos arcos, se llevan a cabo con tres arcos simultáneamente. Por tanto, lo que hace esta algoritmo es eliminar tres arcos e intentar buscar un camino más óptimo reconectándolos de manera alternativa, tal y como podemos ver en la figura 2, de forma que se respeten las restricciones temporales.

Figura 2. 3-opt.



Fuente: [9]

4.3 Meta heurística

La meta heurística está diseñada principalmente para escapar del entrapamiento en el óptimo local al permitir movimientos inferiores, si es necesario. Se espera que la flexibilidad agregada a la búsqueda conduzca a una mejor solución.

A diferencia de la heurística codiciosa o de búsqueda local, la cual siempre termina cuando se llega a un óptimo local, la meta heurística termina mediante los referentes encontrado en la tabla 1.

Tabla 1. Referencias para la terminación de la meta heurística

La cantidad de iteraciones de búsqueda excede una cantidad especificada.
La cantidad de iteraciones desde la última mejor solución excede una cantidad especificada.
La vecindad asociada con el punto de búsqueda actual, o está vacía o no puede conducir a un nuevo movimiento de búsqueda viable.
La calidad de la mejor solución actual es aceptable.

Fuente: [10]

4.3.1 Meta heurística búsqueda Tabú.

El principal objetivo es escapar de óptimos locales, para ello emplea algunas metodologías como el uso de memorias flexibles o cambio de la estructura del problema creando o relajando las restricciones con la finalidad de realizar la búsqueda en áreas no factibles pero que de alguna manera nos puede llevar a una solución de buena calidad. [11]

4.3.1.1 Conceptos de Búsqueda Tabú.

Lista Tabú: Lista creada para guardar una memoria de los movimientos que no se permiten (movimientos tabú) en la actual iteración. Esto con el fin de evitar movimientos que regresen a un punto de altura iteración anterior y de esta manera producir ciclos en la búsqueda. El buen manejo de la lista tabú nos lleva a explorar nuevas regiones.

Criterio de aspiración: Permite omitir las restricciones tabú, con el fin de eliminar la clasificación tabú a un movimiento, cuando la solución de este es mejor que la solución obtenida hasta el momento.

Estrategia de intensificación: El objetivo es explorar más detalladamente una zona determinada del espacio de soluciones con la posibilidad de encontrar en este conjunto una solución o un grupo de soluciones mejores que las conocidas.

Estrategia de diversificación: Cuando una solución no se puede mejorar después de un determinado número de iteraciones es conveniente emplear el criterio de diversificación con el fin de generar soluciones que agreguen atributos o características significativamente diferentes a los encontrados en soluciones anteriores.

Criterio de parada: Se establece al inicio del problema el criterio que detiene el algoritmo.

5. SOFTWARE PARA EL TSPTW

Para diseñar las rutas de recolección de la empresa Edepsa ESP, se creó una herramienta que mejora la eficiencia del proceso de recolección RESPEL de acuerdo al costo de transporte, empleando para su desarrollo herramientas confiables de libre aplicación como tal, es el caso de google maps, mysql y un lenguaje de programación en PHP.

Componentes: El programa combina e integra tres componentes: Cliente web (la información del sistema logístico), Sistema de información geográfica (aplicación de información geográfica Google maps), y servidor apache (toda la información del sistema empresarial necesaria para crear y resolver los modelos matemáticos mediante técnicas de optimización combinatoria).

Requisitos Funcionales: El cliente web solo requiere de un teclado y mouse para ingresar la información relacionada con el cliente y de una pantalla para visualizar el resultado del procesamiento de los datos que se ejecuta al interior del servidor web.

Un usuario en condiciones normales se encuentra en la posibilidad de utilizar cualquier tipo de sistema operativo con una capacidad de almacenamiento de 250 MB y una memoria RAM de 128 MB como mínimo y de una conexión a internet de 6 Bits/s que permita el rápido acceso a páginas web.

6. IMPLEMENTACIÓN

La implementación se llevó a cabo mediante dos fases, en la primera fase se definió la línea base¹ de la empresa

¹ LB un conjunto de indicadores seleccionados para el seguimiento y la evaluación sistemática de políticas y programas.

Edepsa E.S.P, es decir aquel criterio asumido por el conductor para direccionar la visita a cada uno de los clientes, contrastando la información, con los resultados de la optimización para rutas de Bucaramanga del mes de octubre con el objetivo de encontrar una posible mejora.

Se define la línea base, en este caso, como la situación actual de la empresa con respecto al ruteo de vehículos, esto principalmente se puede ver en los siguientes aspectos: Tiempo de ruta, Distancia recorrida y nivel de servicio.

Como mencionamos con anterioridad se desarrolló a modo de seguimiento de aquellas rutas que se ejecutaron objetivamente por la experiencia del conductor, obteniendo de tal forma los resultados de la tabla 2.

Tabla 2. Rutas de recolección ejecutada por el conductor mes octubre

Fecha	CPr / R	CA / R	# CAT	TR (Min)	DR (Km)	% Cump	% RO
02/10/13	13	13	13	4.1	40.74	100%	100%
03/10/13	16	16	15	7.6	79.71	100%	94%
05/10/13	7	7	7	3.5	35.80	100%	100%
11/10/13	12	11	11	4.5	29.80	92%	100%
12/10/13	5	5	5	3.1	26.31	100%	100%
15/10/13	11	11	10	4.5	42.74	100%	91%
16/10/13	8	8	7	3.1	34.63	100%	88%
18/10/13	18	17	17	4.9	51.95	94%	100%
19/10/13	6	6	6	4.1	32.08	100%	100%
24/10/13	10	10	10	3.6	35.96	100%	100%
26/10/13	5	5	5	2.7	29.415	100%	100%
28/10/13	6	6	5	3.7	28.86	100%	83%
31/10/13	7	7	7	3.6	33.52	100%	100%

Donde tenemos que:

- Las Fechas corresponden a cada uno de los días en los que se llevó a cabo cada una de las rutas en la ciudad de Bucaramanga.
- CPr / R: Número de Clientes programados por Ruta
- CA / R: Número de Clientes atendidos por Ruta
- CAT: Número de Clientes atendidos a Tiempo
- TR: Tiempo Real
- DR: Distancia Real
- % Cump: Porcentaje de Cumplimiento
- % RO: Porcentajes de Respuestas Oportunas

El tiempo real fue tomado según el formato de recolección empleado por los conductores en el cual se registran los tiempos (Hr) de llegada a cada uno de los nodos y la hora de finalización de la ruta. Por otra parte la distancia real (Km) fue tomada a partir del Kilometraje del vehículo registrado por el operario de acuerdo a la diferencia existente entre el final y el inicio del recorrido.

6.1 Evaluación de criterios y supuestos

A continuación se enuncian los criterios y supuestos expuestos asumidos en la programación.

Ubicación del vehículo en cada recolección: Se establece que el conductor parquea el vehículo al frente de la entidad a la cual se le realizara el servicio.

Tiempo de almuerzo: Tiempo estipulado de 12pm a 13pm para el almuerzo, el lugar en el cual se almuerza es decisión del conductor.

Congestión en la vía: Google maps contempla congestiones vehiculares, pero este criterio está sujeto a condiciones propias del desarrollo de la ruta, como es la ocurrencia de accidentes de tránsito, arreglos en la vía entre otras.

Tiempo de servicio: Con el fin de establecer un tiempo de servicio adecuado para el caso de Edepsa se analizaron los datos reales recolectados para el mes de octubre, en el cual se presentaron dos situaciones propias de dos tipos de clientes:

- **Negocios pequeños y medianos:** La responsabilidad de entregar los residuos peligrosos es compartida, es decir cualquier persona está calificada para entregar los residuos, por tal motivo el tiempo de espera en cada entidad no representa un factor determinante en el tiempo de servicio.
En cuanto a la generación de residuos peligrosos, estos clientes son generadores de menos de 3 bolsas, dichos clientes están previamente identificados por la empresa ya que el cobro realizado depende de la cantidad de bolsas entregadas.
- **Grandes negocios:** Para este tipo de clientes la responsabilidad de entregar los residuos es claramente definida, y sin su presencia no se puede realizar el proceso de recolección por lo cual es posible incurrir en tiempos de espera.
En cuanto a la generación de residuos, estos clientes son generadores de más de tres bolsas y son previamente Identificados por la empresa debido a que la forma de pago de la prestación del servicio fue establecida según el peso de los residuos generados.

Una vez identificados los clientes se analizan los tiempos reales de servicio presentados en el mes de octubre, se obtiene como resultado un $S_i = 5$ minutos para clientes medianos y pequeños (3.8 minutos de media más 1.3 de desviación) y un $S_i = 17$ minutos para grandes negocios.

Se emplea el software con dichos criterios y supuestos para el mes de octubre, con un costo en función de la distancia, el tiempo y la urgencia de atención con $\delta_1 = 0.5$, $\delta_2 = 0.45$, $\delta_3 = 0.05$ respectivamente, obtenido los resultados reflejados en la tabla 3.

Tabla 3. Ruta programada mediante el modelo de optimización

Fecha	CPr / R	TO	DO (Km)	% Cump	TC
02/10/2013	13	3,8	33,8	100%	25
03/10/2013	16	6,6	58,0	100%	145
05/10/2013	7	3,0	28,9	100%	9
11/10/2013	12	4,1	28,9	100%	10
12/10/2013	5	2,5	23,7	100%	5
15/10/2013	11	3,2	23,8	100%	10
16/10/2013	8	2,8	29,2	100%	6
18/10/2013	18	4,8	42,9	100%	345
19/10/2013	6	2,6	27,5	100%	5
24/10/2013	10	3,0	31,8	100%	8
26/10/2013	5	2,3	22,2	100%	4
28/10/2013	6	3,4	24,3	100%	6
31/10/2013	7	2,5	25,8	100%	7

De acuerdo a la tabla tenemos que:

- CPr / R: Número de Clientes Programados por Ruta
- TO: Tiempo optimizado
- DO: Distancia optimizada
- %Cump: Porcentaje de Cumplimiento
- TC: Tiempo de Comida

Una vez obtenidos estos resultados se realizara un contraste de las dos situaciones para cuantificar las mejoras en las que se va a incurrir según las siguientes ecuaciones, los resultados se encuentran en la tabla 4.

$$\%MT = \frac{TR - TO}{TO} \quad (\% \text{ de Mejora en Tiempo})$$

$$\%MD = \frac{DR - DO}{DO} \quad (\% \text{ de Mejora en Distancia})$$

Tabla 4. Mejoras obtenidas al emplear el aplicativo.

Fecha	TR - TO	DR - DO	% MT	% MD
02/10/2013	0.3	6.94	8.3%	20.5%
03/10/2013	1.0	21.71	15.7%	37.4%
05/10/2013	0.5	6.90	15.7%	23.9%
11/10/2013	0.4	0.90	9.8%	3.1%
12/10/2013	0.6	2.61	24.6%	11.0%
15/10/2013	1.3	18.94	42.2%	79.6%
16/10/2013	0.3	5.43	10.7%	18.6%
18/10/2013	0.1	9.05	2.0%	21.1%
19/10/2013	1.5	4.58	57.5%	16.7%
24/10/2013	0.6	4.16	21.2%	13.1%
26/10/2013	0.4	7.22	17.4%	32.5%
28/10/2013	0.3	4.56	7.6%	18.8%
31/10/2013	1.1	7.72	42.4%	29.9%

En vista de los datos registrados se estima que en un escenario ideal empleando esta herramienta para el TSPTW se hubieran obtenido mejoras en un 21,2 % para el tiempo de ruta y un 25.1 % para las distancias recorridas en el mes de octubre.

6.2 Implementación de la ruta optimizada

La segunda etapa se llevó a cabo tras la selección de los clientes por el auxiliar logístico, se empleo la aplicación del TSPTW programando las rutas de recolección correspondientes, para los meses de noviembre y diciembre del 2013.

6.2.1 Programación de rutas con el modelo de optimización

Se realizó la implementación del algoritmo que arrojo la mejor solución, los resultados programados por la aplicación se ven reflejados en la tabla 5 con un 100% de cumplimiento tanto en la realización del servicio como en las ventanas de tiempo.

Tabla 5. Ruta programada por el modelo de optimización noviembre- diciembre.

Fecha	CP r / R	CE	TO	DO	TI	TC
1/11/13	16	0	4.43	59.50	338	4
02/11/13	7	0	2.70	27.60	457	6
05/11/13	5	0	2.30	27.40	448	5
06/11/13	8	0	2.70	37.30	421	7
09/11/13	9	0	2.73	29.60	437	7
12/11/13	9	0	4.80	32.90	291	8

Fecha	CP r / R	CE	TO	DO	TI	TC
13/11/13	13	0	3.70	42.00	354	12
14/11/13	13	0	4.00	41.50	379	35
15/11/13	12	0	3.40	41.40	413	14
16/11/13	8	0	7.00	30.10	112	5
18/11/13	7	0	4.50	32.10	438	4
19/11/13	17	0	7.30	101.00	226	14
20/11/13	6	0	4.50	31.10	441	4
21/11/13	9	0	8.50	42.10	401	8
22/11/13	19	0	4.50	110.80	342	13
25/11/13	6	0	2.30	28.70	414	4
27/11/13	9	0	4.00	41.60	399	5
28/11/13	12	0	3.60	34.10	383	13
29/11/13	11	0	3.40	37.30	384	15
30/11/13	9	0	3.30	33.60	422	11
04/12/13	14	0	5.00	51.00	362	13
05/12/13	8	0	2.40	32.50	464	5
06/12/13	19	0	7.30	48.70	334	0
07/12/13	6	0	2.80	31.10	417	3
10/12/13	11	0	6.25	37.50	400	8
11/12/13	7	0	3.30	30.50	446	6
12/12/13	12	0	3.80	60.80	385	28
16/12/13	14	0	4.65	53.10	341	43
17/12/13	16	0	7.80	47.70	337	3
18/12/13	7	0	7.25	48.70	427	4
19/12/13	9	0	4.10	56.90	392	5
20/12/13	13	0	4.00	39.50	374	40
21/12/13	5	0	2.46	29.00	454	3
24/12/13	10	0	3.50	36.7	397	8
30/12/13	21	0	7.75	56.4	166	379
31/12/13	7	0	2.50	39.7	444	5

De acuerdo a la tabla tenemos que:

- TI: Tiempo ocioso o inactivo (min)
- Los demás términos se define igual que en las tablas anteriores
- CE: Tiempos excluidos

6.2.2 Implementación de la ruta programada

La ejecución de la ruta la llevó a cabo el conductor quien realizo las recolecciones basados en la programación obtenida del método de optimización, además diligencio la información concerniente a las horas en la cuales se realizaba, los resultados de la implementación del algoritmo se encuentran en la tabla 6.

Tabla 6. Resultados obtenidos de la implementación del modelo de optimización

Fecha	CPr / R	N. CA	N CAT	% Cum	% RO	TR	DR
1/11/13	16	16	16	100%	100%	5.00	64.86
2/11/13	7	7	7	100%	100%	2.60	29.53
5/11/13	5	5	5	100%	100%	2.80	29.04
6/11/13	8	8	8	100%	100%	3.20	44.51
9/11/13	9	9	9	100%	100%	2.60	31.38
12/11/13	9	9	9	100%	100%	4.30	35.91
13/11/13	13	13	13	100%	100%	4.10	45.13
14/11/13	13	13	13	100%	100%	4.60	43.99
15/11/13	12	12	12	100%	100%	3.65	44.30
16/11/13	8	7	7	88%	100%	6.90	38.40
18/11/13	7	7	7	100%	100%	4.00	34.99
19/11/13	17	17	17	100%	100%	7.63	108.07
20/11/13	6	6	6	100%	100%	4.12	32.86
21/11/13	9	9	9	100%	100%	7.50	42.23
22/11/13	19	18	18	95%	100%	5.00	118.56
25/11/13	6	6	6	100%	100%	3.00	31.28
27/11/13	9	8	8	89%	100%	4.60	44.10
28/11/13	12	12	12	100%	100%	4.00	40.39
29/11/13	11	11	11	100%	100%	3.60	40.66
3/11/13	9	9	9	100%	100%	2.80	35.95
4/12/13	14	14	14	100%	100%	4.50	53.55
5/12/13	8	8	8	100%	100%	2.70	35.43
6/12/13	19	18	18	95%	100%	7.00	51.84
7/12/13	6	7	7	117%	100%	3.30	42.63
10/12/13	11	11	11	100%	100%	5.75	40.88
11/12/13	7	7	7	100%	100%	3.46	32.64
12/12/13	12	12	11	100%	92%	4.10	65.06
16/12/13	14	14	14	100%	100%	4.40	56.18
17/12/13	16	16	15	100%	94%	8.00	50.09
18/12/13	7	7	5	100%	71%	6.50	52.11
19/12/13	9	9	9	100%	100%	4.50	58.71
20/12/13	13	13	13	100%	100%	4.50	42.88
21/12/13	5	6	6	120%	100%	3.13	40.49
24/12/13	1	9	9	90%	100%	3.10	38.90
30/12/13	21	18	18	86%	100%	7.00	60.35
31/12/13	7	7	7	100%	100%	3.30	45.68

De acuerdo a la tabla tenemos que:

- NCA: Clientes atendidos
- NCAT: Clientes atendidos a tiempo
- % Cum: Cumplimiento
- % RO: Respuestas oportunas
- TR: Tiempo real
- DR: Distancia real
- Los demás términos se define igual que en las tablas anteriores

El objetivo del análisis consiste en establecer en que porcentaje realmente mejoran los resultados obtenidos tras la implementación, por tanto se analiza el 833% de los datos que corresponden a las rutas que se aplicaron según el modelo de optimización

Podemos citar que el ruteo realizado entre este intervalo de tiempo vario según su comportamiento entre 2,6 y 8 horas con un promedio de 4,66 horas / Ruta y de 29,2 a 11856 Kilómetros para un promedio de 4838 Kilómetros / Ruta Y con un porcentaje de cumplimiento que obedece a un 98%

En la tabla 5 se da a conocer el porcentaje de las mejoras respecto al tiempo empleado y a la distancia recorrida, se muestra la columna programada y ejecutada donde "si" significa que la ejecución se realizo según la programación y "no" en caso contrario, y la columna diferencia del numeral donde "-" significa que TR - TO es negativo debido a que se obtuvieron mejores resultados de los esperados y "+" en caso contrario para las rutas ejecutadas en el mes de noviembre y diciembre

Tabla 5 Variación optimización vs implementación

Fecha	TR - TO	DR - DO	% MT	% MD	ER vs PO	Diferencia dTR - TO
1/11/13	0.57	5.36	129%	9%	Si	+
2/11/13	0.10	1.93	37%	7%	Si	-
5/11/13	0.50	1.64	217%	6%	Si	+
6/11/13	0.50	7.21	185%	193%	No	+
9/11/13	0.13	1.78	48%	6%	Si	-
12/11/13	0.50	3.01	14%	91%	No	-
13/11/13	0.40	3.13	18%	75%	Si	+
14/11/13	0.40	2.49	95%	6%	Si	+
15/11/13	0.25	2.90	74%	7%	Si	+
16/11/13	0.10	8.30	14%	276%	Si	-
18/11/13	0.50	2.89	111%	9%	Si	-

Fecha	TR - TO	DR - DO	% MT	% MD	ER vs PO	Diferencia dTR - TO
19/11/13	0.33	7.07	45%	7%	Si	+
/11/13	0.38	1.76	84%	57%	Si	-
21/11/13	1.00	0.13	118%	3%	Si	-
22/11/13	0.50	7.76	111%	7%	Si	+
25/11/13	0.70	2.58	34%	9%	Si	+
27/11/13	0.40	2.50	95%	6%	Si	+
28/11/13	0.40	6.29	111%	184%	Si	+
29/11/13	0.20	3.36	59%	9%	Si	+
3/11/13	0.50	2.35	152%	7%	Si	-
4/12/13	0.50	2.55	1%	5%	Si	-
5/12/13	0.30	2.93	125%	9%	Si	+
6/12/13	0.30	3.14	41%	64%	Si	-
7/12/13	0.50	11.53	179%	371%	No	+
1/12/13	0.50	3.38	8%	9%	Si	-
11/12/13	0.16	2.14	48%	7%	Si	+
12/12/13	0.30	4.26	79%	7%	Si	+
16/12/13	0.25	3.08	54%	58%	Si	-
17/12/13	0.20	2.39	26%	5%	Si	+
18/12/13	0.75	3.41	13%	7%	Si	-
19/12/13	0.40	1.81	98%	32%	Si	+
/12/13	0.50	3.38	125%	85%	No	+
21/12/13	0.67	11.49	272%	396%	No	+
24/12/13	0.40	2.20	114%	6%	Si	-
3/12/13	0.75	3.95	97%	7%	Si	-
31/12/13	0.80	5.98	32%	151%	No	+
PROM	0.43	3.95	96%	77%		

De acuerdo a los datos ofrecidos, tenemos que la variación entre la programación del modelo propuesto y su implementación en cuanto al tiempo es del 1% en promedio y del 8% en cuanto a la distancia recorrida en kilómetros.

De los casos en los cuales la ejecución de la ruta se llevo según las indicaciones del algoritmo de optimización, para el 46,67% el tiempo optimizado es mayor que el real y en el 53.3% restante el tiempo optimizado es menor que el real, estas variaciones se presentan debido a situaciones propias de un escenario real.

CONCLUSIONES

La matriz de distancias considerada como el motor de esta aplicación, se obtuvo generando un algoritmo computacional que permite capturar la información relacionada con las distancias existentes entre cada uno de los clientes a partir de coordenadas geográficas insertadas en la plataforma de google maps.

En la bibliografía se exploraron documentos científicos relacionados con problemas de ruteo vehicular, específicamente sobre el problema del agente viajero con ventanas de tiempo, encontrando varios autores entre los cuales se hace mención a David L. Applegate, Robert E. Bixby, Vasek Chvatal y William J. Cook que a través de su libro "The traveling Salesman Problem: A Computational Study" enfocando su trabajo en dar respuesta al TSP a partir de un punto de vista computacional desarrollando nuevas técnicas en respuesta a posibles cambios para instancias de gran tamaño.

El problema de ruteo vehicular de Edepsa se abordó principalmente estudiando los elementos y restricciones que contiene el proceso de recolección de respel para definir el modelo de ruteo vehicular y dar paso al estudio de las características de cada uno de sus clientes que se consideran como demanda definida generando rutas estocásticas a partir de la frecuencia y disponibilidad del servicio.

Tras la implementación podemos afirmar que al comparar los resultados entre las 2 heurísticas de construcción, el vecino más cercano aportó una mejor respuesta con un 8% de mejora en la mayoría de los casos frente al método de aproximación de la inserción más barata. Posteriormente se utilizó la mejor solución como semilla en la aplicación de 2 heurísticas de mejora de las cuales la heurística 2-opt obtuvo un mejor resultado con un 4% frente al método 3-opt.

Inferimos que obtuvimos un resultado final satisfactorio con un porcentaje de mejora de 5% para una instancia de 10 clientes y un 8% para 50 clientes, utilizando la meta heurística tabú frente a la mejor solución dada por las heurísticas de construcción, tras emplear una estrategia que permitiera comparar soluciones entre dos heurísticas de construcción (El vecino más cercano y la inserción más barata), escoger la mejor respuesta e insertarla como semilla en 2 heurísticas de mejora (2-opt y 3 opt) y tomar la mejor respuesta como semilla en la meta heurística búsqueda tabú, con el fin de obtener un resultado que de no ser el óptimo se encontrara muy aproximado al mismo.

La herramienta desarrollada para dar solución a problemas del tipo TSPTW arrojó resultados significativos para la fase I (contraste entre una situación real y una simulada), resultados de un 21.2 % para mejorar el tiempo de Ejecución en ruta y un 25.1 % de mejora en el recorrido, situación que permitió poner en marcha la implementación del modelo a partir del mes de Noviembre del 2013.

El software de ruteo vehicular permite arrojar resultados que se aproximan al comportamiento de las actividades de la empresa en condiciones normales, con una interfaz clara y amigable para el usuario, de esta forma cualquier persona con conocimientos básicos en computaciones se encuentra en la posibilidad de disponer de esta herramienta para mejorar el desempeño de la ruta de transporte.

REFERENCIAS

- [1] PACHECO BONROSTRO, Joaquín Antonio. Problemas de rutas con ventanas de tiempo: Madrid, Capítulo 1 y capítulo 3, Universidad Complutense de Madrid, DTO. Estadística e Investigación Operativa, Facultad de Ciencias Matemáticas. Extraído el 22 de septiembre del 2012, Disponible en <http://enrnts.ucm.es/tesis/19911996/X/2/X2008101.pdf>
- [2] Guía para la generación integral de Residuos Peligrosos. Fundamentos. Tomo I (p.16)
- [3] Ministerio de ambiente disponible en la pagina http://www.minambiente.gov.co/documentos/Politica_Residuos%20peligrosos.pdf Situación actual de Colombia.
- [4] Revista de la logística.com disponible en <http://www.revistadelogistica.com/La-logistica-reversa-o-inversa.asp> recuperado el 17/12/2013
- [5] TAHA, Handy A. Programación Heurística. Investigación de operaciones: Novena edición. México: Person Educación. México, 2012. 351 p.
- [6] MARIUS M. Solomon, Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with Time Window constraints. Tomado de: Operations Research, Vol 35, 2 (Mar-Apr, 1987) pp-254-265 Publicado por INFORMS. Disponible en <http://www.jstor.org/stable/170697> consultado 11/10/2013
- [7] CASTRO, Fabela. Algoritmo Genético con edades para resolver el TSP. San Nicolás de la Garza, 1999, 99

pág. (Tesis de Maestría). Universidad Autónoma de Nuevo León.

[8] TAHA, Handy A. Programación Heurística. Investigación de operaciones: Novena edición. México: Person Educación. México, 2012. 351 p.

[9] RODRIGUEZ, Carlos. Algoritmos heurísticas y meta heurísticos para el problema de localización de generadores.

[10] TAHA, Handy A. Programación Heurística. Investigación de operaciones: Novena edición. México: Person Educación. México, 2012. 351 p.

[11] GOMEZ, David; RANGEL, Carlos. Formular las meta heurísticas búsqueda Tabú y recocido simulado para la solución del CVRP (Capacitated vehicle routing problem) Bucaramanga. 2011. 150 pág.