

DISEÑO DE RUTAS DE MENSAJERÍA PARA UNA EMPRESA DE SERVICIOS COMPARTIDOS

ALAN DAVID HEREDIA GIRALDO
JOHN JAIRO ARBOLEDA CASTILLO

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
SANTIAGO DE CALI

2015

DISEÑO DE RUTAS DE MENSAJERÍA PARA UNA EMPRESA DE SERVICIOS COMPARTIDOS

ALAN DAVID HEREDIA GIRALDO
JOHN JAIRO ARBOLEDA CASTILLO

Trabajo de grado presentado para optar por el título de ingeniero industrial.

DIRECTOR:

M.Sc. JUAN PABLO OREJUELA CABRERA

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
SANTIAGO DE CALI**

2015

NOTA DE ACEPTACIÓN

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Santiago de Cali, Junio del 2015

DEDICATORIA

“Agradezco a mi esposa, hija, madre y hermano por ser el motor que impulsaba mi esfuerzo y dedicación, por llenarme de optimismo así el camino fuera oscuro y desierto, por brindarme apoyo incondicional en todo momento, por ser lo que son, mi familia.”

Alan Heredia

“Quiero dedicarle esta obra a toda mi familia, pero en especial a mi madre, mi padre y mi hermana; por su apoyo incondicional a lo largo de esta etapa de mi vida. Espero tener la suerte de poder retribuirles todos los sacrificios que hicieron por mí algún día.”

John Arboleda

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	9
1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	11
2. OBJETIVOS.....	13
2.1. Objetivo General.....	13
2.2. Objetivos Específicos.....	13
3. JUSTIFICACIÓN.....	14
4. MARCO TEÓRICO.....	16
4.1. Clasificación de los problemas de ruteo.....	16
4.2. Métodos para la solución de problemas de ruteo.....	17
4.2.1. Métodos exactos.....	17
4.2.2. Métodos “asignar primero rutear después”.....	18
4.3. Estado del arte.....	20
5. CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO ACTUAL DE MENSAJERÍA.....	24
5.1. Descripción del proceso de mensajería.....	24
5.1.1. Servicios del área de mensajería.....	24
5.1.2. Actividades del proceso de mensajería:.....	25
5.2. Caso de estudio.....	27
5.2.1. Clasificación problema de ruteo.....	27
5.2.2. Datos del caso de estudio.....	28
5.2.3. Ruteo actual.....	30
5.3. Productividad de los mensajeros.....	30
6. DEFINICIÓN DE INDICADORES.....	33
7. PROPUESTA METODOLÓGICA.....	35
7.1. Obtención de parámetros.....	35
7.2. Agrupación.....	37
7.3. Ruteo.....	39
7.3.1. Formulación del modelo.....	39
7.3.2. Implementación en AMPL.....	42
8. RESULTADOS.....	44
8.1. Distribución de rutas propuesta.....	44
8.2. Reducción de las diligencias subcontratadas.....	46
9. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	48

9.1.	Agrupación de clientes utilizando otros métodos.....	48
9.1.1.	Heurística del barrido.....	48
9.1.2.	Modelo de p-mediana con restricciones de capacidad.....	49
9.2.	Reducción de tiempos de inactividad	52
9.2.1.	Agregando más clientes a la ruta con tiempo de inactividad	53
9.2.2.	Asignar un vehículo adicional a un cliente con ventana de tiempo.....	55
9.2.3.	Asignar un vehículo adicional a una zona con ventana de tiempo	56
9.2.4.	Agrupar nuevamente los clientes con un vehículo adicional	57
10.	RECOMENDACIONES	59
11.	CONCLUSIONES	62
	BIBLIOGRAFÍA.....	64
	ANEXOS	67
A.	Parámetros y datos generales	67
B.	Métodos de agrupación	74
C.	Implementación en AMPL.....	79
D.	Resultados modelo de ruteo	80

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 - Secuencia del ruteo actual.....	30
Tabla 2 - Variación diligencias externas y urgentes 2013 - 2014	32
Tabla 3 - Indicadores de la secuencia de las rutas actuales	34
Tabla 4 - Secuencia de las rutas con el algoritmo de los ahorros	44
Tabla 5 - Secuencia de las rutas con la heurística del barrido	48
Tabla 6 - Secuencia de las rutas con modelo de p-mediana.....	49
Tabla 7 - Comparación de diferentes métodos de agrupación	52
Tabla 8 - Secuencia de ruta con el algoritmo de los ahorros (modificado)	53
Tabla 9 - Comparación entre ruta 3 original y la nueva (método de los ahorros).....	55
Tabla 10 - Comparación entre ruta 3 original y la nueva (Heurística del barrido)	56
Tabla 11 - Secuencia de las rutas con modelo de p-mediana (modificado).....	57

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1 - Dos rutas antes y después de ser unidas	19
Gráfica 2 - Solución obtenida mediante la heurística del barrido.....	20
Gráfica 3 - Diagrama de flujo proceso de mensajería	26
Gráfica 4 - Distribución de rutas actual.	29
Gráfica 5 - Número de diligencias externas y urgentes por mes en 2013 y 2014.	31
Gráfica 6 - Diagrama de flujo del algoritmo de los ahorros.....	38
Gráfica 7 - Consolidado de rutas con el algoritmo de los ahorros	45
Gráfica 8 - Consolidado de rutas con la heurística del barrido	50
Gráfica 9 - Consolidado de rutas con modelo de p-mediana.....	51
Gráfica 10 - Consolidado de rutas con algoritmo de los ahorros (modificado).....	54
Gráfica 11 - Adición de un vehículo a la ruta 3 del método de los ahorros	55
Gráfica 12 - Adición de un vehículo a la ruta 3 de la heurística del barrido.	56
Gráfica 13 - Consolidado de rutas con modelo de p-mediana (modificado)	58

INTRODUCCIÓN

El incremento de la productividad constituye un factor importante en el desarrollo de todo tipo de empresa debido al grado de competitividad al que se enfrentan en estos tiempos. La necesidad de reducir los costos y el tiempo de respuesta sin afectar la calidad es cada vez más frecuente, las compañías buscan aumentar sus beneficios con procesos innovadores y con una organización bien definida, tratando de consolidar sus servicios como los mejores del mercado.

En el caso particular de los servicios de mensajería, la importancia de la productividad se manifiesta en su capacidad de pronta respuesta, una de las principales características de este negocio. En mensajería, un proceso mal diseñado provoca costos enormes para la compañía, ya que se manifiesta en un exceso de capacidad (subutilización de vehículos y de personal) o una falta de capacidad (demanda insatisfecha), debido a que no se manejan inventarios y su producto o servicio es el proceso mismo. Diseñar procesos altamente eficientes y organizados involucrando empleados, sistemas de apoyo y estrategias de servicio, permite fidelizar a los clientes al garantizar un buen servicio a un buen precio (Chase, Jacobs, & Aquilano, 2009).

El área de mensajería bajo estudio pertenece a una empresa de servicios compartidos de un grupo empresarial de la región. Desde allí, se centraliza y se distribuye la correspondencia entre las distintas sedes del grupo y otros interesados externos con el objetivo de generar ahorros para todo el consorcio en general. Sin embargo, debido a ineficiencias en este proceso, una buena parte de las diligencias a realizar se ha tercerizado.

Este documento está estructurado de la siguiente manera: En primer lugar, se hará una caracterización del proceso de mensajería de la empresa caso de estudio. Después, se van a definir indicadores que permitan medir el desempeño de la propuesta y compararlo

con la situación actual. Posteriormente, se propondrá un método para la distribución de rutas que minimice el tiempo de permanencia en el recorrido, maximizando la disponibilidad de tiempo de los auxiliares de mensajería para responder a diligencias urgentes o externas, el método tiene en cuenta los horarios de atención de los clientes y la capacidad de los vehículos. Por último, se hará un análisis de los resultados obtenidos, con el fin de hacer recomendaciones para la futura implementación del método diseñado.

1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Los centros de servicios compartidos consolidan algunos procesos administrativos y de apoyo de otras compañías de un mismo grupo empresarial, logrando así una radical reducción de costos y una mayor eficiencia en dichos procesos (Portafolio.co, 2015). El área de mensajería que se estudia en este trabajo consolida y distribuye desde un centro de servicios compartidos todo tipo de documento o paquete entre las demás sedes del grupo. Los servicios que ofrece son: mensajería interna, diligencia externa y diligencia urgente (sección 5.1.1).

El área de mensajería en cuestión dispone de 4 empleados administrativos distribuidos de la siguiente manera: un recepcionista, quién se encarga de la recepción de documentos o sobres, una supervisora que dirige el equipo de mensajeros, un auxiliar de archivo que relaciona las diligencias que han sido entregadas, un auxiliar de reparto que distribuye los sobres en cada casillero y relaciona las planillas donde se controla el número de diligencias mensuales para facturar. El personal operativo se compone de 10 auxiliares de mensajería encargados de transportar los paquetes y sobres, cada uno de ellos con una capacidad de 25 kilos. Actualmente se deben atender todos los días a 13 empresas clientes, que en conjunto suman 34 sedes en Cali.

La operación tiene ciertas características particulares tales como: sedes que requieren ser atendidas por lo menos dos veces al día, clientes que por su demanda de documentación requieren los servicios de varios auxiliares. Pero en especial, unas estrictas ventanas de tiempo para algunas diligencias importantes tales como pago de impuestos y declaraciones, que de no ser atendidas a tiempo puede traer como consecuencia multas enormes.

El rápido crecimiento del grupo empresarial en los últimos años ha venido acompañado de un aumento en el número de sedes clientes, y por consiguiente, de una mayor demanda del servicio de mensajería. La respuesta de la administración fue tercerizar parte de las diligencias externas con una empresa especializada, de modo que los mensajeros quedarían encargados principalmente de las diligencias entre sedes y las diligencias urgentes.

Sin embargo, a pesar de que se redujo considerablemente la carga laboral para los mensajeros, ellos enviaron una carta exigiendo a la gerencia contratar un nuevo auxiliar de mensajería para mitigar esta situación, bajo la justificación de falta de tiempo para prestar un buen servicio. Por esta razón, se presumía una gran disminución de la productividad en el área de mensajería, pues se estaba solicitando un mensajero más para hacer un número menor de diligencias.

En este proceso se encontraron varias causas de la baja productividad en el área de mensajería. Sin embargo, este trabajo se orientará hacia sólo dos: la primera, es la ausencia de indicadores que permitan medir la productividad del área y de cada auxiliar de mensajería; la segunda, es la distribución de rutas, la cual actualmente realizan los mensajeros sin ningún método.

Teniendo en cuenta lo anterior la pregunta que se plantea para este trabajo es:

¿Cómo aumentar y controlar la productividad en el área de mensajería de una empresa de servicios compartidos?

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar un modelo de distribución de rutas de mensajería interna de una empresa de servicios compartidos, para aumentar la productividad de los mensajeros y reducir las diligencias externas subcontratadas.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar el proceso de ruteo actual identificando los aspectos más importantes asociados al diseño de rutas.
- Definir indicadores de gestión del sistema del caso de estudio para medir el desempeño del modelo propuesto y el actual.
- Seleccionar una técnica que permita agrupar rutas y defina secuencia de visitas a los clientes teniendo en cuenta las restricciones de tiempo y carga.
- Validar los resultados obtenidos con un caso de estudio con el propósito de realizar un análisis de sensibilidad que permita proponer recomendaciones para su implementación.

3. JUSTIFICACIÓN

Los problemas de ruteo de vehículos han sido ampliamente desarrollados por muchos autores en el campo de la optimización combinatoria (Baldacci, Toth, & Vigo, 2009), que buscan con métodos exactos o heurísticos su resolución, los cuales mejoran en gran medida los resultados obtenidos de forma empírica; por lo tanto, utilizar un método que permita programar de forma eficiente las rutas desde un depósito hacia las empresas clientes, podría traer consigo grandes ahorros para la organización, justificando la utilización de técnicas de investigación de operaciones que permitan optimizar el uso de los recursos disponibles.

En la empresa en cuestión, más del 50% de las diligencias externas son contratadas con proveedores externos, dejando entrever que el área de mensajería presenta falencias, y que por el contrario de agregar valor, genera pérdidas y gastos innecesarios al grupo empresarial. La necesidad de incrementar la productividad radica en la posible de tercerización de toda el área si no se buscan estrategias eficientes de operación y de buen servicio, dejando a gran parte del personal por fuera de la compañía, al demostrarse que los costos de mantener el área de mensajería son mayores a los de contratar a otra empresa dedicada a esa actividad.

En las empresas de mensajería existe un gran potencial de reducir los costos relacionados con la logística, los cuales representan entre un 4% y 30% de las ventas totales del producto o servicio en diferentes sectores (Guoxing, 1995), por lo anterior, se presenta una buena razón para pensar que se pueden reducir sustancialmente los convenios con proveedores externos al utilizar recursos propios.

Los beneficios de mejorar el sistema de operación actual no sólo están ligados a reducir costos de operación, sino también, a mejorar el nivel de servicio, logrando

incrementar la utilidad de la compañía, al reducir el número de diligencias externas que actualmente se tercerizan.

4. MARCO TEÓRICO

En este apartado se hará una breve explicación de la terminología relacionada con los problemas de ruteo; más adelante, se presentará el estado del arte de los diferentes métodos utilizados para dar solución a estos problemas.

4.1. CLASIFICACIÓN DE LOS PROBLEMAS DE RUTEO

Problema del Agente Viajero (Travelling Salesman Problem - TSP):

En el TSP se dispone de un solo vehículo que debe visitar todos los clientes en una sola ruta, de tal manera que se minimicen los costos asociados al recorrido. (Applegate, Cook, & Rohe, 2003). Generalmente no hay depósito, pero si lo hubiere no se distingue de los clientes. El problema no tiene restricciones de capacidad o tiempo (Olivera, 2004).

Problema de los m Agentes Viajeros (m -TSP):

En el m -TSP se debe definir un depósito y m vehículos a los cuales se le asignara una ruta a cada uno que máximo tendrá un número p de clientes. Cada vehículo debe iniciar y finalizar en el depósito. Al igual que en el TSP original, cada cliente debe ser visitado sólo una vez (Benavent & Matínez, 2013).

Problema de Ruteo de Vehículos con Capacidades (Capacited Vehicle Routing Problem – CVRP o VRP):

Es muy similar al m -TSP, con la diferencia de que cada cliente tiene una demanda asociada, y los vehículos tienen una capacidad limitada para suplir con esta demanda, los vehículos son idénticos (flota homogénea). La demanda de cada cliente es suplida por un solo vehículo. A diferencia del m -TSP, la cantidad de rutas no es fijada previamente (Perboli, Pezzella, & Tadei, 2008).

Problema de Ruteo de Vehículos con Entregas Divididas (Split Delivery Vehicle Routing

Problem – SDVRP):

El SDVRP es una simplificación del CVRP, pues la restricción en la que cada cliente puede ser abastecido sólo por un vehículo es eliminada. Al igual que los problemas anteriormente descritos, en el SDVRP se consideran vehículos idénticos (Archetti, Speranza, & Savelsbergh, 2008).

Problema de Ruteo de Vehículos con Ventanas de Tiempo (Vehicle Routing Problem with

Time Windows – VRPTW):

En esta variante del problema, que puede ser aplicada tanto para el VRP como para el SDVRP, cada cliente tiene asociada una ventana de tiempo con un horario de apertura y uno de cierre, además de un tiempo de servicio (Braysy, 2003).

4.2. MÉTODOS PARA LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS DE RUTEO

En esta sección se revisan algunos métodos para solucionar problemas de ruteo

4.2.1. Métodos exactos

Búsqueda directa en árboles: En el ruteo de vehículos, este método consiste en buscar y validar la mejor ruta que satisfaga los requerimientos del problema. La forma más sencilla de hacerlo consiste en enumerar y probar una por una las soluciones (método de búsqueda exhaustiva). Sin embargo, en algunos problemas de optimización combinatoria como el VRP, generalmente la búsqueda exhaustiva no es posible debido al gran tamaño de los problemas; por este motivo, existen algoritmos con ciertos criterios que reducen el número de soluciones a analizar, haciendo más viable su implementación, como el algoritmo de “ramificación y acotamiento” por ejemplo (Clausen, 1999).

Programación dinámica: Es un enfoque general para la solución de problemas en los que es necesario tomar decisiones en etapas sucesivas. Las decisiones tomadas en una

etapa condicionan la evolución futura del sistema, afectando a las situaciones en las que el sistema se encontrará en el futuro (Taha, 2004).

Programación lineal entera: Esta técnica consiste en minimizar o maximizar una función lineal, al que se le denomina función objetivo. Las variables de dicha función están sujetas a una serie de restricciones que se expresan mediante un sistema de inecuaciones lineales. Para este tipo de problemas, la solución únicamente tiene sentido si los valores de la variables toman valores enteros (Anderson, Sweeney, & Williams, 2006).

4.2.2. Métodos “asignar primero rutear después”

Estos métodos consisten en agrupar aquellos nodos que van a conformar una misma ruta en la solución final, teniendo en cuenta las restricciones de capacidad del modelo; posteriormente con cada grupo se hace un TSP por medio de un método exacto o heurístico para conformar las rutas. Algunos de ellos son:

Algoritmo de los ahorros

Un ahorro (en distancia) se genera cuando dos rutas diferentes $(0, \dots, i, 0)$ y $(0, j, \dots, 0)$ se combinan para formar una nueva ruta $(0, \dots, i, j, \dots, 0)$ como se muestra en la Gráfica 1, el ahorro obtenido por dicha unión es:

$$S_{ij} = C_{i0} + C_{0j} - C_{ij}$$

Donde:

C_{i0} = Distancia entre el cliente i y el depósito.

C_{0j} = Distancia entre el depósito y el cliente j.

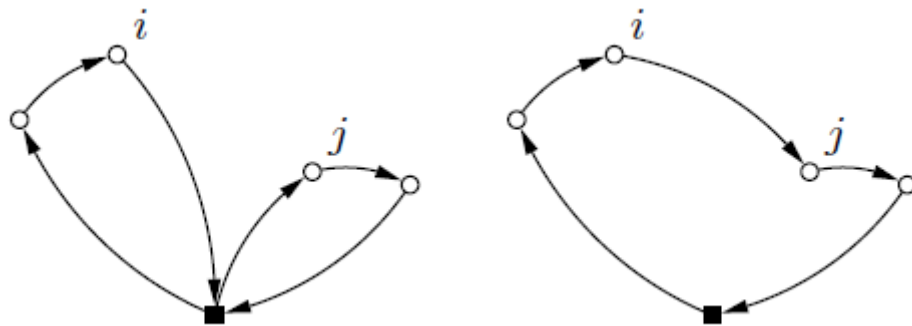
C_{ij} = Distancia entre el cliente i y el cliente j.

S_{ij} = Ahorro entre los clientes i y j.

En la nueva solución los arcos $(i, 0)$ y $(0, j)$ no serán utilizados y se agregará el arco (i, j) generando así un ahorro.

Teniendo claro el concepto de ahorro, el algoritmo de los ahorros tiene los siguientes pasos:

1. Inicialización: Para cada cliente i construir la ruta $(0, i, 0)$.
2. Cálculo de ahorros: Calcular S_{ij} para cada par de clientes i y j .
3. Mejor unión: $S_{i^*j^*} = \max S_{ij}$, donde el máximo se toma entre los ahorros que no han sido considerados aun. Sean r_{i^*} y r_{j^*} las rutas que contienen a los clientes i^* y j^* respectivamente. Si i^* es el último cliente de r_{i^*} y j^* es el primer cliente de r_{j^*} y la combinación r_{i^*} y r_{j^*} es factible, combinarlas. Eliminar $S_{i^*j^*}$ de futuras consideraciones. Si quedan ahorros por examinar ir a 3, si no terminar.



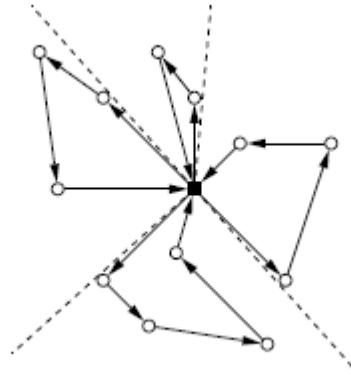
Gráfica 1 - Dos rutas antes y después de ser unidas.
Fuente: Olivera, 2004.

Un diagrama detallado del algoritmo de los ahorros, adaptado al problema abordado se muestra en la sección 7.2.

Heurística del barrido

La heurística del barrido consiste en rotar una semirrecta desde el centro del plano, los clientes se van agrupando a medida que la semirrecta los toca (Olivera, 2004). Cada

agrupación queda consolidada cuando la suma de los clientes agrupados llega al límite de capacidad de los mensajeros.



Gráfica 2 - Solución obtenida mediante la heurística del barrido.
Fuente: Olivera, 2004.

Modelo de p -mediana

Este modelo de programación lineal conforma p grupos de nodos, tal que la suma de la distancia entre nodos de todos los grupos sea mínima (Kusiak, 1987). Aunque, para utilizar este método de agrupación para resolver VRP, se debe tener en cuenta las restricciones de capacidad. La formulación matemática de este modelo se muestra en el anexo B.3.

4.3. ESTADO DEL ARTE

En esta sección se hace una revisión bibliográfica con el fin de identificar algunos de los métodos utilizados para la solución de diferentes tipos de problemas de ruteo de vehículos.

Capacited Vehicle Routing Problem (CVRP)

Perboli, Pezzella, & Tadei (2008) realizan un algoritmo híbrido basado en algoritmos genéticos y búsqueda tabú para resolver el problema de ruteo de vehículos de igual capacidad. Se introduce un nuevo operador genético (Chain Mutation) y se aplica un procedimiento k-Cadena que es capaz de aumentar el tamaño de la región de búsqueda mejorando la calidad de la solución con un esfuerzo computacional insignificante.

Irnich (2008) crea un marco de solución basado en dos metaheurísticas de búsqueda local para el problema de enrutamiento de vehículos (VRP). Es un algoritmo robusto, pues tiene en cuenta una gran variedad de limitaciones clásicas tales como: capacidad, distancia, longitud de ruta, ventanas de tiempo y restricciones de precedencia. Según las conclusiones del autor, su propuesta es bastante más eficiente computacionalmente que otros métodos de búsqueda local de la literatura.

Baldacci, Christofides, & Mingozzi (2008) diseñaron un algoritmo exacto para la solución del problema de enrutamiento de vehículos con capacidades (CVRP). En esta propuesta se utiliza un procedimiento de delimitación con un modelo de programación lineal (LP), el cual es una relajación de la formulación matemática inicial; posteriormente, mediante la combinación de tres heurísticas de ascenso duales se encuentra una solución cercana al óptimo. El objetivo del problema es diseñar m rutas, una para cada vehículo de manera que todos los clientes son visitados exactamente una vez y que se minimice los costos asociados a la ruta.

Capacited Vehicle Routing Problem with Time Windows (CVRPTW)

Braysy (2003) propone una metaheurística “Variable Neighbourhood Search” para resolver el problema de enrutamiento de vehículos con ventanas de tiempo. El procedimiento propuesto se basa en un nuevo enfoque de cuatro fases: la primera fase es un ruteo inicial mediante una heurística de construcción; en la segunda fase se elimina algunas de las rutas obtenidas, de tal forma que se minimice la distancia recorrida; en la tercera, se mejora la solución mediante métodos de búsqueda local; en la última fase, se intenta mejorar la solución cambiando la función objetivo para escapar de algún mínimo local.

Split delivery vehicle routing problem (SDVRP)

Dror, Laporte, & Trudeau (1994) desarrollaron un modelo de optimización con una relajación de las restricciones mediante un algoritmo de branch & bound reduciendo así el

tiempo computacional requerido para resolver el problema y confirmando la calidad de la heurística publicada por los mismos autores en 1989.

Archetti, Speranza, & Savelsbergh (2008) proponen un modelo de optimización lineal que considera las mejores soluciones después de correr un algoritmo de búsqueda tabú para el SDVRP. Los resultados muestran que éste método siempre mejora los resultados obtenidos al utilizar únicamente el algoritmo de búsqueda tabú.

Split delivery vehicle routing problem with Time Windows (SDVRPTW)

Frizzell & Giffin (1994) crearon tres heurísticas secuenciales para la solución del SDVRPTW. La primera de ellas construye las rutas basándose en un enfoque de Clasificación dinámica por urgencia (DUC), este método tiene en consideración las ventanas de tiempo, el tiempo de servicio, el tiempo de recorrido, y los posibles tiempos de inactividad para priorizar qué clientes visitar. Las otras dos heurísticas mejoran las soluciones obtenidas en la primera fase. Una de ellas, mueve o intercambia clientes entre las rutas generadas para reducir los tiempos de inactividad; la otra, se encarga de asignar las entregas parciales.

Como se puede observar, tanto para resolver los CVRP tan como los SDVRP los autores suelen decidirse más por utilizar métodos heurísticos. Cuando usan métodos exactos, lo hacen de forma complementaria con heurísticas que simplifican el problema y favorecen su posterior implementación. Para los ruteos con ventanas de tiempo únicamente se encontraron propuestas con heurísticas y metaheurísticas. Esta tendencia predomina debido a que los problemas de ruteo de vehículos son NP completo, es decir, no pueden resolverse en un tiempo computacional aceptable para ciertas estancias del problema (Archetti, Feillet, Gendreau, & Speranza, 2011). Sin embargo, utilizar un método exacto tiene la ventaja de arrojar una solución óptima, además de una mayor facilidad en el momento de hacer el análisis de los resultados. Por eso, siguiendo con la línea de los autores consultados durante la revisión bibliográfica, en este trabajo se construirá un método

heurístico para la agrupación de los clientes, aunque, ayudado de un modelo de optimización para el ruteo.

En el capítulo siguiente se hace una caracterización del proceso de mensajería de la empresa caso de estudio, con base en ésta, se hace una clasificación del problema de ruteo, y la selección de las técnicas para resolverlo.

5. CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO ACTUAL DE MENSAJERÍA

Con el propósito de dar cumplimiento al objetivo específico número uno, en este capítulo se hará una descripción general del funcionamiento del proceso de mensajería, profundizando sólo en los aspectos relacionados con el problema planteado.

5.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE MENSAJERÍA

Actualmente, la compañía estudiada atiende a todas las empresas del grupo empresarial en materia de mensajería, sin embargo, con tres empresas se tiene convenios y precios fijos mensuales debido a la cantidad de diligencias que les deben enviar a diario. Para hacer eficiente la distribución de sobres entre sedes, la compañía ha desarrollado un método que consiste en la creación de tulas en cada empresa, a su vez, estas tulas se distribuyen por áreas dentro de las empresas clientes. Son 34 sedes con las cuales se tiene convenio de tulas, y los mensajeros deben recogerlas durante el transcurso del día, así mismo, deben empacar los sobres desde la sede principal de mensajería en la tula correspondiente a cada área o sede.

Los mensajeros al llegar a la sede del cliente intercambian las tulas, dejando una con los sobres que han sido recogidos de otras sedes o que han llegado por ventanilla, después, recogen la tula con toda la correspondencia que va a ser distribuida, tanto en las sedes del grupo empresarial, como en empresas y personas ajenas a éste.

5.1.1. Servicios del área de mensajería

Mensajería interna o tula entre sedes: Entrega de correspondencia entre sedes de las empresas del grupo empresarial que tienen contratado este servicio con mensajería. La tula como unidad de transporte para los documentos o sobres que se distribuyen entre sedes.

Diligencias externas: Recepción, verificación, clasificación administración y distribución de correspondencia en el perímetro urbano de la ciudad de Cali y municipios aledaños. Las diligencias fuera del perímetro urbano se manejan como diligencias especiales y tienen un costo mayor.

Diligencias urgentes: Son aquellas que se solicitan por fuera de los horarios establecidos para la programación de recorridos, requieren atención inmediata de un auxiliar de mensajería.

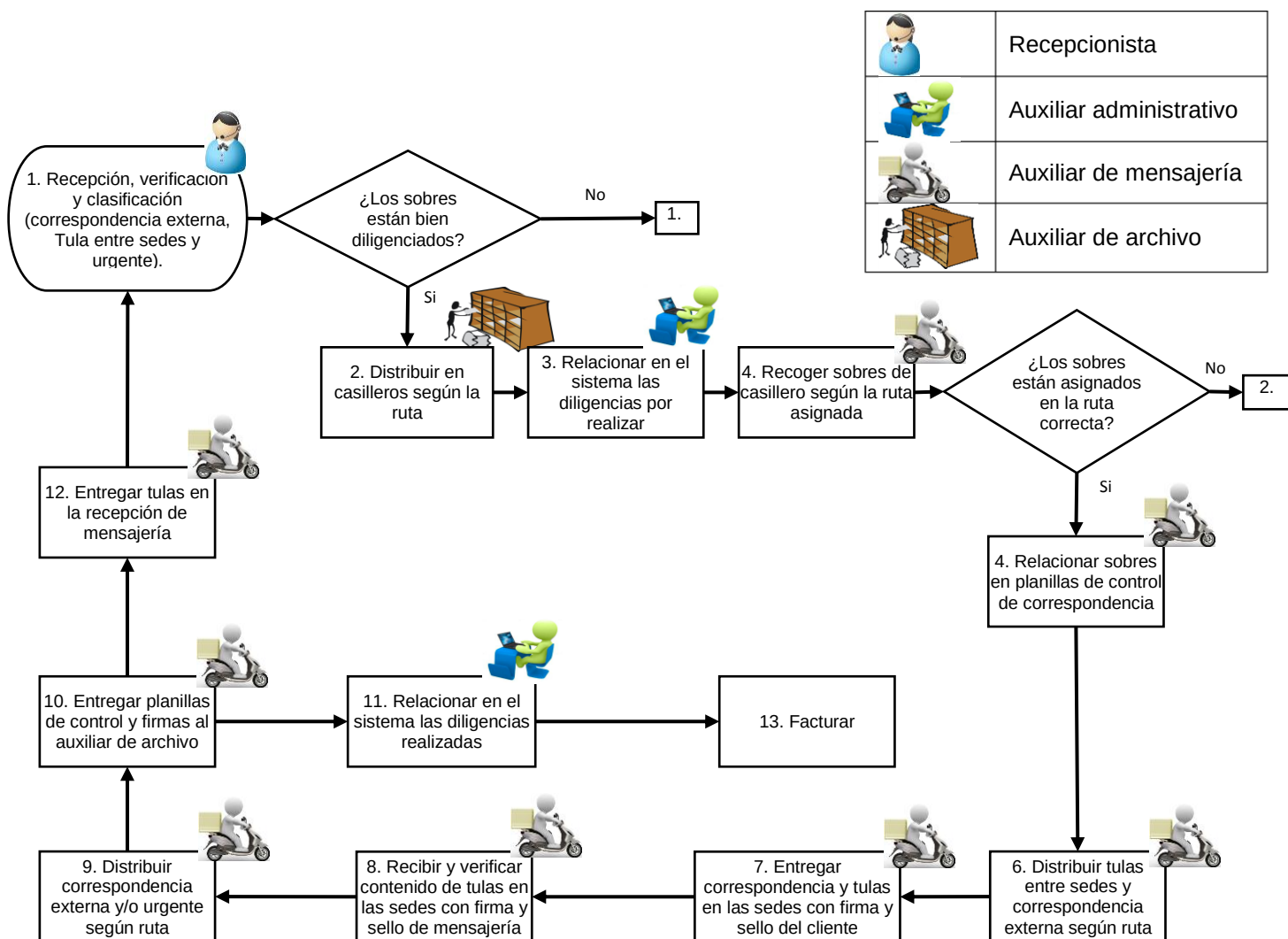
5.1.2. Actividades del proceso de mensajería:

El proceso de mensajería, el cual se describe en la Gráfica 3, tiene las siguientes actividades:

Recepción, verificación y clasificación: Esta actividad consiste en destapar la tula proveniente de las sedes, verificar que los sobres estén bien marcados con nombre, dirección de destinatario, y remitente, para clasificar los sobres según su destino, con base en esto, la correspondencia es remitida a otras sedes del mismo grupo empresarial o como diligencia externa o urgente. La responsabilidad de esta actividad es propia del recepcionista del área.

Distribuir en casilleros según la ruta: El auxiliar de archivo se encarga de distribuir los sobres en cada casillero según la ruta.

Relacionar en el sistema las diligencias por realizar: En esta actividad, un auxiliar de archivo se encarga de digitar las diligencias que van a ser entregadas por tula o que van a ser distribuidas en la ciudad a remitentes externos del grupo empresarial, es una actividad de control interno y su objetivo es conocer el estado del sobre antes de ser entregado, lo que permite medir la trazabilidad del proceso.



Gráfica 3 - Diagrama de flujo proceso de mensajería
Fuente: Empresa caso de estudio

Recoger sobres de casillero según la ruta asignada: Los mensajeros recogen los sobres del casillero correspondiente a su ruta y relacionan en una planilla física las diligencias que van a entregar. Los sobres que son remitidos a sedes del mismo grupo empresarial se relacionan en una planilla distinta a la de diligencias externas debido a que sus costos son diferentes.

Distribuir tulas entre sedes y correspondencia externa según ruta: En esta actividad los mensajeros salen a realizar el recorrido de la ruta llevando consigo las tulas con los sobres de cada sede y los sobres que van a otros lugares distintos a las sedes.

Entregar correspondencia y tulas en las sedes: Los mensajeros solicitan la firma de los sobres entregados en cada sede para llevar el control en las planillas para tula entre sedes, igualmente solicitan la firma de remitente externo como constancia de la entrega.

Recibir tulas en las sedes: Estando en la sede los mensajeros reciben la tula con los sobres que son despachados de ésta, verifican su contenido, y firman la planilla de cada sede como constancia de recibido.

Entregar planillas de control y firmas al auxiliar de archivo: Una vez realizada la entrega de correspondencia los mensajeros entregan las planillas a un auxiliar de mensajería que digita las diligencias según el tipo.

Relacionar en el sistema las diligencias realizadas: Un auxiliar de archivo se encarga de relacionar digitalmente los sobres que fueron entregados según el tipo de correspondencia, posteriormente envía lo relacionado a la coordinadora quien se encarga de facturar.

Entregar tulas en la recepción de mensajería: Los mensajeros entregan las tulas al recepcionista quien se encarga de destapar las tulas y repetir el proceso desde el principio.

5.2. CASO DE ESTUDIO

5.2.1. Clasificación problema de ruteo

Según la literatura relacionada con los problemas de ruteo, el caso de estudio clasifica como un problema SDVRPTW (problema de ruteo de vehículos con entregas parciales y ventanas de tiempo), debido a que presenta las siguientes características:

- 34 sedes clientes
 - 7 de ellos con ventana de tiempo
 - 1 con una demanda mayor a la capacidad de los mensajeros
- 1 depósito

Debido a esa única sede cuya demanda es mayor a la capacidad de un vehículo, el problema obliga a que ésta sea visitada como mínimo por dos mensajeros, por lo tanto debe haber entregas parciales.

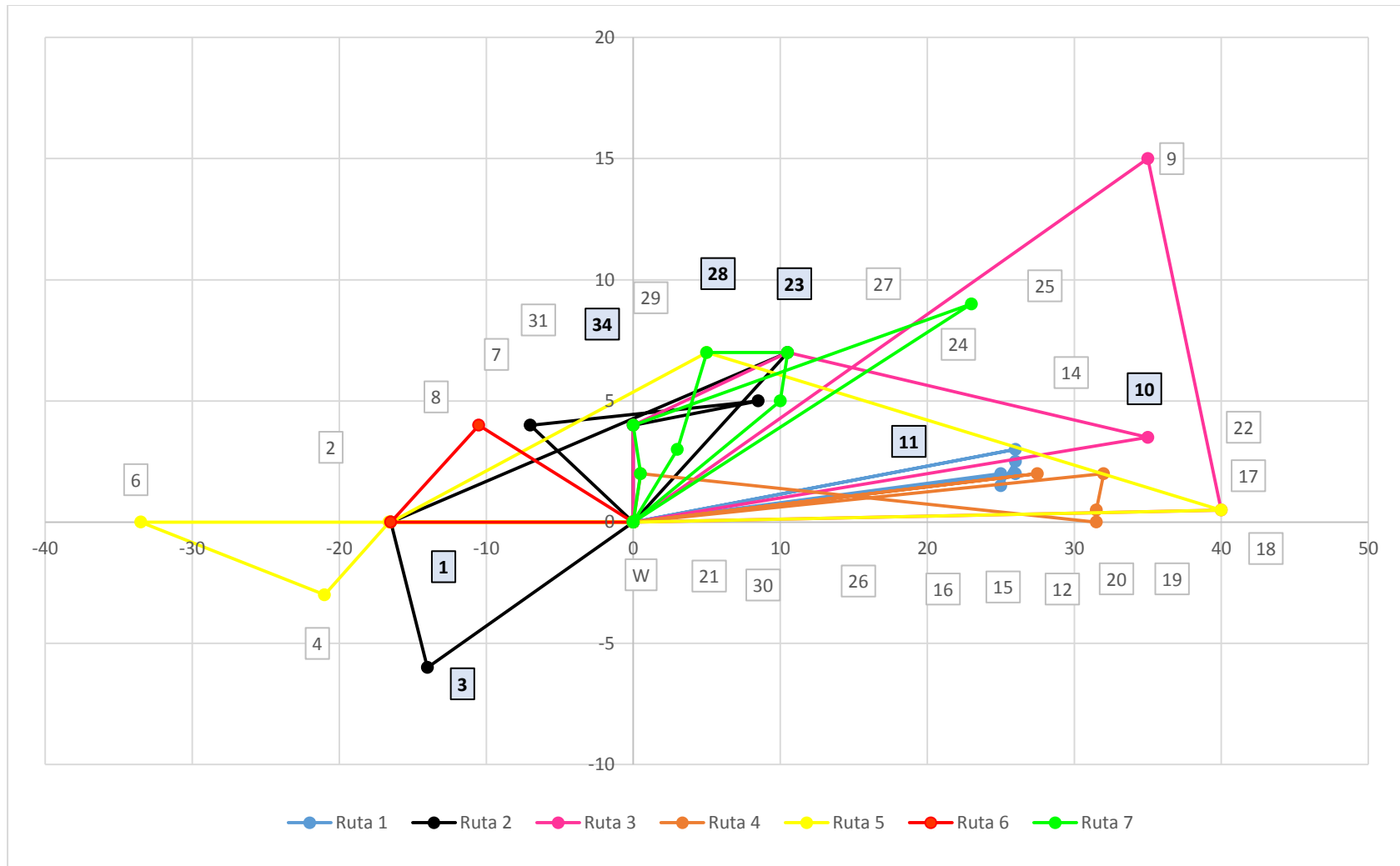
5.2.2. Datos del caso de estudio

Capacidad y demanda: Los mensajeros tienen una capacidad de 25 kilogramos, a pesar de que tanto la capacidad como la demanda se miden en kilogramos, el peso no es el factor determinante en este dato, sino el volumen. Sin embargo, medir todos los sobres y paquetes por unidad de volumen resultaría ser muy engorroso, por eso se prefiere el peso. La demanda de cada una de las sedes está en el anexo A.3.

Tiempo de servicio: Es el tiempo de atención o de espera que tiene el mensajero en cada sede (anexo A.3).

Ventanas de tiempo: Los mensajeros tienen 300 minutos para entregar todos los envíos entre las 7:30 y las 12:30, sin embargo, 7 sedes tienen ventanas de tiempo, determinadas por un horario de apertura y uno de cierre, todas ellas tienen una diferencia de horario que permite la atención del mensajero antes del cierre (anexo A.3). Aquellas sedes con ventanas de tiempo están resaltadas en la Gráfica 4.

Localización de cada sede: Con ayuda de la herramienta Google™ Maps, se hizo una estimación de las coordenadas de cada una de las sedes respecto al depósito (origen del plano). Luego, con estas coordenadas se calculó la distancia euclidiana entre cada par de sedes.



Gráfica 4 - Distribución de rutas actual.
Fuente:

Los

autores.

Duración de cada recorrido: La empresa caso de estudio dispone de cronometrajes de la duración de cada uno de los recorridos actuales, sin embargo, no tienen todos las posibles combinaciones de tiempos entre sedes.

Vehículos disponibles: Actualmente se utilizan 10 mensajeros para realizar las diligencias de tula entre sedes, las diligencias urgentes, y una fracción de las diligencias externas.

5.2.3. Ruteo actual

La Gráfica 4 muestra que las rutas se entrecruzan unas con otras, y no están asignadas a una determinada zona; esto deja entrever que han sido definidas de forma empírica o arbitraria. También hay que destacar, que en la distribución de rutas actual algunos cliente son servidos por más de un mensajero, aun cuando su demanda es muy inferior a la capacidad de cada uno de ellos, esto quiere decir que se están haciendo viajes innecesarios, lo cual representa un desperdicio más para la empresa. La secuencia de rutas se muestra en la tabla 1.

Tabla 1 - Secuencia del ruteo actual

Ruta	Secuencia
1	W - <u>11</u> - W - 12 - 13 - 14 - 15 - W
2	W - <u>3</u> - 32 - <u>23</u> - 27 - W - 26 - W - 34 - 7 - W
3	W - 9 - 18 - W - 34 - <u>23</u> - 22 - W
4	W - 17 - 19 - 20 - 30 - 21 - W - 16 - <u>10</u> - W
5	W - 18 - <u>28</u> - 1 - W - 2 - 4 - 5 - 2 - 6 - W
6	W - 33 - 8 - <u>1</u> - W
7	W - 24 - 23 - 27 - 28 - 29 - W - 31 - <u>34</u> - 25 - W

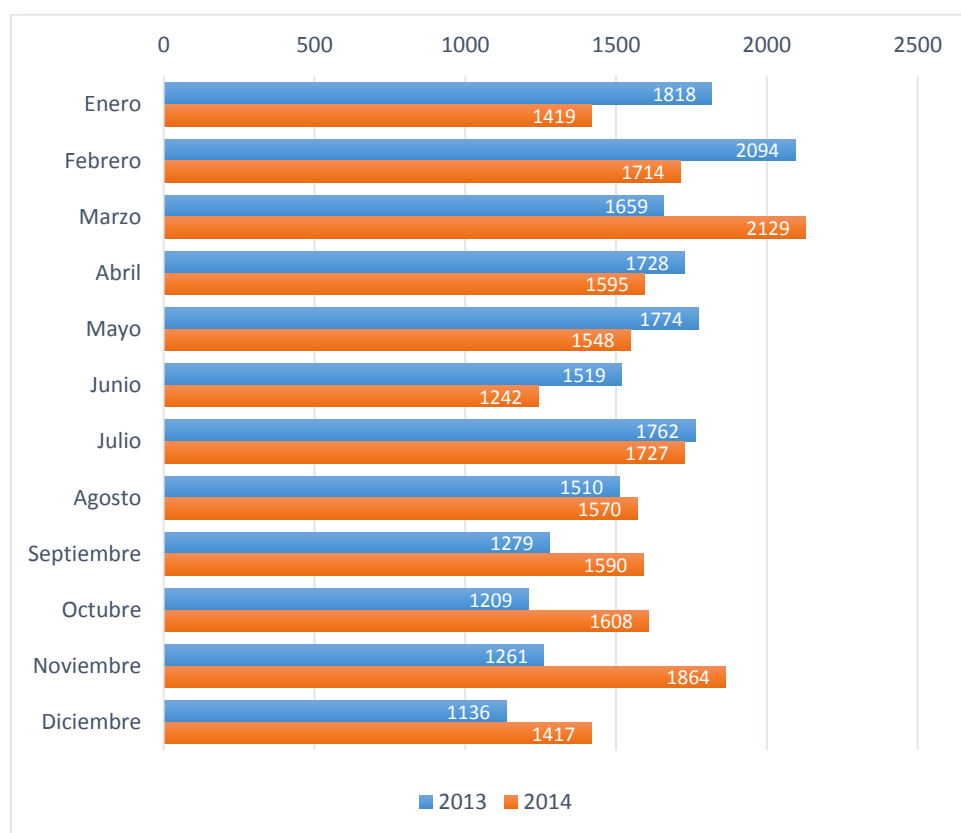
Fuente: Los autores

5.3. PRODUCTIVIDAD DE LOS MENSAJEROS

Uno de los fines de diseñar una nueva distribución de rutas en esta área de mensajería es la actual disminución de la productividad de los mensajeros. Este problema se identificó debido a que en marzo de 2014 los mensajeros manifestaron su inconformidad respecto a la

disponibilidad de tiempo para atender las diligencias externas y urgentes, por este motivo, solicitaron a gerencia contratar un nuevo mensajero. Sin embargo, un estudio realizado por la empresa caso de estudio reveló que en el último año el número de diligencias de este tipo no había aumentado tanto como para requerir un mensajero adicional (Gráfica 5).

La Tabla 2 permite evidenciar que el número de diligencias se ha mantenido relativamente estables en el último año. Con respecto al año anterior, en 2014 las diligencias externas y urgentes sólo aumentaron un 3,5%, que equivalen a 56 envíos adicionales. Teniendo en cuenta que se dispone de 10 mensajeros y 22 días mensuales por mensajero, este incremento supone un promedio de 0,25 diligencias por día adicionales por mensajero. Lo anterior sugiere que un mensajero no se ve en lo absoluto afectado por dicho aumento.



Gráfica 5 - Número de diligencias externas y urgentes por mes en 2013 y 2014.
Fuente: Empresa caso de estudio.

Tabla 2 - Variación diligencias externas y urgentes 2013 - 2014

Diligencias	2013	2014	Variación
Mensajería externa	1520	1585	+4,30%
Diligencias urgentes	43	33	-23,30%
Total	1563	1618	+3,50%

Fuente: Los autores.

Las diligencias subcontratadas en el año 2013 y 2014 se muestra en el anexo A.5, en la misma tabla para el año 2015 se pronostica que en promedio se subcontratará alrededor de 1674 diligencias por mes un promedio de 76 envíos por día, asumiendo que se trabaja 22 días al mes aproximadamente.

Teniendo en cuenta los aspectos del proceso que se ha descrito y la finalidad de la solución del problema de ruteo. En este trabajo se diseña un método para la distribución de rutas de las diligencias de tula entre sedes, con el fin de que aquellas diligencias que actualmente se subcontratan con otra empresa de mensajería puedan ser atendidas por los mensajeros de la empresa caso de estudio.

6. DEFINICIÓN DE INDICADORES

Cumpliendo con el objetivo específico dos, se determinaron los indicadores que permitan medir el desempeño de la ruta actual comparándola con la ruta propuesta. Estos indicadores son los siguientes:

- **Duración del recorrido:** Es el tiempo que los mensajeros utilizan para desplazarse entre sedes.
- **Tiempo de servicio:** Es el tiempo de atención de cada sede. Debido a que varios clientes son visitados por dos o más mensajeros sin que su demanda lo amerite, en este caso, el tiempo de servicio puede verse afectado por el ruteo.
- **Tiempo de inactividad:** Cuando hay ventanas de tiempo en una ruta, es el tiempo que debe esperar un mensajero para que “abran” dicha sede y pueda ser atendido.
- **Duración total (tiempo de permanencia en la ruta):** Es la suma del tiempo de recorrido, el tiempo de inactividad y tiempo de servicio. A pesar de que un bajo tiempo de recorrido está directamente relacionado con un buen diseño de rutas, minimizar estos no necesariamente implica optimizar el tiempo empleado por los auxiliares de mensajería en realizar todas las diligencias, un trayecto que minimice el tiempo de recorrido podría tener grandes esperas entre diligencias ocasionadas por la obligación de respetar las ventanas de tiempo y optimizar el recorrido, por este motivo, es necesario reducir también los tiempos de inactividad que se pueden generar por las ventanas de tiempo.

En la tabla 3 se presenta los tiempos de recorrido, tiempo de servicio, tiempo de inactividad y el tiempo total de permanencia para cada ruta de la gráfica 4.

Tabla 3 – Indicadores de la secuencia de las rutas actuales

Ruta	Secuencia	Duración del recorrido (min)	Tiempo de servicio (min)	Tiempo de inactividad (min)	Duración total (min)
1	W - <u>11</u> - W - 12 - 13 - 14 - 15 - W	53,0	45,0	0,0	98,0
2	W - <u>3</u> - 32 - 23 - 27 - W - 26 - W - 34 - 7 - W	50,3	71,0	0,0	121,3
3	W - 9 - 18 - W - 34 - <u>23</u> - 22 - W	63,8	95,0	0,0	158,8
4	W - 17 - 19 - 20 - 30 - 21 - W - 16 - <u>10</u> - W	87,0	78,0	0,0	165,0
5	W - 18 - <u>28</u> - 1 - W - 2 - 4 - 5 - 2 - 6 - W	101,1	179,0	0,0	280,1
6	W - 33 - 8 - <u>1</u> - W	23,2	61,0	0,0	84,2
7	W - 24 - 23 - 27 - 28 - 29 - W - 31 - <u>34</u> - 25 - W	39,2	65,0	0,0	104,2
Total		417,6	594,0	0,0	1011,6

Fuente: Los autores.

7. PROPUESTA METODOLÓGICA

En este capítulo se expone el conjunto de técnicas a utilizar para dar solución al problema de ruteo que aplica para el caso de estudio, cumpliendo así con el objetivo específico número 3.

La metodología diseñada consta de tres fases: En la primera, todos los datos obtenidos durante la caracterización del proceso se convierten en los parámetros que son usados para las siguientes dos etapas. En la segunda, se agrupan las sedes utilizando el algoritmo de los ahorros, de tal forma que ninguno de los grupos sobrepase el límite de capacidad de cada vehículo. Y en la última, utilizando un modelo de programación lineal entera mixta, se hace el ruteo para cada una de las agrupaciones, minimizando el tiempo de permanencia de los mensajeros en el recorrido.

7.1. OBTENCIÓN DE PARÁMETROS

Los parámetros requeridos para la solución del problema de ruteo se obtuvieron a partir de los datos utilizados para hacer la caracterización del mismo (sección 5.2.2.), estos son:

- Demanda de correspondencia por sede en kilogramos (anexo A.3).
- Capacidad de los vehículos: Cada mensajero puede llevar máximo 25 kilogramos.
- Número de vehículos: Es el mínimo de vehículos suficiente para satisfacer la demanda de todas las sedes clientes. Cada vehículo tiene una capacidad de 25 kg, la suma de la demanda de todas las sedes es 119,2 kg, por lo tanto se utilizaron 5 vehículos.
- Matriz de tiempos de recorrido entre sedes: Para calcular este parámetro se requirió de los siguientes datos:
 - Distancia euclidiana entre cada una de las sedes d_{ij} (sección 5.2.2).

- Con una regresión lineal, se calculó la proporción m entre las distancias reales y las distancias euclidianas de un grupo de 20 sedes (anexo A.6).
- Cronometrajes entre los recorridos que realizan los mensajeros en la distribución actual c^*_{ij} facilitados por la empresa caso de estudio¹ (capítulo 6).
- Con la herramienta Google™ Maps se obtuvieron las distancias reales r^*_{ij} de los recorridos para los cuales había disponible un cronometraje.
- Se calcula la velocidad media v^*_{ij} de los mensajeros en cada una de los recorridos en la muestra.

$$\frac{r^*_{ij}}{c^*_{ij}} = v^*_{ij}$$

- Se promedian los v^*_{ij} para obtener una velocidad media única V para realizar todos los cálculos.
- Obtenidos d_{ij} , m y V ; se calculan los tiempos de recorrido t_{ij} entre cada una de las sedes (anexo A.2).

$$m \frac{d_{ij}}{V} = t_{ij}$$

- Tiempo de servicio o de espera del mensajero para cada sede en minutos (anexo A.3).
- Horarios de apertura y cierre de cada sede: Los mensajeros tienen 300 minutos para entregar todos los envíos entre las 7:30 y las 12:30, por lo tanto, los parámetros horario de apertura y horario de cierre deben escribirse como un número entre 0 (7:30) y 300 (12:30). El parámetro horario de cierre debe ser mayor que el horario de apertura. La diferencia entre ambos horarios debe ser mayor o igual al tiempo de servicio para esa sede (anexo A.3).

¹ Observar que los cronometrajes no se podrían utilizar directamente como parámetro de tiempo de recorrido, pues sólo representan una pequeña muestra (57 cronometrajes) de todas las posibles combinaciones entre los 36 nodos del problema (630 tiempos de recorrido a calcular).

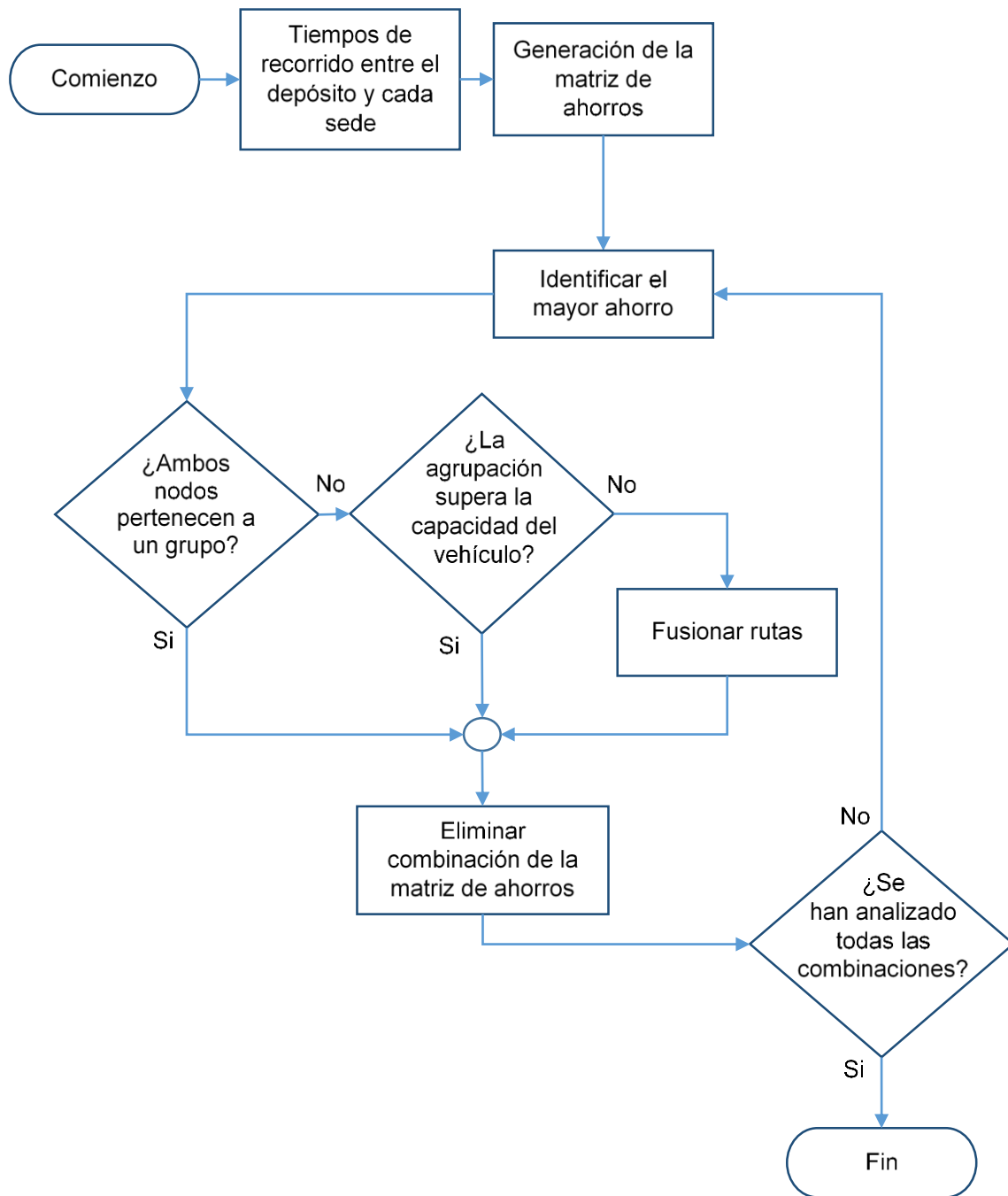
7.2. AGRUPACIÓN

En esta fase se agrupan las sedes que serán atendidas por cada vehículo al obtener la solución final. Cada una de las sedes debe ser visitada por un vehículo, y la suma de la demanda de las sedes que el vehículo atiende no puede superar la capacidad del vehículo. Sin embargo, la sede 1 tiene una demanda superior a la capacidad de un mensajero. Para solucionar esto, se dividió su demanda en dos partes: La primera contiene la correspondencia que debe respetar una determinada ventana de tiempo, en cambio, la segunda parte de la demanda puede llegar en cualquier momento en el transcurso del turno. Ninguna de las dos partes supera el límite de capacidad. Posteriormente, esta sede se duplica, es decir, se crea una nueva sede con la misma localización (sede 35). A la sede 1 se le asigna la primera parte de la correspondencia con sus nuevos valores de capacidad, pero con la misma ventana de tiempo; a la sede 35 se le asigna la demanda restante.

Con la anterior modificación ahora el problema de ruteo tiene 35 sedes que se deben agrupar teniendo en cuenta las restricciones mencionadas. Para hacer eso se eligió el algoritmo de los ahorros, el cual comprende las siguientes etapas:

- i. Inicialización: Obtener la distancia de cada cliente hasta el depósito y viceversa, para esto se utilizó la matriz de tiempos de recorrido del anexo A.2.
- ii. Cálculo de los ahorros (Anexo B.1).
- iii. Mejor unión: Esta etapa consiste en agrupar en cada iteración las rutas obtenidas en la etapa de inicialización que generen los mayores ahorros, siempre que no se exceda el límite de capacidad de los vehículos, este paso se repite sistemáticamente hasta analizar todas las combinaciones de ahorros.

La Gráfica 6 muestra los pasos para la ejecución del algoritmo de los ahorros paso a paso.



Gráfica 6 - Diagrama de flujo del algoritmo de los ahorros.
Fuente: Olivera, 2004.

Como se puede apreciar en la gráfica 6, el método de los ahorros no tiene en cuenta las ventanas de tiempo al conformar las agrupaciones; es decir, el algoritmo podría arrojar grupos de sedes no factibles de ser ruteadas en la siguiente fase. Sin embargo, esta

limitación puede ser superada con una adecuada reagrupación de las sedes, con los mismos principios que se muestran en el capítulo 9.

7.3. RUTEO

Una vez hechas las agrupaciones, se procede con la programación del recorrido de cada vehículo. La técnica seleccionada para realizar el ruteo es un modelo de programación lineal entera mixta para resolver VRPTW (Olivera, 2004, pág. 8).

Para obtener los resultados del modelo de ruteo, éste se programó en el lenguaje de optimización AMPL. Para la ejecución del código se utilizó el solver SCIP[®] de la página NEOS solvers.

7.3.1. Formulación del modelo

A continuación se formula matemáticamente el modelo, posteriormente, se hará una breve descripción de cada una de las expresiones del mismo.

Notación

Conjuntos

$N =$ *Nodos*

Índices

$i, j, k =$ *Nodos*

$c =$ *Nodo salida del depósito*

$f =$ *Nodo llegada al depósito*

Parámetros

$t_{ij} =$ *Tiempo de recorrido entre el nodo i y el nodo j*

$S_i =$ *Tiempo de atención o espera en el nodo i*

$e_i =$ *Horario de apertura del nodo i*

$l_i =$ Horario de cierre del nodo i

$M =$ Número entero muy grande

Variables

$x_{ij} = \begin{cases} 1: \text{Al vehículo se le asigna el recorrido entre los clientes } i \text{ y } j \\ 0: \text{Cualquier otro caso} \end{cases}$

$y_i =$ Hora de arribo del vehículo al cliente i

Formulación matemática del modelo

Función objetivo

Minimizar $Z = y_f - y_c$

Restricciones

$$\sum_{j \in N, j \neq c} x_{cj} = 1 \quad (1)$$

$$\sum_{i \in N, i \neq f} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in N, j \neq c, j \neq f \quad (2)$$

$$\sum_{i \in N, i \neq f} x_{ik} = \sum_{j \in N, j \neq c} x_{kj} \quad \forall k \in N, k \neq c, f \quad (3)$$

$$y_j - y_i \geq S_i + t_{ij} - M(1 - x_{ij}) \quad \forall i, j \in N, i \neq f, j \neq c \quad (4)$$

$$e_i \sum_{j \in N, j \neq c} x_{ij} \leq y_i \leq (l_i - S_i) \sum_{j \in N, j \neq c} x_{ij} \quad \forall i \in N \quad (5)$$

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

$$y_i \geq 0 \quad \forall i \in N \quad (7)$$

Descripción del modelo

Función objetivo

Minimizar $Z = y_f - y_c$

La función objetivo minimiza el tiempo empleado por el vehículo para hacer los recorridos asignados. Lo cual implica, disminuir la diferencia entre la hora de llega del mensajero al depósito y su hora de salida.

Restricciones

$$\sum_{j \in N, j \neq c} x_{cj} = 1 \quad (1)$$

La restricción 1 especifica que el vehículo debe salir del depósito hacia algún nodo j.

$$\sum_{i \in N, i \neq f} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in N, j \neq c, j \neq f \quad (2)$$

La restricción 2 garantiza que cada cliente sea visitado por el vehículo. La sumatoria en i (cliente desde el que se parte) debe ser para todo nodo diferente de f, ya que desde éste no se puede arribar a ningún otro nodo. La restricción solamente se aplica para los j (cliente al que se llega) diferentes de c (salida del depósito), porque desde c solamente se puede salir, mas no se puede arribar; también j debe ser diferente de f (llegada al depósito) porque a éste puede llegar más de un vehículo.

$$\sum_{i \in N, i \neq f} x_{ik} = \sum_{j \in N, j \neq c} x_{kj} \quad \forall k \in N, k \neq c, f \quad (3)$$

La restricción 3 es de balance, establece que si un vehículo visita a un cliente k desde un nodo i, ese mismo vehículo debe abandonar el nodo k hacia otro nodo j. Esta restricción evita que un vehículo abandone un nodo sin haberlo visitado, o que un nodo sea visitado pero nunca sea abandonado, entre otros efectos indeseados similares.

$$y_j - y_i \geq S_i + t_{ij} - M(1 - x_{ij}) \quad \forall i, j \in N, i \neq f, j \neq c \quad (4)$$

La restricción 4 sirve para asignar los horarios de arribo a cada nodo. La diferencia entre las horas de arribo a un cliente i y el cliente j sucesor en la ruta debe ser mayor o igual al tiempo de servicio del cliente i , más, el tiempo de recorrido desde el cliente i al cliente j . También, la restricción 5 sirve para la eliminación de subtours «circuito entre un grupo de clientes que no incluyen ni al depósito ni a los demás clientes» (Paredes & Obreque, 2009), pues al realizarse un ciclo el término $(y_j - y_i)$ sería negativo, lo cual no puede ser, pues $S_i + t_{ij}$ son parámetros que tiene un valor mayor a cero. Esta restricción solamente se activa cuando determinado vehículo es asignado para hacer los recorridos entre dos cliente i y j , de no ser así, las variables y_j, y_i quedaran con el valor por defecto igual a cero. $S_i = 0$ cuando $i = c$, transformando el tiempo de arribo al nodo “salida del depósito” en horario de salida del mismo.

$$e_i \sum_{j \in N, j \neq c} x_{ij} \leq y_i \leq (l_i - S_i) \sum_{j \in N, j \neq c} x_{ij} \quad \forall i \in N \quad (5)$$

La hora de arribo de un vehículo a un cliente debe ser después de la hora de apertura, pero, debe llegar con el tiempo suficiente para ser atendido sin que el cliente cierre.

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

$$y_i \geq 0 \quad \forall i \in N \quad (7)$$

Las restricciones 6 y 7 son las de no negatividad: la variable Y (tiempos de arribo) pertenece a los reales y debe ser mayor o igual a cero, la variable X (asignación) es binaria.

7.3.2. Implementación en AMPL

El listado con cada uno de los archivos para la implementación del modelo anterior en AMPL se encuentran en el anexo C.

8. RESULTADOS

En este capítulo se muestran los resultados de aplicar la metodología diseñada en el caso de estudio, así como el impacto de las mejoras en la disminución de las diligencias que la compañía subcontrata actualmente. A los resultados se les hace unos análisis en el capítulo 9, para a partir de ellos, hacer unas recomendaciones para la futura implementación de la metodología en la empresa caso de estudio en el capítulo 10. Con estos tres capítulos se estaría cumpliendo el cuarto y último objetivo específico de este trabajo.

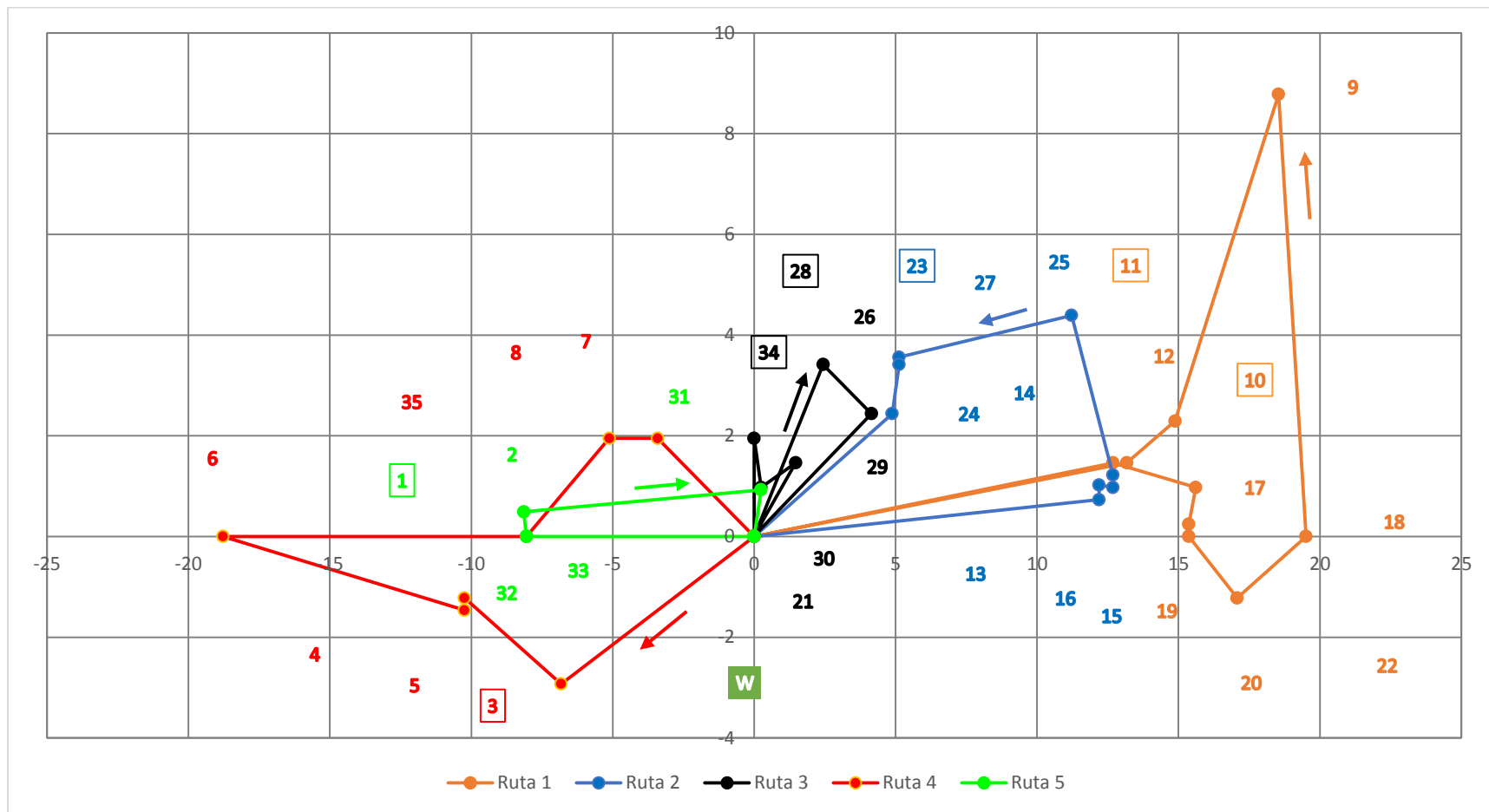
8.1. DISTRIBUCIÓN DE RUTAS PROPUESTA

Tabla 4 - Secuencia de las rutas con el algoritmo de los ahorros

Ruta	Secuencia	Duración del recorrido (min)	Tiempo de servicio (min)	Tiempo de inactividad (min)	Duración total (min)
1	W - <u>11</u> - 17 - 19 - 20 - 22 - 18 - 9 - <u>10</u> - 12 - W	52,92	119	0	171,92
2	W - 15 - 16 - 13 - 14 - 25 - 27 - <u>23</u> - 24 - W	29,27	90	0	119,27
3	W - <u>28</u> - 26 - 21 - 29 - 30 - <u>34</u> - W	17,10	56	40	113,10
4	W - <u>3</u> - 4 - 5 - 6 - 35 - 8 - 7 - W	40,98	82	0	122,98
5	W - <u>1</u> - 32 - 33 - 2 - 31 - W	17,81	110	0	127,81
Duración total con algoritmo de los ahorros		158,08	457	40	655,08
Duración total distribución actual (tabla 3)		417,60	594	0	1011,60
Diferencia		-259,52	-137	+40	-356,52

Fuente: Los autores.

La tabla 4 muestra la secuencia de las rutas representadas por la gráfica 7, los destinos en esta tabla subrayados y en negrita son aquellos clientes que tienen ventanas de tiempo. Con la nueva distribución, el tiempo empleado por los mensajeros para realizar las diligencias de tula entre sedes sería de 655,08 minutos. La mejora respecto a los 1011,6 minutos que los auxiliares de mensajería utilizan actualmente en el recorrido de la mañana, el cual ya se mostró previamente en la tabla 3, es de 35,24%. Este resultado se debe principalmente a tres grandes cambios de esta nueva distribución con relación a la actual.



Gráfica 7 - Consolidado de rutas con el algoritmo de los ahorros
Fuente: Los autores.

El primero, los mensajeros no vuelven al depósito durante el recorrido, sino únicamente al final cuando ya han hecho las diligencias. El segundo, se reduce drásticamente las visitas por múltiples mensajeros a un mismo cliente, antes esta situación se daba en seis sedes, ahora sólo se da en una, por lo que se reduce el tiempo de servicio. Y el tercero, la agrupación de los clientes por zonas, que antes los mensajeros hacían de forma arbitraria.

La programación de rutas propuesta está diseñada para la jornada de la mañana, sin embargo, está pactado con los clientes realizar dos recorridos durante el día, es decir, que el ruteo sirve para que el mensajero realice el mismo recorrido tanto en la mañana como en la tarde. De esta forma, los 655,08 minutos que consumen los recorridos en la nueva distribución (Tabla 4) se duplican, para un total de 1310,2 minutos que comparado con los 2022 minutos que se utilizan actualmente en los recorridos entre sedes (tabla 3), genera un ahorro de 712 minutos diarios, los cuales se utilizarán para cubrir las diligencias que se subcontratan con la empresa de mensajería externa, cuyo valor se estima en 1489 diligencias mensuales en promedio para el 2015 (Anexo A.5), 68 diligencias por día aproximadamente.

8.2. REDUCCIÓN DE LAS DILIGENCIAS SUBCONTRATADAS

La finalidad de este trabajo es reducir las diligencias subcontratadas con el tiempo que se ahorró del ruteo realizado en la sección anterior.

Las diligencias externas tuvieron un crecimiento del 3,5% entre 2013 y 2014 (Tabla 2), se estima que para el 2015 será aproximadamente de 1674 por mes, 76 diligencias por día en promedio. El estudio de tiempos arrojó que para una diligencia externa el tiempo de recorrido es de aproximadamente 5 minutos y el tiempo de servicio en cada diligencia es de 4 minutos para un total de 9 minutos por diligencia (Anexo A.4). Para realizar con personal

propio las 68 diligencias diarias subcontractadas, es necesario contar con 610 minutos los cuales se cubrirán con los ahorros que genera la nueva distribución.

9. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

La agrupación de los clientes es uno de los parámetros más importantes, pues es una de las causas clave de la ineficiencia generada por la distribución de rutas en la empresa caso de estudio. Pese a que el tiempo necesario por los auxiliares de mensajería para realizar diligencias de mensajería interna podría disminuirse considerablemente con la nueva distribución, no es posible garantizar que la agrupación empleada para ejecutar el modelo de ruteo sea la óptima, debido a que el algoritmo de los ahorros es una heurística. Por este motivo, se evaluarán los cambios en la función objetivo al utilizar un método distinto de agrupación al método de los ahorros. Al igual que en el resultado original, cada grupo de sedes no excede la capacidad de los vehículos.

9.1. AGRUPACIÓN DE CLIENTES UTILIZANDO OTROS MÉTODOS

9.1.1. Heurística del barrido

Tabla 5 - Secuencia de las rutas con la heurística del barrido

Ruta	Secuencia	Duración del recorrido (min)	Tiempo de servicio (min)	Tiempo de inactividad (min)	Duración total (min)
1	W - <u>11</u> - 17 - 18 - 22 - 20 - 19 - 13 - 14 - 16 - 15 - W	40,4	119	0	159,4
2	W - <u>23</u> - 27 - 25 - 9 - <u>10</u> - 12 - 21 - W	43,7	93	0	136,7
3	W - <u>28</u> - 30 - 26 - 29 - 29 - <u>34</u> - W	24,9	53	35,2	113,1
4	W - <u>3</u> - 4 - 5 - 6 - 2 - 33 - 35 - W	40,3	117	0	157,3
5	W - 32 - <u>1</u> - 8 - 7 - 31 - W	18,0	75	0	93,0
Total		167,3	457	35,2	659,5

Fuente: Los autores.

Utilizando la heurística del barrido explicada en la sección 4.2.2 se agruparon nuevamente las sedes. Los resultados que arrojó el modelo para esta agrupación se muestran en la gráfica 8.

9.1.2. Modelo de p-mediana con restricciones de capacidad

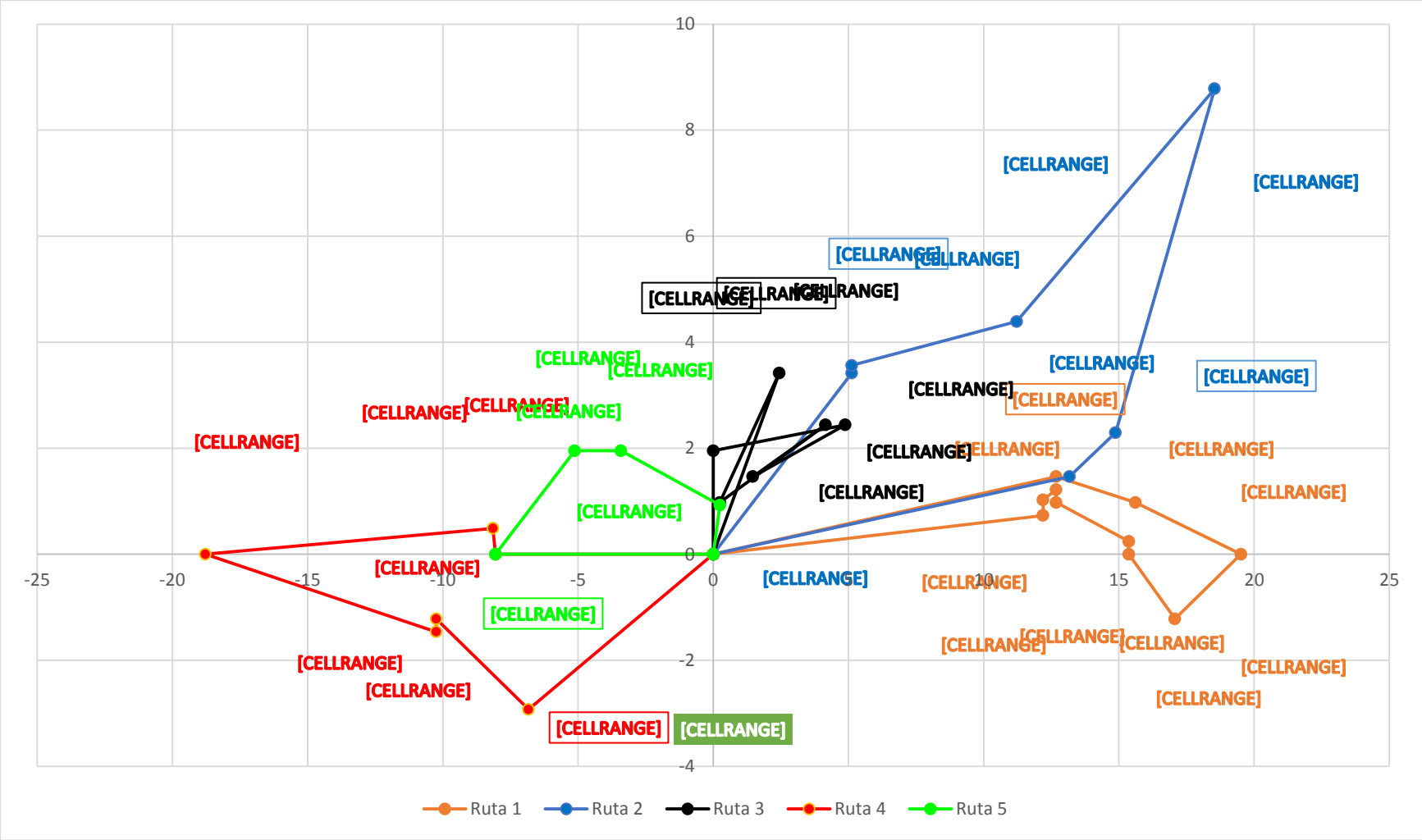
El modelo de p-mediana, el cual se describe en el anexo B3, agrupa los clientes en exactamente p grupos, de tal forma que la suma de la distancia entre clientes sea mínima. Para este caso en particular se agregó una restricción que limita la demanda total que puede tener cada grupo, la cual no puede superar la capacidad de los vehículos.

Tabla 6 - Secuencia de las rutas con modelo de p-mediana

Ruta	Secuencia	Duración del recorrido (min)	Tiempo de servicio (min)	Tiempo de inactividad (min)	Duración total (min)
1	W - 9 - 18 - 22 - 20 - 19 - 17 - <u>10</u> - 12 - W	28,7	82	0	110,7
2	W - 26 - 24 - 25 - <u>11</u> - 14 - 13 - 15 - 16 - W	51,8	117	0	168,8
3	W - <u>28</u> - 29 - <u>23</u> - 27 - 31 - 30 - 21 - <u>34</u> - W	21,2	72	19,9	113,1
4	W - <u>3</u> - 35 - 32 - 33 - 2 - 8 - 7 - W	20,0	140	0	160
5	W - <u>1</u> - 6 - 5 - 4 - W	39,2	46	0	85,2
Total		160,9	457	19,9	637,8

Fuente: Empresa caso de estudio.

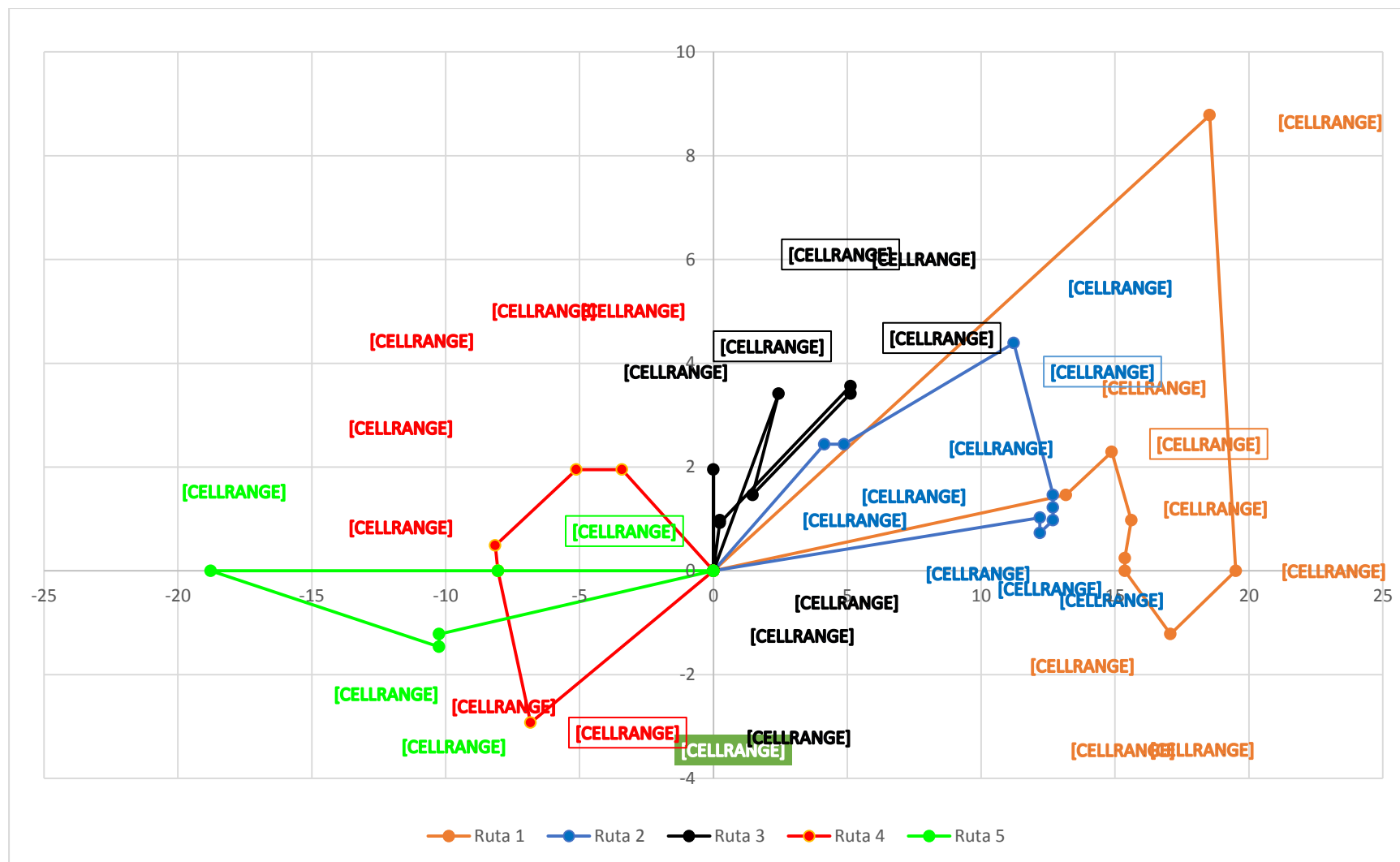
Las tablas 5 y 6 muestran la secuencia de cada ruta, la suma de los tiempos de servicio de cada ruta en particular, tiempo de inactividad, y la duración total del recorrido de las gráficas 8 y 9 respectivamente. Para los resultados obtenidos en el capítulo 8, se puede excluir la suma de los tiempos de servicio, como no se dividen ni se fusionan clientes, éste permanece constante.



Gráfica 8 - Consolidado de rutas con la heurística del barrido
Fuente:

Los

autores.



Gráfica 9 - Consolidado de rutas con modelo de p-mediana.
Fuente: Los autores.

Tabla 7 – Comparación de diferentes métodos de agrupación

Método de agrupación	Duración del recorrido (min)	Tiempo de inactividad (min)	Total tiempo asociado al ruteo (min)	Variación respecto de los resultados iniciales
Heurística de los ahorros	158,1	40,0	198,1	0,00%
Heurística del barrido	167,3	35,2	202,5	+2,23%
Modelo de p-mediana	160,9	19,9	180,8	-8,72%

Fuente: Los autores.

La solución obtenida al agrupar los clientes con el modelo de p mediana mejora la solución inicial (heurística de los ahorros) en un 8,72%, mientras que, la solución empeora en un 2,23% al utilizar el método del barrido (Tabla 7). Los tres ruteos realizados hasta ahora concentran todo el tiempo de inactividad en la ruta 3. La causa de este problema es que las formas de agrupación hacen énfasis en la distancia (tiempo de recorrido) que hay entre los clientes, más no en sus ventanas de tiempo. La ruta 3 tiene la particularidad de poseer dos o tres clientes (según el método de agrupación) con ventanas de tiempo, cuyos intervalos entre ellas son mayores que la suma del tiempo de recorrido y de servicio de los clientes sin ventanas de tiempo visitados durante dichos intervalos. Sin embargo, para tener en cuenta las ventanas de tiempo al agrupar, simultáneamente se debe hacer el ruteo, esto quiere decir, que con el enfoque que se está empleando: agrupar primero y rutear después, ni el método de agrupación ni el modelo que realiza el ruteo pueden eliminar los tiempos de inactividad en un recorrido con las características de la ruta 3.

9.2. REDUCCIÓN DE TIEMPOS DE INACTIVIDAD

En esta sección se muestran agrupaciones hechas de forma intuitiva para reducir los tiempos de inactividad. Para este fin, las tres distribuciones conformadas anteriormente se tomarán como ejemplo.

9.2.1. Agregando más clientes a la ruta con tiempo de inactividad

Si la capacidad de los vehículos lo permite, es conveniente agregar clientes cercanos que pertenezcan a otra ruta a aquella que presenta tiempo de inactividad. En la distribución que se hizo mediante el algoritmo de los ahorros (gráfica 7) fue posible agregar los clientes 7 y 8 a la ruta 3. De esta forma, se redujo el tiempo total que requiere hacer la ruta 4, a la cual pertenecían los cliente 7 y 8, y se elimina casi por completo el tiempo de inactividad de la ruta 3 (gráfica 10).

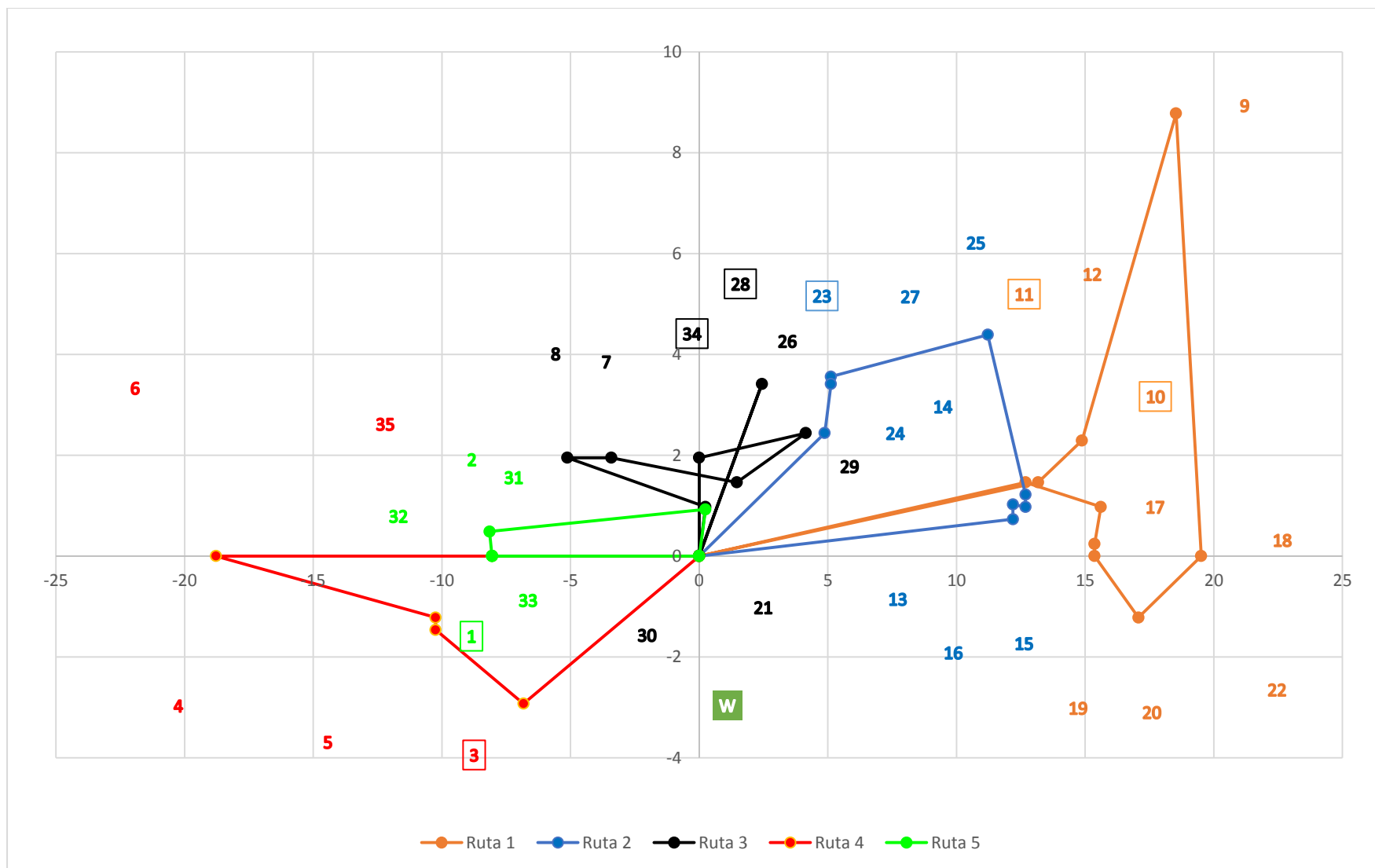
Tabla 8 - Secuencia de ruta con el algoritmo de los ahorros (modificado)

Ruta	Secuencia	Duración del recorrido (min)	Tiempo de servicio (min)	Tiempo de inactividad (min)	Duración total (min)
1	W - <u>11</u> - 17 - 19 - 20 - 22 - 18 - 9 - <u>10</u> - 12 - W	52,92	119	0	171,92
2	W - 15 - 16 - 13 - 14 - 25 - 27 - <u>23</u> - 24 - W	29,27	90	0	119,27
3	W - <u>28</u> - 21 - 30 - 8 - 7 - 29 - 26 - <u>34</u> - W	30,20	82	0,9	113,10
4	W - <u>3</u> - 4 - 5 - 6 - 1 - W	39,80	56	0	95,80
5	W - <u>1</u> - 32 - 33 - 2 - 31 - W	17,81	110	0	127,81
Duración con algoritmo de los ahorros (modificado)		170,00	457	0,9	627,90
Duración con algoritmo de los ahorros (Tabla 4)		158,08	457	40,0	655,08
Variación		+11,92	0	-39,1	-27,18

Fuente: Los autores.

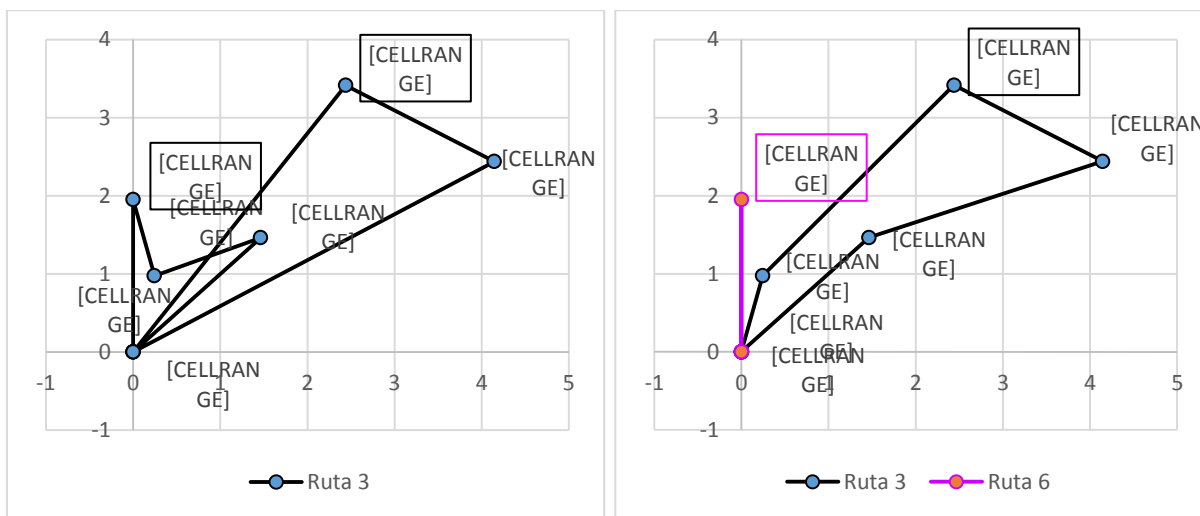
Cómo se venía diciendo, para reducir el tiempo de inactividad en la ruta 3, a ésta se le agregaron los clientes 7 y 8, que antes pertenecían a la ruta 4, estas sedes no tienen ventanas de tiempo, y su demanda no viola el límite de capacidad de los auxiliares de mensajería (Anexo B.2.3). Con esta modificación, la solución del modelo ha mejorado en 27,18 minutos respecto de la elaborada originalmente con el algoritmo de los ahorros (tabla 8). A pesar de que el tiempo de recorrido aumentó en 11,92 minutos, el tiempo de inactividad de la ruta 3 disminuyó 39,1 minutos.

Para los otros métodos de agrupación se excedía el límite de capacidad de los mensajeros. A continuación se proponen más alternativas.



Gráfica 10 – Consolidado de rutas con algoritmo de los ahorros (modificado)
Fuente: Los autores.

9.2.2. Asignar un vehículo adicional a un cliente con ventana de tiempo



Gráfica 11 - Adición de un vehículo a la ruta 3 del método de los ahorros
Fuente: Los autores.

Esta es una solución muy sencilla, en este caso a un sexto vehículo se le asignará la sede 34 que tiene una ventana de tiempo entre las 10:00 y las 10:10, el resto de los clientes serán atendidos por el mensajero encargado de la ruta 3 (gráfica 11).

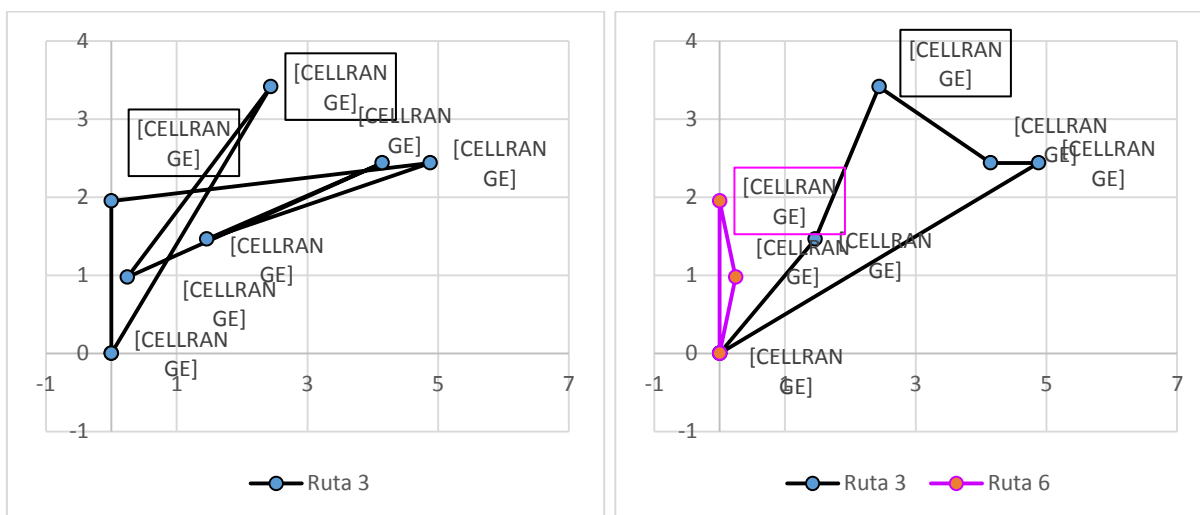
Tabla 9 - Comparación entre ruta 3 original y la nueva (método de los ahorros)

Ruta	Secuencia	Duración del recorrido (min)	Tiempo de servicio (min)	Tiempo de inactividad (min)	Duración total (min)
3 original (tabla 4)	W - <u>28</u> - 26 - 21 - 29 - 30 - <u>34</u> - W	17,1	56	40	113,1
3 nueva	W - 24 - 26 - <u>28</u> - 29 - 30 - W	18,0	56	0	74,0
6	W - <u>34</u> - W				
Diferencia		+0,9	0	-40	-39,1

Fuente: Los autores.

Colocando como ejemplo la distribución de rutas desarrollada al agrupar los clientes con el métodos de los ahorros presentada en el capítulo 9 (gráfica 7). En la ruta 3 no sólo se pudo eliminar los 40 minutos de tiempo de inactividad (tabla 4) sino que el tiempo de recorrido apenas y se incrementó; para este caso, esta sería una solución mejor que la del numeral anterior. La duración total del recorrido disminuyó en 39,1 minutos (tabla 9).

9.2.3. Asignar un vehículo adicional a la zona de un cliente con ventana de tiempo



Gráfica 12 - Adición de un vehículo a la ruta 3 de la heurística del barrido.
Fuente: Los autores.

Para eliminar el tiempo de inactividad de la ruta 3 de la distribución cuyos clientes fueron agrupados con la heurística del barrido (gráfica 8). Se dividió en dos regiones el área ocupada por los clientes de esta ruta. Los clientes 30 y 34 quedaron agrupados para que sean atendidos por un sexto mensajero. Los clientes 24, 26, 28 y 29 aun serían parte de la ruta 3 (gráfica 12).

Tabla 10 - Comparación entre ruta 3 original y la nueva (Heurística del barrido)

Ruta	Secuencia	Duración del recorrido (min)	Tiempo de servicio (min)	Tiempo de inactividad (min)	Duración total (min)
3 original (tabla 5)	W - <u>28</u> - 30 - 26 - 29 - 24 - <u>34</u> - W	24,9	53	35,2	113,1
3 nueva	W - 24 - 26 - <u>28</u> - 29 - W	16,3	53	0	69,3
6	W - 30 - <u>34</u> - W				
Diferencia		-8,6	0	-35,2	-43,8

Fuente: Los autores.

Con la nueva agrupación fue posible eliminar el tiempo de inactividad de 35,2 minutos, y mejorar el tiempo de recorrido de la distribución en 8,6 minutos para un ahorro total de 43,8 minutos.

9.2.4. Agrupar nuevamente los clientes con un vehículo adicional

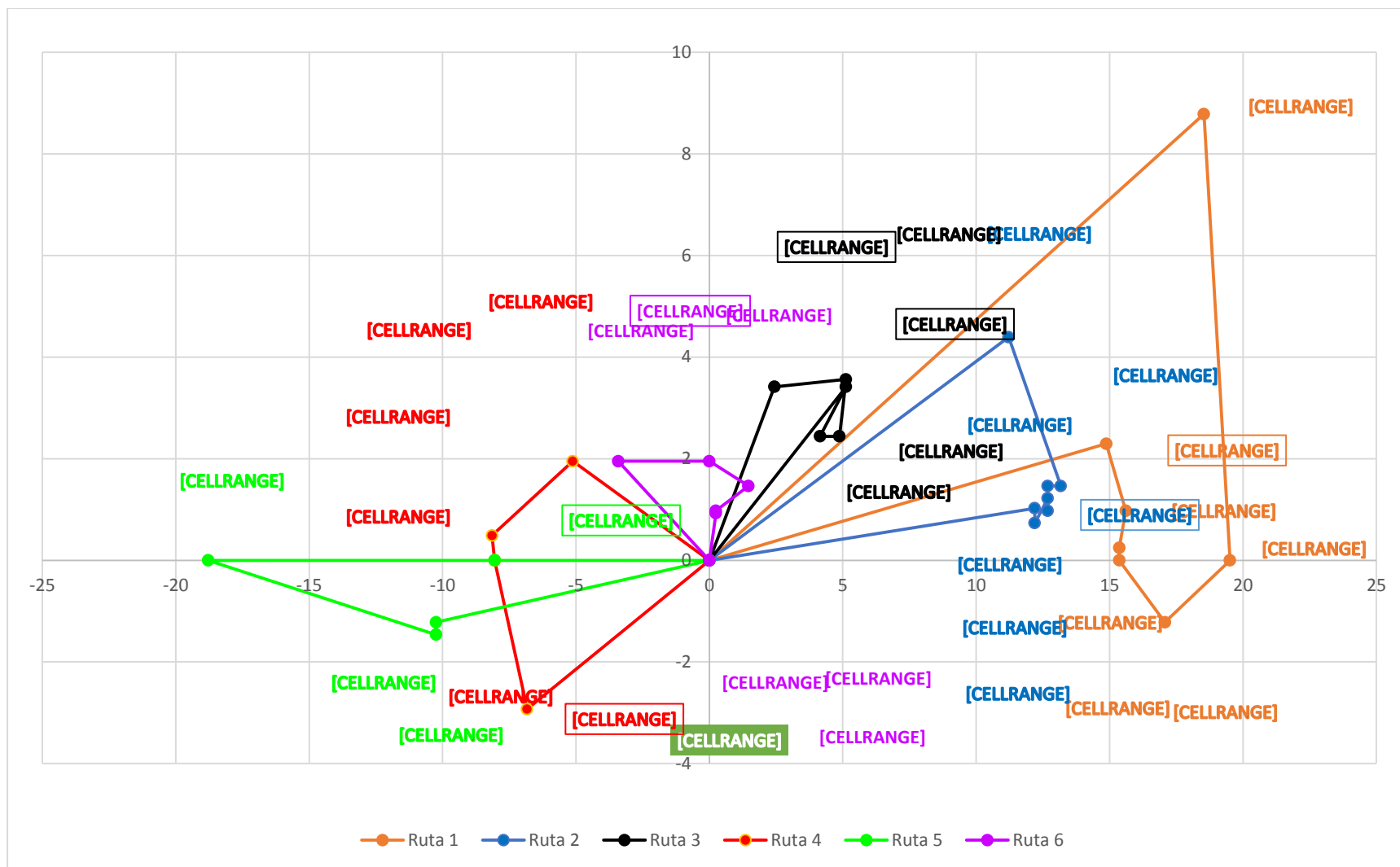
En este caso, se tiene en consideración a todos los clientes y se realiza una nueva agrupación utilizando los mismos criterios del ruteo previo. En el siguiente ejemplo, se muestra el ruteo realizado con los clientes agrupados con el modelo de p-mediana (gráfica 13), pero, en vez de 5 para 6 vehículos, y agregando una restricción que impida que los clientes 34 y 28 (cuyas ventanas de tiempo están separadas por más de 90 minutos) queden agrupados en una misma ruta.

Tabla 11 - Secuencia de las rutas con modelo de p-mediana (modificado)

Ruta	Secuencia	Duración del recorrido (min)	Tiempo de servicio (min)	Tiempo de inactividad (min)	Duración total (min)
1	W - <u>10</u> - 17 - 19 - 20 - 22 - 18 - 9 - W	51,7	104	0	155,7
2	W - 25 - 12 - <u>11</u> - 14 - 13 - 15 - 16 - W	34,7	76	0	110,7
3	W - <u>28</u> - 27 - 24 - 26 - <u>23</u> - W	16,3	44	0,9	61,2
4	W - <u>3</u> - 32 - 33 - 35 - 2 - 8 - W	19,8	129	0	148,8
5	W - <u>1</u> - 6 - 5 - 4 - W	39,2	46	0	85,2
6	W - 31 - 30 - 29 - <u>34</u> - 7 - 21 - W	11,0	58	0	69,0
Duración con p-mediana (modificado)		172,7	457	0,9	630,6
Duración con p-mediana (tabla 6)		160,9	457	19,9	637,8
Diferencia		+11,8	0	-19,0	-7,2

Fuente: Los autores.

La tabla 6 muestra a tres clientes con ventanas tiempo asignados a la ruta 3, sin embargo, al realizar nuevamente las agrupaciones con el modelo de p-mediana con 6 vehículos, al menos una ruta debía quedar con dos clientes con ventanas de tiempo, en este caso, al existir la restricción anteriormente mencionada, la ruta 3 siguió conservando en la nueva agrupación dos de los tres clientes de este tipo, resultando en un pequeño tiempo de inactividad de 0,9 minutos. A pesar de que se redujo el tiempo de inactividad del sistema en 19 minutos, el recorrido se hizo más ineficiente, resultando en un ahorro de tan solo 7,2 minutos (tabla 11).



Gráfica 13 - Consolidado de rutas con modelo de p-mediana (modificado)

Fuente:

Los

autores.

10. RECOMENDACIONES

En este capítulo se harán unas recomendaciones para las nuevas distribuciones de rutas que se hagan en el área de mensajería de la empresa estudiada. Estas recomendaciones responden básicamente a tres preguntas: cuándo hacer un nuevo ruteo, qué aspectos a controlar del mismo, y qué parámetros modificar para mejorar la solución obtenida con esta metodología.

Seguramente, esta propuesta de ruteo se hará obsoleta rápidamente si se mantiene el gran ritmo de crecimiento que ha tenido la empresa en los últimos años. Por eso, la primera recomendación es vigilar parámetros que puedan afectar gravemente la eficiencia de la distribución de rutas optimizada. Ante el cambio de alguno de estos parámetros se deben hacer pruebas para observar su impacto en la distribución, se debe actualizar y recolectar de nuevos datos de ser necesario, y posteriormente, realizar un nuevo ruteo. Algunos de ellos son:

Demanda

- La demanda de una ruta aumenta hasta superar la capacidad del vehículo que la atiende: se debe balancear la capacidad de las sedes utilizando algún método de agrupación, y de ser necesario agregar un nuevo vehículo.
- La demanda de una sola sede aumenta hasta superar el límite de capacidad de los mensajeros: se debe dividir la demanda de la sede y crear una sede adicional con las mismas coordenadas, esta sede será atendida por otro vehículo.
- La demanda de todo el sistema supera a la suma de las capacidades del número de mensajeros utilizados actualmente: se debe agregar por lo menos un vehículo más al ruteo.

- No es factible realizar una agrupación para la demanda de las sedes y el número de vehículos actuales: quizás sea necesario usar un vehículo adicional a pesar de que la demanda no supere aun la capacidad de los mensajeros.

Ubicación de las sedes

- Apertura, cierre o traslado de sedes: se deben hacer de nuevo las agrupaciones y correr nuevamente el modelo de ruteo, lo anterior con el fin de reducir los tiempos de recorrido y garantizar que el mensajero cumpla con las ventanas de tiempo para la nueva localización de las sedes.

Ventanas de tiempo

- Cambio en los tiempos de servicio, horarios de apertura y horarios de cierre: Correr nuevamente el modelo de ruteo para establecer nuevos horarios de arribo a cada sede.

El segundo grupo de recomendaciones está orientado a aspectos de gestión, que en caso de que no estén controlados, harán que la distribución fracase durante su implementación, ellos son:

- El tiempo de desplazamiento entre sedes: para controlar este parámetro se sugiere un sistema de GPS integrado a cada vehículo. Esto permitirá verificar que los mensajeros efectivamente estén visitando las sedes, y lo hagan a la velocidad programada.
- El tiempo de servicio: con el mismo sistema GPS se puede controlar cuánto tiempo permanece el vehículo en cualquiera de las sedes, este debe ser cercano al tiempo de servicio obtenido en los estudios de tiempos.
- Secuencia de las rutas: garantizar que el mensajero siga el recorrido programado mediante el ruteo.

La tercera y última recomendación está basada en el análisis de los resultados. En el capítulo 9 se identificaron dos cuestiones que deben resolverse después de realizar un ruteo para este problema con la metodología diseñada: Cómo eliminar la inactividad durante el recorrido, y cómo mejorar el tiempo de recorrido. Ambas cosas se pueden lograr con una conveniente reagrupación de los nodos, tal y como se mostró en dicha sección.

11. CONCLUSIONES

En este trabajo se pudo apreciar el impacto que puede tener en un área de mensajería el ruteo de vehículos, más aun cuando ésta pertenece a una empresa de servicios compartidos, en la cual los ingresos vienen desde el mismo grupo corporativo. Un centro de servicios compartidos es una ventaja competitiva para el conjunto de empresas servidas si funciona eficientemente, de lo contrario, se podría convertir en un lastre que se debe subvencionar, situación que podría llevar a su eventual desaparición por no cumplir con el objetivo para el que fue creado.

El problema de ruteo abordado en este trabajo clasifica como SDVRPTW, si bien, la propuesta metodológica empleada no está especialmente diseñada para este tipo de problemas, en un caso donde las sedes cuya demanda supera la capacidad de los mensajeros son pocas, dividir la demanda de estas sedes creando una nueva sede virtual que tenga la misma localización mostró buenos resultados, y facilitó considerablemente el desarrollo de la propuesta metodológica.

En cuanto al método diseñado, se puede decir que las tres fases son relativamente sencillas de implementar una vez desarrollado el método. Además de que las herramientas requeridas para su implementación son gratuitas y están al alcance de todos. Sin embargo, a pesar de ser muy sencillo, es muy efectivo si se compara los resultados obtenidos contra el ruteo actual, logrando reducir en más de un 35% el tiempo de permanencia de los mensajeros en el recorrido, y a su vez cumpliendo con la finalidad del trabajo, al tener la posibilidad de utilizar el tiempo restante para cubrir con las diligencias que actualmente se subcontratan con un tercero.

Un aspecto a destacar de la propuesta metodológica, es la función objetivo del modelo de optimización utilizado para programar las rutas una vez las sedes estén agrupadas, ésta

presenta una gran diferencia respecto de los modelos encontrados en la literatura, en vez de minimizar el tiempo de recorrido, se halla la mínima diferencia entre la hora de llegada y la hora de salida del depósito, reduciendo así los tiempos de espera en aquellas rutas que tienen dos o más ventanas de tiempo. Debido a esto, diferentes métodos de agrupación no generan una gran diferencia en los tiempos de permanencia para este problema, cómo se muestra en la sección 9.1. Sin embargo, una de las causas del enorme desperdicio de la distribución de rutas previa era precisamente una mala agrupación, la cual se hacía de forma arbitraria entre los mensajeros; por lo tanto, se puede concluir en este punto, la importancia de usar algún método de agrupación al elaborar el ruteo, y el impacto de no usar uno.

Como se venía diciendo, el análisis de los resultados mostró que la heurística del barrido y el modelo de p-mediana, los métodos alternativos de agrupación utilizados, no presentaron una gran variación respecto de la solución inicial obtenida con el algoritmo de los ahorros. Sin embargo, al realizar agrupaciones analíticamente, de forma tal que se eliminen los tiempos de inactividad, se puede lograr una mejora sustancial del tiempo asociado al ruteo, en cada uno de los métodos de agrupación.

Para terminar, con base en los análisis realizados se hicieron algunas recomendaciones a tener en cuenta al programar una nueva distribución de rutas en el futuro, un aspecto muy importante, porque se dan las herramientas para seguir implementando la metodología que se ha creado en este trabajo, más allá de la corta vida útil que pudiera tener esta solución a causa de los múltiples parámetros para los que la metodología es sensible, y el constante crecimiento de los requerimientos al servicio de mensajería de la empresa en cuestión.

BIBLIOGRAFÍA

- Anderson, D., Sweeney, D., & Williams, T. (2006). *Métodos cuantitativos para los negocios*. México: Cengage Learning.
- Applegate, Cook, & Rohe. (2003). Chained Lin-Kerbigban for large TSP. *INFORMS Journal on Computing*, Vol. 15, No. 1, Invierno 2003 pp. 82–92.
- Archetti, C., Feillet, D., Gendreau, M., & Speranza, M. G. (2011). Complexity of the VRP and SDVRP. *Transportation Research, Part C*(19), 741–750.
- Archetti, C., Speranza, G., & Savelsbergh, M. (2008). An optimization-Based Heuristic for the Split Delivery Vehicle Routing Problem. *Transportation Science*, Vol. 42, 22-31.
- Baldacci, R., Christofides, N., & Mingozzi, A. (2008). An exact algorithm for the vehicle routing problem. *Math. Program., Ser. A*, Vol. 115, 351-385.
- Baldacci, R., Toth, P., & Vigo, D. (2009). Exact algorithms for routing problems under vehicle capacity constraints. *Ann Oper Res*, Vol. 175, 213-245.
- Benavent, & Matínez. (2013). Multidepot Multiple TSP; a polyhedral study and computational results. *Ann Oper Res* (2013) 207, 7-25.
- Braysy, O. (2003). A Reactive Variable Neighborhood Search for the Vehicle-Routing Problem with Time Windows. *INFORMS Journal on Computing*, Vol. 15, No. 4, 347-368.
- Chase, R. B., Jacobs, F. R., & Aquilano, N. J. (2009). *Administracion de operaciones, Produccion y cadena de suministros*. Mexico D.F. : McGraw-Hill.
- Clausen, J. (1999, Marzo 12). *Branch and Bound Algorithms - Principles and Examples*. Copenhagen: Department of Computers Science.

- Dror, M., Laporte, G., & Trudeau, P. (1994). Vehicle routing with split deliveries. *Discrete Applied Mathematics*, Vol. 50, 239-254.
- Frizzell, P., & Giffin, J. (1994). The split delivery vehicle scheduling problem with time windows and grid network distances. *Computers Ops Res.* Vol. 22, No. 6, 655-667.
- Guoxing, Y. (1995). Transformation of multidepot multisalesmen problem. *European journal of operational research*, 81(3), 557 - 560.
- Irnich, S. (2008). A Unified Modeling and Solution Framework for Vehicle Routing and Local Search-Based Metaheuristics. *INFORMS Journal on Computing*, Vol. 20, No. 2, 270-287.
- Kusiak, A. (1987). The generalized group technology concept. *International Journal of Production Research*, 25 (4), 561-569.
- Olivera, A. (2004). *Heurísticas para Problemas de Ruteo de vehículos*. Montevideo, Uruguay: Universidad de la República.
- Paredes, G., & Obreque, C. (2009). Un procedimiento optimal para resolver el Median Shortest Path Problem. *Ingeniería Industrial: Actualidad y Nuevas Tendencias*, 1(2), 7-24.
- Perboli, G., Pezzella, F., & Tadei, R. (2008). EVE-OPT: a hybrid algorithm for the capacitated vehicle routing problem. *Math Meth Oper Res*, Vol. 68, 361-382.
- Portafolio.co. (2015, Marzo 29). 'Una empresa acude a un CSC cuando busca reducir costos'. Retrieved from Portafolio.co: <http://www.portafolio.co/opinion/entrevista-ruben-gallego-centro-servicio-compartido>
- Taha, H. (2004). *Investigación de operaciones 7ma edición*. México: Pearson Educación.

ANEXOS

A. PARÁMETROS Y DATOS GENERALES

A.1. Dirección de las sedes clientes

N°	Dirección
W	Cll 13 No 57 - 50
1	Carrera 100 No 5 - 169
2	Carrera 100 No 11 - 60
3	Carrera 98 No 18 - 49
4	Calle 14 No 103 - 55 Ciudad jardín
5	Calle 14 No 103 - 55 Ciudad jardín
6	Universidad san Buenaventura
7	Carrera 73 No 10 - 05
8	Cra. 80 # 6-71
9	Carrea 3 No 49 - 120 Centro comercial local 272
10	CAM
11	Carrera 4 No 8 - 73
12	Carrera 5 No 11
13	Carrera 5 No 10
14	Carrera 4 No 7 - 61
15	Carrera 9 No 10
16	Calle 7 No 9
17	Avenida 6a # 22 N - 45
18	Cl 38 N 6 N-35 Local 412 G Y 412 H
19	Avenida 5b # 21 N - 60
20	Avenida 5b # 21 N - 60
21	Calle 13 # 57 - 50
22	Terminal
23	Cra. 38 A # 5 A-100 Torre A, Piso 1
24	Calle 5 D # 38 A-35 Centro Cial Centro Vida, Local 12,13 Y 14
25	Carrera 2B Oeste No 7 - 04
26	Calle 5E No 42 - 09 Piso 3
27	Carrera 38 D # 5-19
28	Carrera 50 # 50-103
29	Calle 9 C # 50-25
30	Carrera 56 No 11 A- 83 piso 2
31	Carrera 56 No 11 - 05 piso 2
32	Carrera 100 No 5 - 169
33	Carrera 100 No 5 - 169
34	Carrera 61 No 9 - 250 3 piso
35	Carrera 100 No 5 - 169

Fuente: Empresa caso de estudio.

A.2. Tiempos de recorrido entre sedes

	W	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
W	0,0	8,0	8,0	7,3	10,2	10,2	19,0	3,9	5,4	20,5	15,1	12,7	13,2	12,7	12,7	12,2	12,2	15,6	19,5	15,4	15,4	0,0	17,1	6,1	5,4	12,0	4,9	6,3	4,1	2,0
1	8,0	0,0	0,5	3,2	2,7	2,7	11,2	5,1	3,4	28,0	22,9	20,7	21,2	20,7	20,7	20,2	20,2	23,7	27,6	23,4	23,4	8,0	25,1	13,7	13,2	19,8	12,4	13,7	11,0	9,5
2	8,0	0,5	0,0	3,7	2,9	2,9	11,0	4,9	3,4	28,0	23,2	20,7	21,2	20,7	20,7	20,2	20,2	23,7	27,6	23,4	23,4	8,0	25,4	13,7	13,2	19,8	12,4	13,7	11,0	9,8
3	7,3	3,2	3,7	0,0	3,7	3,7	13,4	5,9	5,1	28,0	22,4	20,0	20,5	20,0	20,0	19,3	19,5	22,7	26,6	22,4	22,4	7,3	23,9	13,4	12,9	19,5	12,2	13,7	11,2	9,3
4	10,2	2,7	2,9	3,7	0,0	0,2	9,8	7,6	6,1	30,5	25,4	23,2	23,7	23,2	23,2	22,4	22,7	25,9	29,8	25,6	25,6	10,2	27,3	16,1	15,6	22,2	14,9	16,1	13,7	12,0
5	10,2	2,7	2,9	3,7	0,2	0,0	9,8	7,6	6,1	30,5	25,4	23,2	23,7	23,2	23,2	22,4	22,7	25,9	29,8	25,6	25,6	10,2	27,3	16,1	15,6	22,2	14,9	16,1	13,7	12,0
6	19,0	11,2	11,0	13,4	9,8	9,8	0,0	15,4	13,7	37,8	33,7	31,5	32,0	31,5	31,5	31,0	31,0	34,4	38,5	34,4	34,4	19,0	36,1	23,9	23,7	30,0	22,9	23,9	21,2	20,2
7	3,9	5,1	4,9	5,9	7,6	7,6	15,4	0,0	1,7	22,9	18,3	16,1	16,6	16,1	16,1	15,6	15,6	19,0	22,9	18,8	18,8	3,9	20,7	8,8	8,3	14,9	7,6	8,8	6,1	4,9
8	5,4	3,4	3,4	5,1	6,1	6,1	13,7	1,7	0,0	24,6	20,0	17,8	18,3	17,8	17,8	17,3	17,3	20,7	24,6	20,5	20,5	5,4	22,4	10,2	10,0	16,6	9,3	10,5	7,8	6,6
9	20,5	28,0	28,0	28,0	30,5	30,5	37,8	22,9	24,6	0,0	7,6	9,3	9,0	9,8	9,5	10,2	10,0	8,3	8,8	9,0	9,3	20,5	10,0	14,4	15,1	8,5	15,6	14,4	17,1	18,5
10	15,1	22,9	23,2	22,4	25,4	25,4	33,7	18,3	20,0	7,6	0,0	2,4	2,0	2,4	2,4	3,2	2,9	1,5	5,1	2,2	2,4	15,1	4,1	9,8	10,0	4,1	10,7	9,8	12,4	13,4
11	12,7	20,7	20,7	20,0	23,2	23,2	31,5	16,1	17,8	9,3	2,4	0,0	0,5	0,5	0,2	1,0	0,7	2,9	7,1	2,9	3,2	12,7	5,1	7,8	7,8	3,2	8,5	7,8	10,5	11,2
12	13,2	21,2	21,2	20,5	23,7	23,7	32,0	16,6	18,3	9,0	2,0	0,5	0,0	0,7	0,5	1,2	1,0	2,4	6,6	2,4	2,7	13,2	4,6	8,3	8,3	3,4	9,0	8,3	11,0	11,7
13	12,7	20,7	20,7	20,0	23,2	23,2	31,5	16,1	17,8	9,8	2,4	0,5	0,7	0,0	0,2	0,5	0,5	2,9	6,8	2,7	2,9	12,7	4,9	8,0	8,0	3,7	8,8	8,0	10,5	11,2
14	12,7	20,7	20,7	20,0	23,2	23,2	31,5	16,1	17,8	9,5	2,4	0,2	0,5	0,2	0,0	0,7	0,5	2,9	6,8	2,9	2,9	12,7	5,1	7,8	7,8	3,4	8,5	7,8	10,5	11,2
15	12,2	20,2	20,2	19,3	22,4	22,4	31,0	15,6	17,3	10,2	3,2	1,0	1,2	0,5	0,7	0,0	0,2	3,4	7,3	3,2	3,2	12,2	5,4	7,6	7,6	3,9	8,3	7,6	10,0	10,7
16	12,2	20,2	20,2	19,5	22,7	22,7	31,0	15,6	17,3	10,0	2,9	0,7	1,0	0,5	0,5	0,2	0,0	3,4	7,3	3,2	3,4	12,2	5,4	7,6	7,6	3,4	8,3	7,6	10,0	10,7
17	15,6	23,7	23,7	22,7	25,9	25,9	34,4	19,0	20,7	8,3	1,5	2,9	2,4	2,9	2,9	3,4	3,4	0,0	3,9	0,7	1,0	15,6	2,7	10,7	10,7	5,6	11,5	10,7	13,4	14,1
18	19,5	27,6	27,6	26,6	29,8	29,8	38,5	22,9	24,6	8,8	5,1	7,1	6,6	6,8	6,8	7,3	7,3	3,9	0,0	4,1	4,1	19,5	2,7	14,9	14,9	9,3	15,6	14,9	17,3	18,0
19	15,4	23,4	23,4	22,4	25,6	25,6	34,4	18,8	20,5	9,0	2,2	2,9	2,4	2,7	2,9	3,2	3,2	0,7	4,1	0,0	0,2	15,4	2,2	10,7	10,7	5,9	11,5	10,7	13,4	13,9
20	15,4	23,4	23,4	22,4	25,6	25,6	34,4	18,8	20,5	9,3	2,4	3,2	2,7	2,9	2,9	3,2	3,4	1,0	4,1	0,2	0,0	15,4	2,2	10,7	10,7	6,1	11,5	10,7	13,4	13,9
21	0,0	8,0	8,0	7,3	10,2	10,2	19,0	3,9	5,4	20,5	15,1	12,7	13,2	12,7	12,7	12,2	12,2	15,6	19,5	15,4	15,4	0,0	17,1	6,1	5,4	12,0	4,9	6,3	4,1	2,0
22	17,1	25,1	25,4	23,9	27,3	27,3	36,1	20,7	22,4	10,0	4,1	5,1	4,6	4,9	5,1	5,4	5,4	2,7	2,7	2,2	2,2	17,1	0,0	12,9	12,7	8,0	13,4	12,9	15,4	15,9
23	6,1	13,7	13,7	13,4	16,1	16,1	23,9	8,8	10,2	14,4	9,8	7,8	8,3	8,0	7,8	7,6	7,6	10,7	14,9	10,7	10,7	6,1	12,9	0,0	1,0	6,1	1,5	0,2	2,7	4,1
24	5,4	13,2	13,2	12,9	15,6	15,6	23,7	8,3	10,0	15,1	10,0	7,8	8,3	8,0	7,8	7,6	7,6	10,7	14,9	10,7	10,7	5,4	12,7	1,0	0,0	6,6	0,7	1,2	2,7	3,7
25	12,0	19,8	19,8	19,5	22,2	22,2	30,0	14,9	16,6	8,5	4,1	3,2	3,4	3,7	3,4	3,9	3,4	5,6	9,3	5,9	6,1	12,0	8,0	6,1	6,6	0,0	7,3	6,1	8,8	10,2
26	4,9	12,4	12,4	12,2	14,9	14,9	22,9	7,6	9,3	15,6	10,7	8,5	9,0	8,8	8,5	8,3	8,3	11,5	15,6	11,5	11,5	4,9	13,4	1,5	0,7	7,3	0,0	1,5	2,0	2,9
27	6,3	13,7	13,7	13,7	16,1	16,1	23,9	8,8	10,5	14,4	9,8	7,8	8,3	8,0	7,8	7,6	7,6	10,7	14,9	10,7	10,7	6,3	12,9	0,2	1,2	6,1	1,5	0,0	2,7	4,1
28	4,1	11,0	11,0	11,2	13,7	13,7	21,2	6,1	7,8	17,1	12,4	10,5	11,0	10,5	10,5	10,0	10,0	13,4	17,3	13,4	13,4	4,1	15,4	2,7	2,7	8,8	2,0	2,7	0,0	2,2
29	2,0	9,5	9,8	9,3	12,0	12,0	20,2	4,9	6,6	18,5	13,4	11,2	11,7	11,2	11,2	10,7	10,7	14,1	18,0	13,9	13,9	2,0	15,9	4,1	3,7	10,2	2,9	4,1	2,2	0,0
30	1,0	8,3	8,3	8,0	10,7	10,7	19,3	3,9	5,4	20,0	14,6	12,4	12,9	12,4	12,4	12,0	12,0	15,4	19,3	15,1	15,1	1,0	17,1	5,4	4,9	11,5	4,1	5,6	3,2	1,2
31	1,0	8,3	8,3	8,0	10,7	10,7	19,3	3,9	5,4	20,0	14,6	12,4	12,9	12,4	12,4	12,0	12,0	15,4	19,3	15,1	15,1	1,0	17,1	5,4	4,9	11,5	4,1	5,6	3,4	1,2
32	8,0	0,0	0,5	3,2	2,7	2,7	11,2	5,1	3,4	28,0	22,9	20,7	21,2	20,7	20,7	20,2	20,2	23,7	27,6	23,4	23,4	8,0	25,1	13,7	13,2	19,8	12,4	13,7	11,0	9,5
33	8,0	0,0	0,5	3,2	2,7	2,7	11,2	5,1	3,4	28,0	22,9	20,7	21,2	20,7	20,7	20,2	20,2	23,7	27,6	23,4	23,4	8,0	25,1	13,7	13,2	19,8	12,4	13,7	11,0	9,5
34	2,0	8,3	8,3	8,3	10,7	10,7	18,8	3,4	5,1	19,8	14,9	12,7	13,2	12,7	12,7	12,2	12,2	15,6	19,5	15,4	15,6	2,0	17,3	5,4	4,9	11,5	4,1	5,4	2,9	1,5
35	8,0	0,0	0,5	3,2	2,7	2,7	11,2	5,1	3,4	28,0	22,9	20,7	21,2	20,7	20,7	20,2	20,2	23,7	27,6	23,4	23,4	8,0	25,1	13,7	13,2	19,8	12,4	13,7	11,0	9,5

Fuente: Empresa caso de estudio.

	30	31	32	33	34	35
W	1,0	1,0	8,0	8,0	2	8,0
1	8,3	8,3	0,0	0,0	8,3	0,0
2	8,3	8,3	0,5	0,5	8,3	0,5
3	8,0	8,0	3,2	3,2	8,3	3,2
4	10,7	10,7	2,7	2,7	11	2,7
5	10,7	10,7	2,7	2,7	11	2,7
6	19,3	19,3	11,2	11,2	19	11,2
7	3,9	3,9	5,1	5,1	3,4	5,1
8	5,4	5,4	3,4	3,4	5,1	3,4
9	20,0	20,0	28,0	28,0	20	28,0
10	14,6	14,6	22,9	22,9	15	22,9
11	12,4	12,4	20,7	20,7	13	20,7
12	12,9	12,9	21,2	21,2	13	21,2
13	12,4	12,4	20,7	20,7	13	20,7
14	12,4	12,4	20,7	20,7	13	20,7
15	12,0	12,0	20,2	20,2	12	20,2
16	12,0	12,0	20,2	20,2	12	20,2
17	15,4	15,4	23,7	23,7	16	23,7
18	19,3	19,3	27,6	27,6	20	27,6
19	15,1	15,1	23,4	23,4	15	23,4
20	15,1	15,1	23,4	23,4	16	23,4
21	1,0	1,0	8,0	8,0	2	8,0
22	17,1	17,1	25,1	25,1	17	25,1
23	5,4	5,4	13,7	13,7	5,4	13,7
24	4,9	4,9	13,2	13,2	4,9	13,2
25	11,5	11,5	19,8	19,8	11	19,8
26	4,1	4,1	12,4	12,4	4,1	12,4
27	5,6	5,6	13,7	13,7	5,4	13,7
28	3,2	3,4	11,0	11,0	2,9	11,0
29	1,2	1,2	9,5	9,5	1,5	9,5
30	0,0	0,05	8,3	8,3	1	8,3
31	0,05	0,0	8,3	8,3	1	8,3
32	8,3	8,3	0,0	0,0	8,3	0,0
33	8,3	8,3	0,0	0,0	8,3	0,0
34	1,0	1,0	8,3	8,3	0	8,3
35	8,3	8,3	0,0	0,0	8,3	0,0

A.3. Demanda, tiempo de servicio, horario de apertura y cierre de cada sede

Sede	Demanda (kg)	Tiempo de servicio (min)	Horario de apertura	Parámetro horario de apertura	Horario de cierre	Parámetro horario de cierre
1	17	18	8:00	30	8:40	70
2	2	50	7:30	0	12:30	300
3	3,1	11	8:00	30	8:20	50
4	1,5	8	7:30	0	12:30	300
5	4	8	7:30	0	12:30	300
6	2,4	12	7:30	0	12:30	300
7	2,5	11	7:30	0	12:30	300
8	1	15	7:30	0	12:30	300
9	4	37	7:30	0	12:30	300
10	4	10	10:00	150	12:00	270
11	1,6	2	8:00	30	8:10	40
12	3,2	13	7:30	0	12:30	300
13	1,8	10	7:30	0	12:30	300
14	3,9	10	7:30	0	12:30	300
15	3,4	10	7:30	0	12:30	300
16	1	30	7:30	0	12:30	300
17	3	5	7:30	0	12:30	300
18	1,9	5	7:30	0	12:30	300
19	3,1	7	7:30	0	12:30	300
20	2	20	7:30	0	12:30	300
21	2,3	18	7:30	0	12:30	300
22	1,9	20	7:30	0	12:30	300
23	3,6	10	9:00	90	9:20	110
24	4,1	15	7:30	0	12:30	300
25	3,8	1	7:30	0	12:30	300
26	5,2	4	7:30	0	12:30	300
27	2,7	4	7:30	0	12:30	300
28	3,5	11	8:10	40	8:30	60
29	3,2	12	7:30	0	12:30	300
30	4,5	5	7:30	0	12:30	300
31	1,3	6	7:30	0	12:30	300
32	2,3	25	7:30	0	12:30	300
33	2	11	7:30	0	12:30	300
34	2,4	6	10:00	150	10:10	160
35	10	17	7:30	0	12:00	300

Fuente: Empresa caso de estudio.

A.4. Tiempo de servicio entre Duración del recorrido entre diligencias

Zona	Dirección	Llegada	Salida	Tiempo de servicio	Duración del recorrido
SERES	Cr 1 AN 56-94	11:10	11:20	0:10	0:04
	Cll 47 N 5BN - 10	11:24	11:27	0:03	0:02
	Cll 64 N 4 - 90	11:29	11:32	0:03	0:03
	Av 3f Norte 59 N - 125	11:35	11:38	0:03	0:06
	Orden 1	11:44	11:54	0:10	0:06
	Orden 2	12:00	12:12	0:12	0:03
	Orden 3	12:15	12:26	0:11	0:03
	Orden 4	12:29	12:35	0:06	
NORTE	Av 8 Norte 12 - 43 Bancolombia	3:40	3:45	0:05	0:10
	Cll 22 N # 6 AN - 23 Bogotá	3:55	4:04	0:09	0:03
	Cll 22 N # 6 AN - 24	4:07	4:15	0:08	0:05
	Cll 23 N # 4N - 50	4:20	4:25	0:05	0:05
	Cll 20 N # 4 N - 35	4:30	4:35	0:05	0:15
	Cll 28 N # 6 Bis N - 17	4:50	5:00	0:10	
CONSULTORIOS	Orden 1	10:30	10:33	0:03	0:02
	Orden 2	10:35	10:39	0:04	0:03
	Orden 3	10:42	10:46	0:04	0:04
	Orden 4	10:50	10:55	0:05	
PANCE	Bosque de la viga	10:25	10:28	0:03	0:12
	Orden medica 1	10:40	10:50	0:10	0:05
	Orden medica 2	10:55	11:05	0:10	
OESTE	Cr 48a No 12 B - 55	10:58	10:59	0:01	0:15
	Cll 19 No 20 - 22	11:14	11:15	0:01	0:08
	Cr 25 No 23 - 38	11:23	11:24	0:01	
	Cll 7a No 56 - 76	14:57	15:00	0:03	0:02
	Cr 56 Cll 5a -89 Bosques de la cabaña	15:02	15:03	0:01	0:06
	Cr 56 N No 7 - 96 oeste	15:09	15:10	0:01	0:06
	Cll 1e No 56 - 183 Cantalapiedra	15:16	15:17	0:01	0:07
	Cr 44 No 1a - 85	15:24	15:25	0:01	0:06
	Fundación Parkinson No 4 - 56	15:31	15:32	0:01	0:03
	Cll 4 No 27 - 52	15:35	15:36	0:01	0:08
	Cr 2 No 7 oeste - 130 Alianza	15:44	15:45	0:01	0:09
	Cll 2 oeste No 2 - 24 Guayacán	15:54	15:55	0:01	0:05
	A dos casas de Leónidas Chaus	16:00	16:01	0:01	0:04
	Cr 4 oeste T 16	16:05	16:06	0:01	0:09
	Cll 5 No 27 - 49 Counivalle	16:15	16:16	0:01	

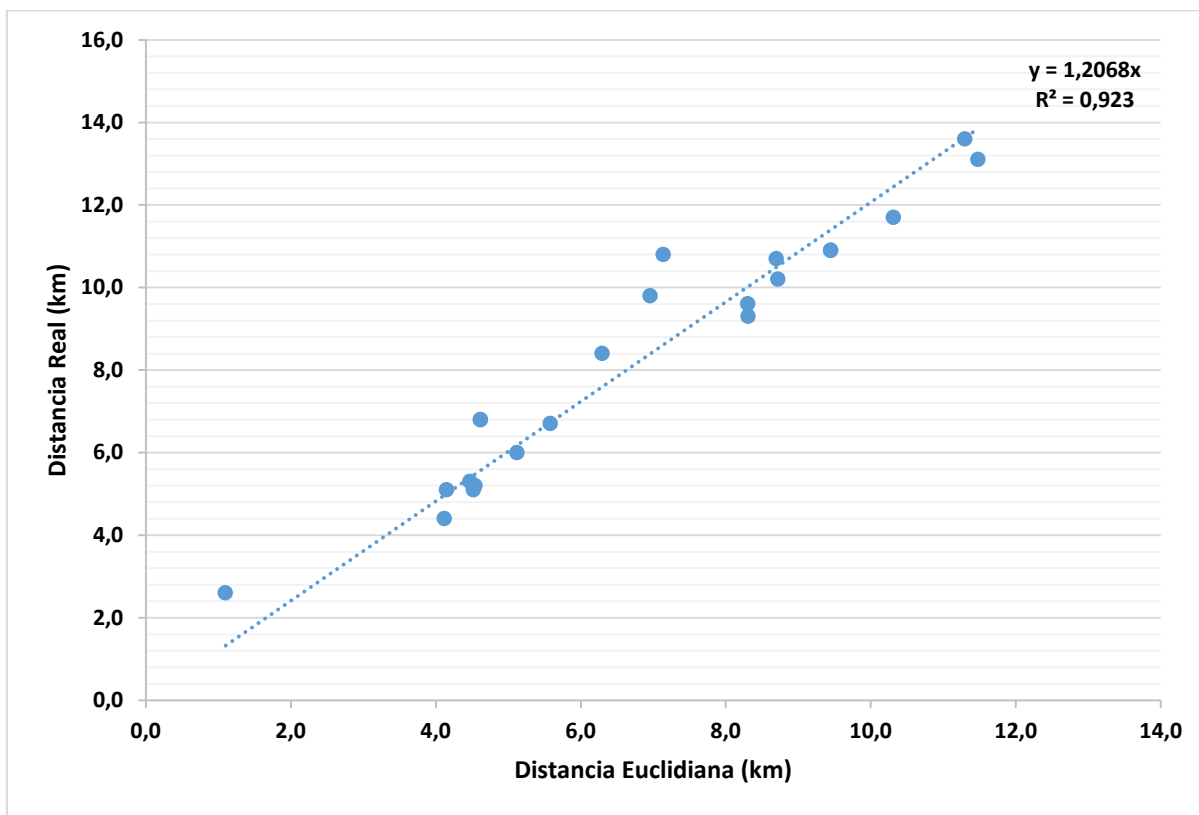
Fuente: Empresa caso de estudio.

A.5. Promedio diario de diligencias subcontractadas en 2013 y 2014

	2013	2014	2015 (pronóstico)
Enero	1326	1577	1876
Febrero	1490	1402	1319
Marzo	1419	1411	1403
Abril	1499	1444	1391
Mayo	1457	1477	1497
Junio	1403	1432	1462
Julio	1463	1448	1433
Agosto	1460	1429	1399
Septiembre	1401	1488	1580
Octubre	1406	1461	1518
Noviembre	1417	1425	1433
Diciembre	1406	1482	1562
Total	17147	17476	17811
Promedio	1429	1456	1489

Fuente: Empresa caso de estudio.

A.6. Regresión lineal, correlación entre la distancia euclidiana y real.



Fuente: Los autores

B. MÉTODOS DE AGRUPACIÓN

B.1. Matriz de ahorros

Matriz de ahorros																																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
1																																		
2	6,4																																	
3	5,0	4,9																																
4	6,5	6,4	5,8																															
5	6,5	6,4	5,8	8,5																														
6	6,5	6,7	5,3	8,0	8,0																													
7	2,9	2,9	2,2	2,7	2,7	3,1																												
8	4,1	4,2	3,2	4,0	4,0	4,4	3,2																											
9	0,2	0,3	0,0	0,1	0,1	0,8	0,6	0,6																										
10	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,2	0,3	0,2	11,5																									
11	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,2	0,2	9,8	10,4																								
12	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,2	0,2	10,1	10,8	10,5																							
13	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,2	0,2	9,6	10,3	10,2	10,4																						
14	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,2	0,2	9,7	10,4	10,4	10,4	10,3																					
15	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,2	0,1	9,2	9,9	9,9	9,9	10,0	10,0																				
16	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,2	0,2	9,3	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	9,9																			
17	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,2	0,2	11,4	12,0	10,4	10,8	10,4	10,4	10,0	10,0																		
18	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,1	0,2	0,1	12,8	12,1	10,4	10,8	10,4	10,4	10,0	10,0	12,8																	
19	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,1	0,2	0,1	11,0	11,6	10,3	10,7	10,4	10,4	10,0	10,0	12,4	12,6																
20	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,1	0,2	0,1	10,9	11,5	10,3	10,7	10,3	10,3	10,0	10,0	12,3	12,6	12,5															
21	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0														
22	0,0	0,0	0,2	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	11,3	11,5	10,1	10,5	10,2	10,2	9,9	9,8	12,3	13,9	12,4	12,5	0,0													
23	0,2	0,3	0,0	0,2	0,2	0,6	0,6	0,5	5,0	4,7	4,6	4,6	4,5	4,5	4,4	4,5	4,5	4,5	4,4	4,4	0,0	4,3												
24	0,1	0,2	0,0	0,1	0,1	0,4	0,4	0,4	4,5	4,3	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,1	4,1	0,0	4,0	4,3											
25	0,1	0,2	0,0	0,1	0,1	0,5	0,5	0,4	9,9	9,4	8,8	8,9	8,6	8,7	8,4	8,5	9,1	9,1	8,8	8,8	0,0	8,6	4,9	4,5										
26	0,2	0,2	0,0	0,1	0,1	0,4	0,5	0,4	3,9	3,7	3,7	3,7	3,6	3,7	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	0,0	3,5	3,9	3,9	3,9									
27	0,3	0,3	0,0	0,2	0,2	0,6	0,6	0,6	5,1	4,7	4,6	4,6	4,5	4,5	4,4	4,5	4,5	4,5	4,4	4,4	0,0	4,3	5,0	4,3	5,0	3,9								
28	0,5	0,6	0,2	0,4	0,4	0,8	0,9	0,8	3,2	2,8	2,7	2,7	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,5	0,0	2,4	3,1	2,9	3,0	2,9	3,2							
29	0,2	0,2	0,0	0,1	0,1	0,3	0,5	0,4	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4	0,0	1,4	1,7	1,6	1,6	1,7	1,7	1,7						
30	0,3	0,3	0,1	0,2	0,2	0,4	0,5	0,4	0,7	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,0	0,5	0,7	0,7	0,6	0,7	0,7	0,8	0,7					
31	0,3	0,3	0,1	0,2	0,2	0,4	0,4	0,4	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,0	0,5	0,7	0,6	0,6	0,6	0,7	0,8	0,7	0,8				
32	6,6	6,4	5,0	6,5	6,5	6,5	2,9	4,1	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2	0,3	0,5	0,2	0,3	0,3			
33	6,6	6,4	5,0	6,5	6,5	6,5	2,9	4,1	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2	0,3	0,5	0,2	0,3	0,3	6,6		
34	0,7	0,8	0,4	0,6	0,6	0,9	1,0	0,9	1,1	0,9	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7	0,0	0,7	1,1	1,0	1,0	1,1	1,2	1,4	1,0	0,8	0,8	0,7	0,7	
35	6,6	6,4	5,0	6,5	6,5	6,5	2,9	4,1	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2	0,3	0,5	0,2	0,3	0,3	6,6	6,6	0,7

Fuente: Los autores.

B.2. Balances de capacidad

B.2.1. Balance de capacidad algoritmo de los ahorros. Fuente: Los autores.

Balance de capacidad método de los ahorros											Carga total	Capacidad disponible
Grupo 1	Sede	11	17	19	20	22	18	9	10	12		
	Demanda	1,6	3,0	3,1	2,0	1,9	1,9	4,0	4,0	3,2	24,7	0,3
Grupo 2	Sede	15	16	13	14	25	27	23	24			
	Demanda	3,4	1,0	1,8	3,9	3,8	2,7	3,6	4,1		24,3	0,7
Grupo 3	Sede	28	26	21	29	30	34					
	Demanda	3,5	5,2	2,3	3,2	4,5	2,4				21,1	3,9
Grupo 4	Sede	3	4	5	6	35	8	7				
	Demanda	3,1	1,5	4,0	2,4	10,0	1,0	2,5			24,5	0,5
Grupo 5	Sede	1	32	33	2	31						
	Demanda	17,0	2,3	2,0	2,0	1,3					24,6	0,4

B.2.2. Balance de capacidad heurística del barrido. Fuente: Los autores.

Balance de capacidad heurística del barrido												Carga total	Capacidad disponible
Grupo 1	Sede	11	17	18	22	20	19	13	14	16	15		
	Demanda	1,6	3,0	1,9	1,9	2,0	3,1	1,8	3,9	1,0	3,4	23,6	1,4
Grupo 2	Sede	23	27	25	9	10	12	21					
	Demanda	3,6	2,7	3,8	4,0	4,0	3,2	2,3				23,6	1,4
Grupo 3	Sede	28	30	26	29	24	34						
	Demanda	3,5	4,5	5,2	3,2	4,1	2,4					22,9	2,1
Grupo 4	Sede	3	4	5	6	2	33	35					
	Demanda	3,1	1,5	4,0	2,4	2,0	2,0	10,0				25,0	0,0
Grupo 5	Sede	32	1	8	7	31							
	Demanda	2,3	17,0	1,0	2,5	1,3						24,1	0,9

B.2.3. Balance de capacidad algoritmo de los ahorros (variación). Fuente: Los autores.

Balance de capacidad algoritmo de los ahorros (variación)											Carga total	Capacidad disponible
Grupo 1	Sede	11	17	19	20	22	18	9	10	12		
	Demanda	1,6	3,0	3,1	2,0	1,9	1,9	4,0	4,0	3,2	24,7	0,3
Grupo 2	Sede	15	16	13	14	25	27	23	24			
	Demanda	3,4	1,0	1,8	3,9	3,8	2,7	3,6	4,1		24,3	0,7
Grupo 3	Sede	28	26	21	29	30	34	8	7			
	Demanda	3,5	5,2	2,3	3,2	4,5	2,4	1,0	2,5		24,6	0,4
Grupo 4	Sede	3	4	5	6	35						
	Demanda	3,1	1,5	4,0	2,4	10,0					21,0	4,0
Grupo 5	Sede	1	32	33	2	31						
	Demanda	17,0	2,3	2,0	2,0	1,3					24,6	0,4

B.2.4. Balance de capacidad modelo de p-mediana 5 vehículos. Fuente: Los autores.

Balance de capacidad modelo de p-mediana 5 vehículos										Carga total	Capacidad disponible
Grupo 1	Sede	9	18	22	20	19	17	10	12		
	Demanda	4,0	1,9	1,9	2,0	3,1	3,0	4,0	3,2	23,1	1,9
Grupo 2	Sede	26	24	25	11	14	13	15	16		
	Demanda	5,2	4,1	3,8	1,6	3,9	1,8	3,4	1,0	24,8	0,2
Grupo 3	Sede	28	29	23	27	31	30	21	34		
	Demanda	3,5	3,2	3,6	2,7	1,3	4,5	2,3	2,4	23,5	1,5
Grupo 4	Sede	3	35	32	33	2	8	7			
	Demanda	3,1	10,0	2,3	2,0	2,0	1,0	2,5		22,9	2,1
Grupo 5	Sede	1	6	5	4						
	Demanda	17,0	2,4	4,0	1,5					24,9	0,1

B.2.5. Balance de capacidad modelo de p-mediana 6 vehículos. Fuente: Los autores.

Balance de capacidad modelo de p-mediana 6 vehículos										Carga total	Capacidad disponible
Grupo 1	Sede	10	17	19	20	22	18	9			
	Demanda	4,0	3,0	3,1	2,0	1,9	1,9	4,0		19,9	5,1
Grupo 2	Sede	25	12	11	13	14	15	16			
	Demanda	3,8	3,2	1,6	1,8	3,9	3,4	1,0		18,7	6,3
Grupo 3	Sede	28	27	24	26	23					
	Demanda	3,5	2,7	4,1	5,2	3,6				19,1	5,9
Grupo 4	Sede	3	32	33	35	2	8				
	Demanda	3,1	2,3	2,0	10,0	2,0	1,0			20,4	4,6
Grupo 5	Sede	1	6	5	4						
	Demanda	17,0	2,4	4,0	1,5					24,9	0,1
Grupo 6	Sede	31	30	29	34	7	21				
	Demanda	1,3	4,5	3,2	2,4	2,5	2,3			16,2	8,8

B.3 Formulación matemática del modelo p-mediana

Conjuntos

$P =$ *Clientes*

Índices

$i, j =$ *Clientes*

Parámetros

$F =$ *Número de grupos*

$T_{ij} =$ *Tiempo de recorrido entre clientes*

$D_i =$ *Demanda de cada cliente*

$Q =$ *Capacidad de los mensajeros*

Variables

$A_{ij} = \begin{cases} 1: \text{Si los clientes } i \text{ y } j \text{ pertenecen a un mismo grupo} \\ 0: \text{Cualquier otro caso} \end{cases}$

Función objetivo

$$\min Z = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} T_{ij} A_{ij}$$

Minimizar la suma de los tiempos de recorrido entre los clientes i y j

Restricciones

$$1. \sum_{j \in P} A_{ij} = 1 \quad \forall i \in P$$

(1) Esta restricción establece que para todo cliente i , la sumatoria en los grupos j de todas las asignaciones del cliente i (A_{ij}) sea igual a 1, lo que significa que un cliente se

asigne a sólo un grupo. Esta restricción también asegura que efectivamente todos los clientes estén asignados a algún grupo, en resumen, que ningún cliente se quede sin asignación pero no con más de una.

$$2. \sum_{j \in P} A_{jj} = F \quad \forall i \in P$$

(2) Garantiza que se agrupen F números de grupos. Es necesario que existan más clientes que grupos.

$$3. A_{ij} \leq A_{jj} \quad \forall i \in P, \forall j \in P$$

(3) Esta restricción plantea que la asignación del cliente i al grupo j (A_{ij}) sea menor o igual a la asignación A_{jj} . Es decir, que la asignación de un cliente a un grupo se pueda hacer siempre y cuando este grupo esté activado o en uso. En otras palabras, si el grupo j está activado ($A_{jj} = 1$), entonces la asignación de cualquier cliente i a esa grupo j (A_{ij}) se puede hacer o no, A_{ij} puede ser igual a 1 o a 0. Si por el contrario el grupo j no está activado ($A_{jj} = 0$), entonces la asignación de cualquier cliente i a ese grupo j (A_{ij}) no se puede hacer, A_{ij} no tiene otra opción que valer 0.

$$4. \sum_{i \in P} A_{ij} D_i \leq Q \quad \forall j \in P$$

(4) La demanda de los clientes agrupados no pueden superar la capacidad de los mensajeros

$$5. A_{ij} = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \quad \forall i \in P, \forall j \in P$$

(5) Restricción obvias.

C. IMPLEMENTACIÓN EN AMPL

La programación de los modelos en AMPL se encuentran en el CD anexo al trabajo.

Éste contiene los siguientes archivos:

- C1. Modelo de ruteo (sección 7.3.1).
- C2. Comandos para el ruteo.
- C3. Datos de las rutas agrupadas por el algoritmo de los ahorros (sección 8.1).
- C4. Datos de las rutas agrupadas por la heurística del barrido (sección 9.1.1).
- C5. Datos de las rutas agrupadas con modelo de p-mediana (sección 9.1.2).
- C6. Datos de las rutas agrupadas por el algoritmo de los ahorros (modificado) (sección 9.2.1).
- C7. Datos de las rutas agrupadas ruta 3 con asignación de un vehículo para un cliente con ventana de tiempo (sección 9.2.2).
- C8. Datos de ruta 3 con asignación de un vehículo para la zona que contiene un cliente con ventana de tiempo (sección 9.2.3).
- C9. Datos de las rutas agrupadas con modelo de p-mediana para 6 vehículos (sección 9.2.4).
- C10. Modelo, datos y comandos para agrupaciones con p-mediana para 5 vehículos (sección 9.1.2) y 6 vehículos (sección 9.2.4).

D. RESULTADOS MODELO DE RUTEO

D.1. Resultados agrupación con algoritmo de los ahorros (sección 8.1)

Ruta 1		
Salida	17,32	7:47
11	30	8:00
17	34,93	8:04
19	40,66	8:10
20	47,9	8:17
22	70,1	8:40
18	92,78	9:02
9	106,56	9:16
10	151,12	10:01
12	163,07	10:13
Llegada	189,24	10:39

Ruta 2		
Salida	12,08	7:42
15	24,28	7:54
16	34,52	8:04
13	65,01	8:35
14	75,25	8:45
25	88,66	8:58
27	95,76	9:05
23	100	9:10
24	110,98	9:20
Llegada	131,35	9:41

Ruta 3		
Salida	44,85	8:14
28	49	8:19
26	61,95	8:31
21	70,83	8:40
29	130,8	9:40
30	144,02	9:54
34	150	10:00
Llegada	157,95	10:07

Ruta 4		
Salida	22,68	7:52
3	30	8:00
4	44,66	8:14
5	52,66	8:22
6	70,42	8:40
1	93,64	9:03
8	114,05	9:24
7	130,76	9:40
Llegada	145,66	9:55
Total	122,98	2:02

Ruta 5		
Salida	21,95	7:51
1	30	8:00
32	48	8:18
33	73	8:43
2	84,49	8:54
31	142,78	9:52
Llegada	149,76	9:59

Fuente: Los autores.

D.2. Resultados agrupación por heurística del barrido (sección 9.1.1)

Ruta 1		
Salida	24,6	7:54
11	37,3	8:07
17	42,2	8:12
18	51,1	8:21
22	58,8	8:28
20	81	8:51
19	101,2	9:11
13	110,9	9:20
14	121,1	9:31
16	131,6	9:41
15	161,8	10:11
Llegada	184	10:34

Ruta 2		
Salida	83,9	8:53
23	90	9:00
27	100,2	9:10
25	110,3	9:20
9	119,8	9:29
10	164,4	10:14
12	176,4	10:26
21	202,6	10:52
Llegada	220,6	11:10

Ruta 3		
Salida	44,9	8:14
28	49	8:19
30	98,4	9:08
26	107,5	9:17
29	114,4	9:24
24	130,1	9:40
34	150	10:00
Llegada	158	10:08

Ruta 4		
Salida	31,7	8:01
3	39	8:09
4	53,7	8:23
5	61,7	8:31
6	79,5	8:49
2	102,5	9:12
33	153	10:03
35	164	10:14
Llegada	189	10:39

Ruta 5		
Salida	0	7:30
32	8	7:38
1	33	8:03
8	54,4	8:24
7	71,1	8:41
31	86	8:56
Llegada	93	9:03

Fuente: Los autores.

D.3. Resultados agrupación con modelo de p-mediana (sección 9.1.2)

Ruta 1		
Salida	129,4	9:39
9	149,9	9:59
18	195,7	10:45
22	203,4	10:53
20	225,6	11:15
19	245,8	11:35
17	253,5	11:43
10	260	11:50
12	272	12:02
Llegada	298,2	12:28

Ruta 4		
Salida	30,0	7:59
3	37,3	8:07
35	51,5	8:21
32	68,5	8:38
33	93,5	9:03
2	105,0	9:14
8	158,4	10:08
7	175,1	10:25
Llegada	190,0	10:39

Ruta 2		
Salida	0	7:30
26	4,9	7:34
24	9,6	7:39
25	31,2	8:01
11	35,4	8:05
14	37,6	8:07
13	47,8	8:17
15	58,3	8:28
16	68,5	8:38
Llegada	110,7	9:20

Ruta 5		
Salida	22	7:52
1	30	8:00
6	59,2	8:29
5	81	8:51
4	89	8:59
Llegada	107,2	9:17

Fuente: Los autores.

Ruta 3		
Salida	44,9	8:14
28	49	8:19
29	73,9	8:43
23	90	9:00
27	100,2	9:10
31	109,8	9:19
30	124	9:34
21	130	9:40
34	150	10:00
Llegada	158	10:08

D.4. Resultados agrupación con algoritmo de los ahorros – variación (sección 9.2.1)

Ruta 1		
Salida	17,32	7:47
11	30	8:00
17	34,93	8:04
19	40,66	8:10
20	47,9	8:17
22	70,1	8:40
18	92,78	9:02
9	106,56	9:16
10	151,12	10:01
12	163,07	10:13
Llegada	189,24	10:39

Ruta 2		
Salida	12,08	7:42
15	24,28	7:54
16	34,52	8:04
13	65,01	8:35
14	75,25	8:45
25	88,66	8:58
27	95,76	9:05
23	100	9:10
24	110,98	9:20
Llegada	131,35	9:41

Ruta 3		
Salida	44,9	8:14
28	49	8:19
21	64,1	8:34
30	83,1	8:53
8	93,5	9:03
7	110,2	9:20
29	126,1	9:36
26	141,9	9:51
34	150	10:00
Llegada	158	10:08

Ruta 4		
Salida	22,7	7:52
3	30	8:00
5	44,7	8:14
4	52,7	8:22
6	70,5	8:40
1	93,5	9:03
Llegada	118,5	9:28

Ruta 5		
Salida	21,95	7:51
1	30	8:00
32	48	8:18
33	73	8:43
2	84,49	8:54
31	142,78	9:52
Llegada	149,76	9:59

Fuente: Los autores.

D.5. Resultados ruta 3 con asignación de un vehículo para un cliente con ventana de tiempo (sección 9.2.2)

Ruta 3		
Salida	30,9	8:00
30	31,8	8:01
28	40,0	8:10
26	53,0	8:22
29	59,9	8:29
21	73,8	8:43
Llegada	91,8	9:01

Ruta 6		
Salida	148,0	9:58
34	150,0	10:00
Llegada	158,0	10:08

Fuente: Los autores.

D.6. Resultados ruta 3 con asignación de un vehículo para la zona que contiene un cliente con ventana de tiempo (sección 9.2.3)

Ruta 3		
Salida	12,9	7:42
24	18,3	7:48
26	34,0	8:04
28	40,0	8:10
29	53,2	8:23
Llegada	67,2	8:37

Ruta 6		
Salida	147,0	9:57
30	148,0	9:58
34	154,0	10:04
Llegada	162,0	10:12

Fuente: Los autores.

D.7. Resultados agrupación con modelo de p-mediana con 6 vehículos (sección 9.2.4)

Ruta 1		
Salida	164,8	10:14
10	179,9	10:29
17	191,4	10:41
19	197,1	10:47
20	204,3	10:54
22	226,5	11:16
18	249,2	11:39
9	263,0	11:53
Llegada	320,5	12:50

Ruta 4		
Salida	22,7	7:52
3	30,0	8:00
32	44,2	8:14
33	69,2	8:39
35	80,2	8:50
2	97,7	9:07
8	151,1	10:01
Llegada	171,5	10:21

Ruta 2		
Salida	0	7:30
25	4,9	7:34
12	9,6	7:39
11	31,2	8:01
14	35,4	8:05
13	47,8	8:17
15	58,3	8:28
16	68,5	8:38
Llegada	110,7	9:20

Ruta 5		
Salida	22	7:52
1	30	8:00
6	59,2	8:29
5	81	8:51
4	89	8:59
Llegada	107,2	9:17

Fuente: Los autores.

Ruta 3		
Salida	44,9	8:14
28	49	8:19
27	62,7	8:32
24	68,8	8:38
26	84,5	8:54
23	90	9:00
Llegada	106,1	9:16