



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA EN SISTEMAS – TRANSPORTE

ESTUDIO DE UN SISTEMA DE RUTAS DE RECOLECCIÓN DE INSUMOS PARA UNA RED
DE HOSPITALES DEL ISSSTE

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
GABRIELA MARES MENDOZA

M. I. JOSÉ ANTONIO RIVERA COLMENERO
FACULTAD DE INGENIERÍA

CD. DE MÉXICO, ABRIL 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Javier Suárez Rocha
Secretario: Dr. Ricardo Aceves García
Vocal: M.I. José Antonio Rivera Colmenero
1^{er}. Suplente: M.I. Luis Alejandro Guzmán Castro
2^d o. Suplente: M.I. Héctor Daniel Reséndiz López

Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.

TUTOR DE TESIS:

M.I. JOSÉ ANTONIO RIVERA COLMENERO

Con dedicación a mis padres, familia, amigos y
abuelos que ya no están, pero a quienes recuerdo con gran cariño.
Sin ellos no habría motivación para la realización del presente trabajo.

Prefacio

El presente trabajo se titula “Estudio de un sistema de rutas de recolección de insumos para una red de hospitales del ISSSTE” elaborado por la Ing. Gabriela Mares Mendoza para obtener el grado de Maestro en Transporte de acuerdo a lo estipulado en el Plan de Estudios de Posgrado en la Facultad de Ingeniería.

La experiencia y los conocimientos adquiridos durante los últimos 8 años en planeación de la cadena de suministro en empresas encargadas al almacenamiento y distribución de insumos para la salud y proveedores de soluciones logísticas para diversos servicios médicos integrales a hospitales públicos o privados, aunado a mi experiencia como consultora funcional para una empresa que provee soluciones innovadoras en logística y cadena de suministro a empresas tanto nacionales como internacionales, permitiendo conocer sus procesos, personal y operación diaria para proponer proyectos de implementación de sistemas de gestión del transporte, han sido también la motivación para el desarrollo del presente trabajo de investigación.

Es importante señalar que el principal revisor y quien dirige con gran empeño este documento es el M.I. José Antonio Rivera Colmenero, del Departamento de Sistemas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Agradecimientos

Antes que nada quiero agradecer al M.I. José Antonio Rivera Colmenero, quien me brindó su apoyo y orientación para estructurar y desarrollar el presente trabajo de investigación y también a los maestros que tuve a lo largo de este Posgrado porque me motivaron a seguirme preparando ya que el conocimiento es infinito. También agradezco a mis amigos: Abner, Adrián, Daniel, Larre, Marcela, Diego, Gerardo y a mis queridísimas hermanas de toda la vida por los momentos de alegría, compañerismo y apoyo.

Finalmente, agradezco infinitamente a mis padres, tías y abuelita, pues sin su apoyo, ejemplo y motivación no hubiera podido concluir este gran proyecto.

Resumen

El objetivo de esta tesis es presentar cómo se puede desarrollar de forma sistematizada y estructurada una solución a la problemática de entregas y/o recolecciones dentro de una empresa particular de servicios farmacéuticos, mediante un modelo de ruteo tanto en la entrega como en la recolección de insumos para la salud en algunos hospitales del ISSSTE para aprovechar cada viaje al máximo, considerando que la mayoría de las recolecciones son constantes y por el tipo de negocio no pueden evitarse.

En el trabajo se expone la importancia de la “logística inversa”, posteriormente se explica a través del Método Operacional cómo repercute el flujo inverso de insumos sobre la operación y control dentro de la empresa de estudio, se desarrolla una investigación sobre los diferentes tipos de problemas de rutas de vehículos (VRP – Vehicle Route Problem, por sus siglas en inglés) y de este conjunto se detecta cuáles pueden resolver la problemática dentro de la empresa de estudio y finalmente se explica cómo se aplicó el método heurístico de Clarke y Wright para resolver el problema de rutas de vehículos y así construir rutas optimas acotando el problema a sólo 11 puntos de entrega y/o recolección de la empresa de servicios farmacéuticos en cuestión.

La tesis cumple con los objetivos y alcance planteado puesto que en ella se desarrolla un método que permite asignar las solicitudes tanto de entrega como de recolección considerando capacidad de los vehículos y distancias entre puntos, facilitando el ruteo y con rutas programadas, facilitar también la rastreabilidad de los requerimientos en los distintos hospitales en la empresa MARES CORP.

Palabras clave

Logística inversa, modelo, hospitales, Método Operacional, insumos para la salud, operación, control, método heurístico de Clarke y Wright, problema de rutas de vehículos, rastreabilidad, recolección, capacidad de los vehículos, VRP.

Abstract

The purpose of this thesis is to present how a solution to the problem of deliveries and / or pick-ups within a particular pharmaceutical services company can be developed in a systematized and structured way, through a routing model both in the delivery and in the pick-up of supplies for health to some hospitals of ISSSTE, to take advantage of every trip to the maximum, considering that the majority of the pick-ups are constants and by the type of business can not be avoided.

In this paper, the importance of "reverse logistics" it is explained, then the Operational Method is developed in order to identify how the reverse flow of supplies for health impacts on the operation and control of the study company, an investigation is carried out on the different types of Vehicle Route Problem (VRP) and it is detected which can solve the problem on the study company and finally it is explained how the heuristic method of Clarke and Wright was applied to solve the vehicle route problem and thus build optimal routes limiting the problem to only 11 points of delivery and / or pick-up (hospitals) of the company of pharmaceutical services.

The thesis reaches the objectives and scope given that it develops a method that allows assigning the requests for both, delivery and pick-up, considering the capacity of vehicles and distances between points, making routing easier and with scheduled routes also help the tracking of the requirements in the different hospitals in the study company, MARES CORP.

Key words

Reverse logistics, model, hospitals, Operational Method, supplies for health, operation, control, Clarke and Wright heuristic method, vehicle Rroutes problem, tracking, pick-up, capacity of vehicles, VRP.

Contenido

PREFACIO	II
AGRADECIMIENTOS	III
RESUMEN	IV
ABSTRACT	V
CONTENIDO	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	IX
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 ASPECTOS GENERALES.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.2.1 <i>Objetivo general</i>	3
1.2.2 <i>Objetivos específicos</i>	3
1.3 ALCANCE.....	3
1.4 METODOLOGÍA.....	3
1.5 ESTRUCTURA DEL TRABAJO.....	4
CAPÍTULO 2. EJEMPLOS DE LOGÍSTICA INVERSA EN LAS EMPRESAS Y SUS REPERCUSIONES ECONÓMICAS Y AMBIENTALES	5
2.1 EJEMPLOS DE LOGÍSTICA INVERSA EN EMPRESAS.....	5
<i>Ejemplo 1. Walmart de México (tienda de retail)</i>	5
<i>Ejemplo 2. Liverpool (tienda departamental)</i>	5
<i>Ejemplo 3. Heineken (cervecería)</i>	6
<i>Ejemplo 4. Logística inversa en el sector de envases y embalajes en España</i>	6
2.2 REPERCUSIONES ECONÓMICAS Y AMBIENTALES DE LA LOGÍSTICA INVERSA.....	7
2.2.1 <i>Programa Transporte Limpio</i>	7
CAPÍTULO 3. CASO DE ESTUDIO: DISEÑO DE RUTAS DE RECOLECCIÓN DE INSUMOS PARA LA SALUD PARA UNA RED DE HOSPITALES DEL ISSSTE	9
3.1 UBICACIÓN DEL SISTEMA.....	9
3.1.1 <i>Ubicación temporal</i>	9
3.1.2 <i>Ubicación sectorial</i>	9
3.1.3 <i>Ubicación espacial</i>	10
3.2 ANÁLISIS DEL SISTEMA EXISTENTE.....	10
3.2.1 <i>Estructura organizacional de la empresa</i>	14
3.2.2 <i>Descripción de los insumos que se transportan</i>	18
3.2.3 <i>Descripción de la demanda</i>	19
3.2.4 <i>Descripción de los destinos (hospitales del ISSSTE)</i>	20
3.2.5 <i>Detalle de las rutas de distribución y/o recolección</i>	25
3.2.6 <i>Descripción de la flota vehicular</i>	49

3.2.7 Descripción de la problemática.....	52
3.3 EVALUACIÓN EX-POST DE LOS RESULTADOS DEL SISTEMA	55
3.4 DIAGNÓSTICO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA	57
3.5 IDENTIFICACIÓN DE OPCIONES DE MEJORAMIENTO.....	57
3.6 EVALUACIÓN EX-ANTE DE OPCIONES	58
3.7 SELECCIÓN.....	58
3.8 IMPLANTACIÓN DE LA OPCIÓN SELECCIONADA	58
3.9 CONTROL	58
CAPÍTULO 4. EL PROBLEMA DE DISEÑO DE RUTAS DE VEHÍCULOS.....	60
4.1 PROBLEMA DE RUTA DE VEHÍCULOS CON RESTRICCIÓN DE CAPACIDAD (CVRP - CAPACITATED VEHICLE ROUTE PROBLEM)	61
4.1.1 Problema de rutas de vehículos con varios almacenes (MDVRP - Multi-depot Vehicle Route Problem).....	63
4.1.2 Problema de rutas de vehículos con ventanas de entrega (VRPTW - Vehicle Route Problem with Time Windows)	65
4.1.3 Problema de rutas de vehículos con múltiples ventanas de entrega (VRPMTW - Vehicle Route Problem with Multiple Time Windows)	67
4.2 VRP'S CON ACTIVIDADES MÚLTIPLES.....	70
4.2.1 Problema de recolección y entrega (PDP - Pickup and Delivery Problem).....	70
4.2.1.1 Problema de recolección y entrega con ventanas de entrega (PDPTW - Pickup and Delivery Problem with Time Windows)	72
4.2.2 Problemas de entregas y recolección (DPP - Delivery and Pick up Problems)	75
4.2.2.1 Problema de rutas de vehículos con recolecciones (VRPB - Vehicle Route Problem with Backhauls)	76
4.2.2.1.1 Problema de rutas de vehículos con recolecciones y ventanas de entrega (VRPBTW - Vehicle Route Problem with Backhauls and Time Windows).....	77
4.2.2.2 Problemas mixtos de rutas de vehículos con recolecciones (MVRPB - Mixed Vehicle Route Problem with Backhauls).....	80
4.2.2.2.1 Problemas mixtos de rutas de vehículos con recolecciones y ventanas de entrega (MVRPBTW - Mixed Vehicle Route Problem with Backhauls and Time Windows)	82
4.2.2.3 Problema de rutas de vehículos con entregas y recolecciones simultáneas (SDPP - Simultaneous Delivery and Pickup Problem).....	83
4.2.2.3.1 Problemas de entrega y recolección simultáneos con ventanas de entrega (SDPPTW - Simultaneous Delivery and Pickup Problem with Time Windows)	86
CAPÍTULO 5. APLICACIÓN DEL ALGORITMO AL PROBLEMA DE DISEÑO DE RUTAS DE VEHÍCULOS DE LA EMPRESA MARES CORP	92
5.1 RUTAS DE VEHÍCULOS PARA LOS HOSPITALES SELECCIONADOS EN EL CASO DE ESTUDIO..	93
5.2 APLICACIÓN DEL ALGORITMO CLARKE Y WRIGHT AL PROBLEMA DE RUTA DE VEHÍCULOS DE LOS HOSPITALES SELECCIONADOS DE LA EMPRESA MARES CORP	98
CONCLUSIONES	111
REFERENCIAS.....	113
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	116

Índice de figuras

Figura 1. Actores en la cadena de suministro	1
Figura 2.Actividades principales de MARES CORP (Parte 1)	15
Figura 3.Actividades principales de MARES CORP (Parte 2)	12
Figura 4.Macro proceso de MARES CORP mediante caja negra	13
Figura 5.Organigrama del área de cadena de suministro de MARES CORP	16
Figura 6.Organigrama del área de distribución de MARES CORP	17
Figura 7. Mapa de localización de hospitales del ISSSTE	22
Figura 8. Mapa de localización de los hospitales seleccionados para el Caso de Estudio ubicados en CDMX	24
Figura 9. Identificación de la causa origen del problema que se quiere resolver	57
Figura 10. Variedad de problemas de ruta de vehículos	60
Figura 11. Desarrollo de problemas de ruta de vehículos por sección para aplicarlos a la problemática de MARES CORP	90
Figura 12. Explicación de la información que contiene cada nodo para las rutas 1, 3, 4 y 5 de los hospitales seleccionados para el Caso de Estudio.....	93
Figura 13. Ruta 1 para hospitales seleccionados en el Caso de Estudio	94
Figura 14. Ruta 3 para hospitales seleccionados en el Caso de Estudio	95
Figura 15. Ruta 4 para hospitales seleccionados en el Caso de Estudio	96
Figura 16. Ruta 5 para hospitales seleccionados en el Caso de Estudio	97

Índice de tablas

Tabla 1. Medidas para el ahorro de combustible	8
Tabla 2. Clasificación de insumos para la salud o items de MARES CORP	18
Tabla 3. Ventas anuales de los hospitales más productivos	19
Tabla 4. Total de destinos (hospitales) por Estado	21
Tabla 5. Hospitales seleccionados para el Caso de Estudio	23
Tabla 6. Detalle de la ruta 1 de distribución / recolección	26
Tabla 7. Detalle de la ruta 2 de distribución / recolección	27
Tabla 8. Detalle de la ruta 3 de distribución / recolección	28
Tabla 9. Detalle de la ruta 4 de distribución / recolección	29
Tabla 10. Detalle de la ruta 5 de distribución / recolección	30
Tabla 11. Detalle de la ruta 6 de distribución / recolección	31
Tabla 12. Detalle de la ruta 7 de distribución / recolección	32
Tabla 13. Detalle de la ruta 8 de distribución / recolección	33
Tabla 14. Detalle de la ruta 9 de distribución / recolección	34
Tabla 15. Detalle de la ruta 10 de distribución / recolección	35
Tabla 16. Detalle de la ruta 11 de distribución / recolección	36
Tabla 17. Detalle de la ruta 12 de distribución / recolección	37
Tabla 18. Detalle de la ruta 13 de distribución / recolección	38
Tabla 19. Detalle de la ruta 14 de distribución / recolección	39
Tabla 20. Detalle de la ruta 15 de distribución / recolección	40
Tabla 21. Detalle de la ruta 16 de distribución / recolección	41
Tabla 22. Detalle de la ruta 17 de distribución / recolección	42
Tabla 23. Detalle de la ruta 18 de distribución / recolección	43
Tabla 24. Detalle de la ruta 19 de distribución / recolección	44
Tabla 25. Detalle de la ruta 20 de distribución / recolección	45
Tabla 26. Detalle de la ruta 21 de distribución / recolección	46
Tabla 27. Detalle de la ruta 22 de distribución / recolección	47
Tabla 28. Detalle de la ruta 23 de distribución / recolección	48
Tabla 29. Detalle de la ruta 24 de distribución / recolección	49
Tabla 30. Especificaciones del vehículo Tipo I para la distribución y/o recolección	50
Tabla 31. Especificaciones del vehículo Tipo II para la distribución y/o recolección	50
Tabla 32. Tipos de vehículos utilizados para cada ruta	51
Tabla 33. Asignación de camionetas de 3.5 toneladas por ruta	51
Tabla 34. Asignación de Eurovan's por ruta	52
Tabla 35. Rutas y vehículos asignados a los hospitales seleccionados para el Caso de Estudio	55
Tabla 36. Vehículos subcontratados (outsourcing) para atender solicitudes de recolección no planeadas.....	56
Tabla 37. Formulación matemática del problema CVRP	62
Tabla 38. Formulación matemática del problema MDVRP.....	64

Tabla 39. Formulación matemática del problema VRPTW	66
Tabla 40. Definición de variables y parámetros para el problema VRPMTW	68
Tabla 41. Formulación matemática del problema VRPMTW	69
Tabla 42. Formulación matemática del problema PDP	72
Tabla 43. Definición de variables para la formulación matemática del problema PDPTW...744	
Tabla 44. Formulación matemática del problema PDPTW	74
Tabla 45. Formulación matemática del problema VRPBTW	79
Tabla 46. Variables de decisión para la formulación matemática del problema MVRPB.....80	
Tabla 47. Formulación matemática del problema MVRPB.....81	
Tabla 48. Notación para las variables de la formulación matemática del problema VRPSDPP	84
Tabla 49. Variables de decisión para la formulación matemática del problema VRPSDPP ..84	
Tabla 50. Formulación matemática del problema VRPSDPP	85
Tabla 51. Conjuntos definidos para la formulación matemática del problema SDPPTW.....86	
Tabla 52. Coeficientes definidos para la formulación matemática del problema SDPPTW ..87	
Tabla 53. Variables de decisión definidas para la formulación matemática del problema SDPPTW	87
Tabla 54. Formulación matemática del problema SDPPTW	89
Tabla 55. Premisas sobre pago a chofer, rendimiento vehicular y precio de combustible.....94	
Tabla 56. Demanda de entrega para cada hospital	98
Tabla 57. Matriz de distancias y ahorros entre cada par de nodos	100
Tabla 58. Nomenclatura para todos los ahorros de cada par de nodos	101
Tabla 59. Cálculo de ahorros (parte 1)	102
Tabla 60. Cálculo de ahorros (parte 2)	103
Tabla 61. Ahorros ordenados de mayor a menor.....103	
Tabla 62. Iteraciones 1,2,3,6 y 35.....106	
Tabla 63. Resumen del cálculo de costos para las rutas resultantes del método de Clarke y Wright.....107	
Tabla 64. Asignación de camionetas de 3.5 toneladas para las nuevas rutas que resultaron de la aplicación del método de Clarke y Wright	109
Tabla 65. Resumen de costos por requerimientos de vehículos subcontratados adicionalmente en MARES CORP.....109	
Tabla 66. Costo total del viaje semanal para las rutas actuales de los hospitales del Caso de Estudio	111
Tabla 67. Costo total del viaje semanal para las rutas óptimas resultado de aplicar el método de Clarke y Wright para los hospitales del Caso de Estudio	111

Capítulo I. Introducción

1.1 Aspectos generales

Los hospitales se enfrentan diariamente con diversos problemas en sus procesos a lo largo de su cadena de suministro. Se debe recordar de manera general, que los involucrados en los procesos de la cadena de suministro se presentan en esta secuencia:

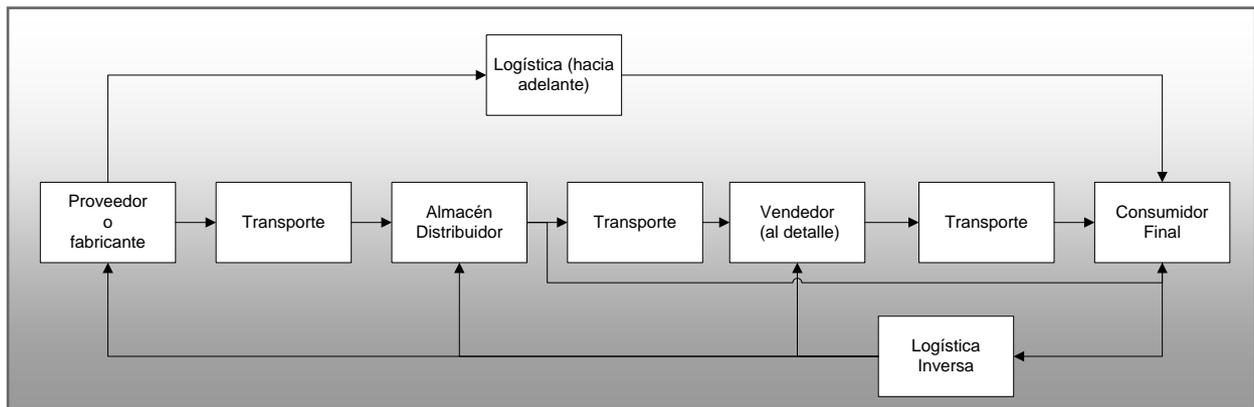


Figura 1. Actores en la cadena de suministro

Fuente: (Milián F., 2016)

Los problemas de los que se hace mención son una brecha entre lo que es y lo que debería ser, así que las empresas analizan los factores que causan estas diferencias para reducirlas, buscando siempre la satisfacción del cliente y ser más competitivas.

Dentro de los procesos de la cadena de suministro, la *Distribución*, juega un papel importante en el flujo de información, personas, dinero y/o mercancías entre el proveedor o fabricante y el almacén distribuidor, entre éste y el vendedor (al detalle) y entre éste actor y el consumidor final como se observa en la *Figura 1*, pero se debe observar que el flujo no siempre es en esta dirección pues existen actividades que van en sentido inverso, es decir, de los consumidores finales a los vendedores (al detalle), al almacén distribuidor o hacia los proveedores o fabricantes, convirtiéndose entonces en lo que se conoce como actividades propias de *logística inversa*.

Así que este documento se enfoca en definir *logística inversa* y sus implicaciones y también se explica cómo se pueden entender y aplicar estos conceptos en una empresa real, mediante un Caso de Estudio.

Entonces, algunas de las definiciones que se encontraron para el término de logística inversa son las siguientes:

"*Logística inversa* es un término que involucra a todas aquellas actividades requeridas para la recuperación de productos devueltos por los clientes por alguna razón" (Gupta S., 2013).

Otra definición que citan algunos autores para el término de logística inversa es la siguiente: "Logística inversa es el proceso de planear, implementar y controlar la eficiencia, el costo del flujo efectivo de materias primas, el inventario en proceso, producto terminado e información relacionada del punto de consumo al punto de origen para el propósito de recapturar valor o una eliminación adecuada" (Olorunniwo F., 2011).

Es importante señalar que el contar con operaciones de *logística inversa* estructuradas y sistematizadas se facilita la recolección de mercancías obsoletas o dañadas para que sean aprovechadas en algún otro nicho de mercado y recordemos también el **Reciclaje** como parte de la Responsabilidad Social que deben promover las empresas al recolectar devoluciones para su posible **desecho, reutilización o reparación** que pueden ser útiles en otros mercados señalado en la Norma ISO 26000 (ISO, 2010).

"Guillermo Utrilla, gerente senior de Price Waterhouse Coopers (PWC) precisa que las actividades de *devoluciones* comprenden entre 3 y 5% de las ventas pero varía según el sector, por ejemplo, en el sector editorial alcanzan hasta un 30% de las ventas inclusive las ventas por catálogo y televisión alcanzan de un 35% hasta 38% de las ventas". (Ortiz S., 2009).

Aunque estas cifras nos dan una idea del bajo porcentaje que representan algunas actividades de logística inversa respecto a las ventas, es importante que las empresas estén preparadas para estas devoluciones inesperadas a través de sistemas que les permitan planear y tener visibilidad de estas solicitudes puesto que a fin de cuentas son parte de un servicio adicional que demandan los clientes y que les permitirían ser empresas diferenciadas de la competencia.

Precisamente en los primeros capítulos del presente trabajo se investiga cómo se desarrollan las actividades de *logística inversa* en las empresas y se amplía este conocimiento en el entorno actual con un Caso de Estudio el cual se presenta en una empresa del sector farmacéutico específicamente en aquellas necesidades de recolección de insumos para la salud para ochenta hospitales del ISSSTE a lo largo de la República Mexicana al centro recolector (CR) que a su vez tiene la misma ubicación que el Centro de Distribución (CD) y se sitúan en la Ciudad de México (CDMX).

En el Caso de Estudio, el principal problema es que se tienen diversas solicitudes de varios proveedores y clientes, tanto internos como externos para recolectar insumos para la salud en los hospitales del ISSSTE al centro recolector pero no se cuenta con un sistema en el cual se les pueda dar seguimiento a estos requerimientos ni mucho menos que ayude a programarlos de manera sistematizada.

Por lo anterior, en este trabajo de investigación se analiza el problema metodológicamente y se presenta una posible solución a través del método heurístico de Clarke y Wright que ayuda en gran medida en la programación de rutas de recolección aprovechando las rutas de entrega existentes o programando nuevas rutas de recolección considerando las restricciones de ventanas de entrega y recolección de los hospitales del ISSSTE, la distancia entre cada hospital y la restricción de capacidad de los vehículos, entre otras variables.

No se considerarán los ochenta hospitales del ISSSTE que actualmente son los puntos de entrega y/o recolección, sino solamente los más importantes y se justifica la razón.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Realizar el estudio de un método funcional de rutas de entrega y/o recolección que permita a una empresa mexicana del giro comercial mayorista del sector farmacéutico tener una programación óptima de aquellas entregas y/o recolecciones de insumos para la salud de algunos hospitales del ISSSTE seleccionados al centro recolector / distribuidor.

1.2.2 Objetivos específicos

- Ubicar un sistema en operación del cual se han detectado desviaciones conforme sus objetivos planteados e identificar posibles soluciones a las mismas.
- Aplicar un método para generación de rutas de manera más óptima con base a las solicitudes de recolección y/o entrega que se tengan en algunos hospitales del ISSSTE.

1.3 Alcance

En el presente trabajo se desarrolla un método que permite identificar la problemática existente en un sistema y analizar sus desviaciones para determinar alguna solución óptima, una vez detectada la problemática se desglosa un método de solución enfocado en atender el problema de rutas de vehículos que presenta la empresa MARES CORP.

1.4 Metodología

El método que se desarrollará está enfocado para resolver problemas de diseño de rutas de vehículos (con recolección y entrega), por sus siglas en inglés este algoritmo es conocido como VRP (Vehicle Route Problem).

Primeramente se plantea el problema, después se investiga sobre el método que mejor se adapte y resuelva la problemática de ruta de vehículos (VRP) que se apega a lo que se está presentando en la empresa MARES CORP.

1.5 Estructura del trabajo

Este trabajo de tesis consta de seis capítulos. El **Capítulo 1** es la introducción, donde se plantea el objetivo general, específicos, alcance, metodología a desarrollar y la estructura del documento.

En el **Capítulo 2**, se expone el resultado de la investigación referente a la forma de cómo operan las empresas en la fase de *logística inversa*. Se aborda este tema para conocer algunos ejemplos del qué y cómo actúan las empresas para administrar y controlar las actividades propias de esta fase de la cadena de suministro.

En el **Capítulo 3**, se desarrolla el Caso de Estudio a través del método operacional.

En el **Capítulo 4**, se explican los tipos de problemas de rutas de vehículos - VRP (Vehicle Route Problem) que se pueden utilizar como referencia para resolver el problema de diseño de rutas de vehículos del Caso de Estudio.

En el **Capítulo 5**, se aplica el método de Clarke y Wright para resolver el problema planteado en el Caso de Estudio.

Finalmente, se presentan las conclusiones del trabajo donde se incluyen algunas recomendaciones a la empresa de estudio, MARES CORP, de acuerdo al análisis realizado y también se proponen futuras líneas de investigación.

Capítulo 2. Ejemplos de logística inversa en las empresas y sus repercusiones económicas y ambientales

En este capítulo se expone cómo operan algunas empresas en materia de *logística inversa* dentro de su cadena de suministro y cómo repercute económica y ambientalmente en las mismas, mediante algunos ejemplos.

Antes de enunciar algunos casos de éxito en las prácticas de logística inversa, es importante mencionar que: "La logística inversa permite mejorar la satisfacción del cliente final mediante la recuperación de productos usados o con disfunciones y la mejora del servicio postventa. Pero además de esta motivación económica, los procesos de recuperación permiten integrar en las empresas valores de protección del medio ambiente, minimizando los gastos energéticos y los impactos industriales sobre el medio. En este sentido, la logística inversa puede añadir un alto valor a las operaciones logísticas de manera que se minimicen los impactos que las actividades industriales pueden generar, así como los perjuicios medioambientales derivados de estas" (Millares C., et al, 2008).

2.1 Ejemplos de logística inversa en empresas

Ejemplo 1. Walmart de México (tienda de retail)

Un ejemplo en el que se puede observar cómo algunas prácticas de logística inversa pueden reducir impactos ambientales es el caso de Walmart de México y Centroamérica: "El sistema de distribución de logística inversa, por medio del cual se aprovecha cada viaje de y hacia los Centros de Distribución (CD) para recolectar artículos de los proveedores que se encuentren en ruta y evitar viajes sin carga, permitió en 2013 reducir costos, ahorrar tiempo en entregas y disminuir considerablemente las emisiones de CO₂ que se liberarían a la atmósfera si cada proveedor realizara sus entregas de forma independiente. Gracias a esta práctica de logística inversa, Walmart de México y Centroamérica ha dejado de emitir 11,124 toneladas de CO₂ y ahorrado 4.1 millones de litros de diesel" (Portal Automotriz, s/f).

Ejemplo 2. Liverpool (tienda departamental)

Otro caso en el que las prácticas de logística inversa puede contribuir a ahorrar insumos es lo que ocurre al interior de Liverpool México: "De acuerdo con Antonio Domínguez, Director de Logística de Liverpool, esta cadena departamental ha podido encontrar áreas de potenciales ahorros en costos y mejoras en el nivel de servicio al cliente mediante logística inversa.

Por ejemplo, hace dos años Liverpool invertía 22 millones de pesos en ganchos para colgar la ropa, pero al definir una estrategia de retorno de ganchos al proveedor para el resurtido de las prendas, han podido en la actualidad ocupar "al menos cinco veces más el gancho" y de esa manera reducir a 12 millones de pesos el gasto en estos insumos.

Tres son los impulsores de la aplicación de la logística inversa en una empresa, enlistó Domínguez: costo-beneficio, requerimientos legales y responsabilidad social". (Huchim. S., 2010).

Ejemplo 3. Heineken (cervecería)

El ejemplo de Heineken, la tercera cervecera más grande a nivel mundial, que a continuación se detalla, muestra los impactos económicos que se pueden llegar a alcanzar mediante logística inversa en insumos de empaque:

"Heineken usa materiales de empaque retornables (RPM por sus siglas en inglés) como por ejemplo: botellas retornables, cajas y barriles para la mayoría de sus productos. En 2001, 47% de la cerveza vendida fue empacada con RPM que requirió sustancialmente inversión (costo de reemplazo del material de empaque retornable es alrededor de 550 millones de euros para Heineken Europa). RPM necesita cadenas de logística inversa también. Los contenedores utilizados requieren recolección, almacenamiento y limpieza antes de ser usados. Determinar el correcto número de RPM a ser lanzado en la cadena de suministro es una importante pero difícil decisión.

En 2000, la compañía empezó un proyecto piloto en la cervecería Brand (una marca local de Heineken) que involucraba un chip dentro de una cierta proporción de las cajas usadas por la compañía. El objetivo era medir el tiempo de circulación de las cajas a través de la cadena de inversa. Usando los escaners localizados en las entradas de las cintas de producción y los únicos códigos adjuntos a los chips, las dos entradas consecutivas de las cajas dentro de la producción fueron grabadas. El proyecto proporcionó información valiosa acerca de los patrones de retorno y los tiempos de circulación de las cajas, que pudieron ser usados para reducir los costos de inversión de RPM. La contribución del proyecto fue implementada para todas las cajas que no fueron medidas por Heineken, pero por un cálculo aproximado en tecnología de chips redujo el stock de embalaje por un millón y ahorros de 3.5 millones de euros para la compañía" (Koppius. O., 2014).

Ejemplo 4. Logística inversa en el sector de envases y embalajes en España

En algunos casos las prácticas de logística inversa son producto de leyes de protección al ambiente tal es el caso de lo que ocurre en España: "La Unión Europea ha publicado una serie de directivas en las que obliga a España a cumplir unos objetivos de valorización, reciclado y reducción de los residuos de envases con la finalidad de evitar y reducir al máximo su vertido, y tienen por objeto la recuperación y gestión de los residuos de envases y hace responsable de ello a los envasadores y comerciantes de productos envasados, estableciendo dos vías o alternativas para cumplir dichas obligaciones: a) Establecer un sistema de depósito, devolución y retorno (SDDR) mediante el cual los envasadores y comerciantes de productos envasados, deben cobrar a sus clientes una cantidad por cada envase objeto de transacción y devolver dicha cantidad por la devolución del envase vacío. b) Adhesión a un **Sistema Integrado de Gestión (SIG)**, que garantiza el cumplimiento de los objetivos de reciclado y valorización establecidos por la ley y que tiene como finalidad la

recogida y reciclado de los envases y residuos de envases, facilitando los medios para la correcta gestión medioambiental del flujo de residuos del que se trate [...]

Cuando una empresa envasadora se adhiere a un SIG contribuye con una cantidad por cada envase en función del peso o volumen (en el caso de vidrio) del envase y del material del que esté hecho, que repercute a los consumidores y, con las cantidades recaudadas, el SIG financia los costos de recogida, reciclaje y aprovechamiento de los materiales, abonando a los ayuntamientos el costo de la recogida y de la clasificación y separación de los residuos de envases, siendo estos los que contratan y pagan a las empresas encargadas del transporte y a las plantas de clasificación y separación. Este pago le da derecho a marcar el envase mediante el símbolo identificativo del SIG" (Villa. A., s/f).

2.2 Repercusiones económicas y ambientales de la logística inversa

2.2.1 Programa Transporte Limpio

En México se cuenta con un programa voluntario, desarrollado por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT).

El Programa está dirigido, principalmente a empresas transportistas de carga y pasaje, tanto urbanas como foráneas así como para empresas usuarias del servicio de carga.

“Los principales objetivos del Programa *Transporte Limpio* son:

- Reducir el consumo de combustible.
- Reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes (NOx y PM₁₀ y PM_{2.5}).
- Reducir los costos de operación del transporte.

Lo anterior se logra con la adopción de estrategias, tecnologías y mejores prácticas que inciden en un transporte más eficiente, seguro y sustentable; aumentando con ello la competitividad del sector”. (SEMARNAT, s/f).

Algunas medidas de ahorro de combustible son las siguientes:

	Medida	Potencia de ahorro de combustible
ESTRATEGIA	Entrenamiento de operadores en conducción técnica-económica (eco-driving)	10-30%
	Regulación de la velocidad máxima	5-15%
	Reducir operación en ralenti (idling)	Mínimo 5%
	Selección y especificación vehicular	Variable incluso hasta 30%
TECNOLOGÍAS	Mantenimiento	7-15%
	Logística	Variable, al menos un 10%
	Control de combustible	Mínimo 5%
	Mejoras aerodinámicas	5-10%
	Llantas individuales de base ancha	3%
	Sistema de inflado automático de llantas	1%
	Lubricantes más avanzados	1.5%
	Dispositivo de control de emisiones	

Tabla 1. Medidas para el ahorro de combustible

Fuente: (SEMARNAT, s/f)

Como se puede observar, la reducción de viajes sin carga de acuerdo al Programa Transporte Limpio, puede lograr reducir el uso de combustible en al menos un 5%, es por eso la importancia de adoptar actividades de *logística inversa* para aprovechar los viajes de regreso.

Capítulo 3. Caso de Estudio: Diseño de Rutas de Recolección de insumos para la salud para una Red de Hospitales del ISSSTE

En este capítulo se desarrolla el Caso de Estudio siguiendo la estructura del **Método Operacional**.

Primeramente, se describirá en qué consiste el Método Operacional de manera general: (Ochoa, 1997), "Cuando en un sistema en operación no se están cumpliendo los objetivos se comienzan a gestar desacuerdos e inconformidades en los actores del sistema, por lo que el sistema tiene problemas y algo tendrá que hacerse.

Existe un proceso estructurado para enfrentar problemas de corrección o mejoramiento en los sistemas existentes, semejante al que se utiliza para la solución de problemas de creación de empresas y expansión.

El objetivo es llegar a controlar el sistema. Se requiere ubicarlo para poder definir el marco de su análisis, separar sus componentes, que pueden ser evaluados ex-post, y sus resultados determinan la existencia de problemas que serán definidos con el propósito de diagnosticar el estado actual del sistema e identificar las opciones de corrección; éstas, al igual que en el método anterior, se evalúan ex-ante para seleccionar la mejor, implantarla y controlar nuevamente el sistema".

Una vez que se comprende en qué consiste el Método Operacional se explica la problemática que se está presentando en la empresa MARES CORP a través de él, para lograr el mejoramiento de algunas actividades de distribución y/o recolección de la empresa antes mencionada.

3.1 Ubicación del sistema

3.1.1 Ubicación temporal.

"Se refiere al periodo en el cual se planeó el sistema, indicando el tiempo transcurrido y por transcurrir en este horizonte de planeación" (Ochoa, 1997).

MARES CORP es una empresa con más de 35 años ofreciendo servicios integrales en quirófanos en el ramo farmacéutico a Instituciones del Sector Salud y algunos Hospitales Privados a lo largo de la República Mexicana, cuya permanencia está planteada para los próximos 50 años expandiendo sus horizontes a Latinoamérica.

3.1.2 Ubicación sectorial.

"Se refiere al primero, segundo o tercero nivel de agregación sectorial" (Ochoa, 1997).

Esta clasificación se basa en el Sistema de Clasificación Industrial de América del Norte 2013 (SCIAN 2013) y es una clasificación de las actividades económicas: " El primer sector corresponde a las actividades primarias, es decir, las que se relacionan con el aprovechamiento directo de los recursos naturales, como el suelo, el agua, la flora y la

fauna. El segundo grupo de sectores comprende las actividades secundarias, mediante las cuales se efectúa la transformación de todo tipo de bienes o productos "sea que éstos provengan del sector primario o del mismo secundario" en otros nuevos o diferentes. El último grupo de actividades corresponde a las terciarias, que se refieren al comercio y a los servicios". (INEGI, s/f)

De acuerdo a esta clasificación, MARES CORP es una empresa del sector terciario (comercio y/o servicios) cuyo giro es comercial mayorista en el ramo farmacéutico.

3.1.3 Ubicación espacial.

"Se indica si es puntual, regional, nacional, etc., el ámbito de acción del sistema en el espacio geográfico" (Ochoa, 1997).

Para profundizar más sobre este apartado la ubicación espacial se refiere a la localización del negocio y se relaciona con algunos factores como: "Cercanía al mercado objetivo, ubicación no prohibida por las Normas y Planes de Ordenamiento Territorial, lugar con infraestructura adecuada, etc." (Localización de empresas, s/f)

El Centro de Distribución (CD) y Centro Recolector (CR) de MARES CORP están ubicados en la CDMX, brindando servicio a los hospitales públicos o privados pactados en contratos a nivel nacional.

3.2 Análisis del sistema existente.

"Se desagregan los componentes para conocer los elementos específicos del sistema. El resultado de esta fase son elementos que caracterizan algún componente del sistema" (Ochoa, 1997).

El servicio que brinda MARES CORP es proporcionar todos los insumos para la salud a diferentes hospitales del sector público y algunos hospitales privados para que puedan operar exclusivamente en quirófanos para los tipos de cirugías que se especifican en diversas licitaciones pactadas a nivel nacional. De manera general se detalla en el siguiente diagrama las actividades que se realizan al interior de MARES CORP:

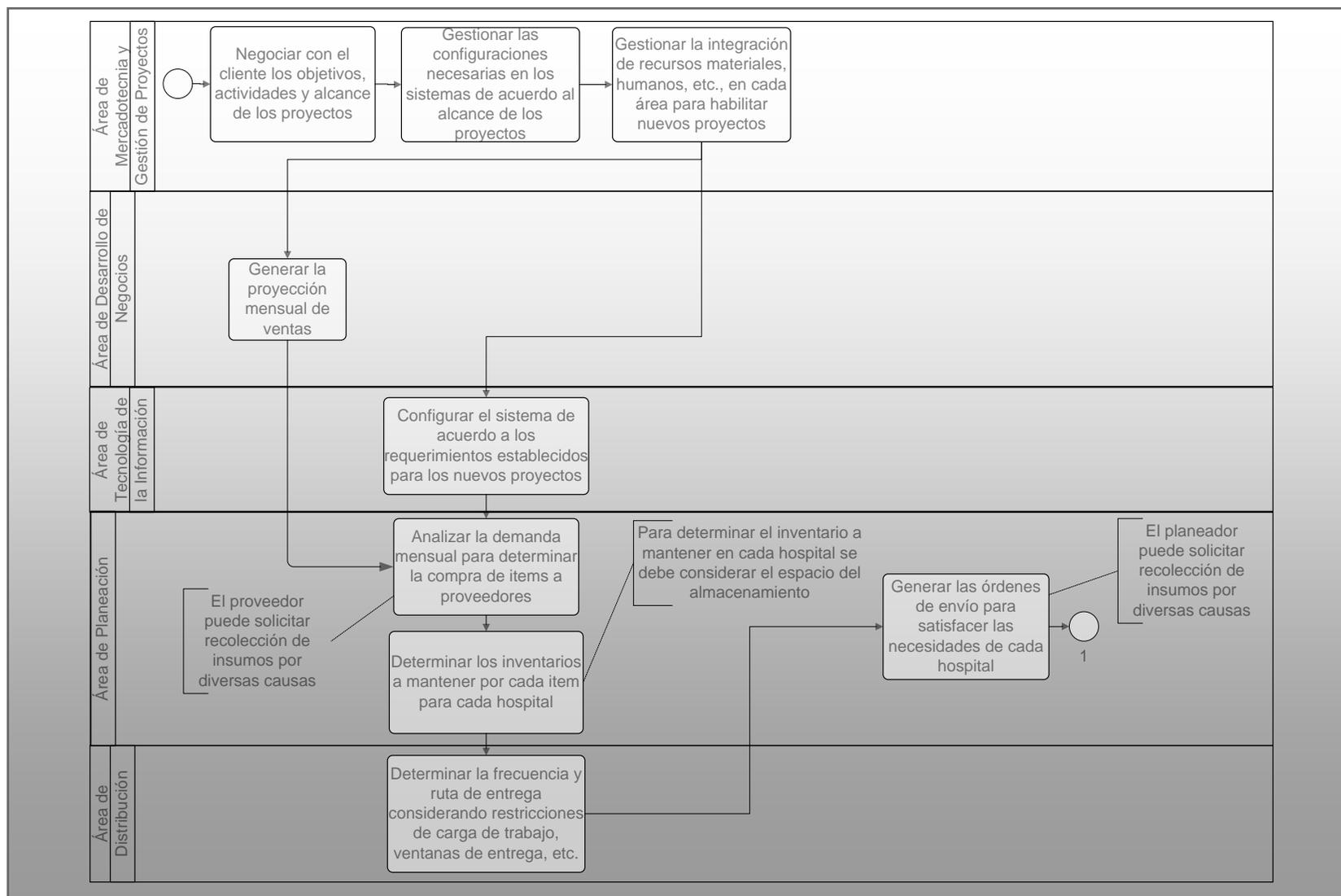


Figura 2. Actividades principales de MARES CORP (Parte 1)

Fuente: Elaboración propia mediante datos de la empresa

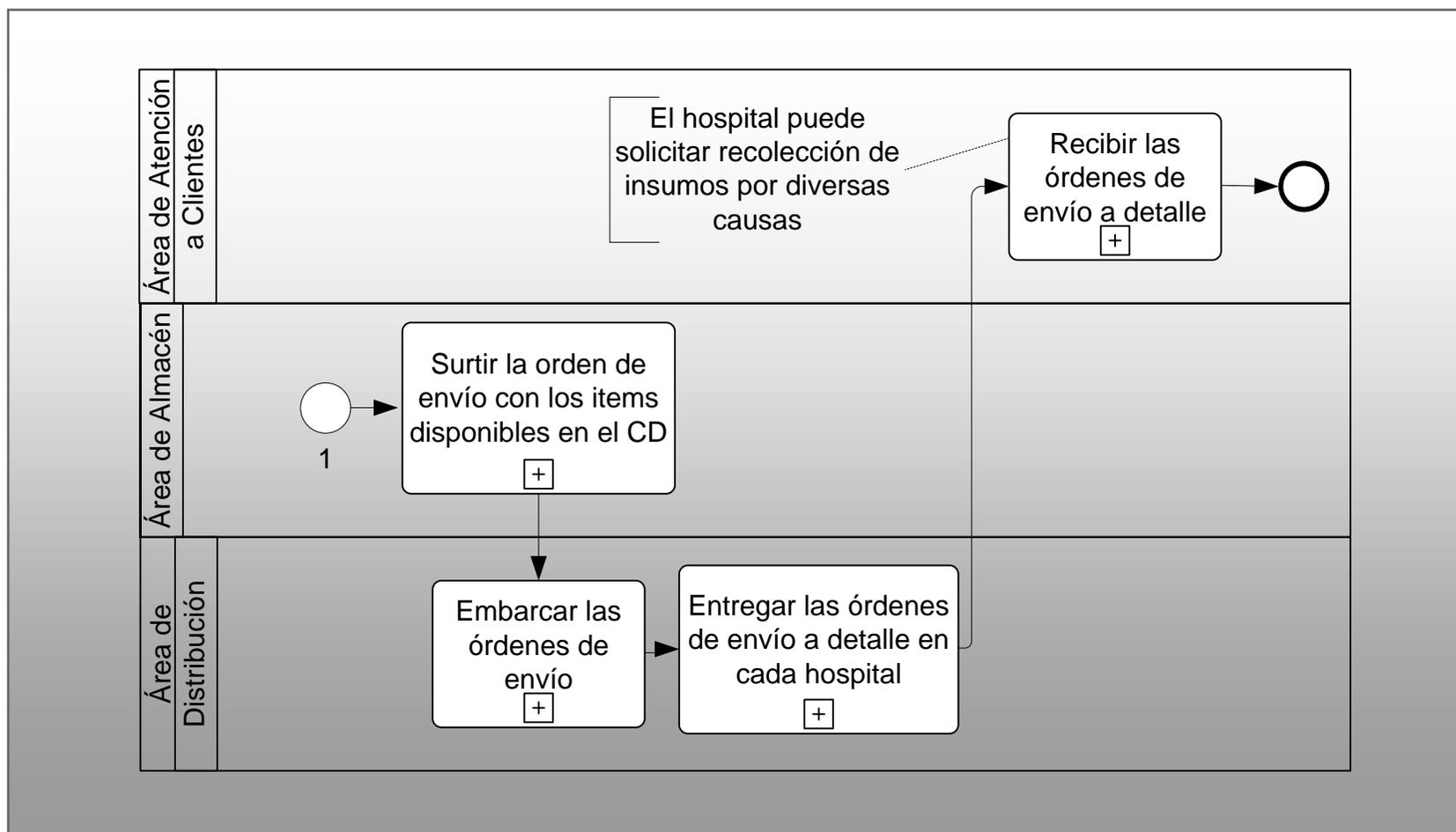


Figura 3.Actividades principales de MARES CORP (Parte 2)

Fuente: Elaboración propia mediante datos de la empresa

A pesar de que el flujo de actividades se debería mantener de esta forma no siempre es así, pues se tienen que considerar otras salidas que a continuación se describen mediante el modelo de **Caja Negra** para visualizar a MARES CORP como un sistema:

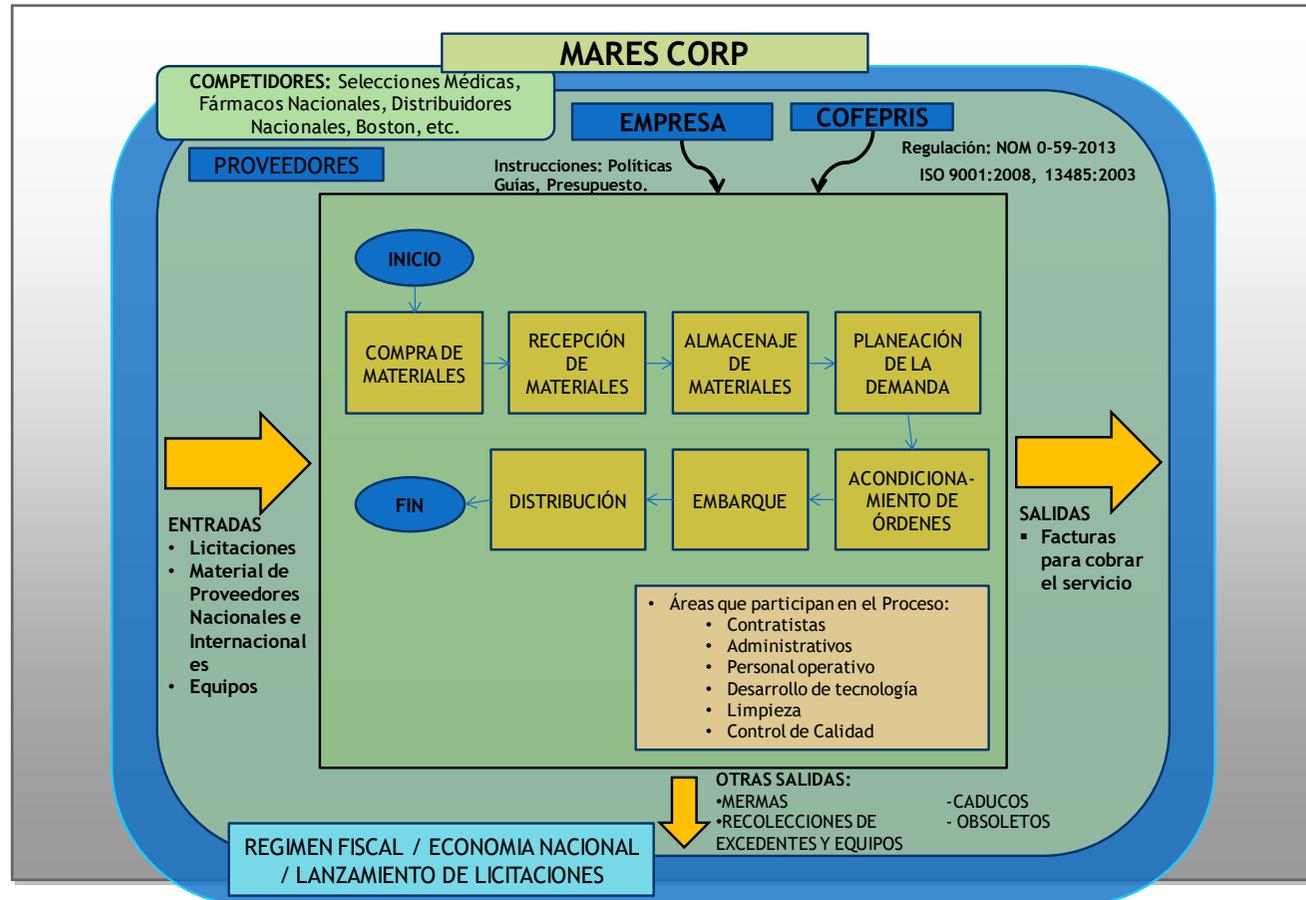


Figura 4. Macro proceso de MARES CORP mediante caja negra

Fuente: Elaboración propia mediante datos de la empresa

De la *Figura 4*, la problemática de interés se presenta en el apartado: "**OTRAS SALIDAS**" puesto que en este caso implica un flujo inverso de mercancía e información del consumidor, es decir, de los hospitales del ISSSTE al proveedor (almacén distribuidor o centro de recolección de MARES CORP). Este flujo es el que se desea hacer más eficiente y es importante aclarar que no se pretende reducir éstas salidas como son las mermas o caducos sino más bien que al estar presentes en la cadena de suministro tratar de hacer más eficiente su retorno al punto de origen a partir de rutas de entrega existentes o creación de rutas de recolección nuevas con ayuda de un sistema que sea funcional.

3.2.1 Estructura organizacional de la empresa

Una vez definido el macro proceso se presenta la estructura de MARES CORP para visualizar el área en la que se intervendrá en el Caso de Estudio.

MARES CORP está conformada por 16 áreas y son las siguientes:

Áreas estratégicas:



Áreas operativas:



Áreas de soporte:



El área en la que nos enfocaremos será la marcada en verde, que es la siete: **CADENA DE SUMINISTRO**, ubicada dentro de las áreas operativas de acuerdo a la clasificación anterior.

El área de cadena de suministro está conformada de acuerdo al siguiente organigrama en el cual cada rectángulo representa un puesto en donde se coloca su nombre y la cantidad de personas en el mismo entre paréntesis:

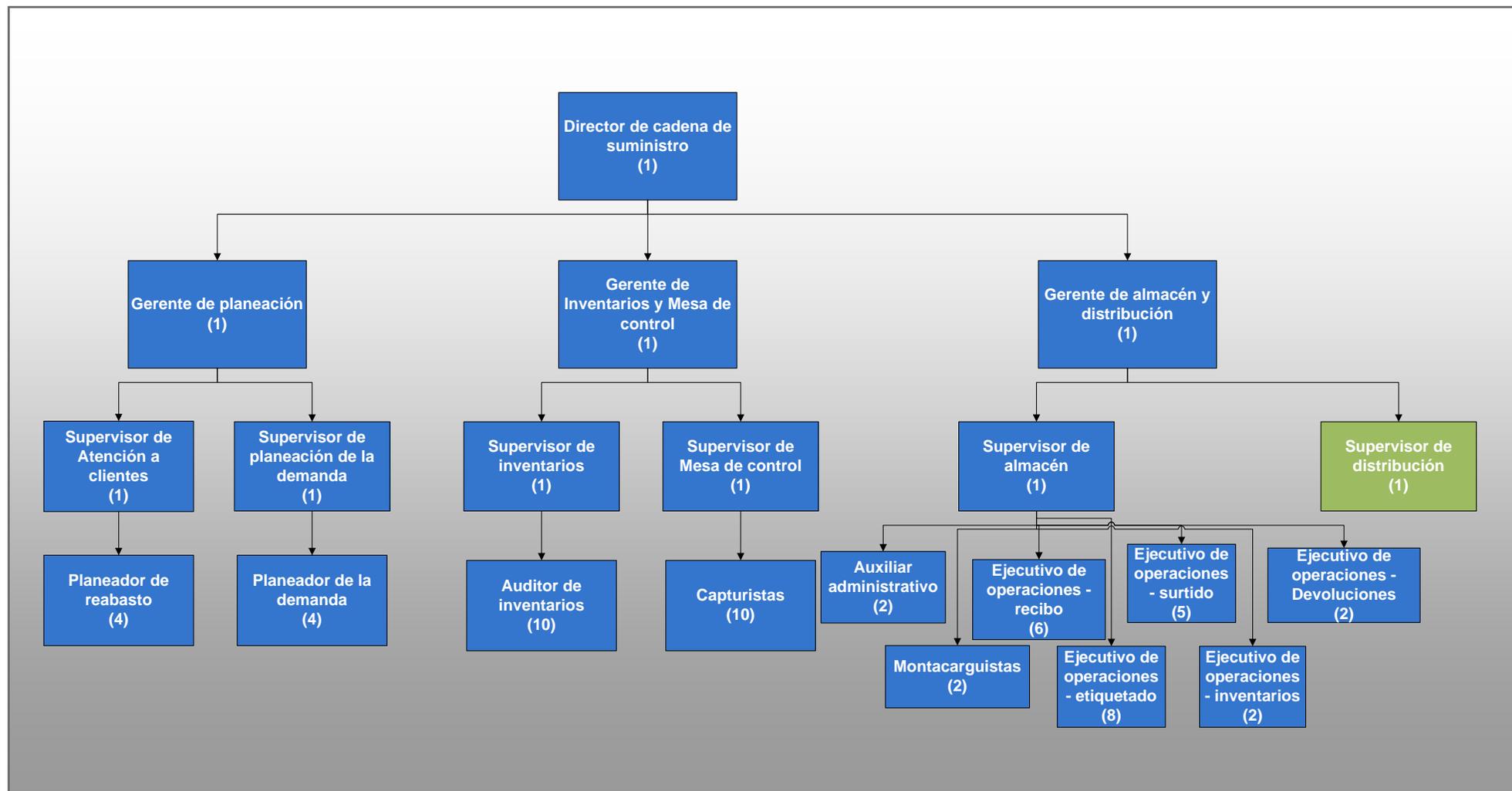


Figura 5.Organigrama del área de cadena de suministro de MARES CORP

Fuente: Elaboración propia mediante datos de la empresa

Para nuestro Caso de Estudio nos enfocaremos a lo que ocurre al interior del **ÁREA DE DISTRIBUCIÓN** que se estructura de la siguiente manera:

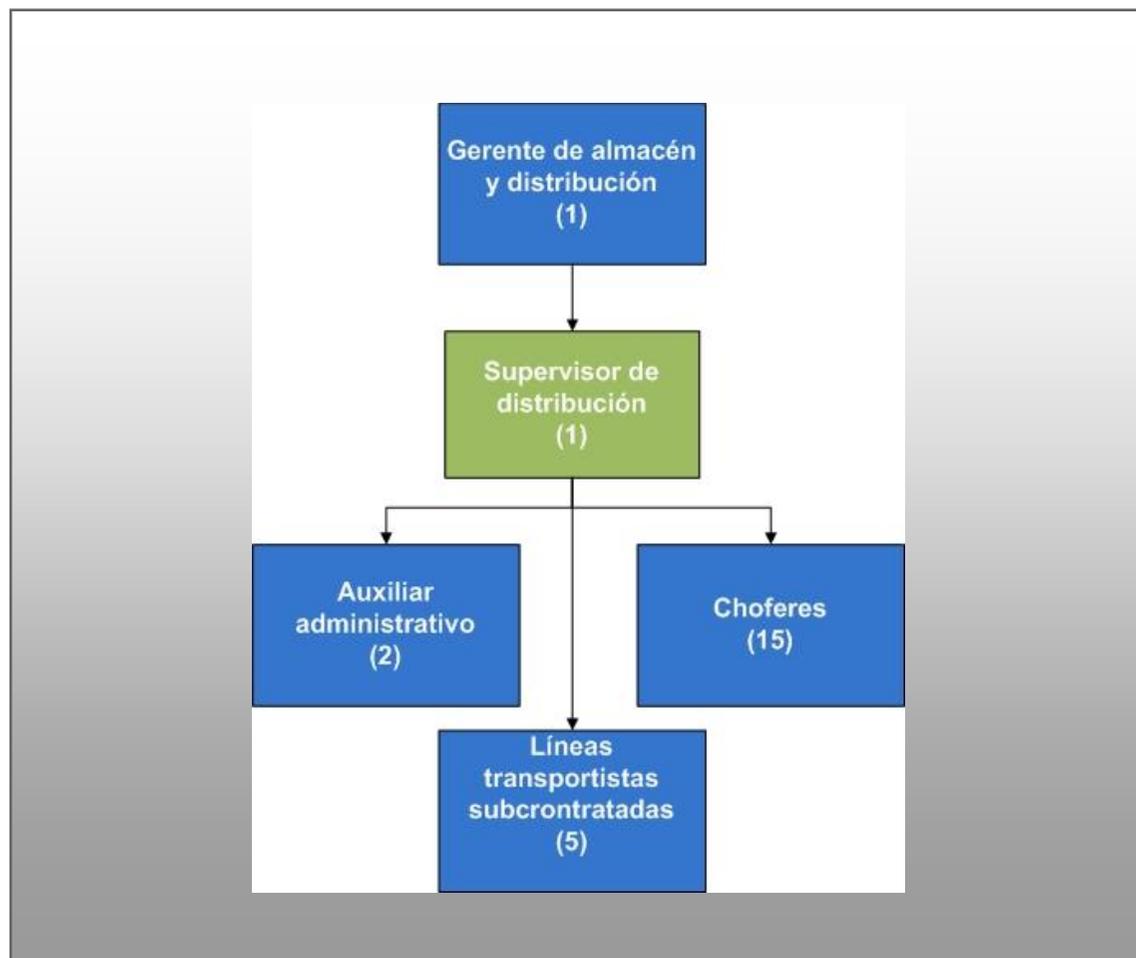


Figura 6. Organigrama del área de distribución de MARES CORP

Fuente: Elaboración propia mediante datos de la empresa

Una vez que se tiene ubicada el área de distribución dentro de la empresa se hace un recuento de los recursos con los que cuenta para su operación diaria y la problemática que se quiere resolver.

3.2.2 Descripción de los insumos que se transportan

El objetivo principal de MARES CORP es hacer llegar diversos insumos para la salud a los hospitales públicos o privados con quienes tiene contratos. De acuerdo a COFEPRIS se define a los **insumos para la salud** como: "aquellos medicamentos, substancias psicotrópicas, estupefacientes y las materias primas y aditivos que intervengan para su elaboración; así como los equipos médicos, prótesis, órtesis, ayudas funcionales, agentes de diagnóstico, insumos de uso odontológico, material quirúrgico, de curación y productos higiénicos, éstos últimos en los términos de la fracción VI del artículo 262 de la Ley General de Salud". (COFEPRIS, s/f)

Por contrato se define un listado de insumos para la salud para cada Hospital público o privado para los cuales se debe vigilar su existencia y abastecimiento de manera periódica de tal forma que siempre se encuentren físicamente en los hospitales.

Actualmente se cuenta con 2,612 insumos para la salud o items que se distribuyen a diferentes hospitales los cuales se pueden clasificar por ABC de la siguiente forma:

Tipo de Item	Total de items	%	% Acumulado
CCA	633	24.23	24.23
CCB	516	19.75	43.99
CCC	388	14.85	58.84
BCA	232	8.88	67.73
BCB	220	8.42	76.15
ABA	109	4.17	80.32
AAA	108	4.13	84.46
BCC	100	3.83	88.28
BBA	66	2.53	90.81
ABB	55	2.11	92.92
ACA	46	1.76	94.68
ACB	40	1.53	96.21
BAA	23	0.88	97.09
ABC	18	0.69	97.78
ACC	16	0.61	98.39
BBB	12	0.46	98.85
AAB	11	0.42	99.27
CBA	7	0.27	99.54
BBC	5	0.19	99.73
CAA	2	0.08	99.81
AAC	2	0.08	99.89
BAB	1	0.04	99.92
CBC	1	0.04	99.96
BAC	1	0.04	100.00
Total General	2,612		

Tabla 2. Clasificación de insumos para la salud o items de MARES CORP

Fuente: Elaboración propia mediante datos de la empresa

La Tabla 2 muestra la clasificación de los insumos para la salud o items de MARES CORP, cabe mencionar que los códigos se clasifican en ABC primero por frecuencia de envío, después por volumen de venta y finalmente por costo. Por ejemplo si un código es ABC significa: "A" que es un código que rota mucho, es decir, que se consume mucho en los hospitales, "B" que el volumen de venta es mediano respecto al total de los items y "C" que su costo es bajo.

3.2.3 Descripción de la demanda

La demanda de insumos para la salud está en función de un análisis de inventarios y consumos previo por cada hospital, es decir, no siempre se abastecen los mismos items en las mismas cantidades.

El 80% de las ventas se concentran en los siguientes 15 hospitales:

Nombre del Hospital del ISSSTE	Estado/Ciudad de ubicación	Ventas anuales (\$)	%	% Acumulado
CMN 20 DE NOVIEMBRE	CDMX	51.165.234,53	32%	32%
HR 1º DE OCTUBRE	CDMX	15.604.599,44	10%	42%
HR IGNACIO ZARAGOZA	CDMX	11.239.386,56	7%	49%
HR A LOPEZ MATEOS	CDMX	10.754.215,87	7%	56%
HR TULTITLÁN	Estado de México	10.473.781,00	7%	63%
HG MORELIA VASCO DE QUIROGA	Michoacán	4.359.409,46	3%	66%
HG DARIO FERNÁNDEZ	CDMX	4.180.569,06	3%	68%
HR PUEBLA	Puebla	3.346.286,50	2%	70%
CH CIUDAD OBREGÓN	Sonora	2.794.389,42	2%	72%
HR MERIDA	Yucatán	2.615.336,86	2%	74%
HG TACUBA	CDMX	2.298.598,82	1%	75%
HG LA PAZ	Baja California Sur	2.212.901,23	1%	77%
HR MONTERREY	Nuevo León	2.212.901,23	1%	78%
CE GUADALAJARA	Jalisco	2.192.201,34	1%	79%
HG FERNANDO QUIROZ	CDMX	2.033.891,95	1%	81%

Tabla 3. Ventas anuales de los hospitales más productivos

Fuente: Elaboración propia mediante datos de la empresa

Adicional a la información de la Tabla 3, otro dato que se puede conocer es la periodicidad con la que se visita cada hospital puesto que se tiene un calendario de entregas establecido. Además, se debe considerar que existen solicitudes de recolecciones de insumos para la salud de los hospitales al Centro Recolector (CR) y éstas no se pueden ser conocidas previamente sino hasta que son detonadas por diversas razones que más adelante se detalla.

3.2.4 Descripción de los destinos (hospitales del ISSSTE)

Como se mencionó en el apartado de ubicación espacial, tanto el Centro de Distribución (CD) como el CR se encuentran ubicados geográficamente en la misma dirección, es decir, la empresa cuenta con andenes asignados para despacho de insumos para la salud que corresponde a la sección de operación del CD y otros asignados para entrega de recolecciones y liquidación de viajes que corresponde al área de operación del CR, ambas secciones se utilizan para dar servicio a 80 hospitales del ISSSTE.

Cabe mencionar que los hospitales del ISSSTE a los que se les da servicio están clasificados de acuerdo al siguiente listado por orden de importancia de acuerdo a su nivel de productividad:

- **CMN:** Centro Médico Nacional
- **HR:** Hospital Regional
- **HG:** Hospital General
- **CH:** Clínica Hospital
- **CE:** Clínica de Especialidades con Quirófano
- **CA:** Consultorio Auxiliar

En la Tabla 4, se muestra que de acuerdo al porcentaje acumulado, el 80% de los destinos se encuentran en la Ciudad de México, Coahuila, Oaxaca, San Luis Potosí, Sonora, Puebla, Baja California Sur, Baja California Norte, Guerrero, Nuevo León, Quintana Roo, Sinaloa, Tamaulipas.

Estado	Total de Hospitales	%	% Acumulado
CDMX	12	15,00%	15,00%
Coahuila	7	8,75%	23,75%
Oaxaca	6	7,50%	31,25%
San Luis Potosí	6	7,50%	38,75%
Sonora	6	7,50%	46,25%
Puebla	5	6,25%	52,50%
Baja California Sur	4	5,00%	57,50%
Baja California	3	3,75%	61,25%
Guerrero	3	3,75%	65,00%
Nuevo León	3	3,75%	68,75%
Quintana Roo	3	3,75%	72,50%
Sinaloa	3	3,75%	76,25%
Tamaulipas	3	3,75%	80,00%
Veracruz	3	3,75%	83,75%
Estado de México	2	2,50%	86,25%
Aguascalientes	1	1,25%	87,50%
Campeche	1	1,25%	88,75%
Chiapas	1	1,25%	90,00%
Chihuahua	1	1,25%	91,25%
Hidalgo	1	1,25%	92,50%
Jalisco	1	1,25%	93,75%
Michoacán	1	1,25%	95,00%
Querétaro	1	1,25%	96,25%
Tabasco	1	1,25%	97,50%
Tlaxcala	1	1,25%	98,75%
Yucatán	1	1,25%	100,00%
Total	80		

Tabla 4. Total de destinos (hospitales) por Estado

Fuente: Elaboración propia mediante datos de la empresa

La ubicación de los 80 hospitales (puntos en amarillo en la Figura 7) se encuentra representada en el siguiente mapa:

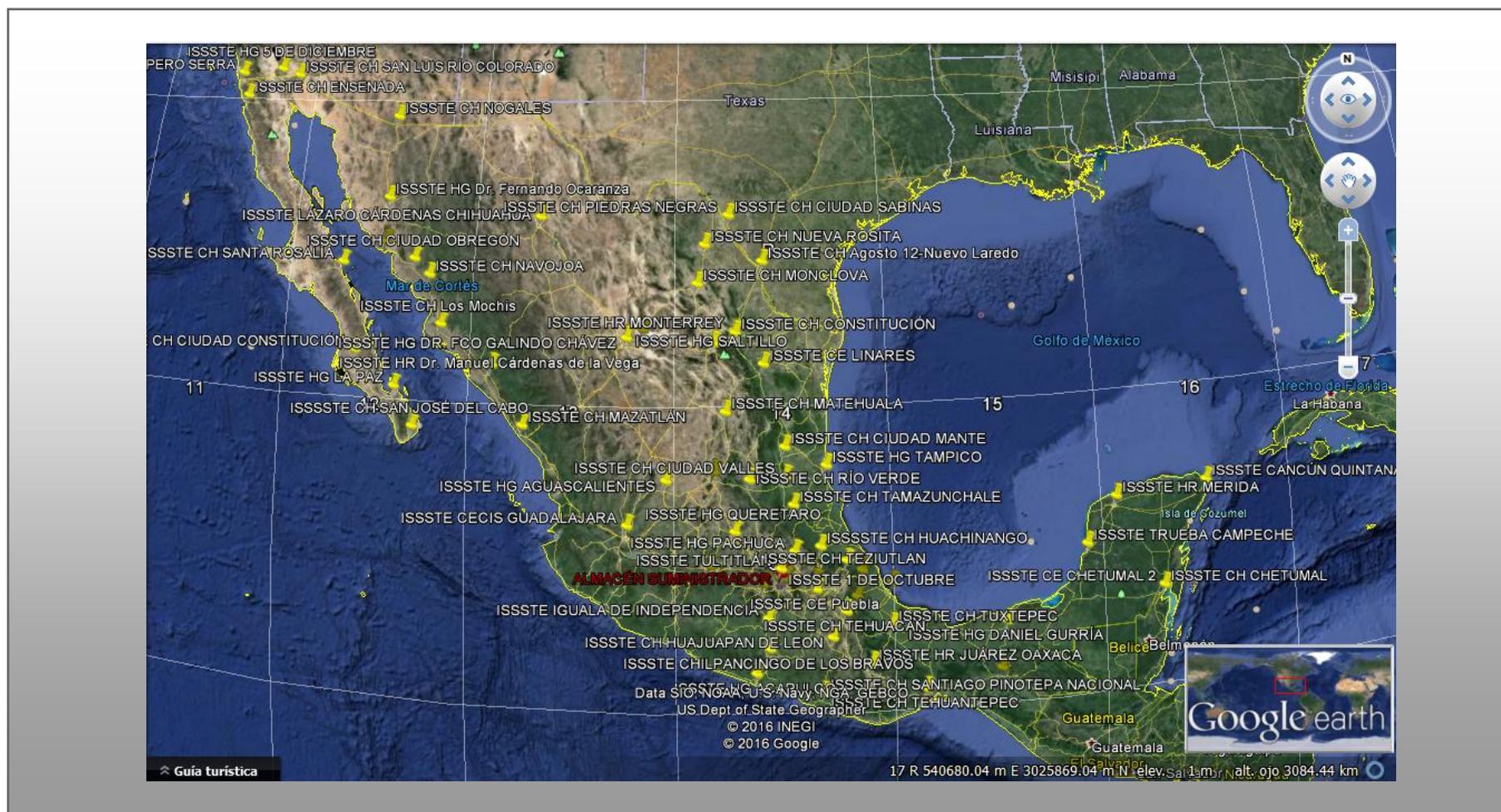


Figura 7. Mapa de localización de hospitales del ISSSTE

Fuente: Elaboración propia mediante datos de la empresa desde Google Earth

Se puede observar que los hospitales que representan mayores ventas anuales están ubicados en la Ciudad de México y por ubicación representan el 15% es, por ello, que la problemática a resolver se acotará 11 hospitales de los más productivos de acuerdo a la Tabla 3 que se ubican en la Ciudad de México. El método para la generación de rutas óptimas que resulte de analizar estos hospitales se pretende que pueda servir como referencia para modelar las demás rutas del resto de los hospitales.

Los hospitales que se considerarán en el Caso de Estudio son los siguientes:

Nombre del hospital del ISSSTE	Dirección				
	Avenida / Calle	Número	Colonia	C.P.	Delegación/ Municipio
HR 1º de Octubre	Av. Instituto Politécnico Nacional	1669	Magdalena de las Salinas	07760	Gustavo A. Madero
CA 1º de Octubre	Av. Instituto Politécnico Nacional	1669	Magdalena de las Salinas	07760	Gustavo A. Madero
CMN 20 de Noviembre	Av. Félix Cuevas	540	del Valle	3229	Benito Juárez
CE Churubusco	Calz. De Tlalpan	1983	Parque de San Andrés	04040	Coyoacán
HG Darío Fernández	Av. Revolución esq. Barranca del Muerto	1182	San José Insurgentes	03900	Benito Juárez
HG Fernando Quiroz	Felipe Ángeles y Canario	120	Bellavista	1140	Álvaro Obregón
HR A López Mateos	Av. Universidad	1321	Florida	01030	Álvaro Obregón
HG Morelos y Pavón	Congreso de Chilpancingo Norte y Sur	s/n	U.H. Ermita Zaragoza	09180	Iztapalapa
CE Leonardo Nicolás Bravo	Av. Enrique Contel esq. Av. Telecomunicaciones	s/n	Ejército Constitucionalista	09220	Iztapalapa
CE Alberto Pisanty	Doctora	28	Tacubaya	11870	Miguel Hidalgo
HG Tacuba	Lago Ontario esq. Golfo de San Lorenzo	119	Tacuba	11410	Miguel Hidalgo
HR Ignacio Zaragoza	Calz. General Ignacio Zaragoza	1711	Ejército Constitucionalista	09220	Iztapalapa

Tabla 5. Hospitales seleccionados para el Caso de Estudio

Fuente: Elaboración propia mediante datos de la empresa

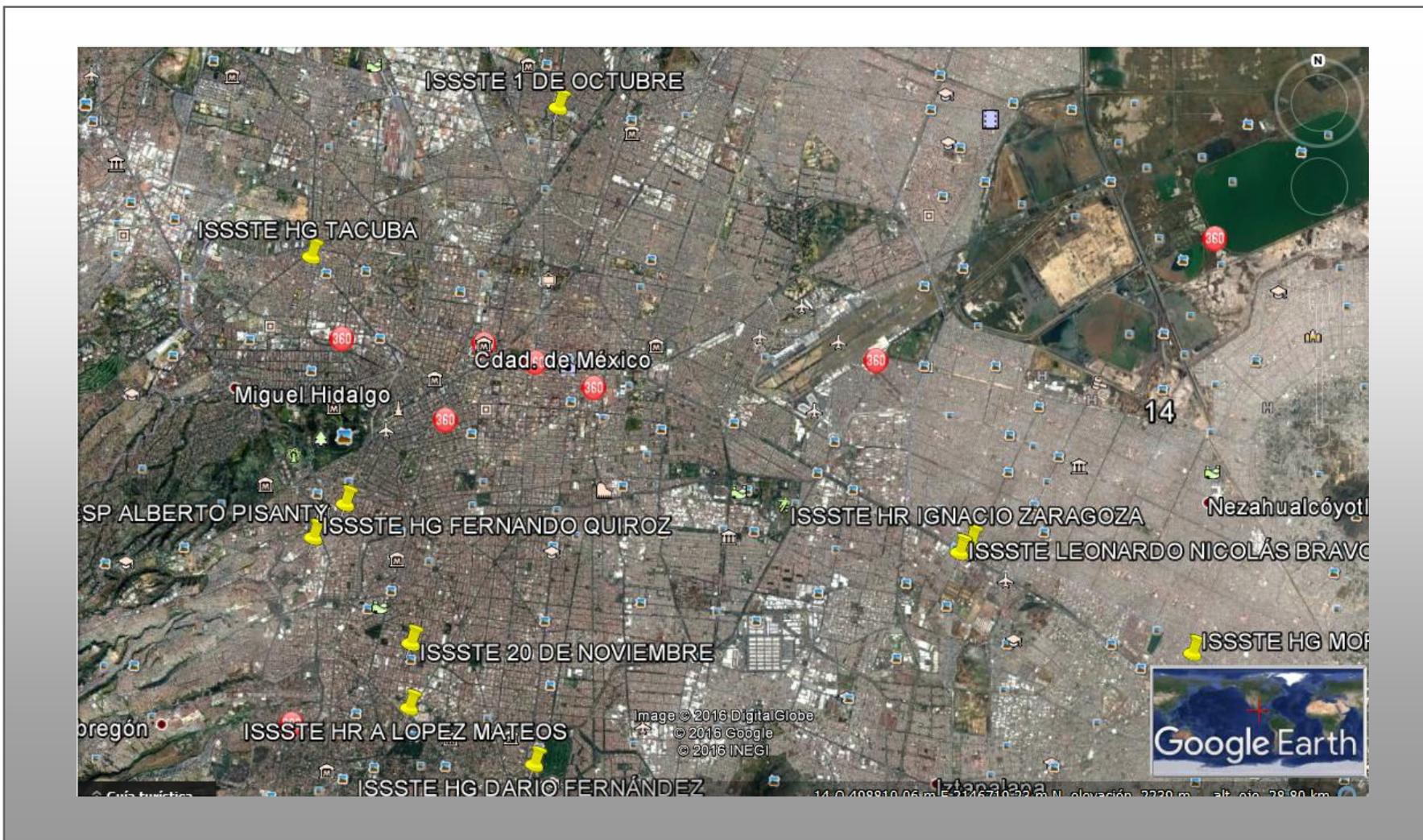


Figura 8. Mapa de localización de los hospitales seleccionados para el Caso de Estudio ubicados en CDMX

Fuente: Elaboración propia mediante datos de la empresa desde Google Earth

3.2.5 Detalle de las rutas de distribución y/o recolección

Actualmente se tienen 24 rutas de distribución y/o recolección para atender los 80 hospitales del ISSSTE.

Se tienen dos premisas para el cálculo de los tiempos por cada ruta:

- Para el cálculo de los **tiempos de descarga / carga y holguras** se consideraron 60 minutos para hospitales de medio a poco productivos y 90 minutos para hospitales con alta productividad, ya que la entrega se realiza a detalle. Además, siempre se están considerando 30 minutos para liquidación del viaje al final de cada ruta.
- Para el cálculo de la **duración total del viaje** se considera la sumatoria del tiempo de recorrido y los tiempos de descarga / carga y holguras.

A continuación se presenta el detalle de cada ruta donde se especifica la siguiente información:

- tipo de unidad vehicular asignada
- número de personas que ejecutan la ruta
- días en los que se lleva a cabo la ruta
- mapa con el detalle del recorrido partiendo y finalizando en el Centro de Distribución (CD) y/o Centro Recolector (CR)
- detalle de los hospitales que conforman la ruta ordenados de acuerdo a la secuencia del recorrido
- tiempos de recorrido en minutos
- tiempos de carga / descarga más holgura de acuerdo a las premisas anteriormente definidas
- duración total del viaje en minutos
- distancia total del viaje en kilómetros

Detalle de la Ruta 1:

Se tiene una camioneta de 3.5 toneladas y una persona asignada para hacer el recorrido de la Ruta 1 los días lunes, miércoles y viernes, a continuación su detalle:

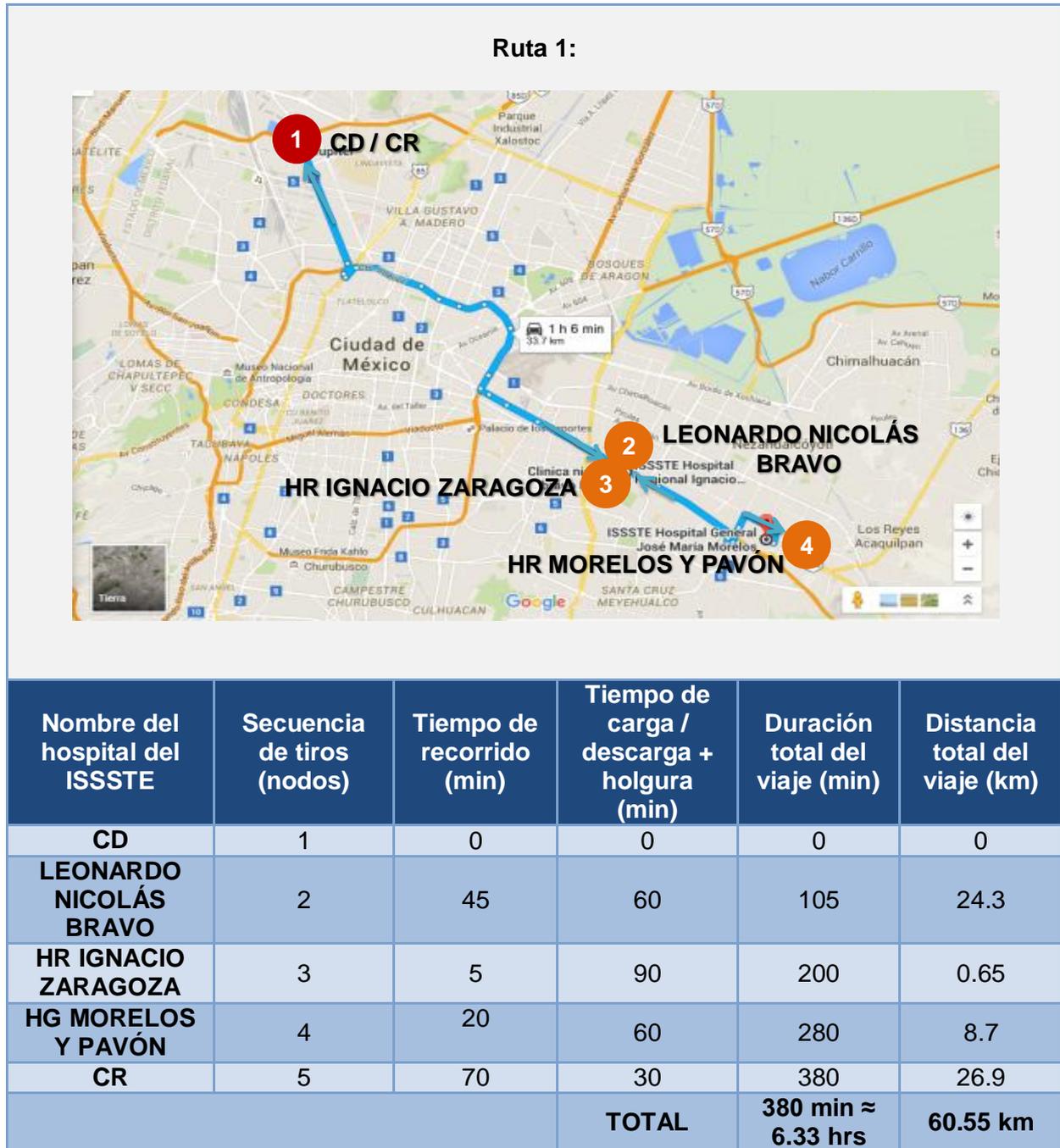


Tabla 6. Detalle de la ruta 1 de distribución / recolección

Fuente: Elaboración propia mediante datos de la empresa

Detalle de la Ruta 2:

Se tiene una camioneta de 3.5 toneladas y una persona asignada para hacer el recorrido de la Ruta 2 los días miércoles y viernes, a continuación su detalle:

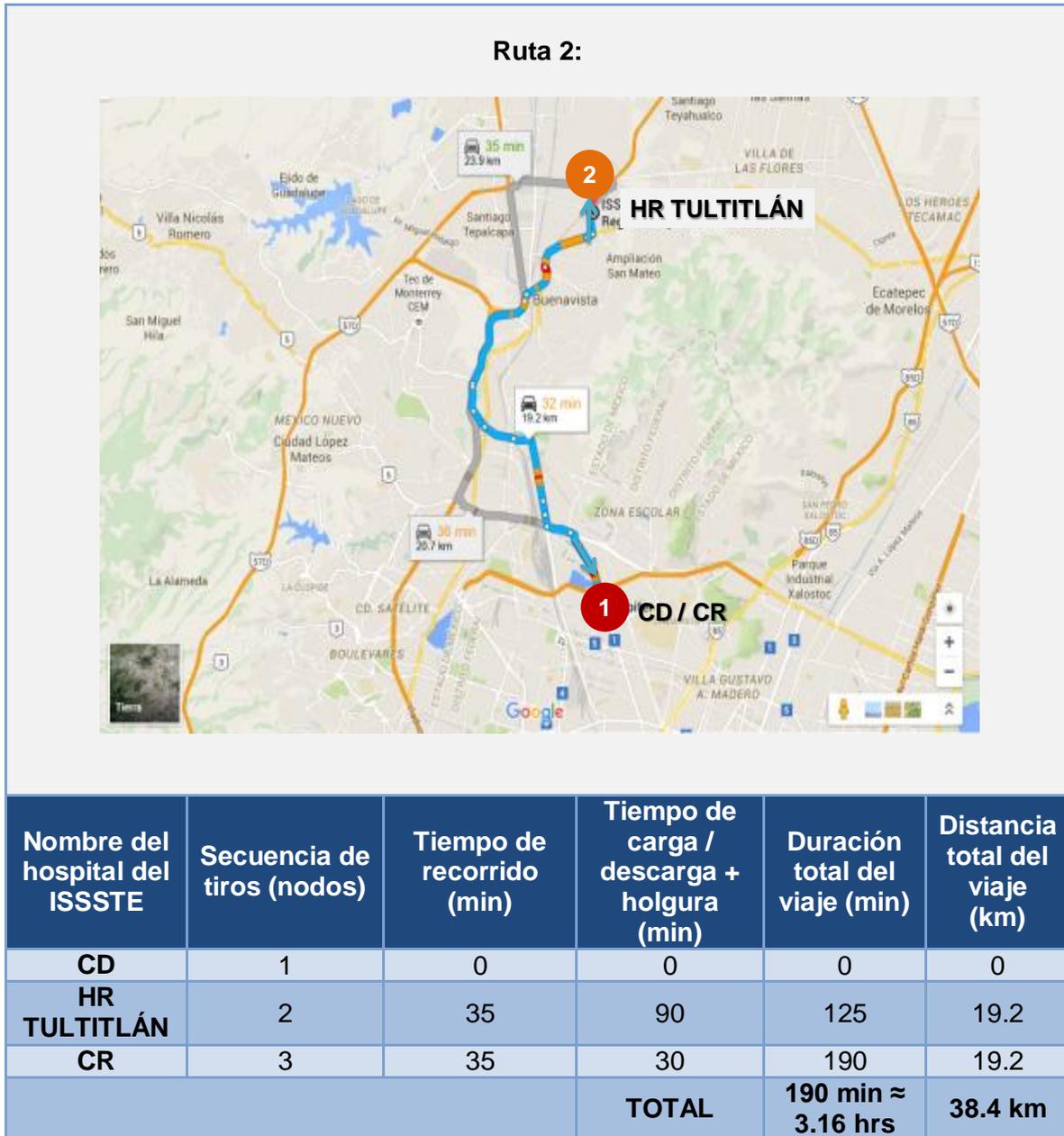


Tabla 7. Detalle de la ruta 2 de distribución / recolección

Fuente: Elaboración propia mediante datos de la empresa

Detalle de la Ruta 3:

Se tiene una Eurovan con capacidad de 2.5 toneladas aproximadamente y una persona asignada para hacer el recorrido de la Ruta 3 los días lunes, a continuación su detalle:

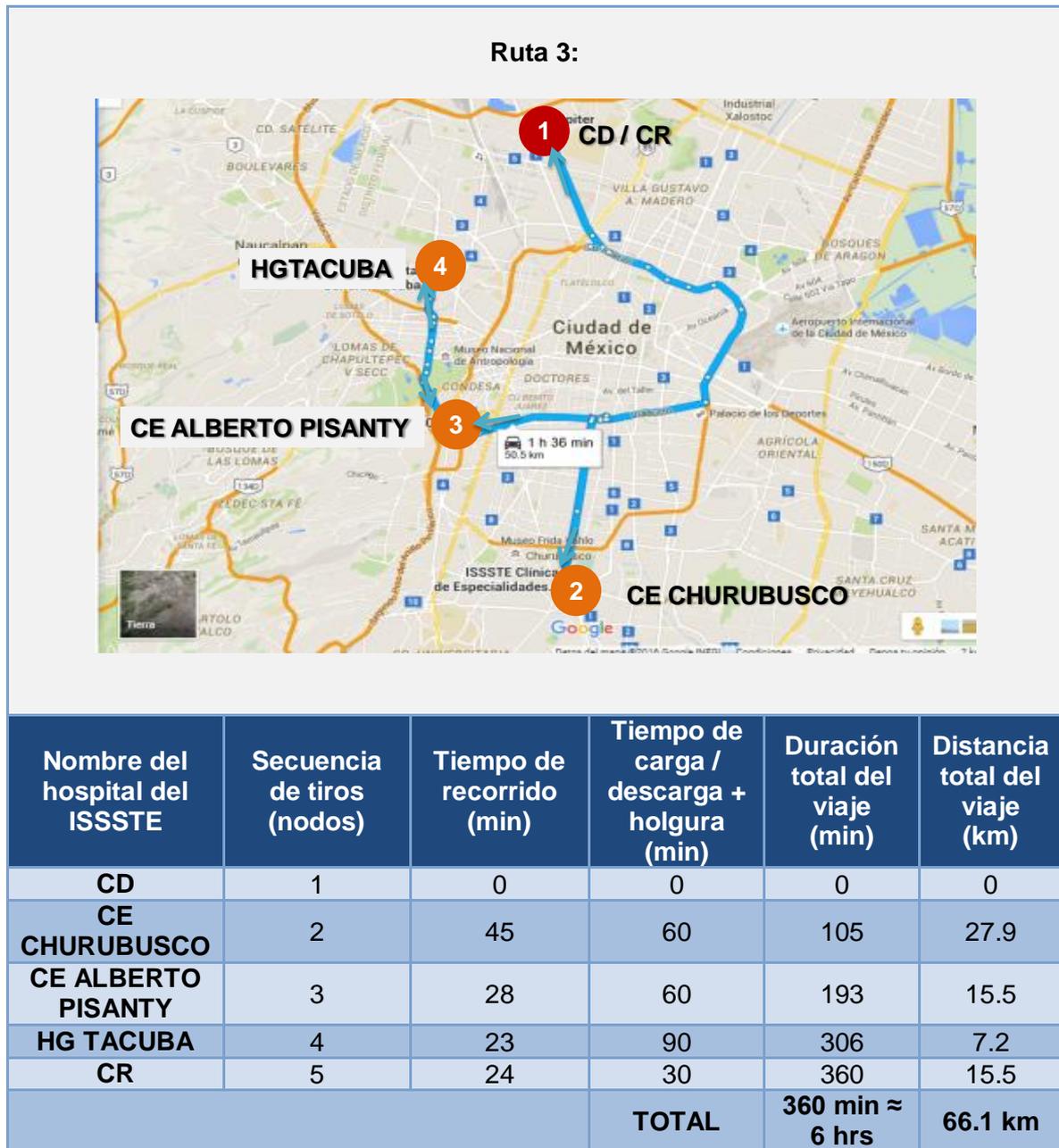
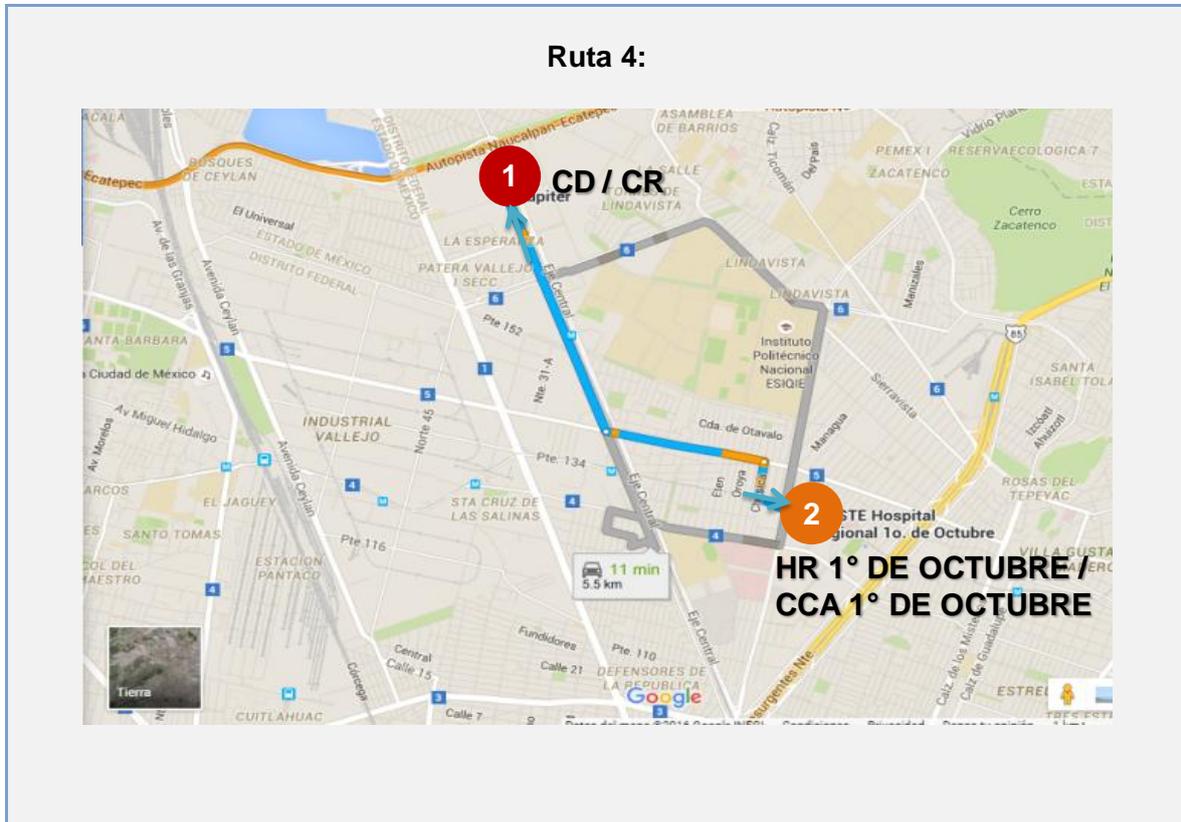


Tabla 8. Detalle de la ruta 3 de distribución / recolección

Fuente: Elaboración propia mediante datos de la empresa

Detalle de la Ruta 4:

Se tiene una camioneta de 3.5 toneladas y una persona asignada para hacer el recorrido de la Ruta 4 los días martes y jueves, a continuación su detalle:



Nombre del hospital del ISSSTE	Secuencia de tiros (nodos)	Tiempo de recorrido (min)	Tiempo de carga / descarga + holgura (min)	Duración total del viaje (min)	Distancia total del viaje (km)
CD	1	0	0	0	0
HR 1° DE OCTUBRE	2	10	90	100	3.9
CCA 1° DE OCTUBRE	3	0	60	160	0
CR	4	10	30	200	3.9
			TOTAL	200 min ≈ 3.33 hrs	7.8

Tabla 9. Detalle de la ruta 4 de distribución / recolección

Fuente: Elaboración propia mediante datos de la empresa

Detalle de la Ruta 5:

Se tiene una camioneta de 3.5 toneladas y una persona asignada para hacer el recorrido de la Ruta 5 los días lunes, miércoles y viernes, a continuación su detalle:

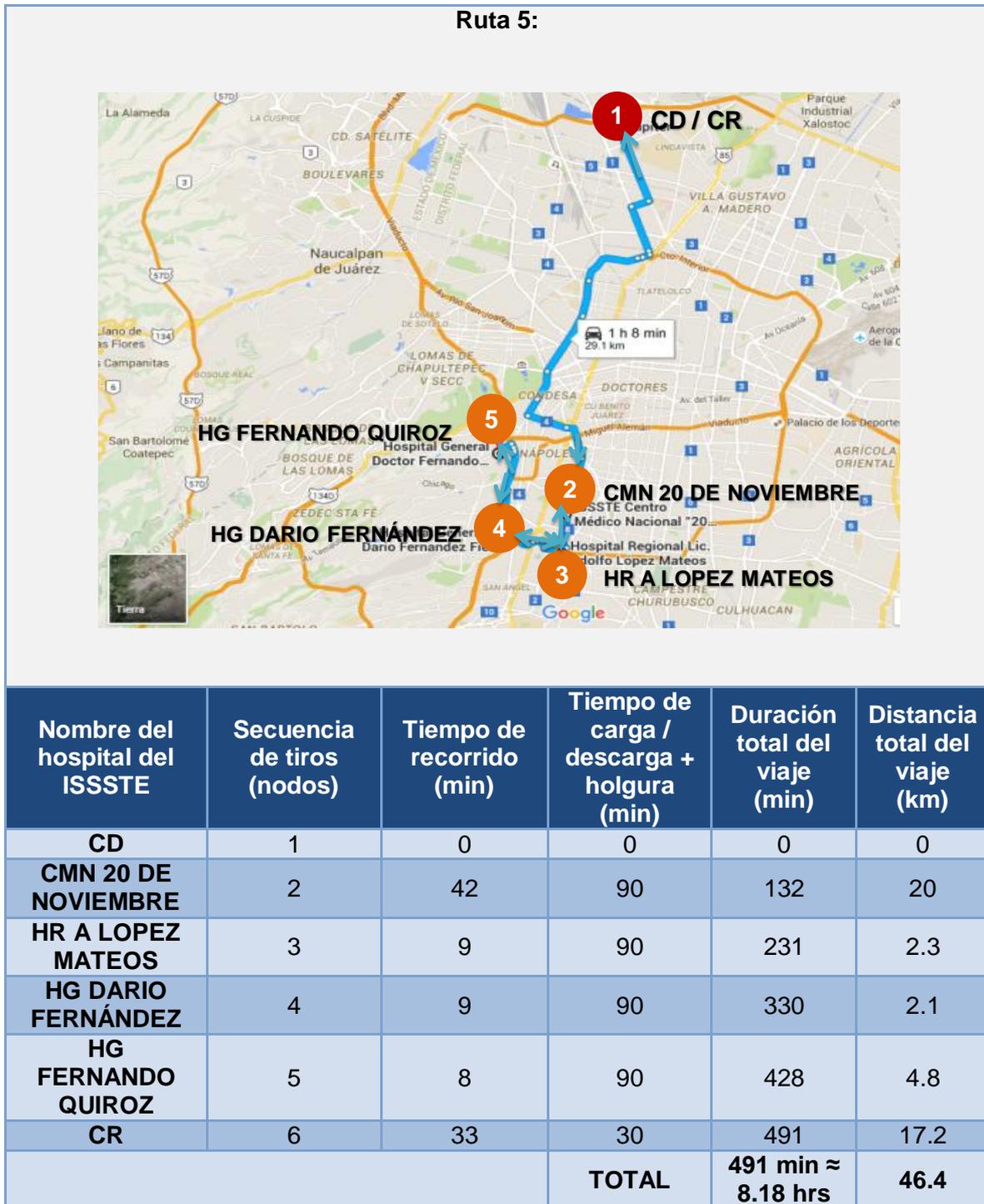


Tabla 10. Detalle de la ruta 5 de distribución / recolección

Fuente: Elaboración propia mediante datos de la empresa

Detalle de la Ruta 6:

Se tiene una Eurovan con capacidad de 2.5 toneladas aproximadamente y una persona asignada para hacer el recorrido de la Ruta 6 los días martes, a continuación su detalle:



Tabla 11. Detalle de la ruta 6 de distribución / recolección

Fuente: Elaboración propia mediante datos de la empresa

Detalle de la Ruta 7:

Se tiene una camioneta de 3.5 toneladas y una persona asignada para hacer el recorrido de la Ruta 7 los días martes, a continuación su detalle:

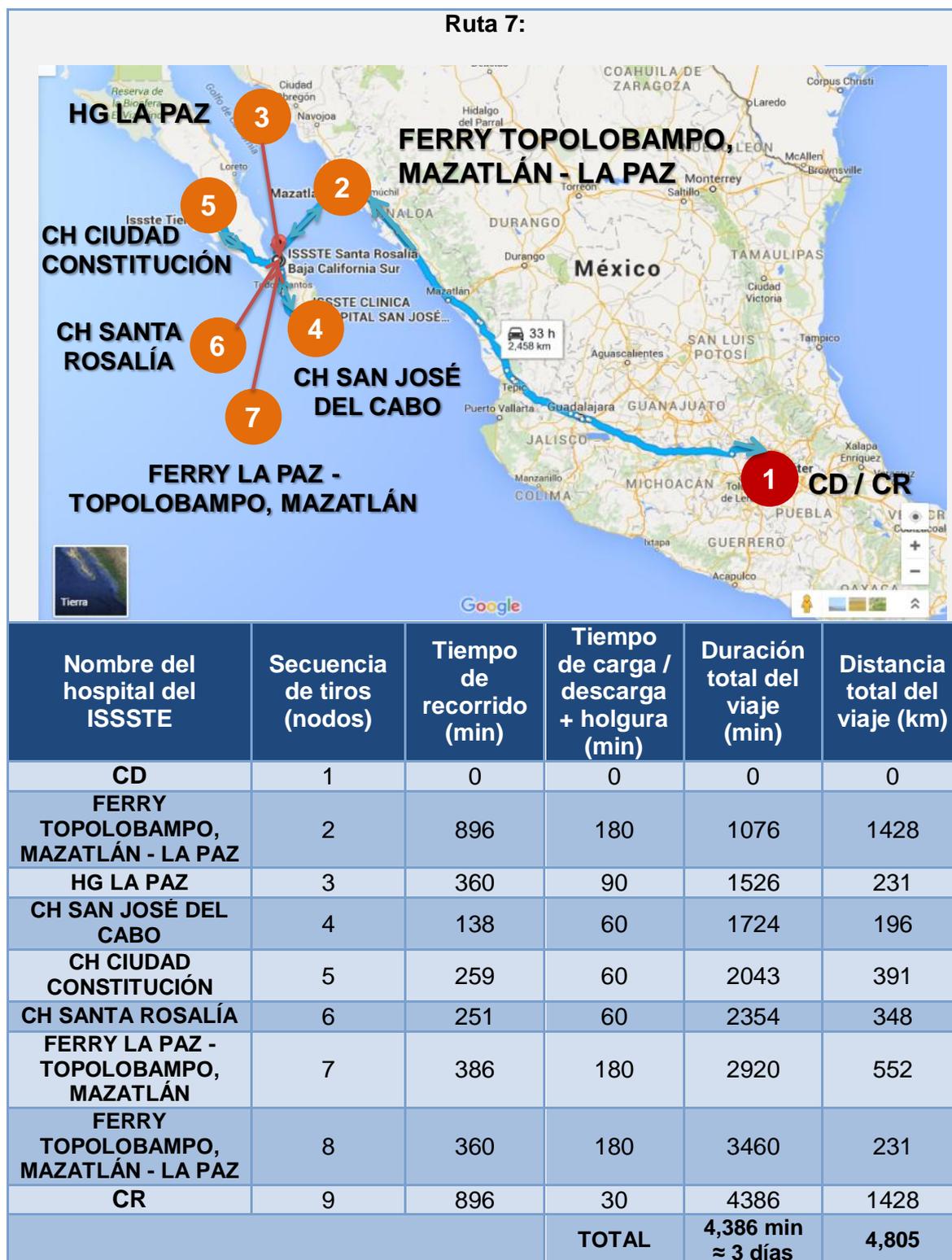


Tabla 12. Detalle de la ruta 7 de distribución / recolección

Fuente: Elaboración propia mediante datos de la empresa

Detalle de la Ruta 8:

Se tiene una camioneta de 3.5 toneladas y una persona asignada para hacer el recorrido de la Ruta 8 los días martes, a continuación su detalle:

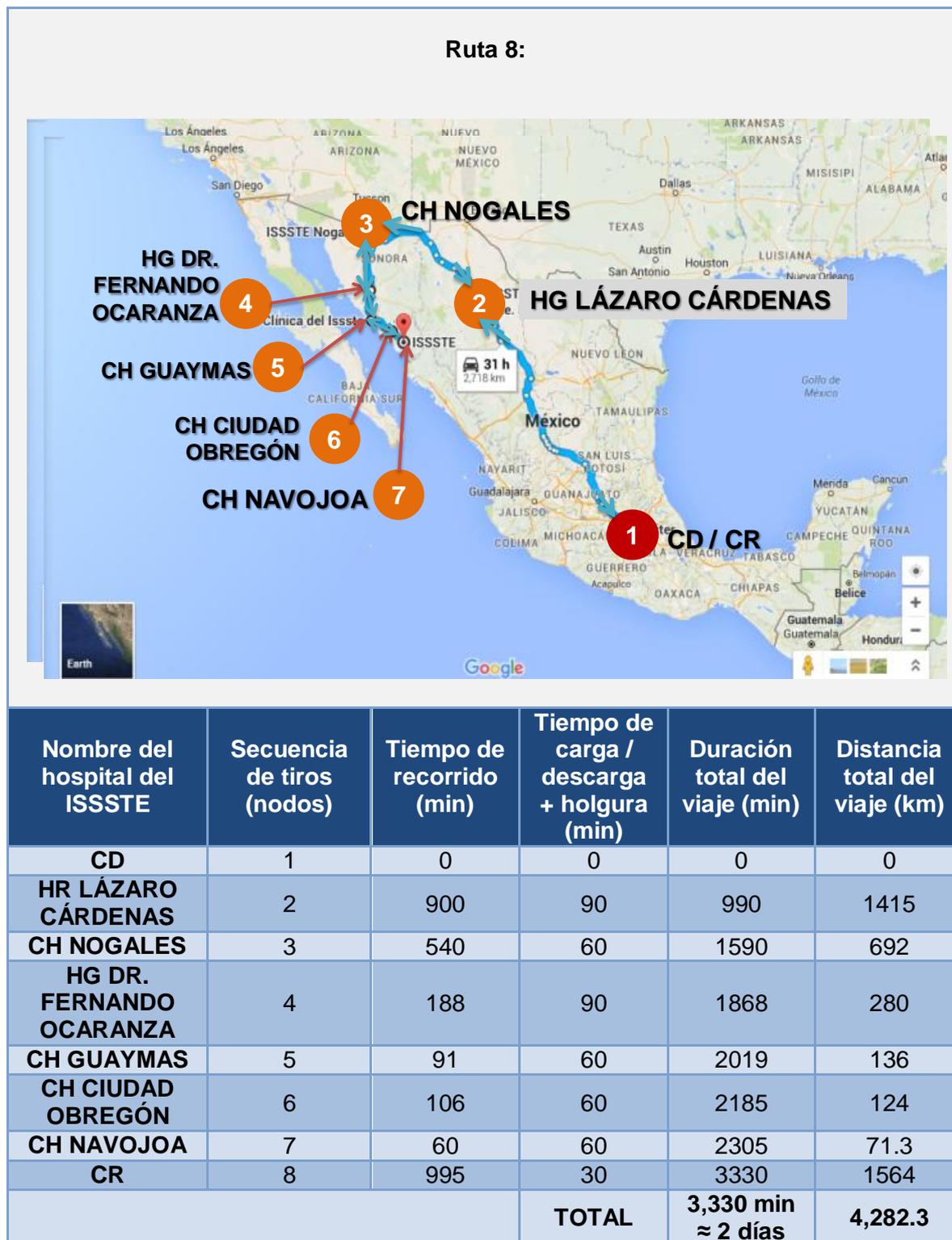


Tabla 13. Detalle de la ruta 8 de distribución / recolección

Fuente: Elaboración propia mediante datos de la empresa

Detalle de la Ruta 9:

Se tiene una Eurovan con capacidad de 2.5 toneladas aproximadamente y una persona asignada para hacer el recorrido de la Ruta 9 los días jueves, a continuación su detalle:



Tabla 14. Detalle de la ruta 9 de distribución / recolección

Fuente: Elaboración propia mediante datos de la empresa

Detalle de la Ruta 10:

Se tiene una Eurovan con capacidad de 2.5 toneladas aproximadamente y una persona asignada para hacer el recorrido de la Ruta 10 los días miércoles, a continuación su detalle:



Tabla 15. Detalle de la ruta 10 de distribución / recolección

Fuente: Elaboración propia mediante datos de la empresa

Detalle de la Ruta 11:

Se tiene una Eurovan con capacidad de 2.5 toneladas aproximadamente y una persona asignada para hacer el recorrido de la Ruta 11 los días miércoles, a continuación su detalle:

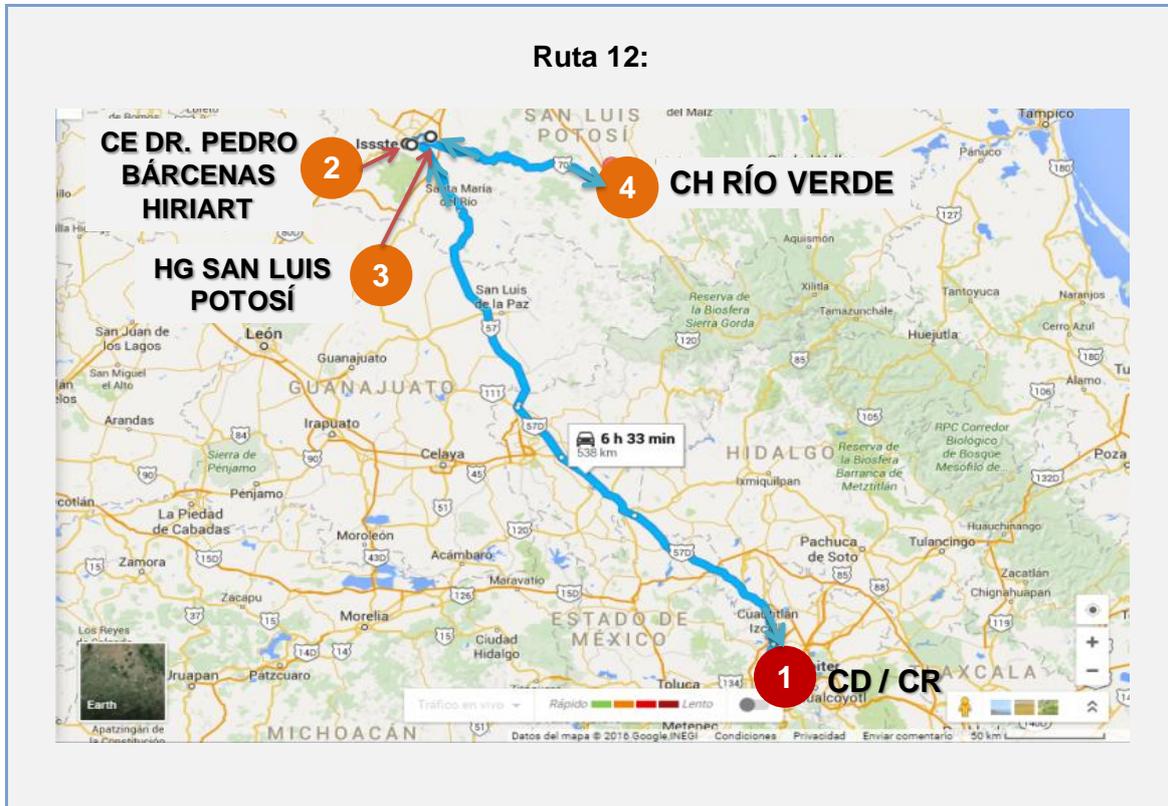


Tabla 16. Detalle de la ruta 11 de distribución / recolección

Fuente: Elaboración propia mediante datos de la empresa

Detalle de la Ruta 12:

Se tiene una Eurovan con capacidad de 2.5 toneladas aproximadamente y una persona asignada para hacer el recorrido de la Ruta 12 los días viernes, a continuación su detalle:



Nombre del hospital del ISSSTE	Secuencia de tiros (nodos)	Tiempo de recorrido (min)	Tiempo de carga / descarga + holgura (min)	Duración total del viaje (min)	Distancia total del viaje (km)
CD	1	0	0	0	0
CE DR. PEDRO BÁRCENAS HIRIART	2	253	60	313	392
HG SAN LUIS POTOSÍ	3	4	90	407	3
CH RÍO VERDE	4	136	60	603	142
CR	5	360	30	993	500
			TOTAL	993 min ≈ 16.55 hrs	1,037

Tabla 17. Detalle de la ruta 12 de distribución / recolección

Fuente: Elaboración propia mediante datos de la empresa

Detalle de la Ruta 13:

Se tiene una Eurovan con capacidad de 2.5 toneladas aproximadamente y una persona asignada para hacer el recorrido de la Ruta 13 los días viernes, a continuación su detalle:

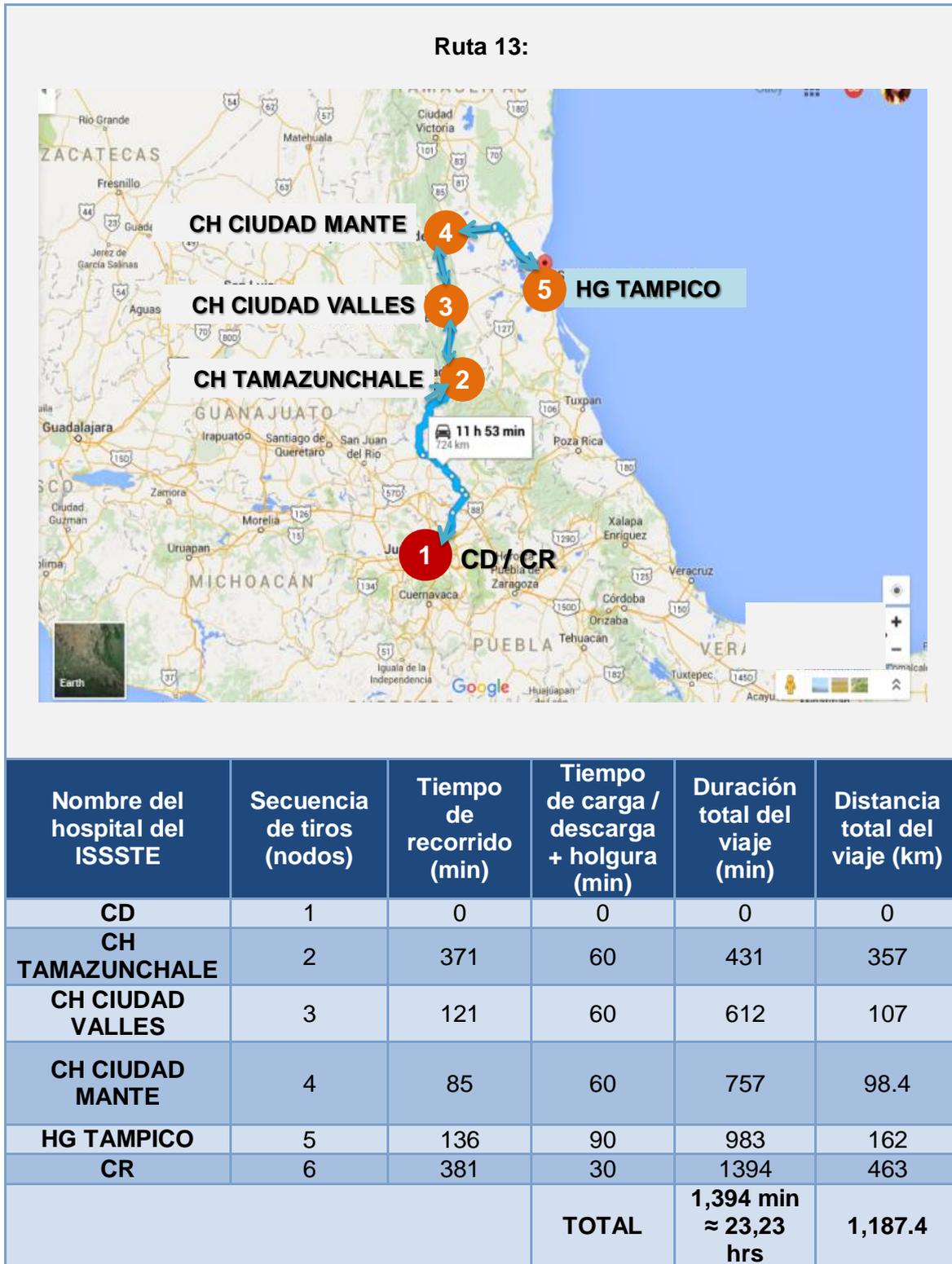


Tabla 18. Detalle de la ruta 13 de distribución / recolección

Fuente: Elaboración propia mediante datos de la empresa

Detalle de la Ruta 14:

Se tiene una Eurovan con capacidad de 2.5 toneladas aproximadamente y una persona asignada para hacer el recorrido de la Ruta 14 los días martes, a continuación su detalle:



Nombre del hospital del ISSSTE	Secuencia de tiros (nodos)	Tiempo de recorrido (min)	Tiempo de carga / descarga + holgura (min)	Duración total del viaje (min)	Distancia total del viaje (km)
CD	1	0	0	0	0
HG QUERETARO	2	141	90	231	201
CECIS GUADALAJARA	3	240	60	531	353
CR	4	398	30	959	584
			TOTAL	959 min ≈ 15,98 hrs	1,138

Tabla 19. Detalle de la ruta 14 de distribución / recolección

Fuente: Elaboración propia mediante datos de la empresa

Detalle de la Ruta 15:

Se tiene una camioneta de 3.5 toneladas y una persona asignada para hacer el recorrido de la Ruta 15 los días martes, a continuación su detalle:



Tabla 20. Detalle de la ruta 15 de distribución / recolección

Fuente: Elaboración propia mediante datos de la empresa

Detalle de la Ruta 16:

Se tiene una Eurovan con capacidad de 2.5 toneladas aproximadamente y una persona asignada para hacer el recorrido de la Ruta 16 los días lunes, a continuación su detalle:



Tabla 21. Detalle de la ruta 16 de distribución / recolección

Fuente: Elaboración propia mediante datos de la empresa

Detalle de la Ruta 17:

Se tiene una Eurovan con capacidad de 2.5 toneladas aproximadamente y una persona asignada para hacer el recorrido de la Ruta 17 los días lunes, a continuación su detalle:

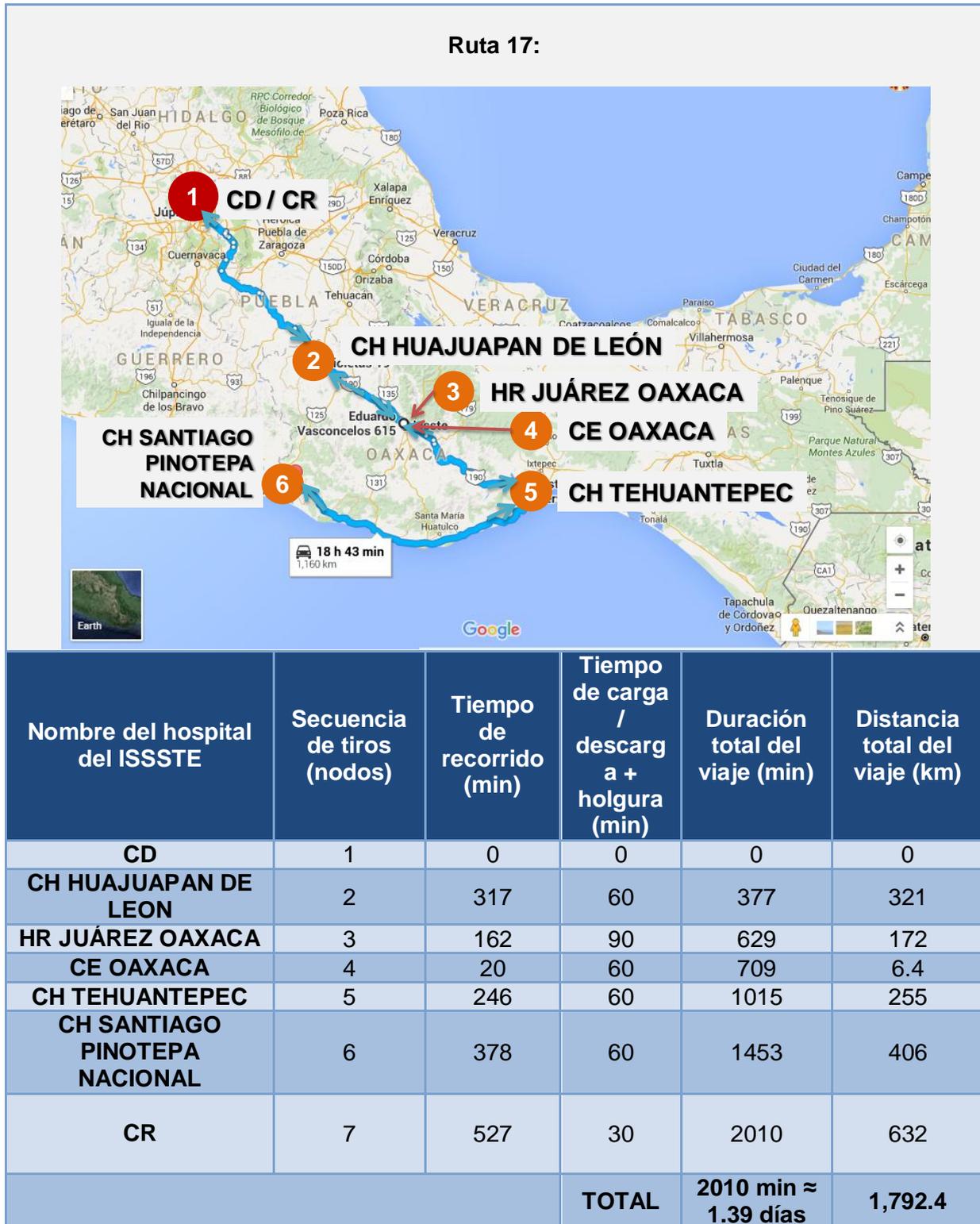


Tabla 22. Detalle de la ruta 17 de distribución / recolección

Fuente: Elaboración propia mediante datos de la empresa

Detalle de la Ruta 18:

Se tiene una Eurovan con capacidad de 2.5 toneladas aproximadamente y una persona asignada para hacer el recorrido de la Ruta 18 los días viernes, a continuación su detalle:

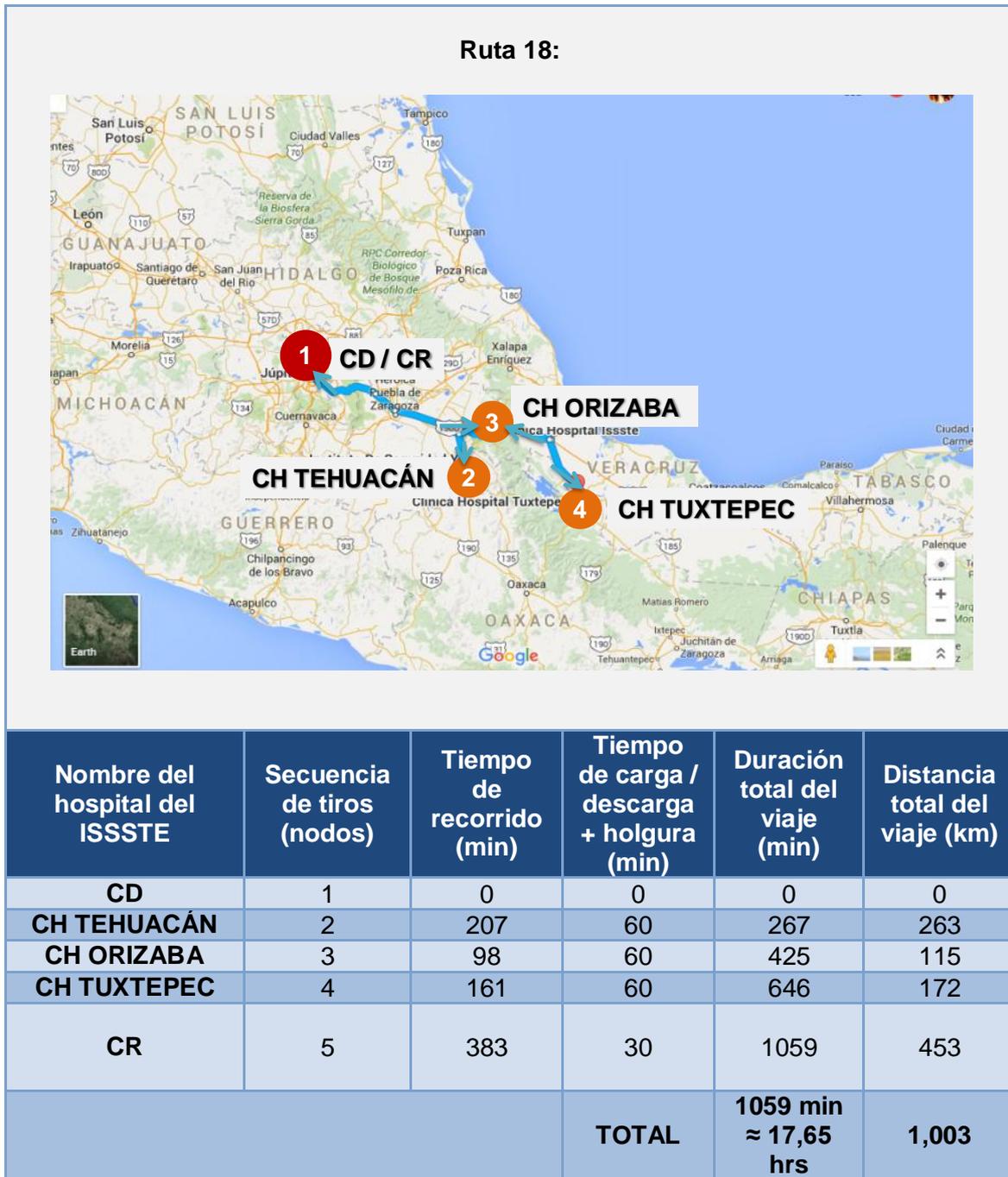


Tabla 23. Detalle de la ruta 18 de distribución / recolección

Fuente: Elaboración propia mediante datos de la empresa

Detalle de la Ruta 19:

Se tiene una Eurovan con capacidad de 2.5 toneladas aproximadamente y una persona asignada para hacer el recorrido de la Ruta 19 los días martes, a continuación su detalle:

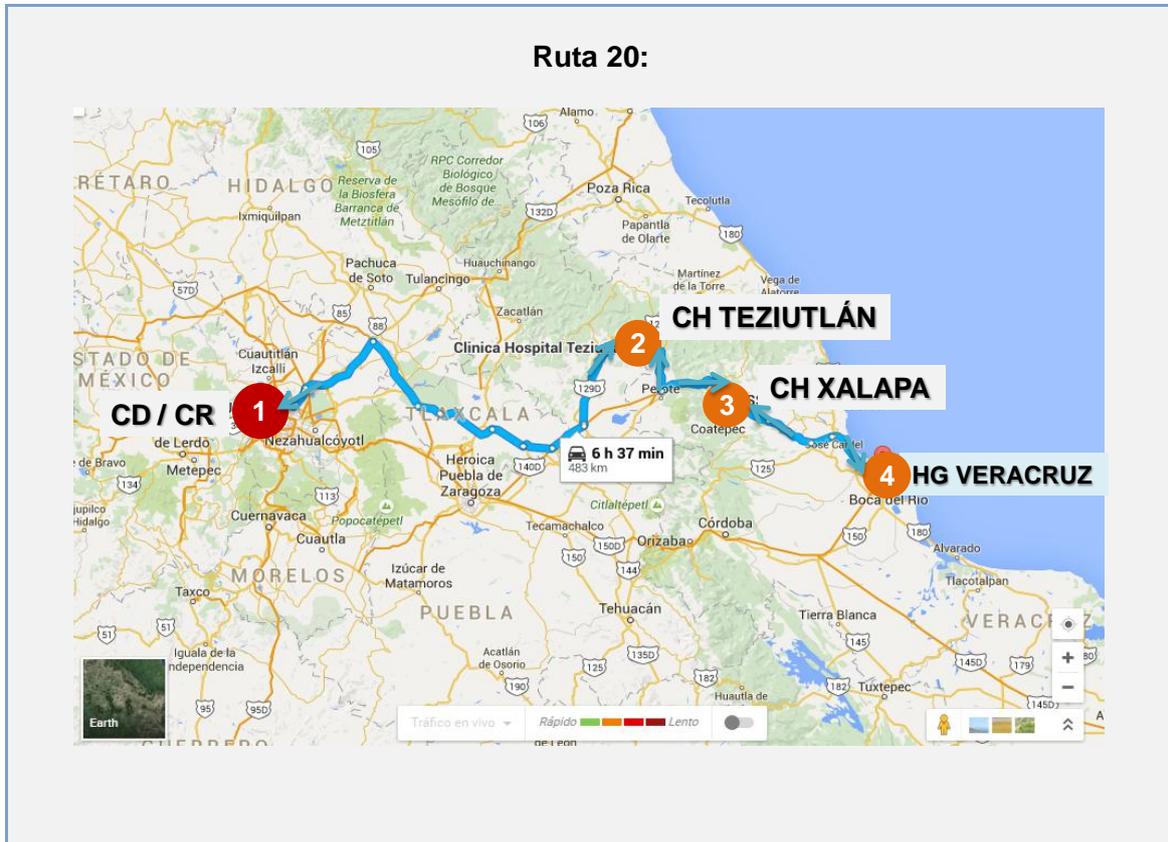


Tabla 24. Detalle de la ruta 19 de distribución / recolección

Fuente: Elaboración propia mediante datos de la empresa

Detalle de la Ruta 20:

Se tiene una Eurovan con capacidad de 2.5 toneladas aproximadamente y una persona asignada para hacer el recorrido de la Ruta 20 los días viernes, a continuación su detalle:



Nombre del hospital del ISSSTE	Secuencia de tiros (nodos)	Tiempo de recorrido (min)	Tiempo de carga / descarga + holgura (min)	Duración total del viaje (min)	Distancia total del viaje (km)
CD	1	0	0	0	0
CH TEZIUTLÁN	2	202	60	262	285
CH XALAPA	3	93	60	415	89
HG VERACRUZ	4	102	90	607	108
CR	5	322	30	959	413
TOTAL				959 min ≈ 15,98 hrs	895

Tabla 25. Detalle de la ruta 20 de distribución / recolección

Fuente: Elaboración propia mediante datos de la empresa

Detalle de la Ruta 21:

Se tiene una Eurovan con capacidad de 2.5 toneladas aproximadamente y una persona asignada para hacer el recorrido de la Ruta 21 los días martes, a continuación su detalle:

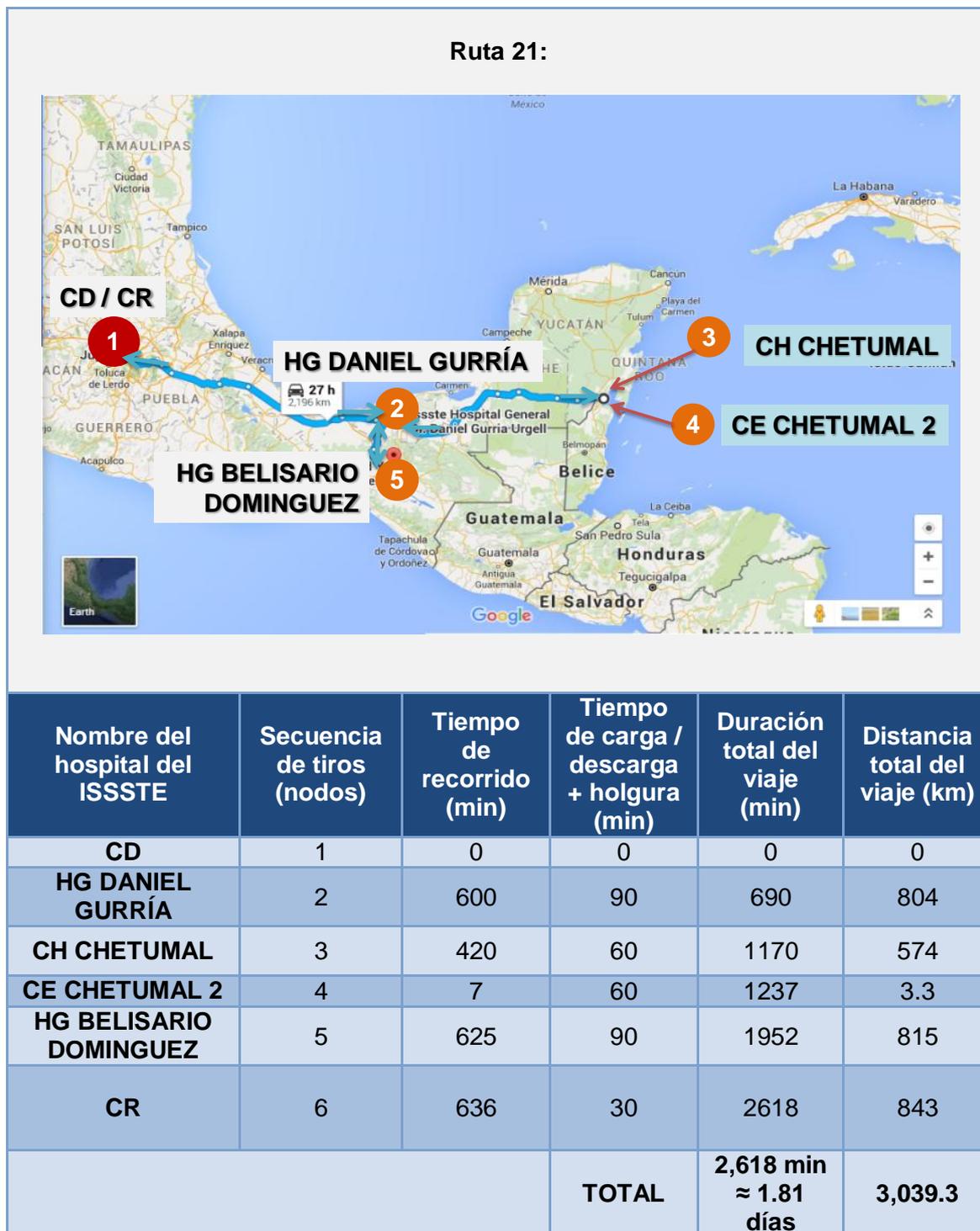


Tabla 26. Detalle de la ruta 21 de distribución / recolección

Fuente: Elaboración propia mediante datos de la empresa

Detalle de la Ruta 22:

Se tiene una camioneta de 3.5 toneladas y una persona asignada para hacer el recorrido de la Ruta 22 los días martes, a continuación su detalle:



Tabla 27. Detalle de la ruta 22 de distribución / recolección

Fuente: Elaboración propia mediante datos de la empresa

Detalle de la Ruta 23:

Se tiene una Eurovan con capacidad de 2.5 toneladas aproximadamente y una persona asignada para hacer el recorrido de la Ruta 23 los días viernes, a continuación su detalle:



Tabla 28. Detalle de la ruta 23 de distribución / recolección

Fuente: Elaboración propia mediante datos de la empresa

Detalle de la Ruta 24:

Se tiene una Eurovan con capacidad de 2.5 toneladas aproximadamente y una persona asignada para hacer el recorrido de la Ruta 24 los días viernes, a continuación su detalle:

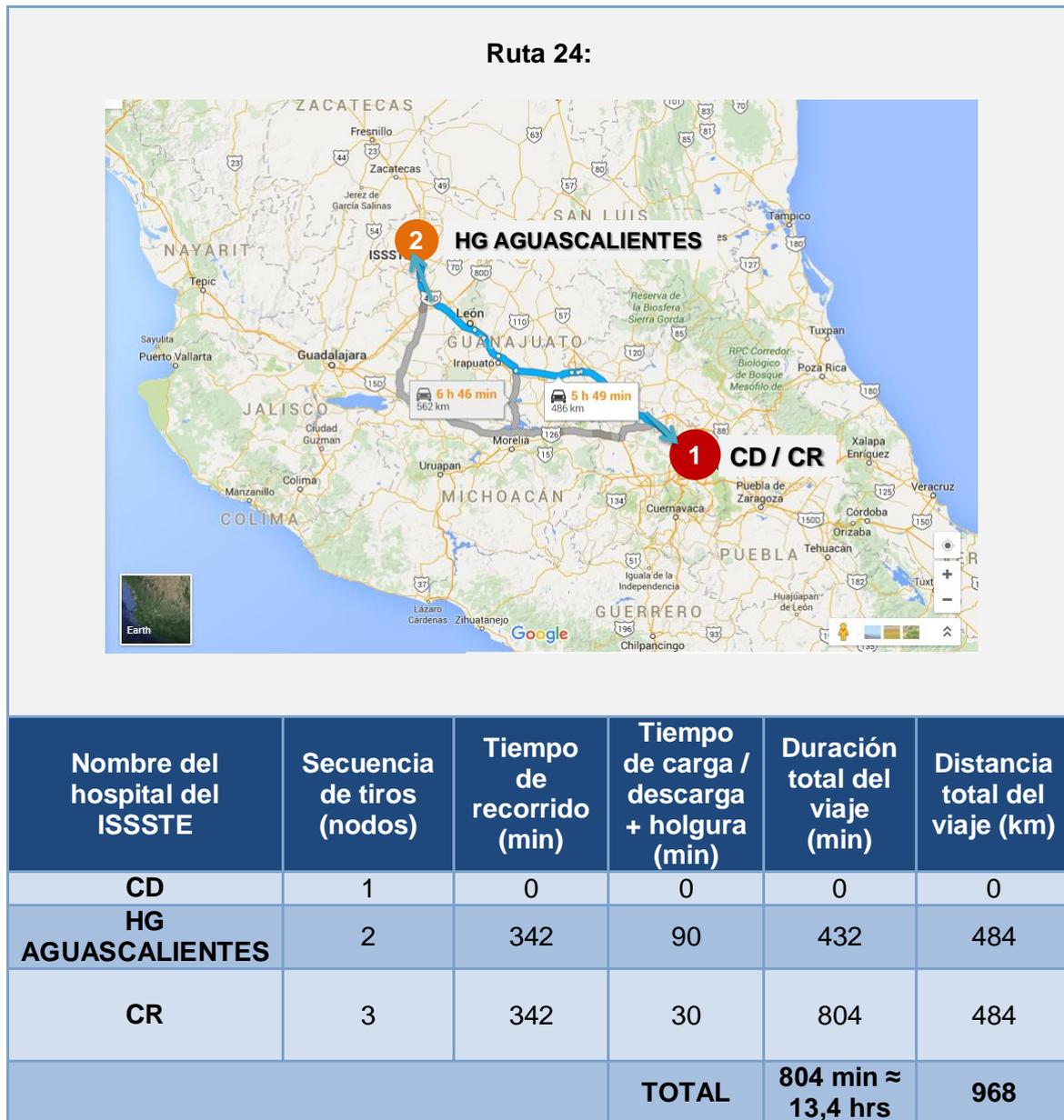


Tabla 29. Detalle de la ruta 24 de distribución / recolección

Fuente: Elaboración propia mediante datos de la empresa

3.2.6 Descripción de la flota vehicular

Se tiene la siguiente flota vehicular para realizar la distribución de los insumos para la salud:

Vehículo Tipo I:



Descripción	Eurovan - Caja cerrada
Capacidad de carga (kgs)	2,680
Largo (m)	4.78
Ancho (m)	1.84
Altura (m)	1.94

Tabla 30. Especificaciones del vehículo Tipo I para la distribución y/o recolección

Fuente: Elaboración propia mediante datos de la empresa

Vehículo Tipo II:



Descripción	Camioneta 3.5 ton - Caja cerrada
Capacidad de carga (kgs)	hasta 3,600
Largo (m)	3.05
Ancho (m)	2.34
Altura (m)	1.96

Tabla 31. Especificaciones del vehículo Tipo II para la distribución y/o recolección

Fuente: Elaboración propia mediante datos de la empresa

Para cada una de las 24 rutas de distribución / recolección se tiene una asignación por tipo de vehículo debido a los volúmenes promedio que se distribuyen a cada hospital y restricciones de accesibilidad, es decir, en 8 de las rutas se utilizan camionetas de 3.5 toneladas y en 16 se utilizan Eurovan's, como se muestra en la siguiente tabla:

No. de ruta	Tipo de vehículo asignado
1,2,4,5,7,8, 15 y 22	Camioneta 3.5 ton (Vehículo Tipo II)
3,6,9-14, 16-21, 23 y 24	Eurovan (Vehículo Tipo I)

Tabla 32. Tipos de vehículos utilizados para cada ruta

Fuente: Elaboración propia mediante datos de la empresa

MARES CORP cuenta con 6 camionetas de 3.5 ton y 11 Eurovan's para recorrer 24 rutas de distribución / recolección.

Cada unidad está asignada a cada ruta a lo largo de la semana de acuerdo a la tablas 33 y 34 que se detallan a continuación:

Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Total rutas cubiertas	Total de camionetas de 3.5 toneladas
Ruta 1	Ruta 4	Ruta 1	Ruta 4	Ruta 1	2	1
Ruta 5	Ruta 15	Ruta 5		Ruta 5	2	1
Ruta 2		Ruta 2		Ruta 2	1	1
	Ruta 7				1	1
	Ruta 8				1	1
	Ruta 22				1	1
				Total	8	6

Tabla 33. Asignación de camionetas de 3.5 toneladas por ruta

Fuente: Elaboración propia mediante datos de la empresa

Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Total de rutas cubiertas	Total de Eurovan
	Ruta 6				1	1
Ruta 3		Ruta 11			2	1
Ruta 16		Ruta 10			2	1
	Ruta 21				1	1
	Ruta 14		Ruta 9		2	1
	Ruta 19			Ruta 12	2	1
				Ruta 13	1	1
				Ruta 18	1	1
				Ruta 20	1	1
				Ruta 23	1	1
Ruta 17				Ruta 24	2	1
				Total	16	11

Tabla 34. Asignación de Eurovan's por ruta

Fuente: Elaboración propia mediante datos de la empresa

Más adelante se presentan datos que muestran que el requerimiento de unidades se excede cuando existen recolecciones que no se planearon correctamente, en estos casos se recurre a subcontratación de transporte externo.

3.2.7 Descripción de la problemática

A continuación se explica con detalle la problemática que se está presentando en el flujo inverso de mercancía en **MARES CORP** y para la cual se pretende diseñar un algoritmo de solución.

Existen requerimientos para recolectar insumos para la salud y equipos del consumidor (hospitales de ISSSTE) al proveedor (Centro Distribuidor / Recolector de **MARES CORP**) por las siguientes causas:

1. Solicitudes de proveedores

- Los proveedores solicitan recolectar algún lote porque ellos mismos detectaron algún defecto que pone en riesgo la vida del consumidor final, es decir, de los pacientes, a esto se le conoce como "RECALL". Lo anterior detona una solicitud para recolectar ese lote, mismo que puede estar físicamente en el Centro Distribuidor / Recolector (punto origen) o puede estar ubicado en algún almacén de un hospital del ISSSTE (consumidor) a lo largo de la República Mexicana, inclusive puede estar en tránsito,

de ahí la necesidad de recuperar los insumos para la salud o equipos de vuelta al Centro Distribuidor / Recolector.

Este tipo de incidentes son atípicos presentándose de cuatro a cinco veces por año, inclusive, no habiendo lotes defectuosos por Norma **(ISO 9001: 2008, punto 8.3 Control de producto no conforme)** se puede solicitar un "Recall" de prueba como evidencia de que la empresa es capaz de realizar esta práctica ante cualquier contingencia

- Otro caso que se presenta con solicitudes de proveedores es que éstos pueden "prestar" material. Por ejemplo: para una cirugía de corazón se requieren diferentes medidas de válvulas para el corazón, el proveedor de válvulas presta a MARES CORP cinco tipos de válvulas aórticas que es lo que conforma un kit valvular, el doctor solamente ocupa una válvula de las cinco por las medidas del corazón del paciente y características del padecimiento, el resto (que no se utilizó) debe ser devuelto al Centro Distribuidor / Recolector, para que a su vez, se lo devuelvan al proveedor, de ahí la necesidad de devolver lo que no se ocupó. Por lo general, esto ocurre con material de cardiología o de alto valor.

2. Solicitudes de clientes

- En ocasiones el cliente detecta que algún equipo quirúrgico no está funcionando correctamente, por lo tanto, solicita sea regresado al Centro Distribuidor / Recolector para su reparación, de ahí la necesidad de programar una recolección.
- El cliente puede solicitar algún requerimiento de recolección debido a que el centro está próximo a cerrar, en remodelación o porque se detectó que existe material que se utilizaba para un cierto servicio que ya no se brinda a los usuarios. El Área de atención a clientes recibe directamente este tipo de solicitudes de los clientes y a su vez esta área es quien notifica al Área de cadena de suministro para su gestión.

Ejemplo: Se cerró el servicio de ginecología en un hospital del ISSSTE del Estado de Guerrero y los insumos para la salud o equipos que se utilizaban en esa área deben devolverse al Centro Distribuidor / Recolector.

3. Solicitudes del Área de Planeación

- El Área de Planeación es quien detona el envío de insumos o equipos para la salud y esa misma área es quien detecta que se deben hacer devoluciones de materiales al Centro Distribuidor / Recolector con las siguientes características:
 - Material excedente
 - Material caduco o próximo a caducar
 - Material obsoleto o discontinuado
 - Material que se tiene que redistribuir en otro hospital del ISSSTE. *Ejemplo:* Un hospital del ISSSTE en la Ciudad de México (CDMX) Zona poniente requiere un determinado ítem con ciertas características que solamente otro hospital en la parte oriente de la CDMX le puede "prestar" para satisfacer la

necesidad de urgencia del paciente, entonces se realiza un movimiento de traspaso entre hospitales.

Los tres tipos de solicitudes anteriormente descritos en muchas ocasiones no se pueden evitar, se podría minimizar la cantidad de devoluciones si se lograra que cada ente que solicita una devolución optimizara sus inventarios, sin embargo, no ocurre así y entonces existe la presencia de solicitudes de devolución que afectan directamente a la empresa y personal que en ella labora de la siguiente manera:

- Al no contar con un sistema de control y rastreabilidad de ordenes de recolección, es difícil saber cuál es el estatus de los diferentes tipos de recolecciones que se pueden dar y solo se da seguimiento con información que se obtiene de la comunicación de los involucrados vía correos electrónicos. Ante tal situación, es importante tener un sistema que proporcione información en tiempo real, debido a que la gran mayoría de los insumos para la salud y equipos son muy costosos y además, en contadas ocasiones se requiere reportar un seguimiento diario a los proveedores como en un “RECALL”.
- Al realizar recolecciones fuera de tiempo se presentan penalizaciones económicas.
Ejemplo: Un equipo de hemodiálisis tiene que ser devueltos al Centro Distribuidor / Recolector para reparación y como éste no es recolectado en tiempo para su pronta restauración, el Hospital del ISSSTE en cuestión deja de dializar pacientes por la falta de equipo, lo que conlleva a penalizaciones económicas por incumplimiento de contrato e inclusive se pierde la confianza en la empresa.
- Como las recolecciones se realizan sobre la marcha se llegan a dar los casos que para ciertas rutas los choferes se encuentren en las siguientes situaciones:
 - Carga excesiva de trabajo, es decir, además de los materiales o equipos que se tengan que entregar se sobre ponen en esa ruta visitas a hospitales para recolectar material que pueden exceder el trabajo del día y generar inconformidades entre los choferes.
 - Falta de comunicación del chofer sobre lo que se tiene que recolectar, es decir, en ocasiones se le llama al chofer vía telefónica para recolectar algo que surgió de imprevisto o que se les había pasado indicarle que lo recolectara, de tal forma que el chofer no cuenta con la documentación pertinente para su correcta recolección y desconoce el material o equipo que se recolectará.
 - Unidades de transporte inadecuadas pues el volumen de las recolecciones excede su capacidad.
- Al no contar con rutas de recolección planificadas se puede incurrir en gastos excesivos de transporte.
- Las actividades que se siguen para recolectar material o equipos son muy diversas y no están correctamente planificadas, lo que puede incurrir en desviaciones de acuerdo a la Norma de Calidad ISO 9001:2008 (**punto 1. Introducción - Enfoque basado en procesos**) pues es imposible documentar esta forma de operar con tantas excepciones y descontrol.

Se observó que MARES CORP no cuenta con un método que le permita ayudar a la planeación de sus rutas ni mucho menos tener visibilidad de las rutas de recolección para todas sus devoluciones, dada esta situación se debe crear un método que permita rutear de

la manera óptima tanto las entregas como las recolecciones que son solicitadas por las causas antes expuestas, cabe mencionar que el modelo que se diseña solamente aplica para 11 hospitales seleccionados que se ubican en la Ciudad de México y se recomienda una segunda fase, aplicar el mismo método para los demás hospitales que se ubican en el resto de los Estados de la República Mexicana.

3.3 Evaluación ex-post de los resultados del sistema

“Evaluar ex-post es juzgar los resultados del sistema; es afirmar e informar si el sistema marcha bien o no, con respecto a los objetivos planteados.” (Ochoa, 1997).

Los centros seleccionados en el Caso de Estudio están asignados a las Rutas 1,3,4 y 5 como se muestra en la siguiente tabla:

Nombre del hospital del ISSSTE	Ruta asignada	Tipo de vehículo asignado
HR 1º de Octubre	4	Camioneta 3.5 toneladas
CA 1º de Octubre	4	Camioneta 3.5 toneladas
CMN 20 de Noviembre	5	Camioneta 3.5 toneladas
CE Churubusco	3	Eurovan (2.5 toneladas aproximadamente)
HG Darío Fernández	5	Camioneta 3.5 toneladas
HG Fernando Quiroz	5	Camioneta 3.5 toneladas
HR A López Mateos	5	Camioneta 3.5 toneladas
HG Morelos y Pavón	1	Camioneta 3.5 toneladas
CE Leonardo Nicolás Bravo	1	Camioneta 3.5 toneladas
CE Alberto Pisanty	3	Eurovan (2.5 toneladas aproximadamente)
HG Tacuba	3	Eurovan (2.5 toneladas aproximadamente)
HR Ignacio Zaragoza	1	Camioneta 3.5 toneladas

Tabla 35. Rutas y vehículos asignados a los hospitales seleccionados para el Caso de Estudio

Fuente: Elaboración propia mediante datos de la empresa

Como se mencionó en el punto 3.2.6 se tienen tanto Vehículos del Tipo I como del Tipo II (Eurovan y Camioneta de 3.5 toneladas) asignados para atender las 24 Rutas de distribución durante la semana, pero se analizó que en el periodo de enero a junio de 2016 se tuvieron requerimientos de recolección de los hospitales (aquellos seleccionados para el

Caso de Estudio) que detonan solicitudes extraordinarias de transporte como se muestra en la siguiente tabla:

Ruta	Total de requerimientos de recolección fuera de ruta (Ene – Jun 2016)	Total de vehículos adicionales requeridos para atender solicitudes de recolecciones (Ene – Jun 2016)	Tipos de vehículos adicionales requeridos para atender solicitudes de recolecciones (Enero – Junio 2016)
Ruta 1	16	3	Camioneta 3.5 toneladas
Ruta 3	6	3	Eurovan
Ruta 4	18	1	Camioneta 3.5 toneladas
Ruta 5	43	3	Camioneta 3.5 toneladas
Total general	83	10	

Tabla 36. Vehículos subcontratados (outsourcing) para atender solicitudes de recolección no planeadas

Fuente: Elaboración propia con datos de la empresa

La tabla 36 muestra que se requirió una flota adicional de 10 unidades vehiculares adicionales, 7 de las cuales fueron camionetas de 3.5 toneladas y 3 Eurovan's, que fueron subcontratadas ocasionando costos adicionales para la empresa, MARES CORP, por no prever estos requerimientos ya que el Área de Distribución no tiene visibilidad de los mismos.

La asignación de vehículos se hace manualmente conforme se presenten los requerimientos y se registran en una hoja de cálculo en Excel que solamente el Área de Distribución va registrando conforme surgen, lo que ocasiona la siguiente problemática:

- Las áreas no tienen visibilidad sobre el estatus de las recolecciones.
- Las recolecciones no son programadas en tiempo pues solamente se notifican al Área de Distribución por correo y comúnmente esta forma de comunicación no es efectiva.
- Los hospitales no separan su material a recolectar en sus almacenes pues desconocen la fecha exacta de recolección, inclusive, lo pueden llegar a consumir antes de que el chofer llegue a recolectarlo.
- El Área de Distribución no tiene una programación adecuada sobre la flota vehicular externa que requerirá contratar para realizar las recolecciones; se está a expensas de subcontratar al momento que surge la necesidad, sin saber si el subcontratista cuenta o no con disponibilidad vehicular.

3.4 Diagnóstico del comportamiento del sistema

“El diagnóstico es determinar el estado actual del sistema, plantear las causas por las cuales se encuentra así y definir las relaciones que guardan las partes del mismo.

Detectando los problemas, se identifican las cadenas causa-efecto y se llega hasta las últimas causa-origen, no precisamente porque se consideren los males a combatir, sino porque ello determina las limitaciones o alcances de la siguiente fase.” (Ochoa, 1997).

En la Figura 9 que a continuación se muestra, se ha obtenido una cascada de problemas de lo más general a lo particular para identificar la causa origen al problema a resolver, de igual forma, por cada problema se presenta una idea de solución.

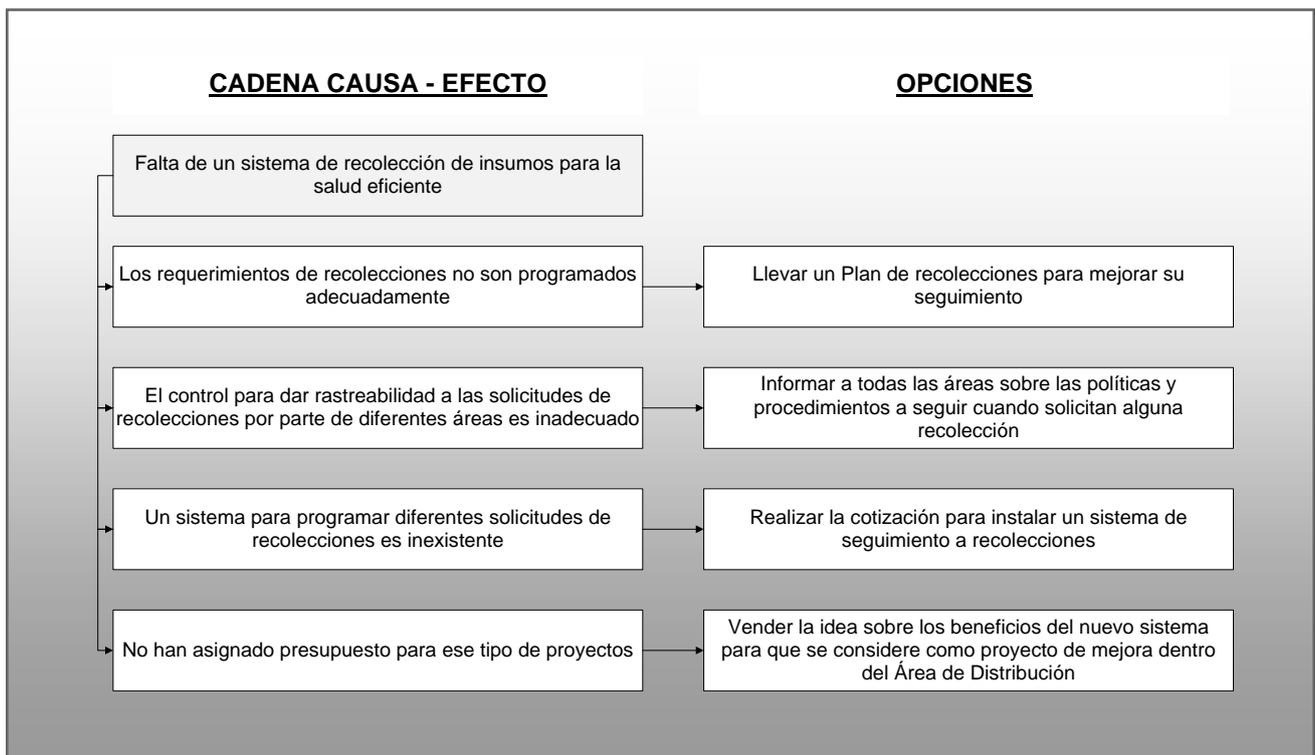


Figura 9. Identificación de la causa origen del problema que se quiere resolver

Fuente: Elaboración propia mediante datos de la empresa

3.5 Identificación de opciones de mejoramiento

“Realizado el diagnóstico del sistema, la fase de identificación de opciones resulta sencilla [...] Entre más cadenas causa-efecto existan, mayor será el número de opciones de corrección o mejoramiento, porque se pueden visualizar combinaciones de rompimientos de cadenas, lo que debe considerar los costos combinados, teniendo presente al sistema como un todo.” (Ochoa, 1997).

Por cada una de las problemáticas que se enlistaron en el punto anterior, se han presentado opciones para poder mejorarlas y se pueden detallar en la Figura 9.

Cabe señalar que la empresa cuenta con un Área de Innovación, a través de la cual se pueden canalizar este tipo de proyectos, además se tiene un presupuesto y personal asignado que revisa la viabilidad de las propuestas al interior de MARES CORP.

3.6 Evaluación ex-ante de opciones

“En esta fase se evalúan las opciones obtenidas en la anterior, se emite un juicio generado de la comparación de los posibles resultados que se obtendrán con cada opción considerando los objetivos o marcos de comparación establecidos, tal como se señala para el método anterior.” (Ochoa, 1997).

En el presente trabajo no se desarrolla la parte de **Evaluación ex - ante de opciones** del Método Operacional debido a que no es posible comparar u obtener resultados de cada una de las opciones de la Figura 9.

Además, los objetivos en MARES CORP no están establecidos conforme a las opciones de mejora.

3.7 Selección

“La mejor opción de mejoramiento o corrección consisten en valorar la evaluación ex - ante. Es una fase en donde se toma la decisión de implantar la mejor opción.” (Ochoa, 1997).

En el presente trabajo no se desarrolla la parte de **Selección** del **Método Operacional** debido a que la decisión de implantar la opción que haya resultado ser la mejor, tiene que pasar por varias validaciones y aceptaciones de las áreas involucradas de MARES CORP y no se pueden obtener directamente estos resultados.

Solamente se pretende justificar por qué es la mejor opción que resolvería la problemática antes descrita, esperando ayude a quienes toman decisiones en MARES CORP optar por este proyecto con base a los intereses que mejor convengan a la empresa.

3.8 Implantación de la opción seleccionada

“Con un nuevo elemento o mecanismo operativo, se transforman las condiciones en cada uno de los elementos, en la medida en que estén interconectados. Esta fase se lleva a cabo con el mínimo de alteraciones.” (Ochoa, 1997).

En el presente trabajo tampoco se desarrolla la parte de **Implantación de la opción seleccionada** del **Método Operacional** debido a que no está definido en el alcance del presente trabajo.

3.9 Control

“Para algunos autores ésta fase es la de mayor importancia. El sistema productivo dinámico es susceptible de producir cambios internos que lo desvíen de lo deseado y se creen

problemas. El control permite minimizar o anular, de ser posible, esta situación latente en los sistemas.” (Ochoa, 1997).

Como no se desarrolla la parte de **Selección** ni la de **Implantación de la opción seleccionada** por ende, no se puede desarrollar la parte de **Control** del **Método Operacional** en este trabajo.

Es importante señalar que para desarrollar las tres etapas finales del Método Operacional se requiere una intervención directa en MARES CORP que no se puede llevar a cabo por motivos propios de esta empresa de estudio.

4.1 Problema de ruta de vehículos con restricción de capacidad (CVRP - Capacitated Vehicle Route Problem)

A continuación algunas definiciones de diferentes autores para este problema que permitan lograr su correcto entendimiento:

“En este problema todos los clientes corresponden a entregas, las demandas son determinísticas, son conocidas por adelantado y no pueden ser divididas, los vehículos son idénticos y se basan en un único almacén central, solamente las restricciones de capacidad de los vehículos son impuestas y el objetivo es minimizar el costo total (ejemplo: el número de rutas y/o sus kilometrajes o tiempos de tránsito) que se requiere para servir a todos los clientes. [...]

El CVRP extiende el bien conocido problema del agente viajero (TSP), llamando a la determinación del circuito con el costo mínimo asociado, visitando exactamente una vez un determinado conjunto de puntos. Por lo tanto, muchos enfoques exactos para el CVRP fueron heredados de la enorme y exitosa labor realizada para la solución exacta del TSP.” (Vigo D., et al, 2000)

Otra definición que se encontró para el problema CVRP es la siguiente:

“Hay muchas aplicaciones del CVRP en el sector público como en las rutas de vehículos escolares, recogida y entrega de correspondencia, así como en el sector privado como en el despacho de camiones de entrega. [...]

Descripción del problema:

Sea $G(V, E)$ un grafo completo no dirigido con el conjunto de nodos V que contiene $n + 1$ nodos numerados $0, 1, \dots, n$. El nodo distinguido 0 corresponde al almacén y los otros nodos corresponden a los n clientes. El conjunto de clientes se denota por V_0 , por lo que $V = V_0 \cup \{0\}$. Con cada cliente $i \in V_0$, asociamos una demanda positiva d_i . Para cada arista $e \in E$, se asocia un costo positivo b_e , que corresponde a la distancia entre los dos nodos finales de e (costo de desplazamiento a lo largo de la arista e). Sea k el número fijo de vehículos disponibles en el almacén y C su capacidad común. Para un subconjunto dado F de aristas de E , $G(F)$ denota el subgrafo $(V(F), F)$ inducido por F , donde $V(F)$ es el conjunto de nodos incidentes con al menos una arista de F . Una ruta ya sea dos copias de la misma arista incidente con el almacén o un subconjunto no vacío F de E que induce un subgrafo $G(F)$ que es un ciclo simple que contiene el almacén 0 (es decir, $0 \in V(F)$, $G(F)$ está conectado, y el grado de cada nodo de $V(F)$ en $G(F)$ es 2) y tal que el total de la demanda de nodos (clientes) en $V_0(F) = V(F) \setminus \{0\}$ no excede la capacidad del vehículo C . Dicha ruta representa el viaje de un vehículo que sale del almacén, satisfaciendo la demanda de los nodos en $V_0(F)$ (viajando a lo largo de las aristas F), y volviendo al almacén. La longitud de una ruta es la suma de los costos de transporte b_e sobre todas las aristas $e \in F$. Obsérvese que si $|V(F)| = 2$ en una ruta F , entonces la ruta está compuesta por dos veces la misma arista. En todos los demás casos (es decir, $|V(F)| > 2$), una arista sólo puede aparecer una vez en una ruta. Obsérvese que en la literatura algunos autores no aceptan el caso de una ruta que visita a un cliente único. Por otra parte, la mayoría de los problemas de la literatura son "limitados", es decir, el número mínimo de vehículos necesarios para servir $V \setminus \{v\}$ es también k para todo v , y por lo tanto el caso de tales rutas "degeneradas" es raro. [...]

Una ruta k se define como un subconjunto R de E que se puede dividir en k rutas R_1, R_2, \dots, R_k y tal que cada nodo $i \in V_0$ pertenece exactamente a una de las k rutas (es decir, exactamente a uno de los conjuntos $V(R_j)$, $1 \leq j \leq k$). La longitud de una ruta k es la suma de las longitudes de las k rutas diferentes que la componen. Cada k -ruta define una solución factible al CVRP y el problema de optimización consiste en encontrar una ruta k de longitud mínima”. (Augerat P., et al, 1998)

Augerat P., et al (1998) formulan el problema CVRP conforme la siguiente tabla:

Formulación	Descripción de restricciones
<p>(CVRP) $\min \sum_{e \in E} b_e x_e \dots\dots\dots (1)$</p> <p>$x(\delta(\{0\})) = 2k \dots\dots\dots (2)$</p> <p>$x(\delta(\{i\})) = 2$ para todo $i \in V_0 \dots\dots\dots (3)$</p> <p>$x(\delta(S)) \geq 2 \lfloor \frac{d(S)}{c} \rfloor$ para todo $S \subseteq V_0, S \neq \emptyset \dots\dots\dots (4)$</p> <p>$0 \leq x_e \leq 1$ para todo $e \in \gamma(V_0) \dots\dots\dots (5)$</p> <p>$0 \leq x_e \leq 2$ para todo $e \in \delta(\{0\}) \dots\dots\dots (6)$</p> <p>$x_e$ entero para todo $e \in E \dots\dots\dots (7)$</p>	<p>La restricción (2) establece que cada uno de los k vehículos tiene que salir y regresar al almacén.</p> <p>Las restricción (3) es las restricción de grado en cada nodo de cliente.</p> <p>Las restricción (4) es la restricción de capacidad (También llamadas restricciones generalizadas de eliminación de sub viajes), donde $\lfloor \alpha \rfloor$ representa el entero más pequeño mayor o igual que α.</p> <p>Significan que para un subconjunto S determinado de clientes, se necesitan al menos $\lfloor d(S) / C \rfloor$ vehículos para satisfacer la demanda en S y, debido a que el almacén está fuera de S, la ruta correspondiente a cada uno de estos vehículos debe necesariamente entrar y salir del conjunto S. Además, como para las restricciones de eliminación de sub en el caso del TSP, estas restricciones son necesarias para forzar la conectividad de la solución.</p> <p>Las restricciones (5) - (7) especifican la integralidad y las restricciones vinculadas sobre las variables. Una variable x_e que enlaza directamente un nodo cliente con el almacén (en (6)) puede tomar el valor 2 cuando una ruta sólo sirve a este cliente, por lo que esta arista es recorrida dos veces por la ruta. No es difícil comprobar que las únicas soluciones a (2) - (7) son los vectores de incidencia de todos los elementos de X^{CVRP}, por lo tanto (2) - (7) es una formulación de programación lineal entera de CVRP.</p> <p>Las restricciones (2) - (6) definen un "polytope" que contiene adecuadamente el "polytope" CVRP y proporciona así una relajación de programación lineal (LP) al problema.</p>

Tabla 37. Formulación matemática del problema CVRP

Fuente: (Augerat P., et al, 1998)

De acuerdo a estas descripciones el CVRP **NO** puede usarse como referencia al modelo que se desea desarrollar debido a que los vehículos no son idénticos puesto que se manejan al menos dos tipos de unidades de transporte en MARES CORP y además este problema no contempla recolecciones en su modelo ni ventanas de entrega y/o recolección que también son otras variables que debemos considerar en el modelo.

En la Figura 10 se observa que para la categoría de problemas CVRP (sin múltiples actividades) se desprenden los siguientes tipos:

- **Problema de rutas de vehículos con varios almacenes (MDVRP - Multi-depot Vehicle Route).** Se explica en el inciso 4.1.1 del presente capítulo.
- **Problema de rutas de vehículos con ventanas de entrega (VRPTW - Vehicle Route Problem with Time Windows).** Se explica en el inciso 4.1.2 del presente capítulo.
- **Problema de rutas de vehículos con múltiples ventanas de entrega (VRPMTW - Vehicle Route Problem with Multiple Time Windows).** Se explica en el inciso 4.1.3 del presente capítulo.

4.1.1 Problema de rutas de vehículos con varios almacenes (MDVRP - Multi-depot Vehicle Route Problem)

Se investigaron algunas definiciones de este problema que a continuación se exponen:

“El problema de ruteo de vehículos con múltiples almacenes es una variante del VRP clásico que incorpora varios almacenes con una localización predefinida. Cada almacén cuenta con una flota limitada de vehículos con capacidad fija, utilizada para repartir los productos demandados por los clientes, cuya localización y demanda es también conocida de antemano. Cada vehículo debe comenzar y terminar su ruta en el mismo almacén, y cada cliente debe ser visitado una única vez.

A continuación se presenta el modelo y formulación matemática que formaliza las diferentes restricciones y la función que definen al MDVRP:

- **Objetivo:** el objetivo es la distancia total del conjunto de rutas.
- **Factibilidad:** una solución es factible si todas las rutas satisfacen las restricciones de longitud y distancia y comienzan y terminan en el mismo almacén.
- **Formulación:** el problema CVRP se extiende al caso donde existen múltiples almacenes, por lo que se denotará el conjunto de vértices como $V = \{v_1, \dots, v_n\} \cup V_0$, donde $V_0 = \{v_0, 1, \dots, v_0, d\}$ son los vértices que representan los almacenes. La ruta i está definida por $R_i = \{d, v_i, \dots, v_m, d\}$ con $d \in V_0$ ”. (Gallego I., 2013)

En la siguiente tabla se trata de resumir la formulación de Gallego I., 2013 para el problema MDVRP:

Nomenclatura	
• Índices de origen (i)	• Ruta (Rk)
• Índices de destino (j)	• Capacidad del vehículo (Qk)
• Grupo de almacenes (D)	• Variables de decisión (Xijk)
• Conjunto de clientes (C)	• Distancia entre clientes y almacenes (Dis ij)
• Vehículos (Vk)	• Grupo de clientes visitados (S)

Función Objetivo	Descripción de restricciones
<p>Min</p> $\sum_{i \in C \cup D} \sum_{j \in C \cup D} dis_{ij} \sum_{k \in D} x_{ijk}$ <p>Sujeto a:</p> $\sum_{i \in C \cup D} \sum_{k \in D} x_{ijk} = 1 \forall j \in C \dots(1)$ $\sum_{i \in C} \sum_{j \in D} x_{ijk} \leq 1 \quad \forall k \in D \dots(2)$ $\sum_{j \in C \cup D} x_{ijk} = \sum_{j \in C \cup D} x_{jik} \quad \forall k \in D, i \in C \cup D \dots(3)$ $\sum_{j \in C} d_j \sum_{i \in C \cup D} x_{ijk} \leq Q_k \quad \forall k \in D \dots(4)$ $\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ijk} \leq S - 1 \quad \forall S \text{ contenido en } C, S \geq 2 \quad k \in D \dots(5)$ $x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i, k \in D, j \in C \dots(6)$	<p>Donde la restricción 1 propone que todo destino (j) pertenece a un grupo de clientes (C).</p> <p>La restricción 2 propone que todo almacén (k) pertenece a un grupo de almacenes (D).</p> <p>En las restricciones de 1 a 3 se impone que cada cliente sea visitado una única vez, cada ruta sea realizada por un único vehículo, y que el vehículo entra y sale para los clientes asignados respectivamente.</p> <p>En la restricción 4 se aprecia la ecuación de la capacidad de cada vehículo (Qk).</p> <p>La restricción 5 es la ecuación de restricción generalizada de eliminación de recorrido, la cual restringe que cada vehículo atienda al menos una ruta de cada cliente pasando a un conjunto de visitados (S) por el vehículo (Vk).</p> <p>Y por último en la restricción 6 se aprecia los requisitos de las variables de decisión, donde las variables de decisión son Xijk que representan una solución de enrutamiento. Xijk =1 si y solo si el cliente j precede al cliente en la ruta Rk, Rk (i,j ∈ C ∪ D, k ∈ D) de lo contrario el valor es cero.</p>

Tabla 38. Formulación matemática del problema MDVRP

Fuente: (Gallego I., 2013)

Toro-Ocampo E. et al, (2016) definen al MDVRP de manera similar:

“El MDVRP puede ser definido como un conjunto de almacenes I y clientes J, donde el objetivo es encontrar una secuencia factible de entregas a través de un conjunto de rutas, las cuales deben minimizar la distancia o el tiempo, de forma que se atiendan todos los clientes de la red. A cada arco (i,j) ∈ I ∪ J se le asocia un costo de viaje cij. Cada cliente j

ϵ J tiene una demanda d_j , la cual debe ser atendida en su totalidad en una sola visita. Un conjunto de K vehículos idénticos con capacidad Q_k está disponible en cada almacén. El MDVRP es un problema NP-duro debido a que simultáneamente se deben determinar las rutas de una flota de vehículos que inician desde diferentes almacenes. El objetivo es determinar un conjunto de rutas que minimice la distancia del recorrido, para realizar todas las entregas o el tiempo invertido en la atención de todos los clientes. Se deben cumplir de forma estricta las siguientes restricciones:

- i) La demanda de cada cliente debe ser atendida por un único vehículo.
- ii) Cada vehículo inicia y termina su ruta en el mismo almacén.
- iii) La totalidad de la demanda de cada ruta no debe exceder la capacidad del vehículo.”

Definitivamente el problema MDVRP **NO** puede usarse como referencia al modelo que se desea desarrollar debido a que MARES CORP solamente cuenta con un almacén (CD / CR) y además este problema no contempla recolecciones ni ventanas de entrega y/o recolección.

4.1.2 Problema de rutas de vehículos con ventanas de entrega (VRPTW - Vehicle Route Problem with Time Windows)

En esta sección se explica el VRPTW de acuerdo a las siguientes citas:

“El VRPTW es una generalización importante del problema VRP en el cual el servicio a cada cliente i debe empezar dentro de una ventana de tiempo $[a_i, b_i]$. Al vehículo se le permite arribar antes que el tiempo a_i , y esperar hasta que el cliente se encuentre disponible, pero arribos después de b_i son prohibidos.

El VRPTW tiene numerosas aplicaciones en la dirección de distribución. Ejemplos comunes son la entrega de bebidas o comida, entrega de periódico y recolección de basura comercial e industrial.

El VRPTW es un problema NP-duro ya que generaliza el CVRP el cual es obtenido cuando $a_i = 0$ y $b_i = \infty$ para cada cliente i . En el caso de un tamaño fijo de flota, aun encontrando una solución factible al VRPTW es por sí mismo un problema NP-completo.” (Cordeau J.-F., et al , 2007).

Bräysy y Gendreau (2001) explican el problema VRPTW como se describe a continuación:

“El VRPTW se define en un grafo (N, A) . El conjunto de nodos N consiste en el conjunto de clientes, denotado por C , y los nodos 0 y $n + 1$, que representan el almacén. El número de clientes $|C|$ será denotado como n y los clientes serán denotados por $1, 2, \dots, n$. El conjunto de arco A corresponde a posibles conexiones entre los nodos. Ningún arco termina en el nodo 0 y ningún arco se origina en el nodo $n + 1$. Todas las rutas comienzan en 0 y terminan en $n + 1$. Un costo c_{ij} y el tiempo de recorrido t_{ij} están asociados con cada arco $(i, j) \in A$ de la red. El tiempo de viaje t_{ij} incluye un tiempo de servicio al cliente i . El conjunto de vehículos (idénticos) se denota por V . Cada vehículo tiene una capacidad dada q y cada cliente una demanda $d_i, i \in C$. En cada cliente, el inicio del servicio debe estar dentro de un intervalo de tiempo dado, llamado ventana de tiempo, $[a_i, b_i], i \in C$. Los vehículos también deben salir del almacén dentro de la ventana de tiempo $[a_0, b_0]$ y regresar durante La ventana de tiempo $[a_{n+1}, b_{n+1}]$. Un vehículo está autorizado a llegar antes de la apertura de la ventana de tiempo, y esperar sin costo alguno hasta que el servicio sea posible, pero no se le permite llegar después de la ventana de tiempo límite. Dado que el tiempo de espera se permite sin costo alguno, podemos suponer sin pérdida de generalidad que $a_0 = b_0 = 0$; Es decir, todas las rutas comienzan en el tiempo 0 .

El modelo contiene dos tipos de variables de decisión. La variable de decisión X_{ij}^k (definida $\forall (i, j) \in A, \forall k \in V$) es igual a 1 si el vehículo k se mueve desde el nodo i al nodo j , y 0 de otra manera. La variable de decisión S_i^k (definida $\forall i \in N, \forall k \in V$) denota el tiempo del vehículo k , $k \in V$, inicia servicio en el cliente i , $i \in C$. Si el vehículo k no da servicio al cliente i , S_i^k no tiene ningún significado. Podemos suponer que $S_0^k = 0, \forall k$, y S_{n+1}^k indica el tiempo de llegada del vehículo k en el almacén. El objetivo es diseñar un conjunto de rutas de costo mínimo, una para cada vehículo, de modo que todos los clientes sean atendidos exactamente una vez. Por lo tanto, las entregas fraccionadas no están permitidas. Las rutas deben ser factibles con respecto a la capacidad de los vehículos y las ventanas de tiempo de los clientes atendidos”.

Bräysy y Gendreau (2001) formulan el problema VRPTW como se explica en la siguiente tabla:

Función Objetivo	Descripción de restricciones
<p>Min</p> $\sum_{k \in V} \sum_{(i,j) \in A} C_{ij} X_{ij}^k \dots \dots (1)$ <p>Sujeto a:</p> $\sum_{k \in V} \sum_{j \in N} X_{ij}^k = 1, \forall i \in C \dots \dots (2)$ $\sum_{i \in C} d_i \sum_{j \in N} X_{ij}^k \leq q, \forall k \in V \dots \dots (3)$ $\sum_{j \in N} X_{0j}^k = 1, \forall k \in V \dots \dots (4)$ $\sum_{i \in N} X_{ih}^k - \sum_{j \in N} X_{hj}^k = 0, \forall h \in C, \forall k \in V \dots \dots (5)$ $\sum_{i \in N} X_{i,n+1}^k = 1, \forall k \in V \dots \dots (6)$ $X_{ij}^k (S_i^k + t_{ij} - S_j^k) \leq 0, \forall (i, j) \in A, \forall k \in V \dots \dots (7)$ $a_i \leq S_i^k \leq b_i, \forall i \in N, \forall k \in V \dots \dots (8)$ $X_{ij}^k \in \{0,1\}, \forall (i, j) \in A, \forall k \in V \dots \dots (9)$	<p>La función objetivo (1) establece que los costos deben ser minimizados.</p> <p>El conjunto de restricciones (2) establece que cada cliente debe asignarse exactamente a un vehículo, y el conjunto de restricciones (3) establece que ningún vehículo puede atender a más clientes de lo que su capacidad permita.</p> <p>El conjunto de restricciones (4), (5) y (6) son las restricciones de flujo que requieren que cada vehículo k deje el nodo 0 una vez, deja el nodo h, $h \in C$, si y sólo si entra en ese nodo y regresa al nodo $n + 1$.</p> <p>Tenga en cuenta que el conjunto de restricciones (6) es redundante, pero se mantiene en el modelo para subrayar la estructura de red. El arco $(0, n + 1)$ está incluido en la red para permitir viajes en vacío. Más precisamente, se permite un número ilimitado de vehículos, pero un costo c_v se pone en cada vehículo utilizado. Esto se hace mediante la configuración. $c_{0, n+1} = -c_v$. El valor de c_v es suficientemente grande para reducir al mínimo el número de vehículos y, en segundo lugar, minimizar los costos de viaje.</p> <p>El conjunto de restricciones no lineales (7) indica que el vehículo k no puede llegar a j antes de $S_i^k + t_{ij}$ si viaja de i a j.</p> <p>El conjunto de restricciones (8) garantiza que todas las ventanas de tiempo se respetan y (9) es el conjunto de restricciones de integridad.</p>

Tabla 39. Formulación matemática del problema VRPTW

Fuente: (Bräysy y Gendreau, 2001)

De acuerdo a las características del VRPTW, este problema **NO** se adaptaría a la problemática de MARES CORP porque aunque sí es correcto considerar restricciones de ventanas de tiempo en el modelo no se contemplan recolecciones que son las que también se pretenden planear y rastrear correctamente.

4.1.3 Problema de rutas de vehículos con múltiples ventanas de entrega (VRPMTW - Vehicle Route Problem with Multiple Time Windows)

El problema VRPMTW se explica de acuerdo a la siguiente definición:

“El VRPMTW es definido como un grafo directo $G=(V,A)$, donde V es el conjunto de vértices y A es el conjunto de arcos. El conjunto de vértices es dividido en $V= \{N, D\}$, donde $N= \{1, \dots, n\}$ es un conjunto de clientes y D es un conjunto de almacenes. Se considera un conjunto de R vehículos y se denota como m el número de vehículos. Se denota como Q_k la capacidad del vehículo k , donde $k \in R$. Todo cliente $i \in N$ tiene una demanda no negativa q_i , y un tiempo de servicio no negativo s_i , un conjunto $W_i = \{[l_i^p, u_i^p], p=1, \dots, p_i\}$ con p_i ventanas de entrega. El tiempo de viaje asociado al arco $(i,j) \in A$ se denota como t_{ij} . También se denota como D_k , la máxima duración de la ruta del vehículo k . Incluso si algunas de estas características, tales como almacenes múltiples y duración máxima, son exógenas al contexto VRPMTW, se cree que proporciona una visión más amplia del problema puede ser útil.

El objetivo de la VRPMTW es diseñar un conjunto de m rutas de vehículos con un tiempo de viaje mínimo o de duración mínima tal que:

- 1) Todos los clientes sean servidos una vez por un vehículo;
- 2) El servicio para todo cliente empieza con una de sus ventanas de entrega; si el vehículo llega antes que el comienzo de la ventana de entrega, éste debe esperar;
- 3) La demanda total de la ruta no excede la capacidad del vehículo;
- 4) La duración total de la ruta asignada a un vehículo k no puede exceder un límite superior preestablecido D_k .”.(Belhaiza S. et al, 2013)

Primero, Belhaiza S. et al, 2013 realizan la definición de variables y parámetros de acuerdo a la siguiente tabla:

Variable	Tipo	Descripción
x_{ij}^k	Binaria	Igual a 1 sí y sólo sí el arco (i,j) es atravesado por el vehículo k
y_{ij}^k	Real	Igual al flujo acarreado en el arco (i,j)
r^k	Binaria	Igual a 1 sí y sólo sí el vehículo k es usado
v_i^p	Binaria	Igual a 1 sí y sólo sí el cliente i es servido sin su ventana de tiempo p
w_i^k	Real	Tiempo de espera del vehículo k al cliente i
z_i^k	Binaria	Igual a 1 sí y sólo sí el cliente i es asignado al vehículo k
q_d^k	Real	Demandada total cargada en el vehículo k en el almacén d
d_k	Real	Duración de la ruta del vehículo k
a_i^k	Real	Tiempo de llegada del vehículo k al cliente i
b_i^k	Real	Tiempo de salida del vehículo k desde el cliente i

Parámetro	Tipo	Descripción
t_{ij}	Real	Tiempo de viaje asociado al arco (i,j)
q_i	Real	Demanda asociada con el cliente vértice i
l_i^p	Real	Ventana de tiempo p cota inferior en el cliente i
u_i^p	Real	Ventana de tiempo p cota superior en el cliente i
Q_k	Real	Capacidad del vehículo k
D_k	Real	Duración máxima de la ruta del vehículo k
s_i	Real	Tiempo del servicio del cliente i
e_d^k	Binaria	Igual a 1 sí y sólo sí el vehículo k empieza y termina en el almacén d
B	Binaria	Igual a 1 sí y sólo sí la duración total debe minimizarse
F^k	Real	Costo fijo en unidades de tiempo de vehículos usados k
M	Real	Arbitraria, amplia variable

Tabla 40. Definición de variables y parámetros para el problema VRPMTW

Fuente: (Belhaiza S. et al, 2013)

Posteriormente, Belhaiza S. et al, 2013 usan las variables y los parámetros en la siguiente formulación:

Formulación	Descripción de restricciones
<p>Min</p> $\sum_{k \in R} \sum_{i \neq j} t_{ij} x_{ij}^k + B \sum_{k \in R} \sum_{i \in N} w_i^k + \sum_{k \in R} F^k r^k$ <p>Sujeto a:</p> $\sum_{k \in T_i} z_i^k = 1, \quad i \in V, \dots \dots (1)$ $\sum_{j \in V} x_{ji}^k = \sum_{j \in V} x_{ij}^k, \quad i \in V \text{ y } k \in R \dots (2)$ $2x_{ij}^k \leq z_i^k + z_j^k, \quad i, j \in V \text{ y } k \in R \dots (3)$ $\sum_{k \in T_i \cap T_j} x_{ij}^k \leq 1, \quad i \in V \dots (4)$ $\sum_{k \in T_i \cap T_j} x_{ji}^k \leq 1, \quad i \in V \dots (5)$ $y_{ij}^k \leq Q_k x_{ij}^k, \quad i, j \in V \text{ y } k \in R \dots (6)$	<p>El objetivo es minimizar el tiempo total de viaje, más el tiempo de espera total multiplicado por el parámetro binario B, más la suma de los costos fijos de los vehículos utilizados. Para convertir el costo real usando un vehículo en las mismas unidades utilizadas en las otras partes del objetivo, el costo fijo F se expresa en unidades de tiempo. Restricciones (1) establecen que cada cliente está asignado a exactamente un vehículo. Restricciones (2) indican que cada ruta de un vehículo k comienza y termina en el almacén, y el número de arcos que salen de un cliente i es igual al número de arcos que entran en él. Las restricciones (3) significan que cualquier arco (i,j) puede ser atravesado por el vehículo sólo si z_i^k y z_j^k son iguales a 1. Las restricciones (4 y 5) obligan a cada cliente i a ser visitado por un vehículo. Las restricciones (6) afirman que el flujo sobre el arco (i,j) está delimitada por la capacidad Q_k del vehículo k que atraviesa este arco. Las restricciones (7) aseguran que la demanda de los clientes visitados por el vehículo k se satisface, mientras que las restricciones (8) significan que se satisface la demanda de cada cliente asignado a la ruta de un vehículo k. (continúa...)</p>

Formulación	Descripción de restricciones
$\sum_{j \in V} y_{dj}^k - \sum_{i \in V} y_{id}^k = q_d^k e_d^k, d \in D \text{ y } k \in R \dots (7)$	<p>Las restricciones (9) garantizan que el tiempo de salida del vehículo k desde el almacén d no exceda de l_d, y las restricciones (10) obligan a que el tiempo de llegada del vehículo k en el almacén d sea menor que o igual a u_d. Finalmente, las restricciones (11) significan que la duración total de cada ruta no puede exceder la duración máxima D_k. Las restricciones (12) garantizan que el tiempo de salida del cliente i es al menos igual al tiempo de llegada al cliente i, más el tiempo de espera y el tiempo de servicio en el cliente i sólo si el cliente i está asignado al vehículo k. De forma similar, las restricciones (13) y (14) significan que el tiempo de llegada al cliente j es igual al tiempo de salida del cliente i, más el costo t_{ij} de arco (i,j) solo si este arco está asignado a Vehículo k. Las restricciones (15) y (16) implican que la hora de llegada más el tiempo de espera del vehículo k en el cliente i está dentro de la ventana de tiempo $[l_i^p, u_i^p]$ sólo si se asigna al cliente i al vehículo k y se elige la ventana de tiempo p. Las restricciones (17) significan que se elige exactamente una sola ventana de tiempo para cada cliente i. Las restricciones (18) aseguran que el cliente i sea atendido por el vehículo k sólo si se utiliza este vehículo. Finalmente, las restricciones (19) y (20) indican los intervalos de factibilidad para las variables de decisión.</p>
$\sum_{j \in V} y_{ji}^k - \sum_{j \in V} y_{ij}^k \geq q_i z_i^k, i \in N \text{ y } k \in R \dots (8)$	
$b_d^k \geq l_d - M(1 - z_d^k), d \in D \text{ y } k \in R \dots (9)$	
$a_d^k \leq u_d + M(1 - z_d^k), d \in D \text{ y } k \in R \dots (10)$	
$a_d^k - b_d^k \leq D_k + M(1 - z_d^k), d \in D \text{ y } k \in R \dots (11)$	
$b_i^k \geq a_i^k + w_i^k + s_i - M(1 - z_i^k), i \in N \text{ y } k \in R \dots (12)$	
$a_j^k \geq b_i^k + c_{ij} - M(1 - x_{ij}^k), i, j \in V \text{ y } k \in R \dots (13)$	
$a_j^k \leq b_i^k + c_{ij} + M(1 - x_{ij}^k), i, j \in V \text{ y } k \in R \dots (14)$	
$a_i^k + w_i^k \geq l_i^p - M(1 - z_i^k) - M(1 - v_i^p), i \in N, p \in w_i \text{ y } k \in R \dots (15)$	
$a_i^k + w_i^k \leq u_i^p + M(1 - z_i^k) + M(1 - v_i^p), i \in N, p \in w_i \text{ y } k \in R \dots (16)$	
$\sum_{p=1}^{p_i} v_i^p = 1, i \in N \cap D \dots (17)$	
$r^k \geq z_i^k, i \in V \text{ y } k \in R \dots (18)$	
$y_{ij}^k, w_i^k, q_d^k, d_k, a_i^k, b_i^k \geq 0 \dots (19)$	
$r^k, x_{ij}^k, v_i^p, z_i^k \text{ binaria } \dots (20)$	

Tabla 41. Formulación matemática del problema VRPMTW

Fuente: (Belhaiza S. et al, 2013)

De acuerdo a las características del VRPMTW, este problema **NO** se adaptaría a la problemática de MARES CORP porque no se tienen múltiples ventanas de tiempo en los nodos de entrega y/o recolección y tampoco se contemplan recolecciones que son las que también se pretenden planear y rastrear correctamente.

4.2 VRP's con actividades múltiples

De acuerdo a la Figura 10, los problemas CVRP que involucran múltiples actividades (entrega y recolección) pueden dividirse en dos grandes sub categorías:

- 1) **Problema de recolección y entrega (PDP - Pickup and Delivery Problem)**. Se explica en el inciso 4.2.1 del presente capítulo.
- 2) **Problema de entregas y recolección (DPP - Delivery and pick up problem)**. Se explica en el inciso 4.2.2 del presente capítulo.

Entonces, son estas categorías las que **SÍ** interesan para resolver la problemática en MARES CORP, sin embargo, debemos analizar más a fondo que sub categoría conviene más para considerarla al modelo.

4.2.1 Problema de recolección y entrega (PDP - Pickup and Delivery Problem)

Este problema puede explicarse bajo las definiciones que se desarrollan a continuación:

“Este problema puede ser conceptualmente descrito como: encontrar el camino óptimo de asignación de un conjunto de solicitudes de transporte a una flota de vehículos (inicialmente localizados en diferentes almacenes), para minimizar una función objetivo con una meta particular, sujeta a una variedad de restricciones.

Los requerimientos de transporte consisten en recoger un cierto número de pasajeros de una localidad de recolección predeterminada y dejarlos en una localidad de entrega predeterminada [...] Las formulaciones fundamentales del PDP son en su mayoría determinísticas (en la cual la demanda del servicio es conocida previamente).” (Cortés C., et al, 2009)

Otra definición que explica el problema PDP es la que se desarrolla a continuación:

“PDP constituye un importante clasificación del VRP en el cual objetos o personas tienen que ser transportadas entre orígenes y destinos. La mayoría de los PDPs pueden ser definidos bajo el siguiente marco de referencia. Sea $G = (V, A)$ un grafo completo y dirigido con un conjunto de vértices $V = \{0, \dots, n\}$, donde el vértice “0” representa el almacén y cada uno de los vértices restantes representan los clientes. El conjunto de arcos es definido como $A = \{(i, j) : i, j \in V, i \neq j\}$. Cada arco $(i, j) \in A$ y tiene una longitud y costo c_{ij} no- negativo satisfaciendo la desigualdad triangular. Sea $H = \{1, \dots, p\}$ un conjunto de commodities representando un conjunto de entidades a ser transportadas. Cada vértice, incluyendo el almacén, puede ya sea necesitar o suministrar una cantidad no-negativa de ese commodity. Dejar que $D = (d_{ih})$ denote una matriz de commodities, donde el positivo d_{ih} , es la cantidad de commodity h abastecido por el vértice i , y $-d_{ih}$, es la cantidad de commodity h requerida por el vértice i si $d_{ih} < 0$. [...] Se asume que $\sum_{i \in V} d_{ih} = 0$ para cada commodity $h \in H$. Esto es, por cada commodity el suministro total y la demanda total están en equilibrio. Dejar a $K = \{1, \dots, m\}$ ser el conjunto de vehículos disponibles, cada uno con capacidad Q . El subconjunto $T \subset V$ designa a vértices de trasbordo en los cuales a los vehículos se les permite para dejar temporalmente una cantidad de algún commodity y recogerlo posteriormente, posiblemente con otro vehículo. [...] La ruta es un circuito sobre algunos vértices, comenzando y terminando con el almacén.

PDP consiste en construir al menos m vehículos tal que:

- 1) Todas las necesidades de recolección y entrega sean satisfechas;
- 2) No trasbordos de commodities son realizados en los vértices de $V \setminus T$;
- 3) La carga del vehículo jamás excede su capacidad;
- 4) La suma de los costos de ruta es minimizada.” (Berblegia G., et al, 2007)

Savelsbergh (s/f), formula el problema general PDP como se explica a continuación:

“Sea N el conjunto de peticiones de transporte. Para cada solicitud de transporte $i \in N$, la carga de tamaño $\bar{q}_i \in \mathbb{N}$ tiene que ser transportada desde un conjunto de orígenes N_i^+ a un conjunto de destinos N_i^- . Cada carga se subdivide de la siguiente manera: $\bar{q}_i = \sum_{j \in N_i^+} +q_j = \sum_{j \in N_i^-} -q_j$, por ejemplo, cantidades positivas para recolecciones y cantidades negativas para entregas.

Define $N^+ := \cup_{i \in N} N_i^+$ como un conjunto de todos los orígenes y $N^- := \cup_{i \in N} N_i^-$ como un conjunto de todos los destinos. Sea $V := N^+ \cup N^-$. Además, sea M un conjunto de vehículos. Cada vehículo $k \in M$ tiene una capacidad $Q_k \in \mathbb{N}$, una localidad de inicio k^+ , y una localidad de fin k^- . Define $M^+ := \{k^+ | k \in M\}$ como un conjunto de localidades de inicio y $M^- := \{k^- | k \in M\}$ como un conjunto de localidades de fin. Sea $W := M^+ \cup M^-$. Para todo $i, j \in V \cup W$ sea d_{ij} que denota la distancia de viaje, t_{ij} el tiempo de viaje y c_{ij} el costo del viaje. Notar que el tiempo de permanencia en los orígenes y destinos pueden ser fácilmente incorporados en el tiempo del viaje y por lo tanto no pueden considerarse explícitamente.[...]

Para formular el GPDP (General PDP) como un programa matemático, se introducen 4 tipos de variables: $z_i^k (i \in N, k \in M)$ igual a 1 si la solicitud de transporte i es asignada al vehículo k y “0” de otra manera, $x_{ij}^k ((i, j) \in (V \times V) \cup \{(k^+, j) | j \in V\} \cup \{(j, k^-) | j \in V\}, k \in M)$ igual a 1 si el vehículo k viaja desde la localidad i a la localidad j y “0” de otra forma. $D_i (i \in V \cup W)$, especificando el tiempo de salida en el vértice i y $y_i (i \in V \cup W)$, especificando la carga del vehículo arribando al vértice i . Define $q_{k^+} = 0$ para toda $k \in M$ ”.

En la tabla siguiente se detalla la formulación de Savelsbergh (s/f) al problema PDP:

Formulación	Descripción de restricciones
<p>Min $f(x)$</p> <p>Sujeto a:</p> $\sum_{k \in M} z_i^k = 1 \text{ para toda } i \in N \dots\dots (1)$ $\sum_{j \in V \cup W} x_{lj}^k = \sum_{j \in V \cup W} x_{jl}^k = z_l^k \text{ para toda } i \in N, l \in N_i^+ \cup N_i^-, k \in M \dots\dots (2)$ $\sum_{j \in V \cup (k^-)} x_{k^+j}^k = 1 \text{ para toda } k \in M \dots\dots (3)$	<p>Restricción (1) asegura que cada solicitud de transporte se asigna exactamente a un vehículo.</p> <p>Por restricción (2) un vehículo sólo entra o sale de un lugar l si es un origen o un destino de una solicitud de transporte asignada a ese vehículo.</p> <p>Restricción (3) y (4) asegura que cada vehículo comienza y termina en el lugar correcto. (continúa...)</p>

Formulación	Descripción de restricciones
$\sum_{i \in V \cup (k^+)} x_{ik}^k = 1 \text{ para toda } k$ $\in M \dots\dots (4)$	
$D_{k^+} = 0 \text{ para toda } k \in M \dots\dots (5)$	
$D_p \leq D_q \text{ para toda } i \in N, p \in N_i^+, q \in N_i^- \dots\dots (6)$	
$x_{ij}^k = 1 \rightarrow D_i + t_{ij} \leq D_j \text{ para toda } i, j \in V \cup W, k \in M \dots (7)$	Restricciones (5),(6),(7) y (13) juntas forman las restricciones de precedencia.
$y_{k^+} = 0 \text{ para toda } k \in M \dots\dots (8)$	
$y_i \leq \sum_{k \in M} Q_k z_i^k \text{ para toda } i \in N, l \in N_i^+ \cup N_i^- \dots\dots (9)$	Restricciones (8),(9),(10) y (14) juntas forman las limitaciones de capacidad.
$x_{ij}^k = 1 \rightarrow y_i + q_i = y_j \text{ para toda } i, j \in V \cup W, k \in M \dots (10)$	
$x_{ij}^k \in \{0,1\} \text{ para toda } i, j \in V \cup W, k \in M \dots (11)$	
$z_i^k \in \{0,1\} \text{ para toda } i \in N, k \in M \dots (12)$	
$D_i \geq 0 \text{ para toda } i \in V \cup W \dots (13)$	
$y_i \geq 0 \text{ para toda } i \in V \cup W \dots (14)$	

Tabla 42. Formulación matemática del problema PDP

Fuente: (Savelsbergh, s/f)

Este problema considera entregas y recolecciones, sin embargo, aún **NO** se apega en su totalidad a lo que sucede en MARES CORP debido a que se requiere considerar ventanas de entrega y/o recolección para realizar estas actividades múltiples.

Para el PDP se tiene una sub categoría que es cuando se consideran ventanas de entrega, convirtiéndose en PDPTW y se describe a continuación:

4.2.1.1 Problema de recolección y entrega con ventanas de entrega (PDPTW - Pickup and Delivery Problem with Time Windows)

Este problema se explica de acuerdo a la siguiente cita:

“El PDPTW es una generalización del problema familiar VRPTW que a su vez es una generalización del conocido problema del agente viajero (TSP).

El PDPTW se define como sigue, dado un número de clientes con una demanda específica, el problema es encontrar un conjunto de rutas, una por cada vehículo para satisfacer la demanda.

Cada demanda consiste en una operación recolección en un nodo de origen y una operación de entrega en un nodo de destino. Las operaciones de recolección y entrega tienen que realizarse a tiempo y, por lo tanto, se asocia una ventana de tiempo con cada nodo de recolección y entrega. La operación de recogida debe, por supuesto, preceder a la entrega.” (Palmgren M., s/f)

De la investigación que se realizó para el problema PDPTW también se encontró la siguiente descripción:

“En esta sección se proporcionan las notaciones y una formulación matemática del PDPTW. El marco matemático que se presenta aquí se construye sobre lo presentado en Salomón 1987.

Donde:

P: conjunto de todas las ubicaciones de los clientes; Para algunos $n \in N$.

0: El almacén central.

K: Conjunto de vehículos disponibles, registrador ordenadamente para registrar su índice, Indicando el número máximo de vehículos disponibles.

V: Conjunto de todos los nodos, por ejemplo, ubicaciones y almacenes de clientes,.

A: Conjunto de arcos que unen los nodos.

G: grafo del problema, $G = (V, A)$.

$G^k: (V^k, A^k)$: El sub-grafo asociado con un vehículo específico k , con V^k el subconjunto de nodos que el vehículo k atraviesa, mientras que $A^k = V^k \times V^k$ contiene todos los arcos factibles entre los nodos en V^k .

P^P : Conjunto de clientes de recolección, $P^P \subset P$.

P^D : Conjunto de clientes de entrega, $P^D \subset P$.

Q^k : Carga máxima del vehículo k .

P^+ : Conjunto de puntos de recolección de PD-pares, $P^+ \subset P$.

P^- : Conjunto de puntos de entrega de pares PD, $P^- \subset P$

[...] Debido a las restricciones de ventana de tiempo, los arcos pueden no existir entre algunos pares de nodos.

La duración del programa de una ruta es la suma de tiempo de espera, tiempo de servicio y tiempo de viaje. Contextos diferentes tienen diferentes prioridades para minimizar el número de objetivos sujetos a una variedad de restricciones.

Para el transporte de mercancías, el objetivo consiste en minimizar el número de vehículos, los costos de viaje y el tiempo de programación. Sin embargo, para las situaciones de “dial-a-ride”, es preferible minimizar los inconvenientes causados por recolecciones o entregas realizadas antes o después que el tiempo deseado”. (Hongping L., 2002)

De acuerdo al autor Hongping L., 2002, para formar los problemas de recolección y / o entrega, se utilizan los tipos de variables que se enlistan en la siguiente tabla:

No. de variable	Descripción
1	Variables binarias $X^{k,ij}$, donde $k \in K$, $i, j \in V, i \neq j$. $X^{k,ij}$ igual a 1 si el vehículo k viaja a través del arco (i,j) desde el nodo i al j , igual a "0" de otra manera.
2	Variable de tiempo T_i donde $i \in P$, representa el tiempo para empezar el servicio en el nodo i .
3	Variable de carga Y_i , donde $i \in P$, representa el total de carga en el vehículo después de dejar el nodo i , $i \in P$.

Tabla 43. Definición de variables para la formulación matemática del problema PDPTW

Fuente: (Hongping L., 2002)

De acuerdo al autor Hongping L., 2002, la formulación matemática para el problema PDPTW es la siguiente:

Formulación	Descripción de restricciones
<p>Min</p> $\sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A^k} C_{ij} X_{ij}^k \dots \dots (1)$ <p>Sujeto a:</p> $\sum_{k \in K} \sum_{j \in V} X_{ij}^k = 1, \forall i \in V \dots \dots (2)$ $\sum_{k \in K} \sum_{j \in P} X_{0j}^k \leq K , \forall j \in V \dots \dots (3)$ $\sum_{j \in V} X_{ij}^k - \sum_{j \in V} x_{ji}^k = 0, \quad i \in V, k \in V \dots \dots (4)$ $\sum_{j \in V} X_{ij}^k - \sum_{j \in V} x_{ji}^k = 0, \quad i \in P^+, k \in K \dots \dots (5)$ $T_i + s_i + t_{i,i_d} \leq T_{i_d}, i \in P^+ \dots \dots (6)$ $T_i \leq T_{i_d}, i \in P^+ \dots \dots (7)$ $x_{ij}^k = 1 \rightarrow T_i + s_i + t_{ij} \leq T_j, \forall (i,j) \in A^k, k \in K \dots \dots (8)$ $\sum_{j \in P^-} X_{0j}^k = 0, k \in K \dots \dots (9)$ $\sum_{j \in P^+} X_{t_0}^k = 0, k \in K \dots \dots (10)$ $e_i \leq T_i < l_i, i \in P \dots \dots (11)$ $x_{ij}^k = 1 \rightarrow Y_j + q_j, \forall (i,j) \in A^k, k \in K \dots \dots (12)$ $0 \leq Y_i \leq Q^k, i \in V \dots \dots (13)$ $x_{ij}^k = 0/1, \forall (i,j) \in A^k, k \in K \dots \dots (14)$	<p>La formulación trata de minimizar los costos de viaje.</p> <p>Las restricciones (2) y (4) aseguran que cada una sea visitada exactamente una vez.</p> <p>Las restricciones (5) son restricciones de acoplamiento que aseguran que los pares PD estén en la misma ruta.</p> <p>Las restricciones (3), (9) y (10) imponen restricciones en la flota de vehículos, en las que cada vehículo debe ser originario y devolverse al almacén. Además, cuando un vehículo sale del almacén, la primera ubicación del cliente no debe ser un lugar de entrega en un par PD.</p> <p>Por otro lado, antes de que un vehículo regrese al almacén, la última ubicación del cliente no debe ser una ubicación de recogida en un par PD. Las restricciones (6) y (7) son restricciones de precedencia para pares PD.</p> <p>Las restricciones (8) y (11) son las limitaciones de la ventana de tiempo. Las restricciones (12) y (13) son restricciones de capacidad.</p>

Tabla 44. Formulación matemática del problema PDPTW

Fuente: (Hongping L., 2002)

Hongping L., 2002 resume el objetivo del problema PDPTW como sigue:

“El objetivo es atender a todos los clientes satisfaciendo las capacidades de los vehículos, ventanas de tiempo, precedencia y restricciones de acoplamiento.

El orden de los objetivos es el siguiente:

- I. Minimizar el número de vehículos
- II. Minimizar la distancia total de viaje
- III. Minimizar la duración total del programa o calendario
- IV. Minimizar el tiempo de espera total”.

Debido a las características de la problemática en MARES CORP este modelo **SÍ** resulta conveniente aplicarlo para obtener el modelo de solución debido a que considera actividades de recolección y entrega con restricción de calendarios de ventanas de entrega para ambas actividades.

4.2.2 Problemas de entregas y recolección (DPP - Delivery and Pick up Problems)

Chen y Wang (2011), formulan el problema DPP como sigue:

“Las aplicaciones de DPP se pueden encontrar frecuentemente, por ejemplo, en el sistema de distribución de cadenas de tiendas de comestibles. Cada tienda de comestibles puede tener una demanda para ambas entrega (comida fresca o bebidas sin alcohol) y recolección (artículos pasados de moda o botellas vacías). La industria de la fundición es otro ejemplo, se lleva a cabo la recolección de arena usada y la entrega de arena reutilizable purificada en la misma ubicación del cliente [...]

El problema DPP se divide en tres categorías: VRPB (inciso 4.2.2.1), MVRPB (inciso 4.2.2.2) y SDPP (inciso 4.2.2.3). En los primeros dos problemas, se asume que los clientes pueden dividirse entre clientes de entrega (clientes que reciben bienes) y clientes de recolección (clientes que envían bienes).

En VRPB, se considera la recolección de bienes después de que la última entrega se efectuó; sin embargo en MVRPB se pueden mezclar clientes tanto de entrega como de recolección libremente sin una ruta. En SDPP, se asume que clientes simultáneamente demandan bienes de – y bienes de suministro hacia – el almacén. La recolección y entrega se pueden ejecutar simultáneamente tal que cada cliente pueda visitarse solamente una vez por el vehículo. La operación de entrega y recolección simultánea disminuye los gastos del cliente o los inconvenientes asociados al manejo de equipos pero resulta en rutas más largas.”

Esta categoría de problemas se acercan más a lo que pretende incluir en el modelo de solución de la problemática de MARES CORP pues considera entregas y recolecciones, sin embargo, habrá que analizar que sub categoría se apega más al modelo a desarrollar.

4.2.2.1 Problema de rutas de vehículos con recolecciones (VRPB - Vehicle Route Problem with Backhauls)

A continuación una definición al problema VRPB:

“El problema de VRPB es una extensión del clásico VRP que incluye tanto un grupo de clientes a los que se deben entregar los productos, como un grupo de vendedores cuyos bienes deben ser transportados de vuelta al centro de distribución. Además, en cada ruta deben realizarse todas las entregas antes de recoger las mercancías para evitar reordenar las cargas en el vehículo.

El VRPB, también conocido como el problema de entrega-recolección, es una extensión del VRP que involucra puntos de entrega y de recolección. Los puntos de entrega son los sitios que van a recibir una cantidad de mercancías de un centro distribuidor. Los puntos de recolección son sitios que envían una cantidad de mercancías al centro distribuidor. El supuesto crítico es que todas las entregas deben hacerse en cada ruta antes de que puedan hacerse las recolecciones. Esto se deriva del hecho de que los vehículos están cargados en la parte trasera y la reordenación de las cargas en los camiones en los puntos de entrega no se considera económicamente factible. Las cantidades a entregar y recoger son determinísticas y se conocen con anticipación. Se supone que el parque de vehículos es homogéneo, teniendo cada uno una capacidad de determinado peso o volumen. Por lo tanto, una solución factible al problema consiste en un conjunto de rutas en las que se completan todas las entregas para cada ruta antes de que se realicen recolecciones y la capacidad del vehículo no sea excedida ya sea en los puntos de entrega o recolección asignados a la ruta. El objetivo es encontrar un conjunto de rutas que minimice la distancia total recorrida.” (Jacobs-Blecha C., 1992)

Dentro de la investigación al problema VRPB se tiene la siguiente descripción matemática:

“A continuación el modelo teórico de grafos para VRPB:

- Grafo completo no dirigido: $G' = (V_o', A')$
 n vértices de entrega, $i=1, \dots, n$ (conjunto de L)
 n vértices de recolección, $i=n+1, \dots, n+m$ (conjunto de B)
almacén central ($i=0$)
- Demanda $d_i > 0$, $i=1, \dots, n+m$ ($d_0=0$)
- K vehículos idénticos, cada uno con capacidad D , localizados en el almacén, que pueden ejecutar más de una ruta.
- Matriz del costo del viaje simétrico o asimétrico ($c_{ij} = +\infty$)
- K_L, K_B cantidad mínima de vehículos que se necesitan para servir a todos los clientes tanto de entrega como de recolección respectivamente (BPP)
Se asume que $K_L = \max\{K_L, K_B\}$
VRPB: encuentra una colección del mínimo costo de K rutas de vehículos tal que:
 - Cada ruta empieza y termina en el almacén;
 - Cada punto es visitado por exactamente una ruta;
 - El total de cargas de entrega de y recolección de la ruta no debe exceder, separadamente, la capacidad del vehículo D ;
 - En cada ruta de clientes de recolección, si hubiera, son visitados después que todos los clientes de entrega:
 - a) Rutas mixtas son orientadas
 - b) No existen rutas con recolecciones únicamente

VRPB es NP-duro en sentido estricto.” (Vigo D., et al, 1996)

Parte de este modelo **NO** puede utilizarse como modelo para resolver la problemática de MARES CORP puesto que se debe considerar la restricción de ventanas de entrega / recolección.

4.2.2.1.1 Problema de rutas de vehículos con recolecciones y ventanas de entrega (VRPBTW - Vehicle Route Problem with Backhauls and Time Windows)

Este problema puede entenderse mejor bajo la siguiente definición que se investigó:

“El problema VRPBTW se puede establecer como: Un conjunto de clientes con demanda determinística, ventanas de entrega determinísticas y ciertos tipos de requisitos de servicio (recolección y / o entrega) que deben ser atendidos por una flota homogénea de vehículos con capacidad fija que empiezan y terminan en un almacén central, que también tiene un cierto horizonte de tiempo. Para cada requisito de servicio (recolección o entrega), cada cliente debe ser asignado exactamente una vez a un vehículo. Los clientes se clasifican en dos grupos: los clientes de entrega cuya demanda debe ser entregada, y los clientes de recolección cuya demanda necesita ser recogida (si un cliente requiere recolección y entrega, se modela como dos clientes separados). En este texto, se permite a un vehículo llegar a un cliente antes de la ventana de tiempo pertinente, pero no atender al cliente hasta que se abra la ventana de entrega. El VRPBTW tiene dos objetivos: minimizar el número de rutas y minimizar la suma de la distancia total de todas las rutas. El VRPBTW puede ser clasificado en dos casos. En el VRPBTW con precedencia del cliente, todos los clientes de entrega deben ser servidos antes de cualquier cliente de recolección en cada ruta. En el VRPBTW sin precedencia del cliente, los clientes tanto de entrega como de recolección pueden intercalarse en una ruta determinada.” (Zhong Y., et al, 2005)

A continuación otra formulación matemática al problema VRPBTW:

“*Formulación matemática de VRPBTW:* Sea $G = (N, A)$ un grafo completo no dirigido con el conjunto de nodos N y el conjunto de arco $A = \{(i, j) \mid i, j \in N\}$. El conjunto de nodos está dividido en $N = \{0, L, B\}$, donde 0 es el almacén, L es el conjunto de clientes de entrega, $L = \{1, \dots, n\}$, y B es el conjunto de clientes de recolección, $B = \{n + 1, \dots, n + m\}$. Cada nodo $i \in N$ se asocia con: (1) una cantidad no negativa a_i o b_i de los bienes a ser entregados o recogidos; (2) una ventana de entrega $[e_i, l_i]$, donde e_i y l_i son el límite inferior y superior de la ventana de entrega, respectivamente (y donde e_0 es el tiempo de inicio más temprano de cada vehículo desde el almacén y l_0 el último tiempo de retorno) ; Y (3) un tiempo de maniobra s_i para cargar o descargar las mercancías (con $s_0 = 0$). Finalmente, una matriz de tiempo de viaje simétrica $T = [t_{ij}]$ que satisfaciendo la desigualdad triangular definida en E .

Dada una flota de vehículos idénticos, $V = \{1, \dots, v\}$, cada uno con capacidad d , el VRPBTW consiste entonces en encontrar un conjunto de rutas de vehículos con costos mínimos (tamaño de flota y tiempo de la ruta), originados y terminados en el almacén, de manera que: (1) cada vehículo preste servicio a una ruta; (2) cada nodo de cliente i es visitado exactamente una vez; (3) la cantidad de mercancías a bordo nunca exceda la capacidad del vehículo; (4) los clientes de entrega directa preceden a los de recolección en cada ruta del vehículo (5) el tiempo de inicio para cada vehículo es más grande o igual al límite inferior de la ventana de entrega en el almacén; (6) el tiempo de retorno en cada ruta de vehículo es menor al límite superior de la ventana de entrega en el almacén; (7) el tiempo de inicio de servicio

en cada nodo i es menor o igual que el límite superior de la ventana de entrega l_i ; Y (8) el tiempo de inicio de servicio en cada vértice i es mayor o igual que el límite inferior de la ventana de entrega e_i . La formulación matemática de VRPBTW, que se modifica de Goetschalckx y Jacobs-Belcha (1989), se puede describir como sigue, donde $x_{ijk} = 1$ si el arco (i, j) es atravesado por el vehículo k , 0 en caso contrario; $U_{ik} = 1$ si el cliente de recolección i es servido por el vehículo k , 0 en caso contrario; $V_{ik} = 1$ si el cliente de recolección i es servido por el vehículo k , 0 en caso contrario; $t_i =$ variable real para denotar el tiempo de comienzo para servir al cliente i ; Y T es un valor extremadamente grande". (Cho Y., et al, 2005)

Cho Y., et al, 2005, describen la formulación matemática al problema VRPBTW conforme la siguiente tabla:

Formulación	Descripción de restricciones
<p>Min =</p> $\sum_{j=1}^{n+m} \sum_{k=1}^v x_{0jk} \dots \dots \dots (1)$ <p>Min=</p> $\sum_{i=0}^{n+m} \sum_{j=0}^{n+m} \sum_{k=1}^v t_{ij} * x_{ijk} \dots \dots \dots (2)$ <p>Sujeto a:</p> $\sum_{k=1}^v u_{ik} = 1 \quad i = 1 \sim n \dots \dots \dots (3)$ $\sum_{k=1}^v v_{jk} = 1 \quad i = n + 1 \sim n + m \dots \dots \dots (4)$ $\sum_{i=1}^n a_j * u_{jk} \leq d \quad k = 1 \sim v \dots \dots \dots (5)$ $\sum_{i=n+1}^{n+m} b_i * v_{jk} \leq d \quad k = 1 \sim v \dots \dots \dots (6)$ $\sum_{i=0}^{n+m} x_{ijk} = \begin{cases} u_{jk} & \text{si } j = 1 \sim n \\ v_{jk} & \text{si } j = 0, n + 1 \sim n + m \end{cases} ; k = 1 \sim v \dots \dots \dots (7)$	<p>Las ecuaciones (1) y (2) son funciones objetivo que minimizan el tamaño de la flota y el tiempo de la ruta respectivamente.</p> <p>Los conjuntos de restricciones (3) y (4) indican por separado que cada cliente de entrega y cada cliente de recolección debe ser atendido por exactamente un vehículo.</p> <p>Los conjuntos de restricciones (5) y (6) indican que la demanda agregada de entrega y recolección en el vehículo k no puede exceder la capacidad del vehículo.</p> <p>Los conjuntos de restricciones (7) y (8) describen comúnmente las relaciones de conservación del flujo. (continúa...)</p>

Formulación	Descripción de restricciones
$\sum_{j=0}^{n+m} x_{ijk} = \begin{cases} u_{jk} & \text{si } i = 0 \sim n \\ v_{jk} & \text{si } i = n + 1 \sim n + m \end{cases} ; k$ $= 1 \sim v \dots \dots (8)$	<p>El conjunto de restricciones (9) establece que la precedencia de la entrega y recolección en cada vehículo k, donde los clientes de recolección deben ser atendidos después de los clientes de entrega.</p>
$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0, n+1}^{n+m} x_{ijk} = 1 \quad k = 1 \sim v \dots \dots (9)$	<p>El conjunto de restricciones (10), que calcula el tiempo de inicio más temprano para servir al cliente j, garantiza que el sub-viaje podría estar rompiéndose.</p>
$t_j \geq t_i + s_i + t_{ij} - (1 - x_{ijk})T \quad i, j$ $= 1 \sim n + m; k$ $= 1 \sim v \dots \dots (10)$	<p>El conjunto de ecuaciones (11) es la restricción de ventana de tiempo de servicio al cliente i.</p>
$e_i \leq t_i \leq l_i \quad i = 1 \sim n + m \dots \dots (11)$	<p>Los conjuntos de restricciones (12), (13) y (14) definen el dominio de las variables de decisión, respectivamente.</p>
$u_{0k} = 1; u_{jk} = 0 \text{ ó } 1 \quad i = 0 \sim n; k$ $= 1 \sim v \dots \dots (12)$	
$v_{0k} = 1; v_{jk} = 0 \text{ ó } 1 \quad i$ $= 0, n + 1 \sim n + m; k$ $= 1 \sim v \dots \dots (13)$	
$x_{ijk} = 0 \text{ ó } 1; t_i \geq 0 \quad i, j = 0 \sim n + m; k$ $= 1 \sim v \dots \dots (14)$	

Tabla 45. Formulación matemática del problema VRPBTW

Fuente: (Cho Y., et al, 2005)

Adicional a esta formulación, Cho Y., et al, 2005, detallan las restricciones que se deben considerar en la formulación al problema VRPBTW:

“[...] Las funciones objetivo minimizan el tamaño de la flota y el tiempo en tránsito, respectivamente, con las siguientes restricciones:

- Cada cliente de entrega y recolección debe ser atendido por exactamente un vehículo.
- La demanda agregada para recolección y entrega en el vehículo k no puede exceder la capacidad del vehículo.
- Existen restricciones que describen comúnmente las relaciones para la conservación del flujo.
- Restricción que establece la precedencia de entrega y recolección en cada vehículo k , donde los clientes de recolecciones deben ser atendidos después de los clientes de entrega.
- Restricción que calcula el tiempo de inicio más temprano para servir al cliente j , garantizando que el sub-tour puede ser suspendido.
- Restricción de ventanas de entregas para servir al cliente i .
- Restricciones que establecen y definen el dominio de las variables de decisión respectivamente.”

De acuerdo a lo antes descrito este problema **SÍ** se asemeja a lo que sucede en MARES CORP, puesto que sí considera entregas y recolecciones y además que éstas deben ser servidas dentro de ventanas de tiempo.

4.2.2.2 Problemas mixtos de rutas de vehículos con recolecciones (MVRPB - Mixed Vehicle Route Problem with Backhauls)

El problema MVRPB se puede definir como sigue:

“El problema de MVRPB es una variante del problema VRP donde los vehículos no sólo se requieren para entregar mercancías sino también para recoger algunas mercancías de los clientes. En el MVRPB, cada cliente tiene una demanda de entrega o recolección que debe satisfacerse y los clientes pueden ser visitados en cualquier orden a lo largo de la ruta. Dada una flota de vehículos y un conjunto de clientes con demandas de entrega y recolección, MVRPB determina un conjunto de rutas de vehículos que se originan y terminan en un almacén único y se visita a todos los clientes exactamente una vez. El objetivo es minimizar la distancia total recorrida con el menor número de vehículos. También se puede imponer una restricción de máxima longitud de ruta a los vehículos.[...]

Matemáticamente, el MVRPB es descrito por un conjunto de vehículos homogéneos V , un conjunto de clientes de entrega L , un conjunto de clientes de recolección B , y un grafo no dirigido $G(N, A)$. $N = \{0, \dots, n + m\}$ denota el conjunto de nodos donde $L = \{1, 2, \dots, n\}$, $B = \{n + 1, n + 2, \dots, n + m\}$, 0 es el almacén. Cada vehículo tiene capacidad Q y cada cliente (nodo) i se caracteriza por su ubicación geográfica y sus requerimientos de entrega o recolección D_i y P_i , respectivamente. $A = \{(i, j) : i, j \in N, j \neq i\}$ denota el conjunto de arcos que representa las conexiones entre el almacén y los clientes y en medio de los clientes. Un costo / distancia c_{ij} está asociado con cada arco (i, j) . Finalmente, Q, D_i, P_i, c_{ij} se asume que son enteros no negativos. El objetivo de MVRPB es determinar un conjunto de rutas tales que:

- i. Cada vehículo realiza exactamente una ruta.
- ii. Cada cliente es visitado una sola vez por uno de los vehículos que satisface completamente su demanda o suministro.
- iii. La carga es transportada por un vehículo entre cualquier par de clientes contiguos en la ruta que no debe exceder su capacidad.
- iv. La distancia total dada por la suma de los arcos que pertenecen a estas rutas es mínima”. (Catay B., s/f)

Catay B., s/f, enlista las siguientes variables de decisión para la formulación matemática del problema MVRPB:

Variable	Descripción
X_{ijv}	1, si el vehículo v viaja directamente del cliente i al cliente j 0, de otra manera
L_j	Carga del vehículo después de haber servido al cliente $j \in N_c$
π_j	Variable de eliminación del sub viaje

Tabla 46. Variables de decisión para la formulación matemática del problema MVRPB

Fuente: (Catay B., s/f)

Catay B., s/f describe la formulación matemática para el problema MVRPB de acuerdo a la siguiente tabla:

Formulación	Descripción de restricciones
<p>Min $z =$</p> $\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{v \in V} C_{ij} X_{ijv} \dots \dots \dots (1)$	<p>En la formulación anterior, N_C denota el conjunto de clientes ($N \setminus \{0\}$) y M es un número suficientemente grande (por ejemplo $M = \max \{ \sum_{j \in N_C} (D_j + P_j), \sum_{i \in N} \sum_{j \in N, j \neq i} C_{ij} \}$)</p>
<p>Sujeto a:</p> $\sum_{i \in N} \sum_{v \in V} x_{ijv} = 1 \quad i \in N_C \dots \dots \dots (2)$	<p>La función objetivo (1) minimiza la distancia total recorrida.</p>
$\sum_{i \in N} \sum_{v \in V} x_{ijv} = 1 \quad j \in N_C \dots \dots \dots (3)$	<p>Los conjuntos de restricciones (2) y (3) aseguran el servicio de cada cliente exactamente una vez.</p>
$\sum_{i \in N} x_{ikv} - \sum_{j \in N} X_{k j v} = 0 \quad k \in N_C, v \in V \dots \dots \dots (4)$	<p>La restricción (4) asegura que si un vehículo llega con un cliente, entonces el mismo vehículo parte del cliente. La carga después de dar servicio al primer cliente se define con la restricción (5) mientras que la carga "en ruta" está limitada con la restricción (6).</p>
$l_j \geq \sum_{i \in N} \sum_{j \in N_C} D_j x_{ijv} - D_j + P_j - M (1 - x_{0jv}) \quad j \in N_C, v \in V \dots \dots \dots (5)$	<p>La restricción (5) asegura que la carga al salir del almacén y "en ruta", respectivamente, no exceda la capacidad del vehículo. La restricción (9) es restricción de eliminación de sub viajes.</p>
$l_j \geq l_i - D_j + P_j - M (1 - \sum_{v \in V} x_{ijv}) \quad i, j \in N_C, i \neq j \dots \dots \dots (6)$	<p>La restricción (10) es la restricción de no negatividad y la restricción (11) define las variables binarias.</p>
$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N_C} D_j x_{ijv} \leq Q \quad v \in V \dots \dots \dots (7)$	<p>Se puede probar que el problema MVRPB es NP-duro de la siguiente manera: Sea $P_i = 0$ para todo $i \in B$, es decir, $B = \emptyset$. Entonces el problema se reduce a VRP, que se sabe que es NP-duro. Por lo tanto, MVRPB es también NP-duro ya que VRP es un caso especial de MVRPB".</p>
$l_j \leq Q \quad j \in N_C \dots \dots \dots (8)$	
$\pi_j \geq \pi_i + 1 - n (1 - \sum_{v \in V} x_{ijv}) \quad i, j \in N_C, i \neq j \dots \dots \dots (9)$	
$\pi_j \geq 0 \quad j \in N_C \dots \dots \dots (10)$	
$x_{ijv} \in \{0, 1\} \quad i, j \in N, v \in V \dots \dots \dots (11)$	

Tabla 47. Formulación matemática del problema MVRPB

Fuente: (Catay B., s/f)

Según describe Catay B. en párrafos anteriores para MVRPB se consideran recolecciones, sin embargo, no se toman en cuenta las restricciones de ventana de entrega y/o recolección, por lo tanto, **NO** podría utilizarse en el algoritmo que se desea implementar para resolver la problemática de MARES CORP.

Para la categoría de MVRPB se desprenden la siguiente problema con ventanas de tiempo:

4.2.2.2.1 Problemas mixtos de rutas de vehículos con recolecciones y ventanas de entrega (MVRPBTW - Mixed Vehicle Route Problem with Backhauls and Time Windows)

El MVRPBTW puede entenderse bajo la siguiente breve descripción:

“La descripción del problema MVRPBTW es igual que la del VRPBTW excepto por el último enunciado. En el MVRPBTW, no hay precedencia de clientes. En la infraestructura de la red MVRPBTW se puede ver que a los clientes de recolección se les permite ser atendidos antes que los clientes de entrega.” (Gupta, S., 2013).

A continuación el desarrollo de este modelo agregando capacidad de manufactura y regulaciones de horas de manejo:

“Sea $G=(V,A)$ un grafo dirigido, donde $V= \{0, \dots, n\}$ es un conjunto de $n+1$ nodos y A es un conjunto de arcos $\{i,j\}$, donde $\{i,j\} \in V, j \neq 0, i \neq j, i \neq n+1$. Nodo 0 representa el almacén, mientras que el conjunto de nodos restantes $V' = V \setminus \{0\}$ corresponde a los n clientes. Cada cliente $i \in V'$ puede requerir un suministro de $q_{i,l}$ unidades de transporte de un producto l desde el almacén y una recolección de p_i unidades de transporte. La suma de todas las unidades de transporte de una orden i , q_i , es dada por $q_i = \sum_{l \in L} q_{i,l}$ donde L es el conjunto de diferentes productos. Los conjuntos CP y CQ representan respectivamente el conjunto de nodos / clientes que requiere recolección y entrega, donde CP, CQ $\in V'$. El conjunto CV representa a todos los clientes que necesitan ser visitados, ya sea para su recolección o entrega, donde CV= CP U CQ. Cada arco $\{i, j\}$ tiene un costo c_{ij} que representa los costos relacionados con el camino entre el arco i y j , independientemente del tipo de vehículo utilizado. Estos costos están relacionados con el ejemplo de costos de peaje. Una flota heterogénea del vehículo se estaciona en el almacén y se utiliza para abastecer a los clientes. El parque de vehículos está compuesto por m diferentes tipos de vehículos, con $K = \{ 1, \dots, m \}$. Para cada tipo $k \in K$, m_k vehículos están disponibles en el almacén, cada uno que tiene una capacidad Q_k . Cada tipo de vehículo $k \in K$ tiene un costo fijo F_k (€ / h) que representa el capital de amortización y un costo variable V_k (€ / km) compuesto de los costos de combustible, costos de servicio / mantenimiento, costo de mantenimiento de neumáticos. Además, para cada arco $(i, j) \in A$ y para cada tipo de vehículo $k \in M$ hay un costo de enrutamiento no negativo $c_{i,j}^k$ proporcional a la distancia $d_{i,j}$ entre los nodos i y j la velocidad media t_k del tipo de vehículo $k \in M$, donde:

$$c_{i,j}^k = d_{i,j} \left(\frac{F_k}{t_k} + V_k \right)$$

Una ruta se define como el par (R,k) , donde $R= (i_1, \dots, i_{|R|})$, con $i_1 = i_{|R|} = 0$ y $(i_1, \dots, i_{|R|}) \subset V'$, es un circuito simple en G conteniendo el almacén, y k es el tipo de vehículo asociado a la ruta. R es usado para referir ambos a la secuencia de visita y al conjunto de clientes. Cada cliente i tiene una ventana de tiempo dada $[a_i, b_i]$ en

la cual su servicio s_i tiene que empezar. El servicio s_i está relacionado con la descarga y carga de unidades de un cliente dado i . La hora de llegada y salida en / desde un cliente i y con un tipo determinado de vehículo k viene dada por T_{Si}^k y T_{di}^k . Estos horarios de llegada y salida dependen de las regulaciones de horas de conducción, que consisten en algunos de estos componentes:

- A un conductor de camión no se le permite conducir más de nueve horas en un día, sin embargo, hay algunas excepciones.
- Un conductor de camión debe descansar al menos nueve horas entre dos días hábiles de trabajo ($b_{required}$)
- Después de un máximo de cuatro horas y media (b_{needed}), el conductor del camión debe tomar un descanso de al menos media hora (b_1).
- Si el descanso es menor que 45 minutos, b_{total} , entonces se requiere otro descanso de al menos 15 minutos, b_2 , es requerido con b_{needed} .
- El tiempo de servicio s_i no puede considerarse como tiempo de descanso. Esto significa que, con el fin de tomar un descanso, el conductor puede tomar uno antes de la hora de servicio o después de un tiempo de servicio en un cliente determinado i .

En este problema dado, la producción de todos los bienes que necesitan ser entregados tiene que ser terminada antes de un tiempo dado, t_f . Aquí, si los recursos necesarios para un pedido dado no están disponibles antes de t_f , la orden se pierde. En esta formulación de problemas, la secuencia de los clientes visitados debe ser encontrada asignando diferentes tipos de vehículos a las diferentes rutas que serán capaces de satisfacer la demanda, respetando la ventana de tiempo de cada cliente y también las capacidades de fabricación. Además, para cada ruta se evaluará la posición de los descansos, ya sea antes o después del tiempo de servicio en un cliente determinado.” (Oesterle, J. et al, 2015)

De acuerdo a la descripción para este tipo de problema **SÍ** puede utilizarse para desarrollar el algoritmo que podrá resolver la problemática en MARES CORP.

4.2.2.3 Problema de rutas de vehículos con entregas y recolecciones simultáneas (SDPP - Simultaneous Delivery and Pickup Problem)

Este problema se define de acuerdo a la siguiente cita para su mejor entendimiento:

“Durante las últimas décadas, la importancia de la logística inversa ha mostrado un rápido crecimiento debido a las cuestiones ambientales y económicas. El “ruteo” de vehículos es uno de los temas más críticos que afectan el desempeño de la logística inversa. La logística inversa aumentó la importancia del problema de “ruteo” de vehículos con recolección y entrega simultáneas. Así que se decide centrarse en VRPSDPP y sus estudios relacionados. Una suposición general en VRPSDPP es que todas las mercancías entregadas deben ser originadas del almacén, todos los productos de recolección deben ser transportados de vuelta al almacén. La entrega y recolección de mercancías deben cumplirse simultáneamente cuando cada cliente es visitado sólo una vez por un vehículo y la descarga se realiza antes de cargar a los clientes.” (Aravind, P., 2014)

Otra cita que resultó de la investigación para el VRPSDPP se describe a continuación:

“[...] nuestro interés está en el VRPSDPP, que puede ser descrito como sigue. Sea $G = (V, E)$ un grafo completo y dirigido con un conjunto de vértices $V = 0, \dots, n$, donde el vértice 0 representa el almacén ($V_0 = \{0\}$) y el resto de éstos los clientes. Cada arista

$(i, j) \in E$ tiene un costo no negativo c_{ij} que satisface la desigualdad triangular. Cada cliente $i \in V - V_0$ tiene una demanda $q_i \in D$ para la entrega y $p_i \in P$ para la recolección. Donde D y P son los conjuntos que contienen la cantidad de una determinada carga (o personas) a ser distribuida y recolectada, respectivamente. Sea, $C = 1, \dots, m$ el conjunto de vehículos disponibles con capacidad Q . VRPSDPP consiste en construir un conjunto de m rutas con los siguientes requisitos: (i) todas las demandas de recolección y entrega deben ser cumplidas; (ii) no debe excederse la capacidad del vehículo; (iii) un solo vehículo visita un determinado cliente; (iv) se minimiza la suma de los costos.

Una serie de aplicaciones de VRPSDPP se encuentran en la industria de las bebidas, donde las botellas llenas se entregan mientras que las vacías se recogen; en las tiendas de abarrotes, donde se recogen pallets o contenedores para su uso en el transporte, etc. Por otra parte, algunos clientes solicitan que los servicios de entrega y recolección se realicen al mismo tiempo, ya que si se lleva a cabo por separado puede implicar costos adicionales y esfuerzos operativos para estos clientes.” (Subramanian, A., s/f)

Antes de formular el problema de SDPP otros autores como Tang y Diéguez (2002), definen la siguiente notación para las variables de la formulación matemática:

Variable	Descripción
V	Conjunto de clientes
V_0	Conjunto de clientes más el almacén (cliente 0): $V_0 = V \cup \{0\}$;
$V_p(V_D)$	Conjunto de clientes de recolección (entrega): $V = V_p = V_D$
N	Número total de clientes: $N = V $
$N_p(N_D)$	Número de clientes de recolección (entrega): $N_p = V_p $, $N_D = V_D $ y $N = N_p = N_D$
C_{ij}	Distancia entre clientes i y j
p_i	Demanda de recolección del cliente i : $i=1, \dots, N$
d_i	Demanda de entrega del cliente i : $i=1, \dots, N$
Q	Capacidad del vehículo
NV	Número máximo de vehículos

Tabla 48. Notación para las variables de la formulación matemática del problema VRPSDPP

Fuente: (Tang y Diéguez, 2002)

Tang y Diéguez (2002), enlistan las siguientes variables de decisión que utilizarán en la formulación matemática para el problema VRPSDPP:

Variable	Descripción
X_{ij}	1, si el arco (i,j) pertenece al conjunto de rutas óptimas; 0, de otra manera
Y_{ij}	Demanda recolectada en los clientes ruteados al nodo (incluido el nodo i) y transportados al arco (i,j)
Z_{ij}	Demanda a ser entregada a los clientes ruteada después de los nodos y transportada en el arco (i,j)

Tabla 49. Variables de decisión para la formulación matemática del problema VRPSDPP

Fuente: (Tang y Diéguez, 2002)

Tang y Diéguez (2002) describen la formulación matemática para el problema VRPSDPP como sigue:

Formulación	Descripción de restricciones
<p>Min</p> $\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N c_{ij} x_{ij} \dots \dots (1)$ <p>Sujeto a:</p> $\sum_{i=0}^N x_{ij} = 1, \quad j = 1, \dots, N \dots \dots (2)$ $\sum_{j=0}^N x_{ij} = 1, \quad i = 1, \dots, N \dots \dots (3)$ $\sum_{j=0}^N x_{ij} \leq NV \dots \dots (4)$ $\sum_{i=0}^N y_{ji} - \sum_{i=0}^N y_{ij} = p_j, \forall j \neq 0 \dots \dots (5)$ $\sum_{i=0}^N z_{ij} - \sum_{j=0}^N z_{ji} = d_j, \forall j \neq 0 \dots \dots (6)$ $y_{ij} + z_{ij} \leq Qx_{ij}, \quad i, j = C, \dots, N \dots \dots (7)$ $x_{ij} \in \{0, 1\} \quad i, j = C, \dots, N \dots \dots (8)$ $y_{ij} \geq 0 \quad i, j = C, \dots, N \dots \dots (9)$ $z_{ij} \geq 0 \quad i, j = C, \dots, N \dots \dots (10)$	<p>El objetivo de esta función se centra en minimizar la distancia total recorrida.</p> <p>Las restricciones (2) y (3) aseguran que cada cliente es visitado por exactamente un vehículo.</p> <p>La restricción (4) fija un límite del número de vehículos usados.</p> <p>Las restricciones (5) y (6) son ecuaciones de flujo para demandas de recolección y entrega, respectivamente; éstas garantizan que ambas demandas son satisfechas por cada cliente.</p> <p>La restricción (7) establece que las demandas de recolección y entrega pueden ser transportadas usando arcos incluidos en la solución; imponen un límite superior en el volumen total transportado por un vehículo en alguna sección dada de la ruta.</p> <p>Finalmente, la restricción (8)-(10) define la naturaleza de las variables de decisión. En sentido más amplio, el problema de restricciones garantiza que cada vehículo deja el almacén con un volumen equivalente a la suma de las demandas de entrega de los clientes en el servicio de ruta por este vehículo, y cada vehículo retorna al almacén con un volumen equivalente a la suma de las demandas de recolección de los clientes en la misma ruta."</p>

Tabla 50. Formulación matemática del problema VRPSDPP

Fuente: (Tang y Diéguez, 2002)

El problema SDPP **NO** es viable para el algoritmo que se desea desarrollar en MARES CORP debido a que no se hacen entregas y recolecciones simultáneas, es decir, las recolecciones no siempre son requeridas al mismo tiempo que se hacen las entregas de los insumos para la salud.

Adicionalmente, para esta variedad de VRPSDPP se desprenden la siguiente categoría:

4.2.2.3.1 Problemas de entrega y recolección simultáneos con ventanas de entrega (SDPPTW - Simultaneous Delivery and Pickup Problem with Time Windows)

El problema SDPPTW se comprende bajo la información de la siguiente cita:

“VRPTW con entrega simultánea y servicio de recolección (VRPTW-SDP) es una extensión de VRPTW, donde los clientes requieren entrega y recolección simultánea.

VRPTW se define como la selección de rutas para un número limitado de vehículos para servir a un grupo de clientes en las ventanas de tiempo. Cada vehículo tiene una capacidad limitada. Inicia y termina en el mismo almacén. Cada cliente es atendido exactamente una vez. Si los vehículos llegan antes de que la ventana de tiempo "se abra" o después de que "se cierra", habrá un costo de espera y un costo por llegar tarde. Se supone que hay K vehículos en el almacén 0. N clientes están esperando para ser servidos y cada uno de los clientes tiene una demanda de $g_i = (i=1,2,3, \dots, N)$ unidades. La distancia entre el cliente i y j es d_{ij} . Cada vehículo tiene una capacidad $q_k=(k=1, 2, 3, \dots, K)$ de unidades. Es decir, la demanda total de los clientes servidos por cada vehículo no puede exceder q_k unidades. Por lo tanto, el vehículo tiene que ser devuelto periódicamente al almacén para recargar o un nuevo vehículo necesita ponerse disponible para alguna entrega. Además, cada cliente debe ser visitado una vez y sólo una vez por exactamente un vehículo. S_i representa el tiempo de servicio requerido por el cliente i . Por lo tanto, el vehículo tiene que permanecer en la ubicación del cliente i por un intervalo de tiempo al menos $s_i = (s_0 = 0$ es asociado al almacén 0) para el servicio. Se considera una ventana de tiempo $[ET_i, LT_i]$. Por lo tanto, si un vehículo llega al cliente i antes de ET_i tiene que esperar hasta el comienzo de la ventana de tiempo para servir al cliente. Por lo tanto, hay un costo e por esperar. Por otra parte, si un vehículo no puede llegar a i antes LT_i , habrá un costo f por llegar tarde. La velocidad de cada vehículo es v_k . t_i , representa el momento en que el vehículo llega i desde el almacén. Y la unidad de carga de cada vehículo es C_k . Este documento considera la condición de que los vehículos del almacén son los mismos, es decir, los vehículos tienen la misma velocidad v , la misma capacidad q y la misma unidad de carga C . [...]” (Gan X., et al, 2012)

Otra definición al problema SDPPTW, es la que explican los autores Chen y Wang, (2011). Primero, definen los siguientes conjuntos que se utilizan en la formulación matemática del problema SDPPTW:

Conjuntos	Descripción
J	Conjunto de clientes, $J=\{j\} = (1, \dots, n)$
J_F	Conjunto de todos los nodos de canal directos, ejemplo, DC y localidades de los clientes, $J_F=\{0\} \cup J$
J_R	Conjunto de todos los nodos de canal inverso, ejemplo localidades de los clientes y CC, $J_R= J \cup \{n+1\}$
J_C	Conjunto de nodos, $J_C= \{0\} \cup J \cup \{n+1\}$
V	Conjunto de vehículos, $V= \{v\} = V_1, \dots, v_M$

Tabla 51. Conjuntos definidos para la formulación matemática del problema SDPPTW

Fuente: (Chen y Wang, 2011)

Después, definen los coeficientes que se utilizan en la formulación matemática del problema SDPPTW:

Coeficientes	Descripción
q_v	Capacidad del vehículo v , $q_v \in \mathbb{R}^+$
g_v	Costo de despacho del vehículo v , $g_v \in \mathbb{R}^+$
c_{ij}	Distancia entre nodos $i \in J_F$, $j \in J_R$; $i \neq j$, $c_{ij} \in \mathbb{R}^+$
t_{ij}	Tiempo de viaje entre nodos $i \in J_F$, $j \in J_R$; $i \neq j$, $t_{ij} \in \mathbb{R}^+$
d_j	Demanda de entrega del cliente $j \in J$, $d_j \in \mathbb{Z}^+$
p_j	Monto de recolección del cliente $j \in J$, $p_j \in \mathbb{Z}^+$
s_j	Tiempo de servicio del cliente $j \in J$, $s_j \in \mathbb{R}^+$
a_j	Tiempo de servicio más temprano del cliente $j \in J$, $a_j \in \mathbb{R}^+$
b_j	Tiempo de servicio más tardío del cliente $j \in J$, $b_j \in \mathbb{R}^+$
a_0	Tiempo de salida más temprano de cualquier vehículo desde DC, $a_0 \in \mathbb{R}^+$
b_{n+1}	Tiempo de salida más tardío en que un vehículo debe retornar al CC, $b_{n+1} \in \mathbb{R}^+$
M	Una constante arbitraria amplia
α	Un parámetro que indica la compensación entre el costo de despacho y el costo del viaje, $\alpha \in [0,1]$

Tabla 52. Coeficientes definidos para la formulación matemática del problema SDPPTW

Fuente: (Chen y Wang, 2011)

Posteriormente, definen las variables de decisión que se utilizan en la formulación matemática del problema SDPPTW:

Variables de decisión	Descripción
L_{0v}	Carga del vehículo $v \in V$ cuando es dejada en DC, $L_{0v} \in \mathbb{Z}^+$
L_j	Carga restante del vehículo después de haber servido al cliente $j \in J$, $L_j \in \mathbb{Z}^+$
x_{ijv}	Variable de viaje del vehículo $v \in V$, $x_{ijv} \in \{0,1\}$; si éste va directamente desde el nodo $i \in J_F$ al nodo $j \in J_R$, $x_{ijv} = 1$; de otra manera $x_{ijv} = 0$
T_j	Tiempo para empezar a servir al cliente $j \in J$, $T_j \in \mathbb{R}^+$
T_{0v}	Tiempo de despacho del vehículo $v \in V$ al DC, $T_{0v} \in \mathbb{R}^+$
$T_{(n+1)v}$	Tiempo de arribo del vehículo $v \in V$ al CC, $T_{v(n+1)} \in \mathbb{R}^+$

Tabla 53. Variables de decisión definidas para la formulación matemática del problema SDPPTW

Fuente: (Chen y Wang, 2011)

A continuación, Chen y Wang, 2011, desarrollan la siguiente formulación matemática del problema SDPPTW:

Formulación

Min

$$z = \alpha \sum_{v \in V} \sum_{j \in J} g_v x_{0jv} + (1-\alpha) \sum_{i \in J_F} \sum_{j \in J_R} \sum_{v \in V} c_{ij} x_{ijv} \dots (1)$$

Minimizar el costo de despacho total y el costo total del viaje sujeto a:

$$\sum_{i \in J_F} \sum_{v \in V} x_{ijv} = 1 \forall j \in J \dots (2)$$

(Servir a todos los nodos de los clientes exactamente una vez)

$$\sum_{i \in J_F} x_{ihv} = \sum_{j \in J_R} x_{h j v} \forall h \in J, \forall v \in V \dots (3)$$

(Llegar y entregar a cada cliente con el mismo vehículo)

$$\sum_{j \in J} x_{0jv} = \sum_{i \in J} X_{i(n+1)v} \forall v \in V \dots (4)$$

(Vehículos con salida desde D.C. deben finalmente regresar a C.C)

$$L_{0v} = \sum_{i \in J_F} \sum_{j \in J} d_j x_{ijv} \forall v \in V \dots (5)$$

(Cargas iniciales de los vehículos)

$$L_j \geq L_{0v} - d_j + p_j - M(1 - x_{0jv}) \forall j \in J, \forall v \in V \dots (6)$$

(Cargas del vehículo después del primer cliente)

$$L_j \geq L_i - d_j + p_j - M(1 - \sum_{v \in V} X_{ijv}) \forall i \in J, \forall j \in J \dots (7) \text{ (continua...)}$$

Formulación
<p>(Cargas de vehículos “en ruta”)</p> $L_{0v} \leq q_v \forall v \in V \dots (8)$ $L_j \leq q_v + M \left(1 - \sum_{\forall i \in J_F} X_{ijv} \right) \forall j \in J, \forall v \in V \dots (9)$
<p>(Restricciones de capacidad de la flota vehicular)</p> $T_{0v} + t_{0j} - M(1 - X_{0jv}) \leq T_j \forall j \in J, \forall v \in V \dots (10)$ $T_i + s_i + t_{ij} - M \left(1 - \sum_{v \in V} X_{ijv} \right) \leq T_j \forall i \in J, \forall j \in J \dots (11)$ $T_i + s_i + t_{i(n+1)} - M(1 - x_{i(n+1)v}) \leq T_{(n+1)v} \forall i \in J, \forall v \in V \dots (12)$ $a_0 \leq T_{0v} \forall v \in V \dots (13)$ $a_j \leq T_j \leq b_j \forall j \in J \dots (14)$ $T_{(n+1)v} \leq b_{n+1} \forall v \in V \dots (15)$
<p>(Asegurar factibilidad del tiempo calendarizado)</p> $x_{ijv} \in \{0,1\} \forall i \in J_F, \forall j \in J_R, \forall v \in V \dots (16)$

Tabla 54. Formulación matemática del problema SDPPTW

Fuente: (Chen y Wang, 2011)

Se da el siguiente ejemplo ilustrativo para resolver este problema:

“Se han creado organizaciones de hospitalización domiciliaria para pacientes que requieren atención médica prolongada y regular para proporcionar un servicio de salud de calidad en su casa, mientras se reduce el requisito de cama en los hospitales. Los servicios de cuidado de la salud en el hogar son provistos en Francia por las empresas de Atención a la Salud Domiciliaria, HHC (Home Health Care), por sus siglas en inglés. Cada día, una compañía de HHC tiene diversas actividades logísticas como la entrega de medicamentos y dispositivos médicos desde su farmacia (también llamada almacén) a los pacientes en su casa. También se necesitan algunos medicamentos especiales, como fármacos de quimioterapia y productos para la sangre, de los hospitales a los pacientes. Por otro lado, el HHC

también necesita recoger materiales de los pacientes y entregarlos en diferentes lugares. Las muestras de sangre de los pacientes se recogen y se entregan a un laboratorio médico. Los desechos médicos, los medicamentos no utilizados y los dispositivos médicos se recogen y se traen de nuevo al HHC o al almacén. Como las empresas HHC suelen ser pequeñas pero sirven a un número bastante grande de pacientes con localizaciones dispersas, es crucial para diseñar cuidadosamente las rutas de los vehículos HHC con el fin de reducir sus costos de operación mientras proveen el servicio de calidad a los pacientes.” (Nazif, H., 2014)

De acuerdo a la información en párrafos de esta sección el problema SDPPTW **NO** es viable para el algoritmo a desarrollar dentro de MARES CORP debido a que no se hacen entregas y recolecciones simultáneas con ventanas de tiempo, es decir, las recolecciones no siempre son requeridas a la vez que se hacen las entregas de los insumos para la salud.

En la siguiente figura se muestra como se fueron desarrollando cada uno de los tipos de VRP por incisos y de acuerdo al análisis, los problemas de interés son: PDPTW, VRPBTW y MVRPBTW. Con ellos, se puede trabajar en el diseño del algoritmo deseado que permita “rutear” tanto las entregas como las recolecciones de insumos para la salud dentro de las ventanas de tiempo de los hospitales del ISSSTE seleccionados.

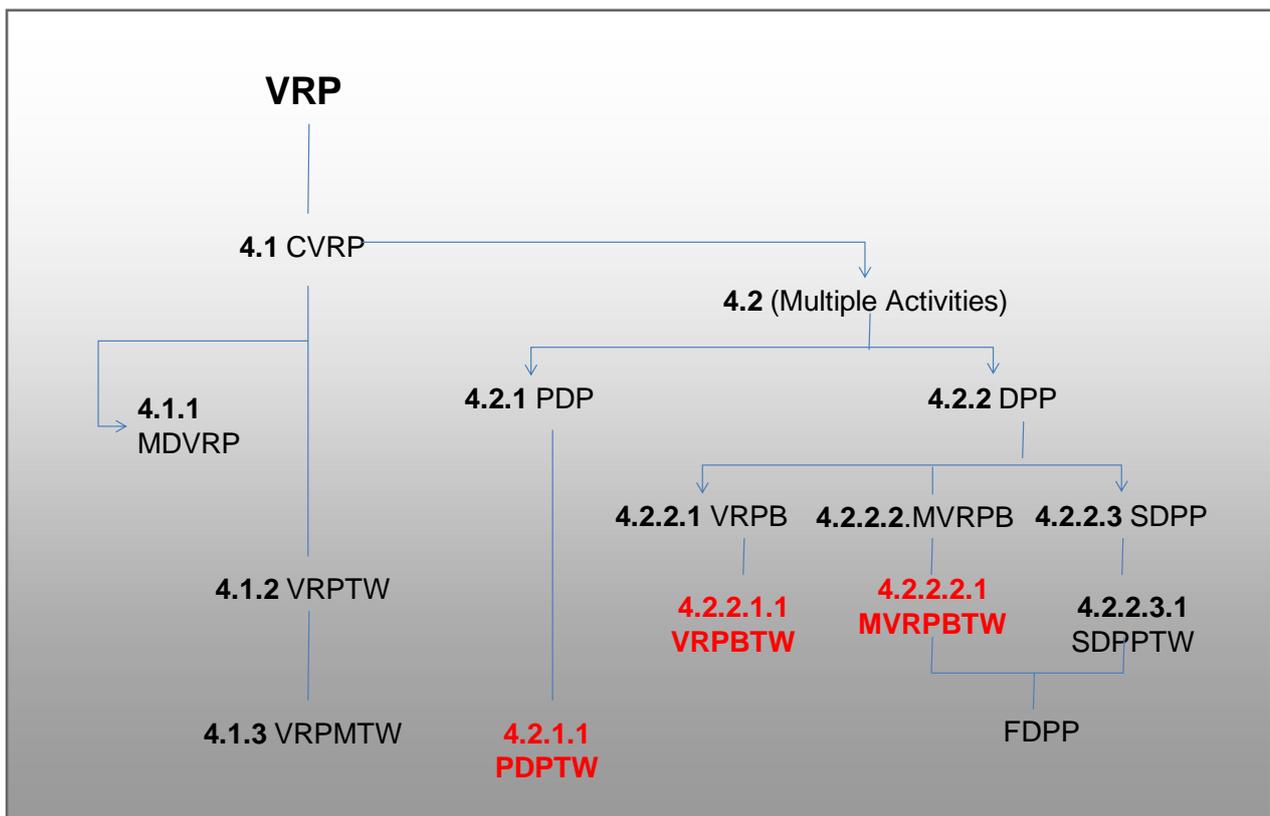


Figura 11. Desarrollo de problemas de ruta de vehículos por sección para aplicarlos a la problemática de MARES CORP

Fuente: Elaboración propia

Al enfocarse en estos tres tipos de VRP's el siguiente paso es desglosar algún método que se han desarrollado para la solución de los mismos, lo anterior, se detalla en el siguiente capítulo.

Capítulo 5. Aplicación del algoritmo al problema de diseño de rutas de vehículos de la empresa MARES CORP

En este capítulo se aplica el algoritmo de Clarke y Wright para resolver el problema de ruta de vehículos de acuerdo a la información del Caso de Estudio.

A continuación se detalla el algoritmo de Clarke y Wright que es el que se utiliza para resolver el problema de ruta de vehículos de MARES CORP:

“Este texto está interesado en el ruteo óptimo de los fletes de los camiones de varias capacidades usados para la entrega desde un almacén central hacia un gran número de puntos de entrega. La mercancía es homogénea con respecto a la unidad de capacidad. La ruta más corta entre cada dos puntos en el sistema está dada. Se desea asignar cargas al camión de tal forma que toda la mercancía es asignada y el total del kilometraje cubierto es un mínimo. El procedimiento dado es simple pero efectivo en producir una solución cercana óptima y ha sido programado para diferentes computadoras digitales. Este problema de despacho de camión (matemáticamente) fue formulado primero por Dantzing y Ramser, quienes obtuvieron un método de solución. Demanda múltiple y la capacidad múltiple del camión son consideradas como una formulación adicional. La formulación en este texto es similar esencialmente, pero una restricción es impuesta primero para cumplir una aplicación práctica particular para la cual el método estaba siendo desarrollado. Su método ha sido desarrollado como una nueva solución encontrada.

Formulación:

Un número de camiones X_i , de capacidad $C_i = (i=1,2,\dots,n)$ están disponibles y cargas q_j son requeridas para ser entregadas a los puntos $P_j = (j=1,\dots,M)$ desde un almacén P_0 . Dadas las distancias $d_{y,z}$ entre todos esos puntos se requiere minimizar la distancia total cubierta por los camiones. Para conveniencia de computación C_i es ordenado tal que $C_{i-1} < C_i$ ($i=2,\dots,n$) y se asume que

$$C_i \ll \sum_{j=1}^{j=m} q_j$$

Ya que en la solución algunos camiones solo pueden estar parcialmente cargados, x_i necesita ser suficientemente grande para asegurar que todas las cargas están asignadas. para fines de cálculo, por lo tanto, se hace infinito. Se puede notar que si $C_n \geq \sum_{j=1}^{j=n} q_j$ entonces el problema se convierte en el problema del agente viajero.” (Clarke G. y Wright J.W., 1962)

Una vez definido el método de Clarke y Wright para resolver el problema de ruta de vehículos, se utilizará la información de las rutas de vehículos de los hospitales seleccionados en el Caso de Estudio que se expone en la siguiente sección del presente capítulo, para poder aplicarlo.

5.1 Rutas de vehículos para los hospitales seleccionados en el Caso de Estudio

Los hospitales seleccionados para el Caso de Estudio son visitados conforme las rutas 1,3,4 y 5. En las Figura 12 se muestra la información que contienen los nodos para las rutas mostradas en las figuras 13,14,15 y 16 que corresponden a las rutas mencionadas respectivamente. En cada ruta se representa el CD / CR marcado en un círculo rojo que es de donde inicia cada ruta hacia los hospitales, marcados en círculos naranjas, cada uno representa un nodo con la siguiente información:

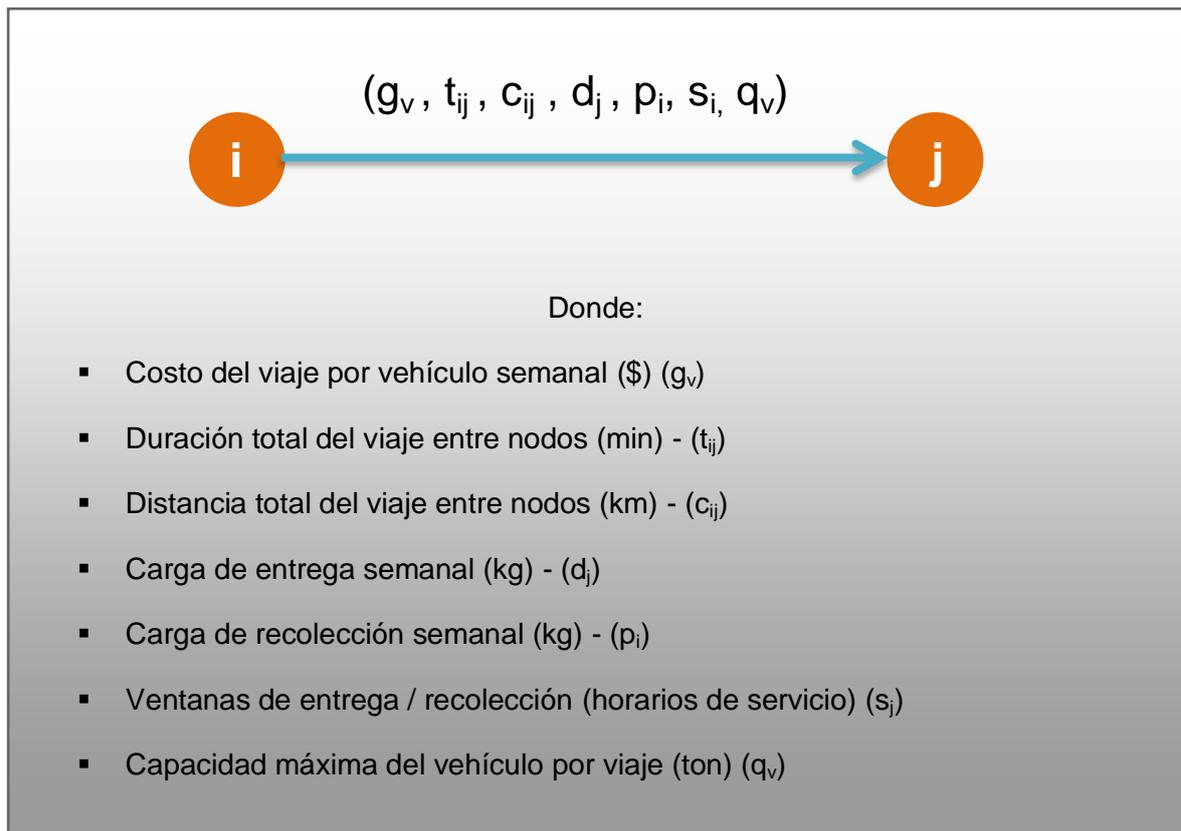


Figura 12. Explicación de la información que contiene cada nodo para las rutas 1, 3, 4 y 5 de los hospitales seleccionados para el Caso de Estudio

Fuente: Elaboración propia

También, es conveniente considerar las siguientes premisas para cada ruta:

- El tiempo más tardío en que un vehículo puede regresar al CD/CR es a las 6:00 p.m. de Lunes a Viernes - (b_k)
- El tiempo más temprano en que un vehículo puede partir del CD / CR es a las 6:00 a.m. de Lunes a Viernes - (a_0)
- La demanda de entrega y recolección que se pudieron obtener son las correspondientes al cuatrimestre de enero a abril del 2016 en MARES CORP.

- Para calcular los gastos del viaje se contemplaron los siguientes valores para pago a chofer, rendimiento vehicular y precio de combustible:

Pago por día al chofer	\$ 400.00	Pago por semana al chofer	\$ 2,000.00
Rendimiento vehicular	10.00	km/lt	Eurovan
Rendimiento vehicular	3.00	km/lt	Camioneta 3.5 ton
Precio del combustible	\$ 16.14	por cada litro	

Tabla 55. Premisas sobre pago a chofer, rendimiento vehicular y precio de combustible

Fuente: Elaboración propia mediante datos de la empresa

A continuación la información obtenida en cada una de las rutas para los hospitales seleccionados del Caso de Estudio:

- Los días asignados para realizar la **Ruta 1** son lunes, miércoles y viernes y se cuenta con la siguiente información para cada punto de entrega y/o recolección:



Figura 13. Ruta 1 para hospitales seleccionados en el Caso de Estudio

Fuente: Elaboración propia mediante datos de la empresa

- 2) El día asignado para realizar la **Ruta 3** es el lunes y se cuenta con la siguiente información para cada punto de entrega y/o recolección:



Figura 14. Ruta 3 para hospitales seleccionados en el Caso de Estudio

Fuente: Elaboración propia mediante datos de la empresa

- 3) Los días asignados para realizar la **Ruta 4** son los martes y jueves y se cuenta con la siguiente información para cada punto de entrega y/o recolección:



Figura 15. Ruta 4 para hospitales seleccionados en el Caso de Estudio

Fuente: Elaboración propia mediante datos de la empresa

- 4) Los días asignados para realizar la **Ruta 5** son los lunes, miércoles y viernes y se cuenta con la siguiente información para cada punto de entrega y/o recolección:



Figura 16. Ruta 5 para hospitales seleccionados en el Caso de Estudio

Fuente: Elaboración propia mediante datos de la empresa

En el siguiente apartado del presente capítulo, se aplica el algoritmo de Clarke y Wright para resolver el problema de ruta de vehículos de los hospitales seleccionados de MARES CORP.

5.2 Aplicación del algoritmo Clarke y Wright al problema de ruta de vehículos de los hospitales seleccionados de la empresa MARES CORP

Una vez mostradas las rutas con las que actualmente se programan las recolecciones y/o entregas de los hospitales seleccionados de MARES CORP, se aplica el algoritmo de Clarke y Wright para el problema de rutas de vehículos para estos destinos.

Paso 1. Se calcula la demanda de entrega diaria para cada hospital.

En la Tabla 56 se observa cómo se obtienen las cargas de entrega semanales y diarias:

- La carga de entrega semanal se obtiene a partir de datos de la empresa MARES CORP y se observa en la columna “E”.
- La carga de entrega diaria se obtuvo de dividir la carga de entrega semanal de la columna “E” entre el número de días asignados por cada ruta de la columna “G”.

	A	B	C	D	E	F	G
5		Demanda de entrega					
6		Ruta asignada actual	Nodo	Nombre del hospital del ISSSTE	Carga de entrega semanal (kg) - (dj)	Carga de entrega diaria (kg) - (dj)	Día asignado por cada Ruta para visitar el hospital
7		N/A	0	CD / CR	0.00	-	-
8		1	1	CE Leonardo Nicolás Bravo	499.96	$=+E8/2 = 499.96/2=249.98$	Lunes / Viernes
9		1	2	HR Ignacio Zaragoza	4920.87	$=+E9/2 = 4920.87/2=2460.43$	Lunes / Viernes
10		1	3	HG Morelos y Pavón	579.17	$=+E10/2= 579.17/2=289.58$	Lunes / Viernes
11		3	4	CE Churubusco	151.03	$=E11=151.03$	Lunes
12		3	5	CE Alberto Pisanty	681.65	$=E12=681.65$	Lunes
13		3	6	HG Tacuba	1747.32	$=E13 = 1747.32$	Lunes
14		4	7	HR 1° de Octubre / CA 1° de Octubre	6400.00	$=+E14/2 = 6400/2= 3200$	Martes / Jueves
15		5	8	CMN 20 de Noviembre	5181.56	$=+E15/3= 5181.56/3= 1727.18$	Lunes / Miércoles / Viernes
16		5	9	HR A López Mateos	1089.09	$=+E16/3= 1089.09/3= 363.03$	Lunes / Miércoles / Viernes
17		5	10	HG Darío Fernández	423.37	$=+E17/3 = 423.37/3= 141.12$	Lunes / Miércoles / Viernes
18		5	11	HG Fernando Quiroz	205.97	$=+E18/3= 205.97/3= 68.65$	Lunes / Miércoles / Viernes

Tabla 56. Demanda de entrega para cada hospital

Fuente: Elaboración propia mediante datos de la empresa

Nota: Para este ejercicio las demandas de entrega y/o recolección para los hospitales HR 1° de Octubre y CA 1° de Octubre se suman debido a que se encuentran en el mismo edificio, solo que se entregan en secciones diferentes del mismo.

Paso 2. Se forma la matriz de distancias y ahorros entre cada par de nodos.

La matriz de distancias y ahorros se estructura con los hospitales del Caso de Estudio y el Centro Distribuidor / Recolector enlistados de forma vertical y horizontal, tal como se muestra en la Tabla 57. Para cada par de hospitales o nodos se obtiene la distancia que hay entre ellos y con esa información se llenan todas las casillas que están por arriba de la diagonal principal de la matriz que están marcadas en color gris.

Para este ejercicio, la distancia en kilómetros entre par de nodos (hospitales) se obtuvo mediante información de Google Maps.

Después, se realizan los cálculos de ahorros entre cada par de nodos y se llenan las casillas por debajo de la diagonal principal de la Tabla 57, para este cálculo, primero, se identifican los ahorros con la nomenclatura definida de acuerdo a la Tabla 58.

Por ejemplo, el ahorro “S₁₋₂” corresponde a la nomenclatura del ahorro entre el nodo uno - CE Leonardo Nicolás Bravo y el nodo dos - HR Ignacio Zaragoza, el ahorro “S₂₋₃” corresponde a la nomenclatura del ahorro entre el nodo dos - HR Ignacio Zaragoza y el nodo tres - HG Morelos y Pavón y así sucesivamente se siguen identificando todos los ahorros para cada par de nodos de la matriz.

Cada ahorro se calcula de acuerdo a la siguiente fórmula: $Ahorro = D_i + D_j - D_{ij}$, donde,

D_i es la distancia del almacén al nodo “x”,

D_j es la distancia del almacén al nodo “y”,

D_{ij} es la distancia entre el nodo “x” y el nodo “y”

y se debe considerar $D_i + D_j - D_{ij} > 0$ para que exista algún ahorro y la ruta sea factible, también se debe tomar en cuenta que el almacén corresponde al CD/CR.

Por ejemplo, el ahorro “S₁₋₂” se calcula con la fórmula: $D_{0-1} + D_{0-2} - D_{2-1}$ donde

D_{0-1} es la distancia del nodo cero - CD / CR al nodo uno - CE Leonardo Nicolás Bravo,

D_{0-2} es la distancia del nodo cero - CD / CR al nodo dos - HR Ignacio Zaragoza y

D_{2-1} es la distancia entre el nodo dos - HR Ignacio Zaragoza y el nodo uno - CE Leonardo Nicolás Bravo. Esta fórmula se aplica para cada par de nodos tal como se muestra en las tablas 59 y 60.

	BB	BC	BD	BE	BF	BG	BH	BI	BJ	BK	BL	BM	BN
5	Matriz de distancias en km y ahorros entre cada par de nodos												
6		Nodo 0 - CD / CR	Nodo 1 - CE Leonardo Nicolás Bravo	Nodo 2 - HR Ignacio Zaragoza	Nodo 3 - HG Morelos y Pavón	Nodo 4 - CE Churubusco	Nodo 5 - CE Alberto Pisanty	Nodo 6 - HG Tacuba	Nodo 7 - HR 1° de Octubre / CA 1° de Octubre	Nodo 8 - CMN 20 de Noviembre	Nodo 9 - HR A López Mateos	Nodo 10 - HG Darío Fernández	Nodo 11 - HG Fernando Quiroz
7	Nodo 0 - CD / CR	0	24.3	21.9	26.9	27.9	16	15.5	3.9	20	22.6	20.4	17.2
8	Nodo 1 - CE Leonardo Nicolás Bravo		0	0.65	9	14.8	17.4	25.6	19.1	17.7	16.1	18.3	20.6
9	Nodo 2 - HR Ignacio Zaragoza		45.55	0	8.7	18.6	19.1	28.2	22	19.3	17.6	19.9	20.2
10	Nodo 3 - HG Morelos y Pavón		42.2	40.1	0	23.7	22.5	30.7	24.6	26.5	28.6	27.2	16.4
11	Nodo 4 - CE Churubusco		37.4	31.2	31.1	0	15.5	19.7	18.9	5.5	6.5	7.1	34.2
12	Nodo 5 - CE Alberto Pisanty		22.9	18.8	20.4	28.4	0	7.2	14.3	5.8	6.8	4.8	35.8
13	Nodo 6 - HG Tacuba		14.2	9.2	11.7	23.7	24.3	0	10.9	13.1	15.9	13.7	42.4
14	Nodo 7 - HR 1° de Octubre / CA 1° de Octubre		9.1	3.8	6.2	12.9	5.6	8.5	0	18.5	19.7	17.5	38.8
15	Nodo 8 - CMN 20 de Noviembre		26.6	22.6	20.4	42.4	30.2	22.4	5.4	0	2.3	3.3	36.6
16	Nodo 9 - HR A López Mateos		30.8	26.9	20.9	44	31.8	22.2	6.8	40.3	0	2.1	39.1
17	Nodo 10 - HG Darío Fernández		26.4	22.4	20.1	41.2	31.6	22.2	6.8	37.1	40.9	0	4.8
18	Nodo 11 - HG Fernando Quiroz		20.9	18.9	27.7	10.9	-2.6	-9.7	-17.7	0.6	0.7	32.8	0

Tabla 57. Matriz de distancias y ahorros entre cada par de nodos

Fuente: Elaboración propia mediante datos de la empresa

A continuación se muestra la nomenclatura para todos los ahorros entre cada par de nodos:

	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP	AQ	AR	AS	AT	AU
5	Matriz de distancias en km y ahorros entre cada par de nodos												
6		Nodo 0 - CD / CR	Nodo 1 - CE Leonardo Nicolás Bravo	Nodo 2 - HR Ignacio Zaragoza	Nodo 3 - HG Morelos y Pavón	Nodo 4 - CE Churubusco	Nodo 5 - CE Alberto Pisanty	Nodo 6 - HG Tacuba	Nodo 7 - HR 1° de Octubre / CA 1° de Octubre	Nodo 8 - CMN 20 de Noviembre	Nodo 9 - HR A López Mateos	Nodo 10 - HG Darío Fernández	Nodo 11 - HG Fernando Quiroz
7	Nodo 0 - CD / CR	0											
8	Nodo 1 - CE Leonardo Nicolás Bravo		0										
9	Nodo 2 - HR Ignacio Zaragoza		S ₁₋₂	0									
10	Nodo 3 - HG Morelos y Pavón		S ₁₋₃	S ₂₋₃	0								
11	Nodo 4 - CE Churubusco		S ₁₋₄	S ₂₋₄	S ₃₋₄	0							
12	Nodo 5 - CE Alberto Pisanty		S ₁₋₅	S ₂₋₅	S ₃₋₅	S ₄₋₅	0						
13	Nodo 6 - HG Tacuba		S ₁₋₆	S ₂₋₆	S ₃₋₆	S ₄₋₆	S ₅₋₆	0					
14	Nodo 7 - HR 1° de Octubre / CA 1° de Octubre		S ₁₋₇	S ₂₋₇	S ₃₋₇	S ₄₋₇	S ₅₋₇	S ₆₋₇	0				
15	Nodo 8 - CMN 20 de Noviembre		S ₁₋₈	S ₂₋₈	S ₃₋₈	S ₄₋₈	S ₅₋₈	S ₆₋₈	S ₇₋₈	0			
16	Nodo 9 - HR A López Mateos		S ₁₋₉	S ₂₋₉	S ₃₋₉	S ₄₋₉	S ₅₋₉	S ₆₋₉	S ₇₋₉	S ₈₋₉	0		
17	Nodo 10 - HG Darío Fernández		S ₁₋₁₀	S ₂₋₁₀	S ₃₋₁₀	S ₄₋₁₀	S ₅₋₁₀	S ₆₋₁₀	S ₇₋₁₀	S ₈₋₁₀	S ₉₋₁₀	0	
18	Nodo 11 - HG Fernando Quiroz		S ₁₋₁₁	S ₂₋₁₁	S ₃₋₁₁	S ₄₋₁₁	S ₅₋₁₁	S ₆₋₁₁	S ₇₋₁₁	S ₈₋₁₁	S ₉₋₁₁	S ₁₀₋₁₁	0

Tabla 58. Nomenclatura para todos los ahorros de cada par de nodos

Fuente: Elaboración propia mediante datos de la empresa

Cálculo de ahorros:

	BD	BE	BF	BG	BH	BI	BJ	BK	BL	BM	BN	BO	BP	BQ	BR	BS	BT	BU	BV	BW
20	Ahorro	=	D_i	+	D_j	-	D_{ij}	>	0	=	D_i	+	D_j	-	D_{ij}	=	(D_i+D_j)-D_{ij}	>	0	
21	S₁₋₂	=	D ₀₋₁	+	D ₀₋₂	-	D ₂₋₁	>	0	=	24.3	+	21.9	-	0.7	=	45.6	>	0	
22	S₁₋₃	=	D ₀₋₁	+	D ₀₋₃	-	D ₃₋₁	>	0	=	24.3	+	26.9	-	9.0	=	42.2	>	0	
23	S₁₋₄	=	D ₀₋₁	+	D ₀₋₄	-	D ₄₋₁	>	0	=	24.3	+	27.9	-	14.8	=	37.4	>	0	
24	S₁₋₅	=	D ₀₋₁	+	D ₀₋₅	-	D ₅₋₁	>	0	=	24.3	+	16.0	-	17.4	=	22.9	>	0	
25	S₁₋₆	=	D ₀₋₁	+	D ₀₋₆	-	D ₆₋₁	>	0	=	24.3	+	15.5	-	25.6	=	14.2	>	0	
26	S₁₋₇	=	D ₀₋₁	+	D ₀₋₇	-	D ₇₋₁	>	0	=	24.3	+	3.9	-	19.1	=	9.1	>	0	
27	S₁₋₈	=	D ₀₋₁	+	D ₀₋₈	-	D ₈₋₁	>	0	=	24.3	+	20.0	-	17.7	=	26.6	>	0	
28	S₁₋₉	=	D ₀₋₁	+	D ₀₋₉	-	D ₉₋₁	>	0	=	24.3	+	22.6	-	16.1	=	30.8	>	0	
29	S₁₋₁₀	=	D ₀₋₁	+	D ₀₋₁₀	-	D ₁₀₋₁	>	0	=	24.3	+	20.4	-	18.3	=	26.4	>	0	
30	S₁₋₁₁	=	D ₀₋₁	+	D ₀₋₁₁	-	D ₁₁₋₁	>	0	=	24.3	+	17.2	-	20.6	=	20.9	>	0	
31	S₂₋₃	=	D ₀₋₂	+	D ₀₋₃	-	D ₃₋₂	>	0	=	21.9	+	26.9	-	8.7	=	40.1	>	0	
32	S₂₋₄	=	D ₀₋₂	+	D ₀₋₄	-	D ₄₋₂	>	0	=	21.9	+	27.9	-	18.6	=	31.2	>	0	
33	S₂₋₅	=	D ₀₋₂	+	D ₀₋₅	-	D ₅₋₂	>	0	=	21.9	+	16.0	-	19.1	=	18.8	>	0	
34	S₂₋₆	=	D ₀₋₂	+	D ₀₋₆	-	D ₆₋₂	>	0	=	21.9	+	15.5	-	28.2	=	9.2	>	0	
35	S₂₋₇	=	D ₀₋₂	+	D ₀₋₇	-	D ₇₋₂	>	0	=	21.9	+	3.9	-	22.0	=	3.8	>	0	
36	S₂₋₈	=	D ₀₋₂	+	D ₀₋₈	-	D ₈₋₂	>	0	=	21.9	+	20.0	-	19.3	=	22.6	>	0	
37	S₂₋₉	=	D ₀₋₂	+	D ₀₋₉	-	D ₉₋₂	>	0	=	21.9	+	22.6	-	17.6	=	26.9	>	0	
38	S₂₋₁₀	=	D ₀₋₂	+	D ₀₋₁₀	-	D ₁₀₋₂	>	0	=	21.9	+	20.4	-	19.9	=	22.4	>	0	
39	S₂₋₁₁	=	D ₀₋₂	+	D ₀₋₁₁	-	D ₁₁₋₂	>	0	=	21.9	+	17.2	-	20.2	=	18.9	>	0	
40	S₃₋₄	=	D ₀₋₃	+	D ₀₋₄	-	D ₄₋₃	>	0	=	26.9	+	27.9	-	23.7	=	31.1	>	0	
41	S₃₋₅	=	D ₀₋₃	+	D ₀₋₅	-	D ₅₋₃	>	0	=	26.9	+	16.0	-	22.5	=	20.4	>	0	
42	S₃₋₆	=	D ₀₋₃	+	D ₀₋₆	-	D ₆₋₃	>	0	=	26.9	+	15.5	-	30.7	=	11.7	>	0	
43	S₃₋₇	=	D ₀₋₃	+	D ₀₋₇	-	D ₇₋₃	>	0	=	26.9	+	3.9	-	24.6	=	6.2	>	0	
44	S₃₋₈	=	D ₀₋₃	+	D ₀₋₈	-	D ₈₋₃	>	0	=	26.9	+	20.0	-	26.5	=	20.4	>	0	
45	S₃₋₉	=	D ₀₋₃	+	D ₀₋₉	-	D ₉₋₃	>	0	=	26.9	+	22.6	-	28.6	=	20.9	>	0	
46	S₃₋₁₀	=	D ₀₋₃	+	D ₀₋₁₀	-	D ₁₀₋₃	>	0	=	26.9	+	20.4	-	27.2	=	20.1	>	0	
47	S₃₋₁₁	=	D ₀₋₃	+	D ₀₋₁₁	-	D ₁₁₋₃	>	0	=	26.9	+	17.2	-	16.4	=	27.7	>	0	
48	S₄₋₅	=	D ₀₋₄	+	D ₀₋₅	-	D ₅₋₄	>	0	=	27.9	+	16.0	-	15.5	=	28.4	>	0	
49	S₄₋₆	=	D ₀₋₄	+	D ₀₋₆	-	D ₆₋₄	>	0	=	27.9	+	15.5	-	19.7	=	23.7	>	0	
50	S₄₋₇	=	D ₀₋₄	+	D ₀₋₇	-	D ₇₋₄	>	0	=	27.9	+	3.9	-	18.9	=	12.9	>	0	
51	S₄₋₈	=	D ₀₋₄	+	D ₀₋₈	-	D ₈₋₄	>	0	=	27.9	+	20.0	-	5.5	=	42.4	>	0	
52	S₄₋₉	=	D ₀₋₄	+	D ₀₋₉	-	D ₉₋₄	>	0	=	27.9	+	22.6	-	6.5	=	44.0	>	0	
53	S₄₋₁₀	=	D ₀₋₄	+	D ₀₋₁₀	-	D ₁₀₋₄	>	0	=	27.9	+	20.4	-	7.1	=	41.2	>	0	
54	S₄₋₁₁	=	D ₀₋₄	+	D ₀₋₁₁	-	D ₁₁₋₄	>	0	=	27.9	+	17.2	-	34.2	=	10.9	>	0	
55	S₅₋₆	=	D ₀₋₅	+	D ₀₋₆	-	D ₆₋₅	>	0	=	16.0	+	15.5	-	7.2	=	24.3	>	0	
56	S₅₋₇	=	D ₀₋₅	+	D ₀₋₇	-	D ₇₋₅	>	0	=	16.0	+	3.9	-	14.3	=	5.6	>	0	
57	S₅₋₈	=	D ₀₋₅	+	D ₀₋₈	-	D ₈₋₅	>	0	=	16.0	+	20.0	-	5.8	=	30.2	>	0	
58	S₅₋₉	=	D ₀₋₅	+	D ₀₋₉	-	D ₉₋₅	>	0	=	16.0	+	22.6	-	6.8	=	31.8	>	0	
59	S₅₋₁₀	=	D ₀₋₅	+	D ₀₋₁₀	-	D ₁₀₋₅	>	0	=	16.0	+	20.4	-	4.8	=	31.6	>	0	
60	S₅₋₁₁	=	D ₀₋₅	+	D ₀₋₁₁	-	D ₁₁₋₅	>	0	=	16.0	+	17.2	-	35.8	=	-2.6	>	0	

Tabla 59. Cálculo de ahorros (parte 1)

Fuente: Elaboración propia mediante datos de la empresa

	BD	BE	BF	BG	BH	BI	BJ	BK	BL	BM	BN	BO	BP	BQ	BR	BS	BT	BU	BV	BW
61	Ahorro	=	Di	+	Dj	-	Dij	>	0	=	Di	+	Dj	-	Dij	=	(Di+Dj)-Dij	>	0	
62	S₆₋₇	=	D ₀₋₆	+	D ₀₋₇	-	D ₇₋₆	>	0	=	15.5	+	3.9	-	10.9	=	8.5	>	0	
63	S₆₋₈	=	D ₀₋₆	+	D ₀₋₈	-	D ₈₋₆	>	0	=	15.5	+	20.0	-	13.1	=	22.4	>	0	
64	S₆₋₉	=	D ₀₋₆	+	D ₀₋₉	-	D ₉₋₆	>	0	=	15.5	+	22.6	-	15.9	=	22.2	>	0	
65	S₆₋₁₀	=	D ₀₋₆	+	D ₀₋₁₀	-	D ₁₀₋₆	>	0	=	15.5	+	20.4	-	13.7	=	22.2	>	0	
66	S₆₋₁₁	=	D ₀₋₆	+	D ₀₋₁₁	-	D ₁₁₋₆	>	0	=	15.5	+	17.2	-	42.4	=	-9.7	>	0	
67	S₇₋₈	=	D ₀₋₇	+	D ₀₋₈	-	D ₈₋₇	>	0	=	3.9	+	20.0	-	18.5	=	5.4	>	0	
68	S₇₋₉	=	D ₀₋₇	+	D ₀₋₉	-	D ₉₋₇	>	0	=	3.9	+	22.6	-	19.7	=	6.8	>	0	
69	S₇₋₁₀	=	D ₀₋₇	+	D ₀₋₁₀	-	D ₁₀₋₇	>	0	=	3.9	+	20.4	-	17.5	=	6.8	>	0	
70	S₇₋₁₁	=	D ₀₋₇	+	D ₀₋₁₁	-	D ₁₁₋₇	>	0	=	3.9	+	17.2	-	38.8	=	-17.7	>	0	
71	S₈₋₉	=	D ₀₋₈	+	D ₀₋₉	-	D ₉₋₈	>	0	=	20.0	+	22.6	-	2.3	=	40.3	>	0	
72	S₈₋₁₀	=	D ₀₋₈	+	D ₀₋₁₀	-	D ₁₀₋₈	>	0	=	20.0	+	20.4	-	3.3	=	37.1	>	0	
73	S₈₋₁₁	=	D ₀₋₈	+	D ₀₋₁₁	-	D ₁₁₋₈	>	0	=	20.0	+	17.2	-	36.6	=	0.6	>	0	
74	S₉₋₁₀	=	D ₀₋₉	+	D ₀₋₁₀	-	D ₁₀₋₉	>	0	=	22.6	+	20.4	-	2.1	=	40.9	>	0	
75	S₉₋₁₁	=	D ₀₋₉	+	D ₀₋₁₁	-	D ₁₁₋₉	>	0	=	22.6	+	17.2	-	39.1	=	0.7	>	0	
76	S₁₀₋₁₁	=	D ₀₋₁₀	+	D ₀₋₁₁	-	D ₁₁₋₁₀	>	0	=	20.4	+	17.2	-	4.8	=	32.8	>	0	

Tabla 60. Cálculo de ahorros (parte 2)

Fuente: Elaboración propia mediante datos de la empresa

Paso 3. Los ahorros se ordenan de mayor a menor como en la siguiente tabla:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Ahorro	(Di+Dj)-Dij	Ahorro	(Di+Dj)-Dij	Ahorro	(Di+Dj)-Dij	Ahorro	(Di+Dj)-Dij	Ahorro	(Di+Dj)-Dij
2	S₁₋₂	45.55	S₅₋₉	31.8	S₅₋₆	24.3	S₃₋₈	20.4	S₇₋₉	6.8
3	S₄₋₉	44	S₅₋₁₀	31.6	S₄₋₆	23.7	S₃₋₁₀	20.1	S₇₋₁₀	6.8
4	S₄₋₈	42.4	S₂₋₄	31.2	S₁₋₅	22.9	S₂₋₁₁	18.9	S₃₋₇	6.2
5	S₁₋₃	42.2	S₃₋₄	31.1	S₂₋₈	22.6	S₂₋₅	18.8	S₅₋₇	5.6
6	S₄₋₁₀	41.2	S₁₋₉	30.8	S₂₋₁₀	22.4	S₁₋₆	14.2	S₇₋₈	5.4
7	S₉₋₁₀	40.9	S₅₋₈	30.2	S₆₋₈	22.4	S₄₋₇	12.9	S₂₋₇	3.8
8	S₈₋₉	40.3	S₄₋₅	28.4	S₆₋₉	22.2	S₃₋₆	11.7	S₉₋₁₁	0.7
9	S₂₋₃	40.1	S₃₋₁₁	27.7	S₆₋₁₀	22.2	S₄₋₁₁	10.9	S₈₋₁₁	0.6
10	S₁₋₄	37.4	S₂₋₉	26.9	S₁₋₁₁	20.9	S₂₋₆	9.2	S₅₋₁₁	-2.6
11	S₈₋₁₀	37.1	S₁₋₈	26.6	S₃₋₉	20.9	S₁₋₇	9.1	S₆₋₁₁	-9.7
12	S₁₀₋₁₁	32.8	S₁₋₁₀	26.4	S₃₋₅	20.4	S₆₋₇	8.5	S₇₋₁₁	-17.7

Tabla 61. Ahorros ordenados de mayor a menor

Fuente: Elaboración propia mediante datos de la empresa

Paso 4. Se construyen rutas óptimas empezando del ahorro mayor al menor de tal forma que se recorran todos los ahorros y éstos se acumulen hasta el tope máximo de kilogramos de la capacidad del vehículo.

Para este ejercicio, la capacidad máxima del vehículo es de 3,500 kilogramos que es la capacidad de la camioneta de 3.5 toneladas la cual se utiliza para distribuir a los 11 hospitales del Caso de Estudio, debido a que se tiene pactado este tipo de vehículo para distribuir dichos hospitales.

Para construir las rutas óptimas se tienen que hacer varias iteraciones hasta que se hayan recorrido todos los ahorros.

Por ejemplo, para la iteración uno se toma el ahorro mayor, S_{1-2} , con una carga de entrega diaria de 249.98 kilogramos del tramo 0-1-0 de la ruta y 2460.44 kilogramos para el tramo 0-1-2-0 de la ruta. Para la carga de entrega diaria se obtiene su suma acumulada, es decir, 249.98 kilogramos más 2460.44 kilogramos, lo que resulta en una carga de entrega diaria acumulada es de 2710.41 kilogramos. Posteriormente, se toma el siguiente ahorro mayor que empiece en el nodo dos porque si se observa, el ahorro que se eligió anteriormente fue el, S_{1-2} y finaliza en el nodo dos. En este caso, el siguiente ahorro que se elige es el ahorro, S_{2-3} , con una carga de entrega diaria de 289.58 kilogramos para ese tramo, porque de esta forma se puede ir construyendo una ruta viable. Entonces, hasta este paso de la iteración, la ruta que se ha conformado tiene la secuencia de nodos: 0-1-2-3-0, con una carga de entrega diaria acumulada de 2710.41 kilogramos más 289.58 kilogramos de éste último tramo, lo que nos da una carga de entrega diaria acumulada de 3000 kilogramos.

Después se toma el siguiente ahorro mayor que empiece en el nodo tres puesto que el ahorro que se eligió anteriormente fue el, S_{2-3} , entonces, el ahorro que se resulta electo es el, S_{3-4} con una carga de entrega diaria de 151.03 kilogramos para ese tramo, esta carga de entrega se suma a la que se ya se llevaba acumulada de 3000 kilogramos, por lo tanto, la secuencia de nodos hasta el momento es: 0-1-2-3-4 con una carga de entrega diaria acumulada de 3151.03 kilogramos. Posteriormente, se toma el siguiente ahorro mayor que comience en el nodo cuatro, en este caso el ahorro que se elige es el, S_{4-5} , pero se observa que para este tramo se tiene una carga de entrega de 681.64 kilogramos, resultando una carga de entrega diaria acumulada de 3832.68 kilogramos, sin embargo, como se observa el ahorro S_{4-5} ya no debe ser considerado como parte de esta iteración debido a que si su carga de entrega diaria se suma a la que ya se tenía acumulada, sobrepasa la capacidad del vehículo de 3.5 toneladas (3500 kilogramos). Por lo tanto, los ahorros que se deben considerar solamente para esta iteración son: S_{1-2} , S_{2-3} y S_{3-4} .

Como se detalla en este ejemplo, de esta misma forma se construyen rutas óptimas recorriendo todos los ahorros del mayor al menor.

Entonces, para este ejercicio, resultaron 42 iteraciones pero solamente cinco de ellas se establecen como rutas óptimas y son las iteraciones 1,2,3,6 y 35 que se explican en la Tabla 62.

La información de la Tabla 62 se define de la siguiente forma:

- **Iteración:** Es el número de repetición del proceso con la finalidad de obtener una ruta factible hasta el tope máximo de 3.5 toneladas (3500 kilogramos) que es la capacidad máxima de carga del vehículo. Es la columna "A" de la Tabla 62.
- **Arcos:** Es el segmento que existe entre dos nodos u hospitales del ISSSTE, y se van construyendo conforme la ordenación de ahorros de la Tabla 61. Es la columna "B" de la Tabla 62.
- **Ruta:** Es la secuencia de visitas que se va construyendo partiendo del CD/ CR. Es la columna "C" de la Tabla 62.
- **Carga de entrega diaria (kg) - (dj):** se obtiene de la Tabla 56, columna F. Es la columna "D" de la Tabla 62.
- **Demanda acumulada (kg):** Es la suma acumulada de cargas de entrega diaria en kilogramos de cada nodo para cada tramo de la ruta. Es la columna "E" de la Tabla 62.
- **Distancia (km):** se obtiene de la matriz de distancias y ahorros de la Tabla 57 y corresponde a la distancia entre cada nodo de los valores por encima de la diagonal principal. Es la columna "F" de la Tabla 62.
- **Distancia acumulada (km):** Es la suma acumulada de las distancias en kilómetros entre cada par de nodos que conforman la ruta. Es la columna "G" de la Tabla 62.

	A	B	C	D	E	F	G
	Iteración	Arcos	Ruta	Carga de entrega diaria (kg) - (dj)	Demanda acumulada (kg)	Distancia (km)	Distancia acumulada (km)
3							
4	ITERACIÓN 1 = RUTA 1	0-1	0-1-0	249.98	= D4= 249.98	24.3	= F4= 24.3
5		1-2	0-1-2-0	2460.44	= E4+D5= 249.98 + 2460.44= 2710.41	0.65	= G4 + F5= 24.3 + 0.65 = 24.95
6		2-3	0-1-2-3-0	289.58	= E5+D6= 2710.41 + 289.58 = 3000	8.7	=G5 + F6= 24.95 + 8.7 = 33.65
7		3-4	0-1-2-3-4-0	151.03	= E6+D7 = 3000 + 151.03 = 3151.02	23.7	=G6 + F7=33.65 + 23.7 = 57.35
9	ITERACIÓN 2 = RUTA 2	0-4	0-4-0	151.03	= D9= 151.03	27.9	= F9 = 27.9
10		4-9	0-4-9-0	363.03	= E9 + D10 = 151.03 + 363.03 = 514.05	6.5	= G9 + F10= 27.9 + 6.5= 34.4
11		9-10	0-4-9-10-0	141.12	=E10 + D11=514.05 + 141.12=655.18	2.1	= G10 + F11=34.4 + 2.1 = 36.5
12		10-11	0-4-9-10-11-0	68.66	=E11 + D12= 655.18 + 68.66 = 723.84	4.8	= G11 + F12=36.5 + 4.8 = 41.3
14	ITERACIÓN 3 = RUTA 3	0-4	0-4-0	151.03	= D14= 151.03	27.9	= F14= 27.9
15		4-8	0-4-8-0	1727.19	=E14 + D15= 151.03 + 1727.19=1878.21	5.5	= G14 + F15= 27.9 + 5.5 = 33.4
16		8-9	0-4-8-9-0	363.03	=E15 + D16= 1878.21+ 363.03= 2241.24	2.3	= G15 + F16= 33.4 + 2.3 = 35.7
17		9-11	0-4-8-9-11-0	68.66	=E16 + D17=2241.24 + 68.66 = 2309.90	39.1	= G16 + F17= 35.7 + 39.1 = 74.8
19	ITERACIÓN 6 = RUTA 4	0-1	0-1-0	249.98	= D19= 249.98	24.3	= F19= 24.3
20		1-4	0-1-4-0	151.03	=E19 + D20=249.98 + 151.03= 401.00	14.8	= G19 + F20= 24.3 + 14.8= 39.1
21		4-5	0-1-4-5-0	681.65	=E20 + D21= 401.00 + 681.65= 1082.65	15.5	= G20 + F21=39.1 + 15.5= 54.6
22		5-6	0-1-4-5-6-0	1747.32	=E21 + D22=1082.65 + 1747.32= 2829.98	7.2	= G21 + F22= 54.6 + 7.2= 61.8
24	ITERACIÓN 35 = RUTA 5	0-1	0-1-0	249.98	= D24=249.98	24.3	= F24= 24.3
25		1-7	0-1-7-0	3200.00	=E24 + D25=249.98 + 3200= 3449.98	19.1	= G24+ F25= 24.3 + 19.1= 43.4

Tabla 62. Iteraciones 1,2,3,6 y 35

Fuente: Elaboración propia mediante datos de la empresa

De acuerdo a las rutas de la tabla anterior, se calcula el costo total del viaje para cada ruta resultante y los resultados se muestran en la siguiente tabla:

	H	I	J	K	L	M	N	O
2			Rendimiento vehicular	3.00	km/LT	Camioneta 3.5 toneladas		
3			Precio del combustible	\$ 16.14	por litro			
5	No. de iteración	Ruta	Distancia Total (km)	Hospitales del ISSSTE visitados en la ruta	Pago por semana al chofer (\$)	Litros consumidos en el viaje (Lt)	Costo total del combustible por viaje (\$)	Costo total del viaje semanal (\$)
6	1	0-1-2-3-4-0	57.35	CE Leonardo Nicolás Bravo, HR Ignacio Zaragoza, HG Morelos y Pavón y CE Churubusco	2,000.00	=J6/\$K\$2= 57.35/3= 19.11	=M6*\$K\$3=19.11*16.14= 308.54	=L6+N6= 2000 + 308.54= 2308.54
7	2	0-4-9-10-11-0	41.30	CE Churubusco, HR A López Mateos, HG Darío Fernández, HG Fernando Quiroz	2,000.00	=J7/\$K\$2= 41.3/3= 13.76	=M7*\$K\$3=13.76* 16.14=222.19	=L7+N7= 2000+222.19=2222.19
8	3	0-4-8-9-11-0	74.80	CE Churubusco, CMN 20 de Noviembre, HR A López Mateos, HG Fernando Quiroz	2,000.00	=J8/\$K\$2= 74.8/3=24.93	=M8*\$K\$3= 24.93*16.14=402.42	=L8+N8=2000+402.42= 2402.42
9	6	0-1-4-5-6-0	61.80	CE Leonardo Nicolás Bravo, CE Churubusco, CE Alberto Pisanty, HG Tacuba	2,000.00	=J9/\$K\$2=61.8/3=20.6	=M9*\$K\$3=20.6*16.14= 332.48	=332.48
10	35	0-1-7-0	43.40	CE Leonardo Nicolás Bravo, HR 1° de Octubre / CA 1° de Octubre	2,000.00	=J10/\$K\$2=43.4/3= 14.46	=M10*\$K\$3= 14.46*16.14= 233.49	=233.49
11							Total	2308.54 + 2222.19 + 2402.42 + 332.48 + 233.49 = 7499.14

Tabla 63. Resumen del cálculo de costos para las rutas resultantes del método de Clarke y Wright

Fuente: Elaboración propia mediante datos de la empresa

La información de la Tabla 63 se define de la siguiente forma:

- **No. de iteración:** este dato se obtiene de la columna “A” de la Tabla 62 y es la columna “H” para la Tabla 63.
- **Ruta:** este dato se obtiene de la columna “C” de la Tabla 62 y es la columna “I” para la Tabla 63.
- **Distancia total (km):** este dato se obtiene de la columna “G” de la Tabla 62 y es la columna “J” para la Tabla 63.
- **Hospitales del ISSSTE visitados en la ruta:** Se obtienen conforme la secuencia de la ruta y el número de nodo asignado para cada hospital de acuerdo a la matriz de distancias y ahorros entre cada par de nodos. Es la columna “K” de la Tabla 63.
- **Pago por semana al chofer (\$):** Son \$2,000.00 de acuerdo a las premisas definidas en la Tabla 55. Es la columna “L” de la Tabla 63.
- **Litros consumidos en el viaje (Lt):** Se obtiene de dividir la columna “J”, Distancia total del viaje en kilómetros, entre el rendimiento vehicular que se definió de acuerdo a la Tabla 55 (Celda “K2” mostrada en la Tabla 63). Es la columna “M” de la Tabla 63.
- **Costo total del combustible por viaje (\$):** Se obtiene de multiplicar la columna “M”, litros consumidos en el viaje por el precio del litro del combustible (Celda “K3” mostrada en la Tabla 63). Es la columna “N” de la Tabla 63.
- **Costo total del viaje semanal (\$):** Es la suma del costo total del combustible por viaje más el pago por semana al chofer.

Para este cálculo, se debe considerar un esquema de asignación de vehículos para cada ruta a lo largo de la semana para analizar si se deben o no sumar los \$2,000.00 del pago por semana al chofer a la ruta.

Entonces, de las cinco rutas que resultaron factibles de la aplicación del método de Clarke y Wright, se observa en la siguiente tabla que las rutas 1,2 y 3 se pueden programar tres veces a la semana, es decir, los días lunes, miércoles y viernes debido a que los hospitales que las conforman son de alta productividad, mientras que los hospitales contenidos en las rutas 4 y 5 son menos productivos y pueden ser visitados únicamente dos veces por semana, es decir, los días martes y jueves. De esta forma, las rutas se intercalan de lunes a viernes y el chofer tiene la semana ocupada para realizar las entregas a esos hospitales y no es necesario agregar \$2,000.00 para el pago del chofer por semana al costo total del viaje a todas las rutas solamente aplica para las rutas 1, 2 y 3 como se muestra en la última columna de la siguiente tabla:

No. de iteración	Ruta	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Pago del chofer por semana
1	0-1-2-3-4-0	Ruta 1		Ruta 1		Ruta 1	Agregar \$2,000.00
2	0-4-9-10-11-0	Ruta 2		Ruta 2		Ruta 2	Agregar \$2,000.00
3	0-4-8-9-11-0	Ruta 3		Ruta 3		Ruta 3	Agregar \$2,000.00
6	0-1-4-5-6-0		Ruta 4		Ruta 4		N/A
35	0-1-7-0		Ruta 5		Ruta 5		N/A

Tabla 64. Asignación de camionetas de 3.5 toneladas para las nuevas rutas que resultaron de la aplicación del método de Clarke y Wright

Fuente: Elaboración propia mediante datos de la empresa

Por otro lado, si retomamos la información resumida de vehículos subcontractados para atender solicitudes de recolecciones adicionales de la Tabla 36, los gastos para este rubro resultan de \$24,563.29 para el primer semestre del 2016, tal como se muestra en la siguiente tabla:

	A	B	C	D
	Ruta	Total de vehículos adicionales requeridos para atender solicitudes de recolecciones (Ene - Jun 2016)	Costo total del viaje por semana (\$)	Costo por requerimientos de vehículos adicionales (\$)
1				
2	Ruta 1	3	\$2,651.52	=B2*C2=3*2651.52= \$ 7954.56
3	Ruta 3	3	\$2,106.69	=B3*C3=3*2106.69= \$ 6320.07
4	Ruta 4	1	\$2,041.96	=B4*C4=1*2041.96=\$ 2041.96
5	Ruta 5	3	\$2,748.90	=B5*C5=3*2748.90= \$ 8246.70
6	Total general	10		+7954.56+6320.07+2041.96+8246.70= \$ 24563.29

Tabla 65. Resumen de costos por requerimientos de vehículos subcontractados adicionalmente en MARES CORP

Fuente: Elaboración propia mediante datos de la empresa

Al programar rutas de entrega y/o recolección como las que se obtuvieron al aplicar el método de Clarke y Wright se pueden evitar gastos adicionales por \$24,563.29 semestralmente como se mostró en la tabla anterior y si se multiplica ese valor por dos para obtener el gasto anual llega a ser de \$49,126.58. Estos casi 50 mil pesos pueden reflejarse en ahorros si se programan y planean correctamente las rutas. Cabe mencionar que los 10 vehículos requeridos adicionalmente para atender solicitudes de recolecciones pueden llegar a ser más debido a que las administraciones han cambiado en MARES CORP y la

información solo se tiene en hojas de cálculo de Excel lo que imposibilita analizar más a detalle y determinar con precisión si fueron 10 unidades vehiculares o más, las que fueron subcontratadas.

Adicionalmente a estos ahorros, el Área de Distribución puede tener rutas programadas que puede dar a conocer a las demás áreas con anticipación y así lograr una mejor rastreabilidad tanto de las recolecciones como de las entregas.

Con rutas previamente establecidas y programadas de acuerdo a los requerimientos de los hospitales se puede tener un mejor control de las recolecciones y reducir el número de penalizaciones por incumplimiento en tiempo de los contratos.

Al construir rutas contemplando capacidades de los vehículos, se pueden evitar visitas dobles a un mismo hospital y por ende exceder el trabajo de los choferes así como tener el inventario adecuado de flota vehicular.

CONCLUSIONES

Finalmente, se analiza que de acuerdo a la programación de rutas que se tiene actualmente en MARES CORP para los hospitales del Caso de Estudio el costo total del viaje resulta de \$ 9,549.06 semanalmente como se muestra en la siguiente tabla:

Ruta	Hospitales del ISSSTE visitados en la ruta	Costo total del viaje semanal (\$)
1	CE Leonardo Nicolás Bravo, HR Iganacio Zaragoza, HG Morelos y Pavón	\$ 2,651.52
3	CE Churubusco, CE Alberto Pisanty y HG Tacuba	\$ 2,106.69
4	HR 1º de Octubre, CA 1º de Octubre	\$ 2,041.96
5	CMN 20 de Noviembre, HR A López Mateos, HG Darío Fernández, HG Fernando Quiroz	\$ 2,748.90
Total		\$ 9,549.06

Tabla 66. Costo total del viaje semanal para las rutas actuales de los hospitales del Caso de Estudio

Fuente: Elaboración propia mediante datos de la empresa

Por otro lado, las rutas óptimas que resultan de aplicar el Método de Clarke y Wright resultan de \$ 7,499.14 tal como se resume en la siguiente tabla:

Ruta	Hospitales del ISSSTE visitados en la ruta	Costo total del viaje semanal (\$)
1	CE Leonardo Nicolás Bravo, HR Ignacio Zaragoza, HG Morelos y Pavón y CE Churubusco	\$ 2,308.54
2	CE Churubusco, HR A López Mateos, HG Darío Fernández, HG Fernando Quiroz	\$ 2,222.19
3	CE Churubusco, CMN 20 de Noviembre, HR A López Mateos, HG Fernando Quiroz	\$ 2,402.42
4	CE Leonardo Nicolás Bravo, CE Churubusco, CE Alberto Pisanty, HG Tacuba	\$ 332.48
5	CE Leonardo Nicolás Bravo, HR 1º de Octubre / CA 1º de Octubre	\$ 233.49
Total		\$ 7,499.14

Tabla 67. Costo total del viaje semanal para las rutas óptimas resultado de aplicar el método de Clarke y Wright para los hospitales del Caso de Estudio

Fuente: Elaboración propia mediante datos de la empresa

Por lo tanto, se concluye que para las rutas de los 11 hospitales del Caso de Estudio se logra una disminución de \$ 2,049.93 semanalmente y si este dato se multiplica por 52 que son las semanas del año aproximadamente, se obtiene una cifra anual de \$106, 596.36 que se refleja como ahorros que se logran obtener en el Área de Distribución y como sí existe una mejora, seguramente los siguientes pasos a desarrollar ante esta problemática es replicar esta metodología para el análisis del resto de las rutas de entrega y/o recolección en la empresa de estudio.

Además, con base a estos resultados, se logra el objetivo principal de esta tesis que es el de realizar el estudio de un método funcional que permita tener una programación óptima de aquellas entregas y/o recolecciones de insumos para la salud a una empresa particular del sector farmacéutico. Lo anterior se desarrolla a lo largo de este documento mediante el Método Operacional, al estudio del problema de rutas de vehículos (VRP) y a la aplicación del método de Clarke y Wright.

Otra conclusión que se obtiene del presente trabajo es que esta idea se puede presentar ante la dirección de operaciones de MARES CORP para que se tome una decisión pronta a la problemática en el ruteo de entregas y/o recolecciones pues este análisis está sustentado en desglosar cada parte del sistema identificando desviaciones entre el estado actual y los objetivos que se pretenden lograr para así proponer soluciones viables que se enfocan en programación de rutas, establecer procedimientos a seguir en el Área de Distribución y visualizar que aunque el problema se haya acotado para construir rutas de 11 hospitales solamente, se puede poner en marcha para el resto con ayuda de algún sistema de administración del transporte comercial más sofisticado, manejando una cantidad mayor de información y apegado a los planes de crecimiento de la empresa; inclusive se puede utilizar este documento como referencia para aplicarlo en problemáticas de otras áreas.

La problemática que se documenta en este texto es un buen ejemplo para tratar de resolver el problema de rutas de vehículos (VRP) a través de otras metodologías y de la misma forma generar otros textos que sean de utilidad para ampliar el conocimiento referente a VRP.

REFERENCIAS

- Aravind, P. (2014). *A Review of Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery*. International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT). Volume 15 Number 4.
- Augerat P. (1998). Computational results with a branch-and-cut code for the capacitated vehicle routing problem. Istituto di Analisi dei Sistemi ed Informatica, CNR. Pág. 3.
- Belhaiza S. et al, (2013). *A hybrid variable neighborhood tabu search heuristic for the vehicle routing problem with multiple time windows*. Computers & Operations Research. Pág. 1
- Berblegia G., et al, (2007). *Static pickup and delivery problems: a classification scheme and survey*. Sociedad de Estadística e Investigación Operativa.
- Bräysy y Gendreau (2001). *Route Construction and Local Search Algorithms for the Vehicle Routing Problem with Time Windows*. SINTEF Applied Mathematics, p.p. 4-5.
- Catay B., s/f. *An ant colony optimization approach for the mixed vehicle routing problem with backhauls*. Facultad de Ingeniería y Ciencias Naturales, Universidad de Sabanci. pp.1- 4.
- Chen y Wang, 2011, *The flexible delivery and pick up problem with time windows*.
- Cho Y., et al, (2005). *A threshold accepting meta-heuristic for the vehicle routing problem with backhauls and time windows*. Journal of the Eastern Asia Society of Transportation Studies, Vol. 6, p.p. 3022-3037.
- Clarke G. y Wright J.W., (1962). *Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points*. Operations Research, Vol. 12, No. 4, pp. 568-581. Obtenido el 23 de octubre del 2017. Disponible en: <https://github.com/aishfenton/thesis/blob/master/papers/Scheduling%20of%20Vehicles%20from%20a%20Central%20Depot%20to%20a%20Number%20of%20Delivery%20Points.pdf>
- COFEPRIS, (s/f). Obtenido el 10 de agosto del 2016. Disponible en: <http://www.gob.mx/cofepris/>
- Cordeau J.-F., et al (2007), Handbook in OR & MS, Vol. 14, cap. 6.
- Cortés C., et al, (2009). *The pickup and delivery problem with transfers: Formulation and a branch-and-cut solution method*. European Journal of Operational Research. págs. 711-724.
- Gallego I., (2013). *Desarrollo de un método híbrido para la resolución del MDVRP*. Revista de la Escuela Jacobea de Posgrado, N° 5, págs. 45-64
- Gan X., et al, (2012). *Vehicle Routing Problem with Time Windows and Simultaneous Delivery and Pick-Up Service Based on MCPSO*. Mathematical Problems in Engineering. Volume 2012 (2012), Article ID 104279, 11 pages. Obtenido el 2 de abril del 2017 desde: <https://www.hindawi.com/journals/mpe/2012/104279/>
- Gupta, S. (2013). *Reverse Supply Chains, Issues and Analysis*. New York: CRC Press, cap.1, 14.
- Hongping L., (2002). *Solving the pickup and delivery problem with time windows using "Squeaky Wheel" optimization with local search*. AMCIS 2002 Proceedings. 319. Obtenido el 20 de marzo desde: <http://aisel.aisnet.org/amcis2002/319>.

- Huchim, S. (2010). *Destacan a la logística inversa como fuente de ahorros y de mejor atención al cliente*. Revista electrónica: Énfasis Logística. Obtenido el día 2 de agosto del 2018, desde: <http://www.logisticamx.enfasis.com/notas/17370-destacan-la-logistica-inversa-como-fuente-ahorros-y-mejor-atencion-al-cliente>.
- INEGI, (s/f). Estructura del SCIAN México. Obtenido el 26 de diciembre del 2016. Disponible en: <http://www.inegi.gob.mx/est/contenidos/espanol/metodologias/censos/scian/estructura.pdf>
- Jacobs-Blecha C., (1992). *The Vehicle Routing Problem with backhauls: properties and solution algorithms*. Georgia Tech Research Corporation. Obtenido el 21 de marzo desde <http://www2.isye.gatech.edu/~mgoetsch/cali/VEHICLE/VRPB/VRPB.HTM>
- Koppius. O., et al. (2014). Business Value from Closed -Loop Supply Chains. Department of Technology and Operations Management. Vol. 3, No. 4.
- Localización de empresas, (s/f). Obtenido el 26 de diciembre del 2016. Disponible en: http://www.camarascv.org/EMPRENDEDORES/_pdf/localizacion.pdf.
- Milián, F. (2016). La cadena de Suministro del mañana. ADL Asociación para el desarrollo de la logística. Obtenido el 15 marzo de 2016 desde: <http://www.adl-logistica.org/revista/articulo/927/articulo-de-opinion-la-cadena-de-suministro-del-manana-por-francisco-milian>.
- Millares, C., et al. (2008). Logística Inversa: impacto ambiental y económico en la gestión de la cadena de suministro. Obtenido el día 26 de abril de 2016, desde http://adingor.es/congresos/web/uploads/cio/cio2008/SUPPLY_CHAIN_MANAGEMENT/1725-1734.pdf
- Nazif, H., 2014. *A Genetic Algorithm Based Approach for Vehicle Routing Problem with Simultaneous Delivery and Pick-up and Time Windows in Home Health Care*. Applied mathematics in Engineering, Management and Technology 2 (4) 2014:289-297.
- Norma ISO 26000.
- Ochoa R. (1997). Cuaderno de Planeación y Sistemas No.10 Método de los sistemas. Pág. 51- 56.
- Oesterle J., et al, (2015). *Exact method for the vehicle routing problem with mixed linehaul and backhaul customers, heterogeneous fleet, time window and manufacturing capacity*. Procedia CIRP 41 (2016) 573 – 578.
- Olorunniwo, F. (2011). *An Overview of some reverse logistics practices in the United States*. Supply Chain Forum An International Journal. Vol. 12 N° 3.
- Ortiz, Silvia (2009). Logística Inversa: Al revés no es igual. Revista Expansión en línea. Obtenido el 16 marzo de 2016 desde: <http://expansion.mx/manufactura/2009/05/06/logistica-inversa-al-reves-no-es-igual>.
- Palmgren M., s/f. *A Column Generation Algorithm for the Log Truck Scheduling Problem*. Linköping University. pág. 2
- Portal Automotriz. (s/f) *La red logística de Walmart de México y Centroamérica fortalece su estructura y reduce emisiones*. Obtenido el 27 abril de 2016 desde: <http://www.portalautomotriz.com/noticias/transporte/la-red-logistica-de-walmart-de-mexico-y-centroamerica-fortalece-su-estructura-y>.
- Savelsbergh M.W.P, (s/f). *The general pick up and delivery problem*. School of Industrial and Systems Engineering Georgia Institute of Technology. p.p. 6-7

- SEMARNAT, (s/f). Obtenido el 3 de agosto del 2016. Disponible en: <http://www.semarnat.gob.mx/temas/gestion-ambiental/calidad-del-aire/transporte-limpio/acerca-del-programa>.
- SEMARNAT, (s/f). Obtenido el 3 de agosto del 2016. Disponible en: <http://www.semarnat.gob.mx/temas/gestion-ambiental/calidad-del-aire/transporte-limpio/acerca-del-programa/compromiso-beneficios#medidas>.
- Subramanian, A. (s/f). *An efficient ILS heuristic for the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pick up and Delivery*. Instituto de Computación – UFF, Technical Report – RT 07/08.
- Tang F. y Diéguez R., (2002), *Vehicle Routing Problems with Simultaneous Pick-up and Delivery Service*. Operational Research Society of India, OPSEARCH, Vol. 39, No. 1.
- Toro-Ocampo E., et al, (2016), *Desempeño de las técnicas de agrupamiento para resolver el problema de ruteo con múltiples depósitos*. Obtenido el 27 de febrero del 2017 desde: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-77992016000100005
- Vigo D., et al, (1996). *Exact and Heuristics Algorithms for the symmetric and asymmetric Vehicle Routing Problem with Backhauls*. Pág. 2-3.
- Vigo D., et al (2000). *Models, relaxations and exact approaches for the capacitated vehicle routing problem*. Discrete Applied Mathematics. Pág. 488.
- Villa. A. (s/f). *Logística Inversa en la distribución de productos agroalimentarios*. Obtenido el 3 de agosto del 2016, desde: http://oa.upm.es/9640/1/INVE_MEM_2010_88836.pdf
- Zhong Y., et al, (2005). *A vehicle routing problem with backhauls and time windows: a guided local search solution*. Transportation Research Part E 41 (2005) 131–144.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

CA: Consultorio Auxiliar

CD: Centro de Distribución

CDMX: Ciudad de México

CE: Clínica de Especialidades con Quirófano

CH: Clínica Hospital

CMN: Centro Médico Nacional

COFEPRIS: Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios

C.P.: Código Postal

CR: Centro Recolector

CVRP: Capacitated vehicle route problem (Problema de ruta de vehículos con restricción de capacidad)

DPP: Delivery and pick up problems (Problemas de entregas y recolecciones)

FDPP: Flexible delivery and pickup problem (Problemas de entrega y recolección flexibles)

HG: Hospital General

HR: Hospital Regional

Item: Artículo o producto

ISSSTE: Instituto de Seguridad y Servicios Sociales de los Trabajadores del Estado

MDVRP: Multi-depot vehicle route problem (Problema de rutas de vehículos con varios almacenes)

MVRPB: Mixed vehicle route problem with backhauls (Problemas mixtos de rutas de vehículos con recolecciones)

MVRPBW: Mixed vehicle route problem with backhauls and time windows (Problemas mixtos de rutas de vehículos con recolecciones y ventanas de entrega)

PDP: Pickup and delivery problem (Problema de recolección y entrega)

SDPP: Simultaneous delivery and pickup problem (Problema de rutas de vehículos con entregas y recolecciones simultáneas)

SDPPTW: Simultaneous delivery and pickup problem with time windows (Problemas de entrega y recolección simultáneos con ventanas de entrega)

VRP: Vehicle route problem (Problema de rutas de vehículos)

VRPB: Vehicle route problem with backhauls (Problema de rutas de vehículos con recolecciones)

VRPBTW: Vehicle route problem with backhauls and time windows (Problema de rutas de vehículos con recolecciones y ventanas de entrega)

VRPMTW: Vehicle route problem with multiple time windows (Problema de rutas de vehículos con múltiples ventanas de tiempos)

VRPTW: Vehicle route problem with time windows (Problema de rutas de vehículos con ventanas de entrega)