

# OPTIMIZACIÓN DE LAS RUTAS DE DISTRIBUCIÓN DE MEDICAMENTOS A LOS CLIENTES DE EMCOMED MAYARÍ

TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE MÁSTER  
EN EFICIENCIA ENERGÉTICA

Autor: Lic. José Manuel García Reyes

HOLGUÍN 2018

# OPTIMIZACIÓN DE LAS RUTAS DE DISTRIBUCIÓN DE MEDICAMENTOS A LOS CLIENTES DE EMCOMED MAYARÍ

TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE MÁSTER  
EN EFICIENCIA ENERGÉTICA

Autor: José Manuel García Reyes  
Tutor: DrC. Esteban López Milán

HOLGUÍN 2018

## **PENSAMIENTO**

La estrategia es la herramienta que permite intervenir en el futuro par amoldarlo a  
nuestras necesidades y aspiraciones

Jorge Gonzáles Moore.

## **DEDICATORIA**

A la memoria de mi madre por su  
incondicional aliento para mi superación.

A mis hijos y esposa por la cuota de sacrificio que les toco a mi lado.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Doctor Esteban, mi tutor, por su paciencia y enseñanzas.

A todos aquellos que, por los golpes sufridos en el alma,  
cuando me quería abandonar la voluntad, estuvieron allí para alentarme a seguir adelante y  
lograr mi objetivo.

## RESUMEN

En esta investigación se traza como objetivo el diseño de rutas óptimas de distribución de medicamentos con el empleo de herramientas informáticas para lograr la eficiencia del sistema de transporte empleado por la Comercializadora de Medicamentos (EMCOMED). Posterior al análisis de varios métodos heurísticos de solución al problema de ruta. Del tipo “Agente Viajero” con la aplicación del método de programación lineal con enteros binarios a la herramienta Solver de Microsoft Office, se obtuvo la mejor solución al problema analizado, la que se podrá emplear por quien tenga que tomar las decisiones de diseñar las rutas de abasto de medicamentos, en tiempo récord con la certeza de obtener una solución que este dentro del conjunto de soluciones óptimas. Con el valor añadido de poder disminuir o adicionar nodos en función de la demanda. Esta optimización permitió mejorar en 2.64 km la solución de EMCOMED Mayarí, lo que significa un ahorro de medio litro de combustible diésel por recorrido y tipo de vehículo. Otro importante aporte de esta investigación, sin el cual no hubiera sido posible todo el trabajo posterior, ha sido la confección de una tabla general de distancias entre cada uno de los clientes. La misma está hecha de forma tal que se puedan establecer las distancias entre los clientes, aun cuando estos no se encuentren dentro de la ruta de distribución facilitándole a los choferes distribuidores de medicamentos su desempeño laboral pues algunos de los medios de transporte no cuentan con los odómetros para medir la distancia recorrida de la entidad referida

## **Summary.**

The medications design of optimal routes of distribution with the job of information-technology tools to achieve the efficiency of the system of transportation used by Medicamentos's Marketer is drawn like objective in this investigation (EMCOMED). Posterior to the analysis of several heuristic methods of solution to the problem of route. Of the type Traveling Salesman with the application of the method of linear programming with binary integers to the tool Resolving of Microsoft Office, the best solution was obtained to the examined problem, the one that will be able to be used for who have to take the decisions to design the medications routes of provisioning, in record time with the certainty to obtain a solution than this within the set of optimal solutions. With the value added to be able to diminish or to add nodes in terms of the request. Mayarí permitted this optimization to improve in 2,64 km EMCOMED's solution, that means a saving of half a liter of fuel diesel for journey and type of vehicle. Important other contribute of this investigation, without the one that it had not been possible without all of the later work, the confection has come from a general board of distances between each one of the customers. The same is made out of form such that the distances between the customers, even though these not meet within the route of distribution making easy his labor performance because some of the transportation facilities count out the odometers to measure the traveled distance of the entity referred to the distributing drivers of medications may become established.

<b>INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>Capítulo 1. Análisis de las fuentes bibliográficas</b>	6
1.1. El transporte en la cadena de suministro	6
1.2. El proceso del transporte	7
1.3. El problema de la optimización de rutas	7
1.3.1. Diseño de rutas	10
1.3.2. Principios para una buena programación y diseño de rutas	10
1.3.3. Técnicas de programación para el diseño de rutas de transporte	11
1.4. La Investigación de Operaciones en la planificación de rutas óptimas	12
1.4.1. El problema del agente viajero	13
1.4.2. Dificultad de resolución del TSP	13
1.4.3. Problemas en las rutas de vehículos (VRP)	14
1.4.4. Aplicaciones del Problema del Viajante de Comercio	14
1.5. Métodos computacionales de solución del TSP	16
1.5.1. El método de la fuerza bruta	17
1.5.2. El método del vecino más cercano	17
1.5.3. El método del vecino más cercano con inserción	18
1.6. Métodos de resolución del TSP con programación entera o mixta	19
1.6.1. Modelo de programación lineal con enteros binarios para solucionar el TSP	20
1.6.2. Otros métodos heurísticos para la solución del TSP	21
1.7. Programas informáticos empleados en la optimización de rutas	26
1.8. Antecedentes de las rutas de distribución de medicamentos en Cuba	27
1.9. Conclusiones de Capítulo 1	27
<b>Capítulo 2. Propuesta de ruta óptima de vehículos.</b>	29
2.1. Caracterización de la Empresa Comercializadora y Distribuidora de Medicamentos	29
2.1.1. EMCOMED Holguín	29
2.2. Concepción de la tabla general de distancias	30
2.3. Optimización de la ruta de reparto de medicamentos en EMCOMED Mayarí	31
2.3.1. Solución EMCOMED Mayarí	34
2.3.2. Solución directa	34
2.3.3. Solución por el vecino más cercano	35



2.3.4. Solución por el método mejor primero (Best First)	36
2.3.5. Solución por el método de programación lineal con enteros binarios	37
2.3.5.1. Solución del modelo con el Solver del Excel	38
2.4. Análisis de las soluciones	43
2.4.1. Consumo de combustible y eficiencia energética de las transportaciones	44
2.5. Conclusiones del Capítulo 2	46
<b>CONCLUSIONES</b>	47
<b>RECOMENDACIONES</b>	48
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	49
<b>ANEXOS</b>	53

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad una de las grandes preocupaciones de las empresas, tanto públicas como privadas, es establecer una red de distribución que sea lo más eficiente posible para atender de forma eficaz a sus clientes, al mismo tiempo que los costos generados por la distribución sean los más bajos posibles. La premisa es atender el mayor número de clientes cercanos y lograr su satisfacción total.

Al asignar las rutas se deben valorar las prestaciones de los vehículos y cuántos clientes se pueden visitar con el mismo vehículo, según su demanda. Los aspectos relacionados con los vehículos y que determinan los costos y la posibilidad de satisfacer a los clientes son: la capacidad volumétrica, la tara, el índice de consumo de combustible, así como sus cualidades dinámicas que, en última instancia, garantizan el poder llegar a las zonas de difícil acceso.

El primer intento de solucionar esta problemática se conoce como “El problema del viajante de comercio”, “El problema del agente viajero” o TSP por sus siglas en inglés (*Traveling Salesman Problem*). En la actualidad se han desarrollado numerosas técnicas mucho más complicadas para la solución de problemas de este tipo en extremo complejos, que la formulación clásica del TSP no puede resolver de forma eficiente.

La necesidad de buscar rutas óptimas no sólo pueden ser aplicados en logística y distribución, también se encuentran en actividades como el transporte escolar y la distribución de correos. Esta misma formulación ha podido ser aplicada en otras esferas de la producción material y los servicios como, por ejemplo: la fabricación de circuitos impresos, las comunicaciones y la asignación operario-máquina, entre muchos más.

En Cuba este es un problema que, a opinión de este autor, no se le ha dado toda la importancia que debería tener. La Droguería Holguín, subordinada a la Unidad Empresarial de Base (UEB) Empresa Comercializadora y Distribuidora de Medicamentos (EMCOMED), es una de las empresas cubanas donde este enigma espera por una propuesta de solución.

Esta Droguería se dedica a almacenar, conservar, transportar y comercializar de forma mayorista: medicamentos, materias primas, material de envase, reactivos químicos, medios de diagnóstico, artículos ópticos y dentales, productos químicos, material higiénico sanitario, materiales para banco de sangre, dermocosméticas medicinales, suplementos nutricionales, narcóticos y alcohol de uso médico.

En el campo de la logística y distribución de medicamentos en la Droguería Holguín, se considera que existe desorganización al momento de realizar las entregas, lo cual provoca atrasos en los despachos; simultáneamente a este problema, se le suma la inexistencia de una ruta óptima que permita entregar de manera eficiente los medicamentos, esto ocasiona incrementos de los costos de transporte cuando el vehículo que realiza las distribuciones tiene que salir varias veces a la misma zona.

Por tanto, existe la necesidad de realizar un estudio para perfeccionar las rutas de distribución de panaceas, pues no se cuenta con un diseño adecuado en el prorrateo de medicamentos, que permita una optimización del parque automotor y el disminuir el consumo de los portadores energéticos empleados en esta actividad.

Teniendo en cuenta la problemática presente en la Droguería Holguín, se plantea el siguiente **problema de investigación**: ¿Es posible diseñar rutas óptimas de distribución, que se adapten a la demanda de los clientes y que permitan entregar de manera eficiente los medicamentos?

En correspondencia con el problema de investigación, el **objeto de estudio** se enmarca en el sistema de transporte de medicamentos y **Campo de acción**, lo constituye el diseño de rutas óptimas de distribución de medicamentos.

Se plantea como **hipótesis**: Si se pudiera elaborar una plantilla de Microsoft Excel, que encuentre propuestas para rutas óptimas de distribución de medicamentos, se podría garantizar la eficiencia y eficacia en este sistema.

El **objetivo** de esta investigación es elaborar una plantilla de Microsoft Excel, mediante su herramienta *Solver*, que facilite el confeccionar de forma ágil y al menor costo posible, rutas para el reparto de medicamentos en la empresa EMCOMED de Mayarí.

## **ACTUALIDAD E IMPORTANCIA DEL TEMA**

La UEB EMCOMED de Holguín tiene el propósito de satisfacer las cambiantes demandas de medicamentos de la población y garantizar su salud con una correcta distribución de los recursos, para ello se auxilia del transporte logístico como herramienta para una correcta programación y distribución. La eficacia con que los productos médicos lleguen a los clientes tributa en la satisfacción de la población, esta es una premisa fundamental para lograr la excelencia en los servicios.

El sistema de distribución en la Empresa Comercializadora de Medicamentos se enfrenta al desafío que le impone la demanda de medicamentos de las instituciones sanitarias, estas deben entregar los pedidos en el tiempo previsto, con la calidad requerida y con el gasto mínimo de recursos financieros.

### **Valor teórico-práctico.**

En sentido general, la investigación posee valor como referencia a las droguerías del país a las cuales, con similar parque automotor, se les dificulta la distribución de medicamentos por no contar con las herramientas matemáticas que ayuden a la toma de decisiones.

Desde el punto de vista teórico, no se tiene conocimiento de que en alguna parte del país donde se hubiera elaborado una herramienta similar a la que aquí se propone: muy práctica en su manejo y de ágil propuesta de solución.

La propuesta de esta hoja de cálculo de Microsoft Excel, que sin lugar a duda servirá base para futuras investigaciones.

### **Aportes y resultados.**

El principal aporte de esta investigación es que proporciona una herramienta muy práctica, sencilla en su manejo y de ágil propuesta de solución, para resolver el problema de la distribución de medicamentos con eficiencia y eficacia.

La eficiencia se garantiza con la obtención de rutas óptimas, que acortan las distancias a recorrer en la transportación y con ello, se contribuye a minimizar tiempo de traslado y se disminuye el consumo de combustible. La eficacia se mira desde el punto de vista de satisfacción de las necesidades del cliente, esto es, realizar las entregas en correspondencia a la demanda y disponibilidad de insumos.

Como resultado, la UEB EMCOMED cuenta con una herramienta que le facilita elaborar de manera rápida posibles rutas de vehículos para la distribución de medicamentos, garantizando los costos mínimos en la transportación y garantizar la premisa de satisfacer plenamente a los clientes.

### **Métodos de la investigación.**

Los métodos empleados en la investigación son varios:

- *La investigación bibliográfica.* Empleada para conocer el estado actual del objeto de estudio y valorar posibles vías de solución al problema de investigación planteado.
- *La recopilación de datos.* Permite realizar un adecuado diagnóstico de la situación actual de los medios de transporte y tomar los elementos necesarios de cada uno de los subsistemas.
- *Observación.* Para valorar el estado técnico de los equipos, el aprovechamiento de las capacidades instaladas, etcétera.

- *El análisis y procesamiento de la información*, con el objetivo de seleccionar y transformar según sea necesario aquella información relevante, de acuerdo con los objetivos de trabajo.
- *Método de la modelación*. Este método se empleó para elaborar el modelo económico matemático y su planteamiento en una hoja de cálculo de Microsoft Excel.
- *Diseño de experimentos*. Se hicieron numerosas pruebas con posibles situaciones reales que permitieron la validación de la hipótesis

En todo el trabajo está presente la dialéctica materialista que permite progresar de la apariencia a la esencia, del fenómeno a la causa, de lo simple a lo complejo y estudiar un determinado problema en sus vínculos y movimientos tanto internos como externos.

### **Etapas de la investigación.**

#### *I. Etapa preparatoria.*

- Investigación primaria para fundamentar el problema y valorar alternativas de solución.
- Búsqueda bibliográfica de los temas relacionados con el contenido de la investigación.

#### *II. Etapa de desarrollo.*

- Recopilación y procesamiento de información y datos estadísticos referentes al transporte logístico de medicamentos.
- Creación de un modelo económico-matemático para planificar las transportaciones.
- Elaboración de un sistema automatizado, en forma de una hoja de cálculo de Microsoft Excel, para gestionar la solución del problema del ruteo de vehículos en la distribución de medicamentos.

#### *III. Etapa final.*

- Análisis de los resultados.
- Elaboración del informe final de la investigación.

### **Contenido del informe científico-técnico**

El informe se presenta en dos capítulos que recogen los aspectos más relevantes de la investigación. El Capítulo 1 se dedica al análisis de las fuentes bibliográficas. Aquí se exponen los principales

métodos y criterios para la evaluación y selección de los medios de transporte, fundamentalmente lo concerniente al ruteo de vehículos.

En el Capítulo 2 aparece una breve caracterización de la UEB EMCOMED, la propuesta del modelo matemático para la solución del problema de la transportación de medicamentos, así como la técnica operatoria de la hoja de cálculo de Microsoft Excel.

El informe se completa con las Conclusiones, las Recomendaciones, la Bibliografía y los necesarios anexos. En los anexos se muestran las tablas de distancias, mapas y otra información útil a los efectos de la investigación.

## **Capítulo 1. Análisis de las fuentes bibliográficas.**

En este capítulo se dedica al análisis de las fuentes bibliográfica aquí se exponen los principales métodos y criterios para la evaluación y selección de los medios de transporte en la transportación de medicamentos.

### **1.1. El transporte en la cadena de suministro**

La toma de decisiones en la cadena de suministro es esencial para el desarrollo eficiente de las actividades de la organización, deben tener cierta flexibilidad, cuidar por los tiempos de entrega y en definitiva tener muy en cuenta las necesidades del cliente.

Una de las actividades básicas de la gestión integral de la cadena de suministro es la planificación y la toma de decisiones que esto conlleva. Se distinguen tres niveles de planificación: estratégica táctica y operativa. Cada uno de estos niveles está asociado con horizontes temporales distintos y acarrea un conjunto diferente de importantes problemas de decisión (Levi y Chen, 2005; Narasimhan, 2004; Gupta, 2004).

La planificación estratégica tiene como misión la definición de los recursos necesarios a largo plazo, entre otros problemas de decisión incluidos: la localización, dimensión y número de entidades de la cadena de suministro tales como, plantas de producción, almacenes y centros de distribución, la fabricación de productos, la composición de inventarios y los niveles de existencias, la asignación de almacenes a puntos de abastecimiento, los modos de transporte y la flota requerida (Teigen, 2000; Griffin, 1996).

La planificación táctica está centrada en la disposición de los recursos necesarios, en el momento requerido, seleccionando las mejores entre diferentes alternativas en un horizonte temporal a medio plazo. Aquí se situarían todas las decisiones directamente vinculadas al ajuste operativo diseñado en el nivel anterior, como la definición de la nueva ruta o la distribución de un nuevo producto podrían ser factores correspondientes a este nivel de decisión.

En este nivel forman parte problemas de decisión como: el diseño de almacenes, de las entradas y salidas, los sistemas de reposición y distribución de mercancías, la selección de proveedores, basado en la operatividad y las decisiones diarias basadas en cuál es el recorrido óptimo del tipo de vehículo que realizará una entrega concreta.

## 1.2. El proceso del transporte

En los sistemas de distribución, el transporte a utilizar (propio o subcontratado) es el punto más importante a tener en cuenta, la gestión de dicho proceso comprende el análisis y elección del mejor medio de transporte para transportar los materiales desde el punto de origen al destino y el diseño de la mejor ruta, el objetivo principal del proceso de distribución es facilitar los productos en el lugar y momento adecuado al menor costo (Etal, 2016).

Normalmente, el transporte constituye el gasto logístico o individual más importante para la mayoría de las empresas, pues se observa que el movimiento de carga absorbe dos tercios de los costos logísticos aumentan, existen diversos medios de transporte que deben ser escogidos de acuerdo con criterios específicos: del tipo de material a trasladar, tiempo de transporte y distancia por recorrer, La tabla 1.1 presenta los diferentes medios empleados para el transporte de carga y sus características.

Tabla 1.1 Comparación de los medios de transporte (Ballou, 2004).

Características del medio	Tipo de carga	Tiempo de transporte	Costo del transporte
Aéreo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Productos frágiles, delicados de corta vida.</li> <li>• Productos de alto valor</li> </ul>	El menor tiempo mayor velocidad	Costo alto
Marítimo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Materias primas.</li> <li>• Productos terminados.</li> <li>• Productos semi-terminados</li> </ul>	El mayor tiempo menor velocidad	Costo bajo
Ferrovionario	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Materias primas.</li> <li>• Productos manufacturados de poco valor</li> </ul>	Tiempo medio. Velocidad media	Costo medio
Terrestre	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Productos terminados.</li> <li>• Productos semi terminados</li> </ul>	Tiempo medio. Velocidad media	Costo medio

## 1.3. El problema de la optimización de rutas

Todas las empresas que tengan una parte de reparto de mercancías o seguimiento a los clientes, con vistas a realizar labores comerciales o reclamar el pago de factura pendientes, necesitan diseñar una ruta para que partiendo de la empresa o de otro punto, se construya un camino para visitar a todos los clientes.

Es muy importante que el camino a seguir sea lo más eficiente posible, es decir, que tenga el menor recorrido posible o se tarde el menor tiempo en visitar a todos los clientes, con esto se consigue que en una jornada se visite al máximo número de clientes posibles. El problema viene determinado por



cómo programar ese camino.

Dentro de esta problemática, la capacidad de las empresas para optimizar sus rutas de transportación y distribución de mercancías, constituye un elemento elucidario dentro de su gestión industrial; sin embargo, no todas las empresas abordan este problema de una manera adecuada

Se puede entender por optimización de rutas, todas aquellas acciones que contribuyan a organizar las rutas de la empresa, de manera que se reduzcan costos (viáticos, combustibles) al minimizar las distancias y el tiempo empleado en trayectos, se aumente el número total de visitas, se cumpla con lo pactado en los contratos económicos, y se aproveche al máximo la capacidad de carga nominal del vehículo (González, 2004).

Las rutas de distribución como un modelo de optimización de redes, es una actividad que ha cobrado gran importancia en los últimos años, en que investigadores y científicos se han dado a la tarea de desarrollar un conjunto de algoritmos y métodos tradicionales. Para obtener la solución con los métodos tradicionales de optimización se poseen la heurística, metaheurística y los algoritmos genéticos (Etal, 2016).

En general podría entenderse por optimización de rutas todas aquellas acciones que contribuyan a la mejora de la función de distribución, bien sea en términos de servicios, mejora de la calidad, disminución de costos.

Existen diversos factores que se deben considerar para optimizar las rutas de distribución (González, 2004):

- Personal, recursos humanos: ¿Qué personal está disponible?, ¿cuál es el horario de trabajo?, ¿con qué permisos de conducción cuenta el personal encargado de conducir los vehículos?, ¿existen limitaciones en los convenios laborales y resoluciones legales en cuanto a las horas de conducción y cantidad de turnos de trabajo establecidos en la jornada laboral?
- Vehículos por utilizar: ¿La flota es propia o de terceros?, ¿cuál es el número de vehículos disponibles y su genealogía?, ¿son suficientes y válidos?, ¿se deben incorporar vehículos externos? En este tópico se debe considerar, además, las necesidades de mantenimiento vehicular.
- La capacidad de carga del vehículo: Se debe considerar cuánto volumen y peso de cargas puede concentrar la unidad de transporte para obtener su máximo aprovechamiento. Una buena programación de carga dará como resultado una solución en la que se minimicen los kilómetros

recorridos y el tiempo empleado, partiendo siempre del total cumplimiento de la ruta.

- Tipo de producto: Los productos también influyen, porque para diseñar una ruta de repartos se analizan sus características intrínsecas y se debe tomar en cuenta si requieren condiciones especiales en la transportación.
- Tiempo de entrega: Es el cálculo del tiempo necesario para completar la entrega, que se verá afectada por las vías de circulación que tiene que utilizar el vehículo en el entorno (tráfico, trabajos en la vía) y el compromiso de servicio adquirido por la empresa. Es necesario conocer las restricciones en cuanto a los tiempos límites para realizar la operación de entrega y garantizar al cliente el cumplimiento de la misma.
- Localización de los puntos de entrega: A la hora de programar un recorrido es vital conocer si el domicilio está ubicado en una calle inaccesible para camión o furgoneta, o si está en una zona industrial. Del mismo modo, es necesario contar con información sobre las restricciones del acceso y los horarios estipulados para la entrega.
- Detalles de facturación: Se debe asumir la posibilidad de tener retornos de la mercancía, porque el cliente la rechace por diferencias entre la factura de entrega y el pedido.
- Las carreteras de acceso: Se deben de considerar si se tienen dificultades a la hora de acceder a ciertas zonas de ciudades. Dependiendo de estas variables fluctuará la velocidad media, que a su vez alcanzará un resultado u otro según el medio rural o urbano donde se produzcan las entregas.
- Evaluar las condiciones climatológicas: Las condiciones ambientales son impredecibles e incontrolables, pero se pueden prevenir retrasos tomando datos proporcionados por reportes del tiempo para tener un pronóstico del escenario donde se efectuara la entrega.
- Disposiciones legales: Es necesario conocer si se requieren renovar permisos del producto por transportar, como es el caso de las aduanas en las fronteras. Lo cual exige de una información actualizada al momento para no fallar.
- Métodos de planificación: Existen distintos entes especializados en la comercialización de software diseñados para la programación, tipificación de rutas que tienen en cuenta la seguridad vial, rapidez y pueden desempeñar otras funcionalidades, a su vez las empresas disponen de herramientas informáticas desarrolladas por sus informáticos. Teniendo todos en común la necesidad de poseer la base de datos actualizada de los clientes.

### 1.3.1. Diseño de rutas

La planificación de las rutas de transporte para la distribución de los productos a los clientes representa un elevado gasto, pues comienza en el mismo almacén, esperando estantería de *parlet* o al final de una línea de fabricación.

Los objetivos que se buscan con la confección de las rutas son:

- Maximizar la eficiencia,
- Maximizar la ocupación de vehículos,
- Minimización de kilometraje,
- Maximización de repartos.

Puntos a tener en cuenta en la elaboración de las rutas:

- Especialización de los repartidores: Para mejor conocimiento de la zona y de los clientes
- Balancear el volumen y la dificultad: Las rutas urbanas tienen menos kilometraje, pero más demoras, atascos.

Para la confección de rutas de reparto a nivel urbano, existen programas informáticos que mezclando una serie de variables ayudan a la confección de las mismas.

Una vez confeccionada la ruta y dependiendo de la accesibilidad de los paquetes habrá que cargar en orden inverso a la secuencia de reparto: los primeros bultos por repartir son los últimos que se cargan en la furgoneta.

### 1.3.2. Principios para una buena programación y diseño de rutas

Para la programación y el diseño de rutas, se deben de tener en cuenta limitaciones como: que cada punto puede tener un volumen determinado; que pueden usarse múltiples vehículos con diferentes limitaciones de capacidad, tanto en peso como en volumen; que en las paradas puedan permitirse recolección y entrega solo a ciertas horas del día; que se puede permitir recoger en una ruta solo después de haber efectuado las entregas; que se puede permitir a los conductores tomarse breves descansos, entre otras.

Sin embargo, pueden hallarse buenas soluciones a pesar de las limitaciones, basados en determinados principios básicos que se han planteado para lograr una programación (Ballou, 2004):

1. Cargar los camiones con volúmenes de parada que estén lo más cercanos unos de otros: Para reducir al máximo el tiempo del viaje entre ellos y minimizar el tiempo total del viaje en la ruta.
2. Las paradas en diferentes días se deben de ordenar de tal manera que se formen agrupaciones

más estrechas: Los segmentos diarios deberían evitar la superposición de las agrupaciones de paradas, esto ayudaría a minimizar el número de camiones necesarios para atenderlos, el tiempo de viaje del camión y la distancia recorrida en la semana.

3. Construir rutas comenzando con la parada más lejos del depósito: Trabajando de regreso hacia el depósito. Una vez identificada la parada más lejana debe seleccionarse el volumen de la agrupación más estrecha de paradas situadas alrededor de esta parada clave, para completar la capacidad prevista del camión.
4. La ruta más eficiente se construye usando los vehículos más grandes disponibles: se deben asignar primero los vehículos más grandes, dentro de los variados tamaños de una flota de vehículos, con la condición de que se aproveche bien su capacidad de carga.
5. Las recolecciones deben mezclarse dentro de las rutas de reparto, en vez de ser asignadas al final de las rutas: Estas conviene hacerlas, en lo posible, durante el curso de los repartos para minimizar la cantidad de caminos que se cruzan, lo que puede ocurrir cuando se atienden dichas paradas después de hacer los repartos.

### **1.3.3. Técnicas de programación para el diseño de rutas de transporte**

Existen tres técnicas de programación dependiendo de la flexibilidad y el dinamismo de las rutas (González, 2004):

- Fija: Las rutas se planifican basándose en datos históricos. Cada ruta determina una secuencia de clientes que un vehículo debe visitar. Este enfoque se utiliza en compañías con clientes que ordenan regularmente una cantidad fija de bienes.
- Semifija: Al igual que en el ruteo fijo cada cliente tiene asignado inicialmente una ruta, se realizan diariamente ajustes a las rutas en dependencia de los pedidos para lograr mayor fiabilidad en la programación de la ruta.
- Variable: Todos los días las rutas se planifican desde cero, los clientes no están asignados a ninguna ruta en particular. Como resultado, las rutas cambian permanente.

### **1.4. La Investigación de Operaciones en la planificación de rutas óptimas**

La investigación de operaciones, conocida también como programación matemática, es una joven ciencia con surgimiento durante la II Guerra Mundial para planificar las operaciones combativas (Calvo y otras, 2003). Estos modelos del tipo económico matemáticos evolucionaron y se

especializaron, para adaptarlos a determinadas tareas en ayuda a la toma de decisiones. Entre los más conocidos modelos matemáticos de programación lineal se encuentran los problemas de cola, los de asignación y el clásico problema del transporte.

Uno de los problemas más famosos y estudiado en la programación matemática, especialmente dentro de la optimización combinatorial, es el Problema del Agente Viajero (*Traveling Salesman Problem*, TSP). El objetivo que se consigue es el de minimizar la distancia recorrida por un comerciante o repartidor, para que pueda visitar a todos sus clientes una sola vez y regrese a su punto de partida.

Por su parte, el Problema de Ruteo de Vehículos (*Vehicle Routing Problem*, VRP) es una generalización del TSP, pues su demanda es tan alta que es necesario tener varios repartidores.

A pesar de que su nombre hace pensar que tiene una aplicación muy concreta: decidir la ruta para un vendedor o agente comercial, el TSP se puede emplear en cualquier situación que requiera seleccionar nodos en cierto orden de cara a reducir los costos por su aplicación en casi todas las ramas de la economía.

Los problemas de rutas sobre arcos tienen su origen en el siglo XVIII cuando los habitantes de Königsberg, un pequeño pueblo de la actual Rusia, empezaron a debatir si existía alguna ruta que pasase una única vez por los siete puentes que atravesaban el río Pregel y volviese al punto de origen.

Leonard Euler, matemático suizo, resolvió el problema de los puentes de Königsberg en 1761, pasando. Este matemático demostró que no existía tal ruta: el pasar por ellos una sola vez y regresar al punto de partida; de esta forma se dio paso a la Teoría de Grafos, de vital importancia para la formulación de los modelos de programación lineal, que representan al TSP y VRP (ver figura 1.1).

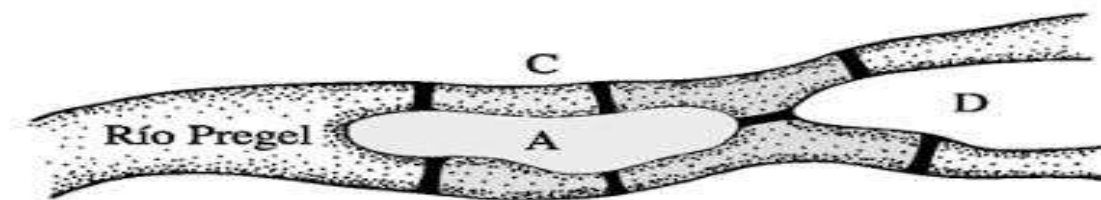


Figura. 1.1. *Los puentes de Königsberg*

(Fuente: <https://wordpress.com/2011/12/01/euler-y-los-siete-puentes-de-Königsberg/>)

#### **1.4.1. El problema del agente viajero**

Existen hitos históricos en la resolución del TSP, pues a lo largo de la historia del TSP se han generado numerosas variantes del mismo problema, entre las que se podrían destacar:

Problema del Ciclo Simple (SCP, *Simple Cycle Problem*): en el ciclo solución no tienen por qué estar incluidas todas las ciudades. Esto se debe a que, para este caso, no solo existen costos por visitar las ciudades sino también hay beneficios por cada ciudad.

Problema del viajante de comercio generalizado (GTSP, *Generalized Traveling Salesman Problem*): el conjunto de ciudades está dividido en regiones, y se debe visitar una ciudad de cada región minimizando el costo.

Problema del viajante de comercio con recogida y entrega de mercancías (PDTSP, *Pick-up and Delivery Traveling Salesman Problem*): cada ciudad provee o recibe una cantidad de producto que es transportada por un único vehículo con capacidad limitada.

Problema del viajante de comercio con ventanas de tiempo (*Traveling Salesman Problem with Time Windows*): donde cada ciudad o cliente tiene un tiempo mínimo de llegada y máximo de salida.

Problema del viajante de comercio con múltiples viajantes: existe un número determinado de viajantes que deben visitar ciertas ciudades, sin visitar las que ya han sido visitadas por el resto de viajantes.

#### **1.4.2. Dificultad de resolución del TSP**

El TSP es un problema NP-duro. Igual que ocurre con otros problemas en el ámbito de la Organización Industrial, se caracteriza por ser fácilmente descriptible pero difícil de resolver, por lo que ha despertado un gran interés a lo largo de la historia no sólo en su estudio, sino también en la obtención de heurísticas para su resolución. Su dificultad de resolución radica en que el número de posibles soluciones aumenta significativamente al ampliar el tamaño de la muestra, es decir, de la cantidad de nodos a visitar.

Por esta razón, el problema del viajante ha alcanzado una importante posición en la teoría de la complejidad. Según esta teoría, los problemas para los que existe un buen algoritmo de resolución son clasificados como P, de tiempo polinómico. Por el contrario, los problemas para los que aún no se ha encontrado un algoritmo eficiente son clasificados como NP, de tiempo polinómico no determinista.

Además, se ha demostrado que muchos de los problemas denominados como “difíciles” son computacionalmente equivalentes. Es decir, un algoritmo polinómico que puede usarse para resolver uno de estos problemas sería válido para resolver el resto de los englobados en esta categoría. Estos problemas reciben el nombre de NP-duro (más conocidos por su nombre inglés *NP-hard*).

### 1.4.3. Problemas en las rutas de vehículos (VRP)

Los constantes cambios a los que se han visto sometidas las industrias de carga y transporte durante los últimos años, junto con los nuevos requerimientos relacionados con el aumento de complejidad de las estrategias de planificación, han propiciado la aparición de nuevos VRP, como variaciones y restricciones que generan una familia que incluye restricciones complejas.

Este modelo es uno de los más conocidos, supone la existencia de un ente central, que dispone de un parque automotor con una capacidad de carga específica, con los cuales deben atender las demandas establecidas de los clientes distribuidos en su zona de reparto (ver figura 1.2), buscando lograr el principal objetivo que es, minimizar costos en la distribución por medio de la ruta óptima que empiece y finalice en el almacén (Stentz, 1996).

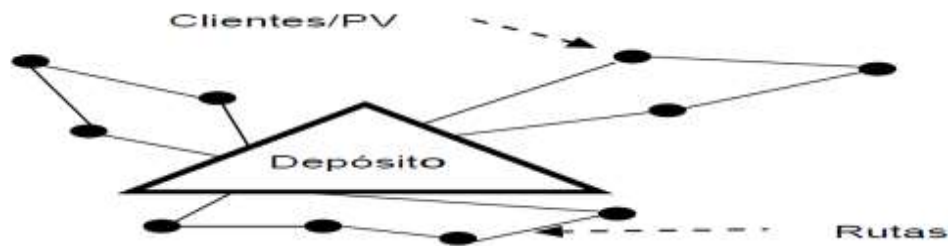


Figura 1.2. Ilustración genérica de la solución simple a un problema VRP (Fuente: Hernández, 2014).

### 1.4.4. Aplicaciones del Problema del Viajante de Comercio

A pesar de que su nombre hace pensar que tiene una aplicación muy concreta: Decidir la ruta para un vendedor o agente comercial, el TSP se puede emplear en cualquier situación que requiera seleccionar nodos en cierto orden de cara a reducir los costos, éste se ha aplicado sobre una gran variedad de problemas. A continuación, se comentan brevemente algunas de sus aplicaciones más importantes del Problema del Viajante de Comercio (Yang y Rong, 2000):

**Industria:** De gran beneficio, sus aplicaciones contribuyen de manera significativa una gran contribución en lograr la necesaria reducción de los costos del sistema empresarial.

**Producción de placas de circuito impreso:** Estas placas están constituidas por numerosos agujeros hechos por perforadoras automáticas, en estos puntos se hacen las conexiones, soldaduras o grabados necesarios.

**Microprocesadores personalizados:** Este proceso comienza con un microprocesador básico, el cual

está formado por una red de puertas lógicas sencillas, fraccionadas mediante láser y creando grupos individuales de puertas, que permiten al chip desarrollar las funciones especificadas por el cliente. Con la ayuda del TSP es posible reducir hasta un 50 % el tiempo necesario.

**Secuenciación de tareas:** Se refiere al orden en el cual los diferentes trabajos deben ser procesados, de forma que se minimice el costo total empleado en los ciclos de ensamblaje en las cadenas productivas.

**Búsqueda de planetas:** En los observatorios espaciales, se determina la secuencia de observaciones que deberá hacer el telescopio una vez esté en su posición.

**Organización de datos:** La organización de datos en grupos *clústers* de elementos con propiedades similares es un problema básico en análisis de datos. El TSP ha sido aplicado frecuentemente en problemas de este tipo cuando existe una buena medida de la similitud

Entre los últimos proyectos exitosos en referencia al estudio del TSP se encuentran:

**Programación de impresión de periódicos:** Se emplean en la impresión de medios de prensa, donde cinco pares de cilindros por ambos lados son impresos simultáneamente. Existen tres clases de formas, llamadas de 4-6-8 páginas, las cuales son usadas para imprimir las ediciones. El problema de programación consiste en decidir cuál de los tamaños se debe programar y en qué cantidad (Gorenstein, 1970; Carter, 2002).

**Ruteamiento de rutas escolares:** La programación de rutas escolares, como una variante del problema de TSP, con algunas restricciones adicionales. La función objetivo consiste en minimizar el número de rutas, teniendo en cuenta que la longitud de los itinerarios sean los más cortas posibles, que no se tengan sobrecupos de estudiantes en los ómnibus y adicionalmente que se cumpla con el horario de ingreso a la escuela (Noonan, 1972).

**Problema de programación de grupos o tripulaciones:** Una aplicación aparece en sistemas de información entre diferentes áreas de un banco, donde la central necesita recoger documentos o caudales y debe programar las rutas de los equipos de mensajería, tal que permita que esta operación garantice un costo mínimo (Svestka, 1973).

**Problema de programación de entrevistas:** Los autores proponen una aplicación de m-TSP con variaciones entre distintos períodos, para la programación de entrevistas entre agentes turísticos y proveedores de la industria del ocio, cuyo objetivo es determinar las rutas de cada agente turístico al conjunto de proveedores (Hofstra, 1992).



**Problema de programación de laminadores calientes:** En la industria del hierro y el acero, las órdenes son programadas sobre un laminador en caliente, en el que los costos de preparación de la producción deben ser minimizados. Las órdenes son tratadas como ciudades y las distancias entre dos ciudades se toman como un costo de penalización por el cambio entre dos órdenes (Brummit, 1996).

**Problema de planificación de misiones:** La programación de misiones consiste en encontrar la ruta óptima para cada soldado (o planeador) para lograr los objetivos de la misión en el mínimo tiempo posible. Esta es una variante del m-TSP donde hay m planeadores que deben regresar al punto de partida. Esta aplicación incluye construcción, reconocimiento militar (Jinhai y Rubo, 2002), oficina de correos automatizada, robots de rescate, robots autómatas, exploración planetaria y aeronaves no tripuladas (Carlton, 1998).

**Diseño del sistema global de navegación por satélite:** Es un sistema de satélite basado en el espacio terrestre, es importante en aplicaciones reales tales como prevención y administración de desastres, medio ambiente, monitoreo agrícola, estado de tiempo. El objetivo es determinar las posiciones geográficas de puntos desconocidos sobre los cuales debe usarse el satélite. Cuando se tienen múltiples receptores o múltiples periodos de tiempo, se ubican los receptores para realizar una serie de observaciones, el problema de encontrar la mejor orden de sesiones de los receptores puede ser formulado como un m-TSP (Chelouah, 2004).

### 1.5. Métodos computacionales de solución del TSP

Existen algunos métodos relativamente sencillos que se pueden programar, para resolver el TSP para cuando son pocos los nodos a recorrer. En este caso frecuentemente no se buscan soluciones óptimas, sino soluciones factibles y aceptablemente buenas.

Una posible solución, que probablemente no sea la óptima, es la solución directa. Esta consiste en recorrer cada uno de los nodos en la misma dirección en que aparecen en la tabla de distancias. Si la matriz no es simétrica, se obtendrán dos rutas: una para la directa y otra para la inversa de la directa; en el epígrafe 2.3.2 del próximo capítulo, se muestra este caso en particular.

Otra solución sería proponer al azar varias rutas, calcular el consumo del recurso que se quiera minimizar (o si es el caso, calcular la ganancia que se quiera maximizar), para luego asumir la mejor

de ellas. Esto tiene el inconveniente de la incertidumbre que genera el usar propuestas al azar.

Existen otros métodos como el del Vecino más Cercano y el del Vecino más cercano con Inserción, que igualmente se desarrollan en el segundo capítulo de esta investigación, que si bien no brindan soluciones óptimas, brindan buenas soluciones y acortan el tiempo de cómputo.

El conocido “Método de la fuerza bruta” es el único algoritmo realmente óptimo, pero inabordable computacionalmente a partir de un cierto número de nodos en el sistema, por lo que su eficiencia es catastrófica. Su funcionamiento es muy intuitivo en su definición.

### • 1.5.1. El Método de la fuerza bruta

Esta solución es fácil de programar, no obstante, el número de posibles rutas se incrementa según aumenta el número de ciudades, de la misma manera que aumenta el factorial de un número. En función de la cantidad de nodos ( $n$ ), entiéndase: ciudades, lugares, puntos..., y si la tabla de distancias es asimétrica, la cantidad de rutas ( $CR$ ) posibles a analizar se calcula por la fórmula:

$$CR = (n - 1)! \quad \text{Ec. 1.1}$$

Si la tabla de distancias fuera simétrica, la cantidad de rutas se reduce a la mitad:

$$CR = \frac{(n - 1)!}{2} \quad \text{Ec. 1.2}$$

No es necesario un gran número de ciudades para que el guarismo de posibilidades sea inabordable para las actuales generaciones de computadoras; producto a la explosión combinatoria, no existe ordenador alguno capaz de realizar los cálculos en un tiempo razonable. La siguiente tabla muestra la sorprendente progresión de las cantidades de posibles rutas para cantidades pequeñas de la cantidad de nodos:

Tabla 1.2. Factorial de los números naturales del 4 al 19 (Elaboración propia).

4! = 24	8! = 40 320	12! = 479 001 600	16! = 20 922 789 888 000
5! = 120	9! = 362 880	13! = 6 227 020 800	17! = 355 687 428 096 000
6! = 720	10! = 3 628 800	14! = 87 178 291 200	18! = 6 402 373 705 728 000
7! = 5040	11! = 39 916 800	15! = 1 307 674 368 000	19! = 12 164 510 040 883 200

### 1.5.2. El método del vecino más cercano

Demostrada la inviabilidad de la aplicación del método de la fuerza bruta, surgieron nuevos métodos de solución tal como es el método del vecino más cercano (Calviño, 2011). Este es un método muy sencillo que consiste en salir del origen hacia el nodo más cercano, luego desde dicho nodo visitar al

nodo que quede más cerca y así sucesivamente, hasta visitar el último de los nodos; del último de los nodos visitados se retorna al nodo de origen.

El método del vecino más cercano entrega una solución “razonable” en mucho menos tiempo que el método de la fuerza bruta; sin embargo, generalmente, este algoritmo no da lugar al camino más corto (Menger, 1931).

En la Figura 1.2 se puede observar un ejemplo de resolución a través de este método (Calviño, 2011). Obsérvese que en la primera iteración existen dos arcos con igual costo. Por ello, se han obtenido dos soluciones a través de este método, una comenzando con cada uno de los arcos. La solución (a), que además coincide con la solución óptima, tiene un costo menor que la solución (b).

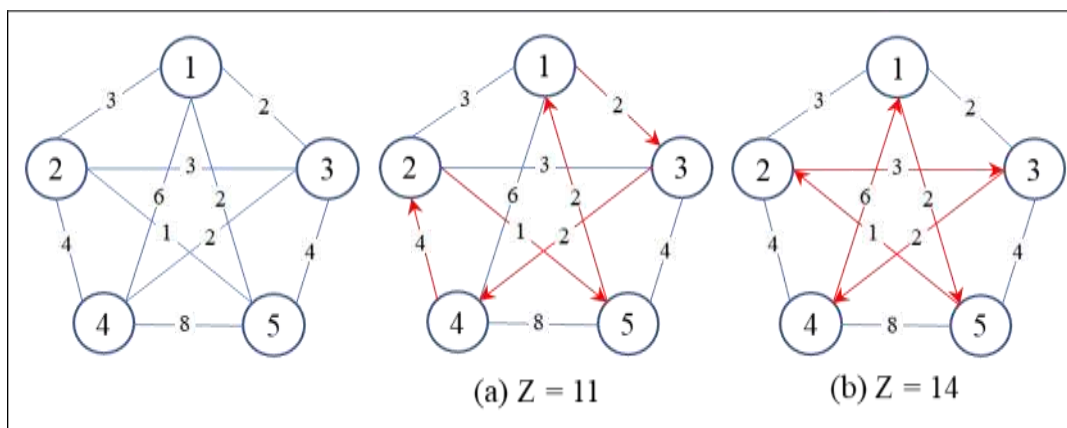


Fig. 1.3. Heurística del vecino más próximo (Elaboración propia)

### 1.5.3. El método del vecino más cercano con inserción

Este método es una variación del método del vecino más cercano y es conocido también como el Algoritmo de mejor primero (BF). Generalmente da una buena mejor solución que el método del vecino más cercano, pero su solución se torna más complicada en la medida que se incrementan los nodos a analizar, si la matriz no es simétrica y si se tiene el caso de que existan varias distancias iguales entre nodos.

Para explicar este método se utilizará una matriz simétrica de distancias en kilómetros entre cinco nodos, con punto de inicio del recorrido en el origen “A”. La siguiente tabla muestra los valores:

La solución por el Método del vecino más cercano sería:  $A \rightarrow C \rightarrow E \rightarrow B \rightarrow D \rightarrow A$ , con distancia total a recorrer  $Z = 1 + 2 + 5 + 5 + 10 = 23$  km.

La solución por el Algoritmo de mejor primero (BF), o Método del vecino más cercano con inserción, sería:  $A \rightarrow C \rightarrow E \rightarrow D \rightarrow B \rightarrow A$ , con distancia total a recorrer  $Z = 1 + 2 + 8 + 5 + 2 = 18$  km.

Tabla 1.2. Matriz de distancias.

	A	B	C	D	E
A.	0	2	1	10	25
B		0	18	5	5
C			0	20	2
D				0	8
E					0

En los epígrafes 2.3.3 y 2.3.4, se desarrollan los métodos del “vecino más cercano” y el “mejor primero”, para la ruta de reparto “Mayarí”.

### 1.6. Métodos de resolución del TSP con programación entera o mixta

Son diversos los algoritmos que intentan resolver el TSP de diferentes maneras, presentando cada uno características diferentes, buscando optimización en cuanto a caminos Hamiltonianos, tiempo de ejecución o consumo de recursos.

Los métodos de resolución de optimización combinatoria se pueden clasificar de diversas maneras, pero se podría decir que una de las clasificaciones más generales se corresponde con la siguiente:

**Método exacto:** proporciona una solución óptima del problema. Algunos de estos modelos son los de Ramificación y acotación, Hiperplanos de corte, de Ramificación y corte.

**Método heurístico:** algoritmo que con poco esfuerzo computacional proporciona una solución aproximada, pero no necesariamente óptima del problema. Una clasificación de estos podría ser:

- *Algoritmos constructivos:* heurísticos que tratan de construir una solución factible sin precisar de ninguna previa.
- *Heurísticos voraces:* hace uso del mejor elemento, teniendo en cuenta el objetivo a optimizar, pero sin tener en cuenta consecuencias futuras, ya que tras tomar una decisión esta no vuelve a ser considerada en futuras iteraciones.
- *Heurísticos de mejora:* la idea principal es comenzar con una solución inicial a la que se le quitarán  $k$  aristas o arcos para luego añadirle esta misma cantidad de forma que se mejore la solución.
- *Heurístico de multiarranque:* trabaja con probabilidades y procesos aleatorios que nos dan mejores soluciones.

### 1.6.1. Modelo de programación lineal con enteros binario para solucionar el TSP

Existen múltiples formulaciones distintas del TSP (Calviño, 2011; Quirós, 2013), en este epígrafe tan solo se va mostrar una de ellas y es la formulación que se empleará para solucionar el problema de investigación, con ayuda de una plantilla de Excel 2017.

En el modelo de programación lineal con enteros binarios se tiene a la Función Objetivo (FO), que como su nombre lo dice, es el objetivo del problema. Es la expresión que se debe maximizar o minimizar; en este caso, será la de minimizar distancias.

$$\text{FO.: Min } Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij} X_{ij} \quad \text{Ec. 1.3}$$

La variable de decisión se denota por  $X_{ij}$  y los coeficientes económicos  $C_{ij}$  se obtienen de la matriz de distancias; es decir este coeficiente es el valor de la distancia que existe desde un punto al otro.

La siguiente parte del problema son las restricciones que se asocian en dos grupos fundamentales:

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} = 1, \quad (\forall j = 1 \dots n) \quad \text{Ec. 1.4}$$

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} = 1, \quad (\forall i = 1 \dots n) \quad \text{Ec. 1.5}$$

La ecuación 1.4 establece que, desde cada nodo (incluido el origen), se puede salir una sola vez; por su parte la ecuación 1.5 obliga a que a cada nodo, incluido el origen, se pueda entrar una única vez.

En los modelos de programación lineal se acostumbra a enunciar la condición de no negatividad, pero en este caso al tratarse de un modelo con variables binarias se expresa de la siguiente forma:

$$\forall X_{ij} = \{0;1\} \quad \text{Ec. 1.6}$$

Esto significa que la variable puede tomar valor de cero o uno. Si toma valor de cero es porque no aparecerá en el conjunto de soluciones; por otro lado, si toma valor igual a la unidad, significa que la variable es parte del conjunto de solución del problema.

Esta manera de formular el problema no garantiza por sí sola que se creen subrutras, de modo que habría que insertar otras restricciones muy puntuales como establecer que una variable en específico tome valor cero, para indicar que desde un determinado nodo no se puede ir al otro nodo indicado.

Por ejemplo, para indicar que desde el nodo  $E$  no se pueda ir al nodo  $M$  se haría el siguiente planteamiento:

$$X_{E,M} = 0 \quad \text{Ec. 1.7}$$

Otra forma muy conveniente de evitar que se creen subrutas es el de prefijar cuál será el último nodo a visitar, antes de regresar al origen. El siguiente se emplearía para decir que de vuelta al *Origen*, tan solo se puede hacer desde el nodo  $M$ :

$$X_{M,Origen} = 0 \quad \text{Ec. 1.8}$$

Este modelo, tanto por la sencillez de su programación como por la facilidad que brinda la herramienta *Solver* del Excel, así como la posibilidad de incorporar controles de *Visual Basic* a la hoja de cálculo, fue lo que condicionó implementar una solución al problema de investigación por esta vía. En el Capítulo 2 se desarrolla este método.

### 1.6.2. Otros métodos heurísticos para la solución del TSP

En este epígrafe se muestran otros 24 métodos para abordar el TSP, escogidos entre las numerosas formas de abordar este problema.

#### **Teoría de los grafos (Calviño, 2011).**

Mediante la teoría de grafos pueden representarse gran número de situaciones que supongan relaciones entre diversos elementos pues constituyen una herramienta que permite modelizar relaciones de esta naturaleza, de modo que se puedan resolver problemas asociados a esas circunstancias, frecuentemente de forma menos costosa que utilizando otras técnicas como la programación lineal.

#### **Programación dinámica (Calviño, 2011).**

La programación dinámica permite al igual que el método voraz, resolverlo mediante una secuencia de decisiones. Sin embargo, en este caso, se producen varias secuencias de decisiones y solamente al final se sabe cuál es la mejor de ellas, al evitar explorar todas las secuencias posibles de decisiones, por medio de la resolución de subproblemas de tamaño creciente y almacenamiento en una tabla de soluciones óptimas de éstos para facilitar la solución del problema mayor.

### **Heurística de Christófidis (Calviño, 2011 y Stockdale, 2011).**

La base de este algoritmo es la relación existente entre árboles de mínimo coste y los problemas del viajante, los problemas de mínimo costo pueden ser resueltos eficientemente y sus árboles de mínimo costo cuentan con múltiples variantes.

### **Heurísticas de intercambio (Calviño, 2011).**

Consiste básicamente en eliminar dos aristas y conectar los dos caminos resultantes, de una manera diferente, para obtener un nuevo ciclo. De igual manera se obtiene el valor objetivo de cada ruta con el fin de verificar si los intercambios mejoran la calidad de las respuestas en función de la matriz de distancias.

### **Algoritmo codicioso (Stockdale, 2011).**

Este método para construir la solución se dispone de un conjunto de candidatos. A medida que avanza el algoritmo se forman dos conjuntos, uno de aspirantes considerables y otro de aspirantes rechazados definitivamente. Teniendo que haber una función de selección que indica cual candidato es más prometedor, que estará directamente relacionado con la optimización del camino mínimo.

### **Algoritmo del mínimo *spanning tree* (Stockdale, 2011).**

Existe relación entre el TSP y los *spanning tree*, éste constituye para un conjunto de ciudades una colección de ramas que unen todas las ciudades sin formar ciclos aunque su diferencia principal radica en la forma de solución de ambos, pues a diferencia del TSP, el problema del mínimo *spanning tree* puede ser resuelto en forma eficiente con la condición de que la distancia cumpla con la desigualdad triangular y de esta forma obtenemos un beneficio.

### **Algoritmo de Lin y Kernighan (Stockdale, 2011).**

Este algoritmo heurístico pertenece a la clase de los más empleados de los de búsqueda local, el algoritmo tiene la opción de distintas alternativas, se utilizan reglas heurísticas para dar prioridad a las mismas. En el caso donde solo una de ellas puede ser elegida, se elige aquella que tiene mayor prioridad. En cambio, cuando varias alternativas pueden ser probadas, se las considera en orden descendiente de prioridad.

### **Algoritmo Hill-Climbing (Pérez de Vargas Moreno, Beatriz, 2015).**

Este algoritmo es también conocido como método del descenso, *steepest descent* o *best improvement*. Empieza con una solución inicial considerada como la solución actual en la primera iteración aunque es eficiente en cuanto al tiempo requerido al ser muy rápido, sin embargo termina buscando en una solución candidata la que es comparada con la actual. Si es mejor se acepta y se toma como la actual solución para la siguiente iteración

### **El Algoritmo *Late Acceptance Hill-Climbing*, LAHC (Stockdale, 2011).**

Esta es una versión mejorada del algoritmo Hill-Climbing, donde su principal idea es retrasar la comparación de la solución actual con otra del entorno, en lugar de compararla inmediatamente con la anterior se compara con la solución obtenida varias iteraciones antes en cada iteración.

### **Búsqueda Tabú (Stockdale, 2011).**

Es una técnica heurística de búsqueda local inteligente, para lo cual se utilizan las estructuras de memoria de corto y largo plazo, acompañadas de criterios de aspiración, con ella se pretende pasar de una solución a la mejor solución vecina sin importar si es mejor o peor que la actual trayectoria.

### **Algoritmos Genéticos (Stockdale, 2011).**

Es una clase de algoritmo evolutivo basado en la genética de la combinación de los cromosomas, donde cada solución al problema se codifica en un cromosoma derivada de la anterior solución y combinando las mejores soluciones y descarta las peores. No es recomendable al no ser válido para los problemas de rutas pues puede darse el caso que dejen de ser rutas los descendientes de ese cruce.

### **El *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*, GRASP (Stockdale, 2011).**

Se trata de un método en el cual cada iteración consta de dos pasos: la fase de construcción y la fase de búsqueda local. En el primero se construye una solución inicial factible mediante un método de búsqueda aleatorizado, cuyo entorno es investigado por un procedimiento de intercambio, se encuentra un óptimo local. La forma en la que se lleva a cabo la segunda fase puede ir desde sencillos métodos de búsqueda local hasta procedimientos muy sofisticados pues dirige la mayor parte de su esfuerzo a construir soluciones de alta calidad que posteriormente son procesadas con el fin de conseguir otras aún mejor.



### **Recocido simulado (*Simulated Annealing*) (Stockdale, 2011).**

El algoritmo *Simulated Annealing* (Recocido Simulado), es una heurística inspirada en la física del temple de metales, esta imitar una buena estructura cristalina de metales con una buena estructura de soluciones en problemas de optimización combinatoria, la función objetivo representa la energía del sistema, en los primeros estados la temperatura es alta y se permite la transición de una buena solución a una no tan buena con una probabilidad que disminuye exponencialmente a medida que transcurren las iteraciones.

### **El método *Threshold Accepting*, TA (Stockdale, 2011).**

Este método (TA) es una variación del Simulated Annealing, simplifica el algoritmo del recocido simulado dejando fuera el elemento probabilístico usado para aceptar soluciones peores, aunque la principal ventaja de este método es su simplicidad conceptual y sus excelentes resultados en diferentes problemas de optimización combinatoria en el cual se incluye el TSP.

### **Algoritmo determinístico usando búsqueda tabú (López y otros, 2014).**

Este algoritmo garantiza que los valores que se obtengan para la función objetivo sean de tipo determinístico; por la estructura del mismo, se facilita la generación de soluciones vecinas y el cálculo del valor de la función objetivo. La filosofía del algoritmo basado en la técnica búsqueda tabú no es complicada si no flexible y puede ser aplicado a cualquier problema de combinatorio en el que se definan con claridad y precisión los elementos que intervienen.

### **Heurísticas K-Opt (Espinoza, 2006).**

Se trata de una heurística de mejora, y por lo tanto, se ha de partir de una solución factible y conocida. Se basa en la sustitución de los arcos de una ruta por otros arcos que no se crucen mejorando así el problema. Se señala que una ruta es óptima si es imposible obtener una ruta con menor distancia al remplazar la distancia de sus arcos por otros arcos distintos.

### **Algoritmos heurísticos de mejora (Pérez, 2015).**

Esta heurística parte de una solución ya conocida, basando su desarrollo en buscar de entre los elementos del entorno de la solución actual aquel que tenga un mejor valor de acuerdo con algún criterio predefinido, moverse a él y repetir la operación hasta que se considere que no es posible hallar una mejor solución.

**Backtracking (Aínos y Pinto, 2008).**

En la estrategia de vuelta atrás (Backtracking), lo que primero se buscará es estructurar el espacio a explorar. Se descartan en bloques soluciones no satisfactorias, estructurada en etapas y se expresa en forma de  $n$ -tupla en la que cada elemento representa la decisión tomada en la etapa  $i$ -ésima, buscando satisfacer unas determinadas restricciones.

**Ramificación y acotación o *Branch and Bound* (García y Pérez 2015).**

Este método aparece por la necesidad de acelerar el proceso de resolución de problemas de programación lineal entera que avanzamos en el árbol decisional. Estos cortes son específicos y no se asegura. En este caso, a pesar de emplearse un tiempo ligeramente mayor para el estudio de cada nodo, el número de nodos objeto de estudio es considerablemente menor, debido a la reducción del número de restricciones añadidas de ahí su convergencia a una solución óptima.

**Hiperplanos de corte (*Cutting planes*).**

Este modo se resuelve partiendo inicialmente del problema relajado, la técnica seguida es el aislamiento de las soluciones continuas obtenidas de la región óptima del problema, generando un mayor acercamiento la solución recomendable buscada.

**Algoritmos polinomiales (Stockdale, 2011).**

Clasificados en dos categorías de algoritmos: la primer categoría consiste de algoritmos polinomiales que encuentran soluciones que si bien no son óptimas, a lo sumo difieren del óptimo en un cierto porcentaje calculable, así como la segunda categoría consiste de algoritmos que encuentran en tiempo polinomial una solución que se espera sea buena pero cuya distancia al óptimo se desconoce, son conocidos con el nombre de heurísticos.

**Ramificación y corte (*Branch and cut*) (Pérez de Vargas Moreno, 2015).**

Se trata de una combinación de planos de corte y ramificación y acotación. Estos métodos trabajan resolviendo una secuencia de relajaciones de programación lineal, los planos de corte mejoran la relajación del problema para acercarse con una mejor aproximación al problema de programación entera.

**Relajación continua (Espinoza, 2006 y Venegas y otros, 2009).**

Constituye un método asociado a la programación lineal entera el cual sirve para obtener cotas al problema original acelerando el proceso de resolución

### **Heurística: Algoritmo de mejor primero (*Better first*).**

Este algoritmo, combina las ventajas de los algoritmos de búsqueda en profundidad y búsqueda en anchura. Sigue un sendero a la vez, pero puede cambiarse a otro sendero que parece más prometedor que el que está siguiendo.

### **1.7. Programas informáticos empleados en la optimización de rutas**

Las primeras herramientas de diseño óptimo de rutas y frecuencia surgen en la década del 70' del siglo pasado, basadas en ideas intuitivas, sin una formulación del modelo y su función objetivo y en algunos casos sin exploración del espacio de soluciones. En la actualidad es amplio el uso de tecnologías para el crecimiento de cualquier empresa.

Este tema no es la excepción ya que para la supervivencia es necesario el uso de técnicas y paquetes informáticos capaces de hacer una programación acertada para que los productos estén en el momento indicado al alcance del cliente y al menor costo.

- **WinQSB.**

WINQB es una aplicación versátil que permite la solución de una gran cantidad de problemas: administrativos, de producción, de capital humanos, direcciones de proyectos. Debido a su facilidad y potencia de manejo, este libro se convierte en herramienta indispensable en materias como la investigación de operaciones, planes de producción, factibilidad de proyectos y simulación estadística entre otras (Ruiz, 2004).

- **DRSoft.**

Es un software destinado a diseñar rutas para la distribución utilizando de forma simultánea, varios criterios como son el costo de transportación y el nivel de satisfacción de los clientes. El plan de distribución entregado por el software es la mejor solución que ha tomado en cuenta los criterios anteriores y su importancia.

Este sistema está destinado para almacenes y empresas que distribuyan productos a un número importante de clientes, donde los costos implicados en este proceso tienen un impacto significativo en los beneficios, pero el estado de satisfacción del cliente juega un importante papel en el posicionamiento de la empresa y en la fidelización de sus clientes, aspectos de gran importancia en estos momentos en gestión empresarial.

Existen otros softwares que permiten procesar modelos matemáticos, entre los que se cuentan el MathLab y el IBM Ilog CPLEX. Estos sistemas tienen el principal inconveniente de que deben ser operados por especialistas en ramas afines a la modelación económico-matemática, de modo que representan un gran reto para quienes tienen que tomar decisiones.

Un sistema que está un poco más al alcance de los conocimientos de los especialistas es el Microsoft Excel. Mediante una plantilla de cálculo de Excel y con la ayuda de su herramienta *Solver*, resulta relativamente menos complicado el resolver pequeños problemas, tal como el que ocupa en esta investigación. En el epígrafe 2.3.5.1 se explica en detalle esta propuesta.

### **1.8. Antecedentes de las rutas de distribución de medicamentos en Cuba**

(Menoyo, 2007) menciona una metodología elaborada por un grupo de especialistas del Instituto de Geografía Tropical dirigida a la optimización de la entrega de leche y al reordenamiento de la red de comercio minorista especializada en la venta de este producto en municipios de la anterior provincia Ciudad de La Habana, con el objetivo de lograr que la vinculación consumidor-red minorista de comercio, se realizara entre unidades de la propia zona de comercio, con el fin de agilizar la distribución del producto.

La situación en estos últimos años ha permitido dar un nuevo impulso a la economía, facilitando su tránsito por un período de recuperación. Se trabaja día a día con una logística intencionada en el transporte pues garantizará un estable suministro de medicamentos a la población (Fariñas, 2016). Un grupo de criterios que ayudan al carácter transformador se han ido abriendo paso entre otros, el cambio del concepto de “abastecer” por el de “traspasar propiedad”, lo cual es ejecutado a diario, cuando se abastece a la red de farmacias u hospitales por los transportistas

Igualmente hace referencia al sistema elaborado por el Centro de Investigación y Desarrollo del Transporte (CETRA), para el enrutamiento de vehículos de distribución de mercancías, basado en un modelo económico-matemático mediante técnicas computacionales. Por otro lado, Diseñaron y aplicaron un procedimiento metaheurístico (González, 2004). Para la selección de rutas de distribución que permitía la reducción de los costos de transporte y un mejor tiempo de entrega a partir de la optimización de las distancias a recorrer, al implementar un algoritmo basado en la Optimización por Colonias de Hormigas.

Dicha metodología se basaba en la utilización de la fórmula de las poligonales de Thiessen y la del modelo gravitacional. Cita, además, la utilizada en una tesis doctoral para abordar el problema de la

planificación física en redes heterogéneas de distribución, utilizando un análisis multicriterio, al incluir las preferencias del usuario.

### **1.9. Conclusiones de Capítulo 1**

- El problema del agente viajero, dentro de la Investigación de Operaciones, es uno de los problemas más abordados. El TSP cuenta con una considerable cantidad de formas o métodos de solución.
- Teniendo en cuenta la complejidad del problema que se ha de abordar, se ha decidido emplear una hoja de cálculo de Excel y su herramienta Solver, para elaborar una interfaz de usuario que permita proponer buenas soluciones en función de las demandas de los circuitos de distribución.
- Este autor no ha podido encontrar en la literatura revisada, propuesta alguna para optimizar las rutas en el reparto de medicamentos.

## **Capítulo 2. Propuesta de ruta óptima de vehículos**

En este segundo capítulo se hace una caracterización de EMCOMED como institución comercializadora y distribuidora de productos farmacéuticos. Se hace también un análisis de las probables rutas de distribución de medicamentos, partiendo desde las más elementales formas de concepción, hasta la definitiva propuesta de un modelo económico matemático de programación entera binaria. Cada alternativa, o ruta calculada, se comparó en función de sus resultados.

### **2.1. Caracterización de la Empresa Comercializadora y Distribuidora de Medicamentos**

La Empresa Comercializadora y Distribuidora de Medicamentos (EMCOMED) se encuentra ubicada en Calzada de Vento, No. 4163 entre Camagüey y Línea de Ferrocarril, municipio Cerro, La Habana. La misma es fundada el 5 de septiembre de 2005, subordinada a la Organización Superior de Dirección Empresarial (OSDE), en su forma abreviada BioCubaFarma.

Está formada por la Dirección General y nueve direcciones funcionales con veinte Unidades Empresariales de Base Mayorista de Medicamentos (UEBMM o Droguerías); su distribución es una por cada provincia y en algunos casos constituidos por dos almacenes como es el caso de la provincia de Holguín, que tiene uno en el municipio de Holguín y otro en Mayarí.

Su principal objetivo es la distribución y comercialización de medicamentos, reactivos, materias primas, productos de insumo y material asépticos. La comercialización se hace de forma directa con las instituciones del MINSAP.

Realiza la extracción de materias primas, envases, e insumos en general, además de los productos terminados desde puertos y aeropuertos hasta las plantas productoras, así como la extracción de los medicamentos terminados desde éstas hasta todas las instituciones de salud pública y otras que lo requieran. Ejecuta el aseguramiento logístico de la exportación de medicamentos. Efectúa la transportación, almacenamiento y distribución del 100 % de las materias primas, envases y productos terminados de la industria farmacéutica cubana.

#### **2.1.1. EMCOMED Holguín**

La Empresa Comercializadora y Distribuidora de Medicamentos Droguería Holguín (EMCOMED), con domicilio legal en Vía de acceso a la Loma del Frayle No. 8 y Carretera Central Holguín; subordinada a la Empresa EMCOMED, se caracteriza por tener autonomía relativa en su gestión económica corriente y funciona bajo el principio de autofinanciamiento empresarial con una capacidad de respuesta a las demandas del mercado provincial.

De acuerdo con el patrimonio que posee se clasifica en una empresa estatal con capital ciento por ciento cubano y con bienes, derechos y obligaciones; de acuerdo con la actividad que realiza se clasifica en comercial y de servicios; porque se dedica a la compra-venta de medicamentos y a prestar el servicio de distribución de los mismos.

Para ello cuenta con dos almacenes, uno en el municipio de Holguín, desde donde se distribuye a los municipios de “Calixto García”, “Rafael Freyre”, “Urbano Noris”, Banes, Gibara, Báguanos, Cacocum y Holguín; mientras desde Mayarí se distribuye a Cueto, Antilla, “Frank País”, Sagua, Moa, y Mayarí.

Numerosas son las dificultades que cuenta esta Empresa en el territorio de la provincia, partiendo del hecho de que, en la transportación interna, no hay empleo de los códigos de barra. Los muchos años de explotación del parque automotor, unido al hecho de que el servicio técnico a los vehículos corre a cuenta de terceros, conspiran contra la eficiencia del sistema de transportación.

En cuanto al transporte externo, con el propio parque de EMCOMED se intenta suplir las necesidades de transportaciones, pero la capacidad de transportación es limitada y es necesario contratar servicios a una tercera empresa, siempre y cuando no existan competencias con el objeto social de la empresa que prestaría el servicio, es decir, que EMCOMED no se convierta en una competencia para el tercero.

Los choferes, en ocasiones, no tienen plena consciencia de la mercancía que transportan y los cuidados que hay tener con la misma.

No existe una buena organización al momento de realizar las entregas, lo cual provoca atrasos en los despachos; simultáneamente a este problema, se le suma la inexistencia de una ruta óptima que permita entregar de manera eficiente los medicamentos.

Estos problemas ocasionan considerables incrementos de los costos de transporte, frecuentemente el vehículo que realiza las distribuciones tiene que salir varias veces a la misma zona. Esta problemática se puede abordar desde varios puntos de vista y focalizando la atención en un problema específico a resolver, que en este caso será el de hacer propuestas de rutas óptimas de distribución.

## **2.2. Concepción de la tabla general de distancias**

El primero de los resultados de esta investigación, sin el cual no hubiera sido posible realizar el cálculo de las rutas, ha sido el construir una tabla general de distancias entre cada uno de los 41 clientes (farmacias y hospitales) de EMCOMD Mayarí, que a su vez implicó la consulta de 1 640 distancias ( $41 \cdot 41 - 41 = 1\ 640$ ). Esta tabla se muestra en el Anexo 1.

Para determinar las distancias entre cada uno de los puntos y en ambos sentidos de circulación, se empleó el *Google Maps* ([www.maps.google.com](http://www.maps.google.com)). Las siguientes figuras muestran la manera en cómo se determinaron las distancias entre las farmacias.

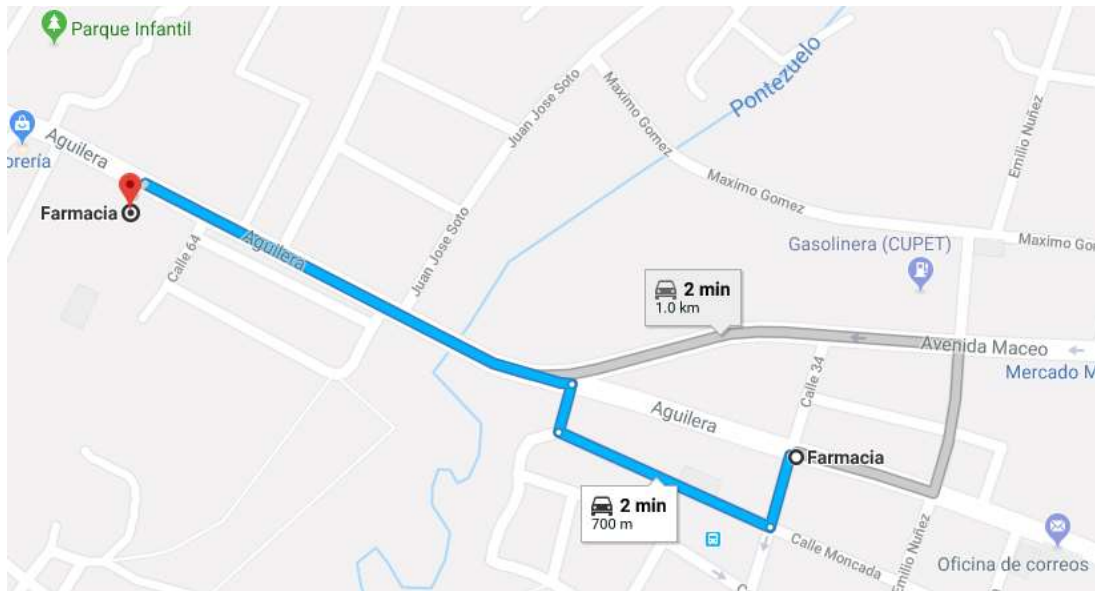


Figura 2.1. Distancia, según *Google Maps*, desde la Farmacia Bitiry hasta la Farmacia Hospital Mayarí.

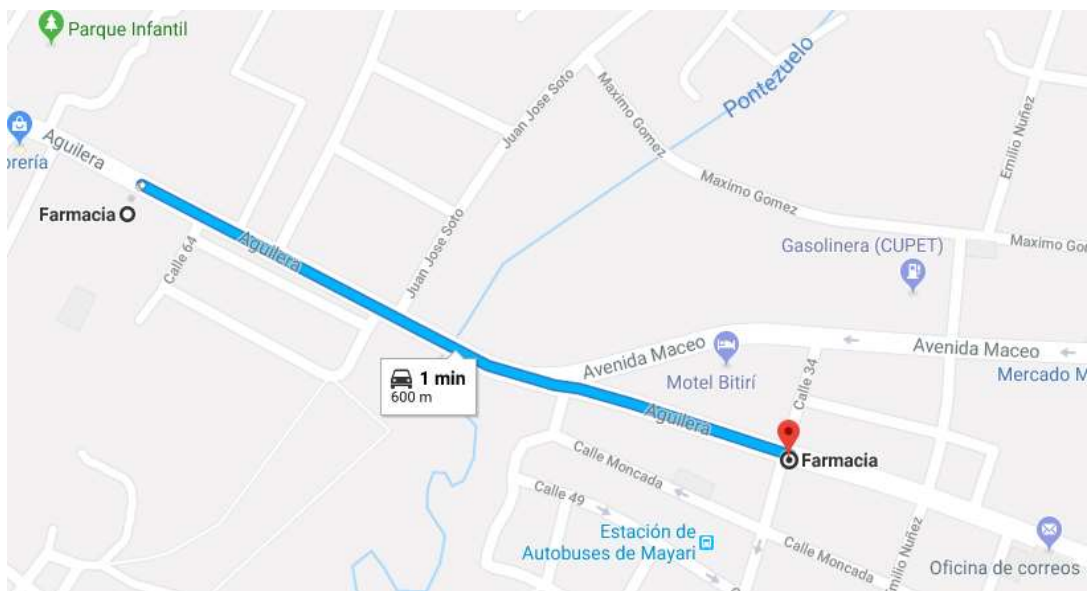


Figura 2.2. Distancia, según *Google Maps*, desde la Farmacia Hospital Mayarí hasta la Farmacia Bitiry.



### **2.3. Optimización de la ruta de reparto de medicamentos en EMCOMED Mayarí**

Esta investigación se llevó a cabo en el sector que cubre el Centro de Distribución de Mayarí y la solución propuesta, pasará por establecer una ruta óptima de transportación en función de la demanda de los clientes.

El almacén de Mayarí hace la distribución en cinco rutas fundamentales, con origen y destino final en EMCOMED Mayarí:

- Mayarí, Distribución 1, con los siguientes clientes: Farmacia Urgencia Mayarí, Hospital Mayarí, Farmacia Bitiry, Policlínico Mayarí, Farmacia Cocal, Farmacia Principal Mayarí, Farmacia Chavaleta, Farmacia Naranjal, Farmacia Guatemala y Farmacia Felton.
- Mayarí, Distribución 2, con los siguientes clientes: Farmacia Levisa, Policlínico Levisa, Farmacia Las Pasas, Farmacia Nicaro y Hospital Nicaro.
- Municipio Frank País, con los siguientes clientes: Farmacia Río Grande, Farmacia “Frank País”, Centro de Higiene, Farmacia Principal “Frank País” y Policlínico “Frank País”.
- Municipio Sagua de Tánamo, con los siguientes clientes: Farmacia Bazán, Farmacia Principal Sagua, Farmacia Sagua, Policlínico Sagua de Tánamo, Hospital Sagua de Tánamo y Farmacia el Jobo.
- Municipio Moa, con los siguientes clientes: Farmacia Centeno, Farmacia Urgencia Moa, “Hospital Guillermo Luis”, Farmacia Miraflores, Farmacia las Coloradas, Policlínico Las Coloradas, Farmacia Bahía, Farmacia los Mangos, Farmacia “Armando Mestre”, Farmacia “Rolo Monterey”, Policlínico “Rolo Monterey” y Centro Higiene Moa.

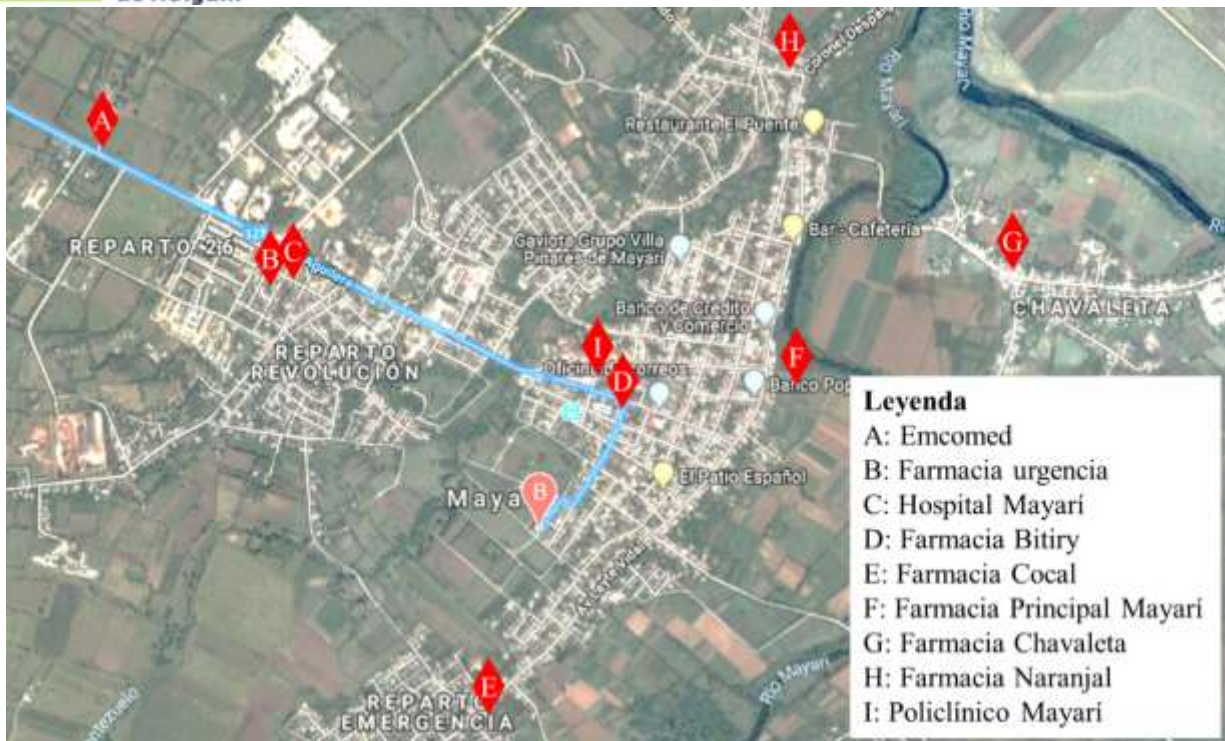


Figura 2.3. Ubicación de los clientes en la ciudad de Mayarí (Foto: Google Maps).

Este estudio se desarrolló para la Distribución 1 de Mayarí, a la cual se le adicionó una farmacia de la Distribución 2 de Mayarí, que es la Farmacia Levisa. La anterior figura muestra la ubicación geográfica de los nueve clientes en la ciudad de Mayarí, quedan fuera de este mapa las farmacias de Guatemala, Felton y Levisa.

La tabla 2.1 muestra las distancias entre las farmacias de la ciudad Mayarí, a la que se ha añadido las farmacias de Guatemala, Felton y Principal Levisa.

Tabla 2.1. Tabla de distancias entre cada una de las farmacias de Mayarí, obtenidas por el *Google Maps*.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
A	0	0,74	0,89	1,30	3,40	2,10	3,60	3,20	1,50	13,60	22,00	18,00
B	0,37	0	0,15	0,61	2,60	1,40	2,90	2,50	0,80	13,80	21,00	18,57
C	0,88	0,15	0	1,50	2,70	1,40	2,90	2,50	0,82	14,10	21,10	18,72
D	1,50	0,61	0,63	0	2,00	0,75	2,30	1,90	0,21	13,90	22,20	17,00
E	3,70	3,00	3,00	2,00	0	1,80	3,30	3,10	2,40	15,10	24,20	21,20
F	1,90	1,20	1,20	0,75	3,20	0	1,50	1,30	0,67	13,40	20,00	16,00
G	3,40	2,70	2,70	2,30	3,30	1,50	0	1,30	2,20	13,40	18,00	15,00
H	3,00	2,30	2,30	1,90	3,10	1,30	1,30	0	1,80	12,00	19,00	16,00
I	1,20	0,52	0,54	0,41	2,40	1,20	2,70	2,30	0	14,30	21,00	17,00
J	14,00	14,80	14,90	15,20	17,30	17,00	13,40	12,00	13,90	0	30,00	27,00
K	22,00	21,00	21,00	20,00	21,00	20,00	18,00	19,00	20,00	30,00	0	19,00
L	18,00	17,00	17,00	16,50	18,00	16,00	15,00	17,00	17,00	27,00	19,00	0

(A: EMCOMED Mayarí, B: Farmacia de Urgencia, C: Hospital Mayarí, D: Farmacia Bitiry, E: Farmacia Cocal, F: Farmacia Principal Mayarí, G: Farmacia Chavaleta, H: Farmacia Naranjal, I: Policlínico Mayarí, J: Farmacia Guatemala, K: Farmacia Felton y L: Farmacia Levisa)

En el encabezamiento de las columnas se han puesto los orígenes, mientras que en el encabezamiento de las filas se encuentran los destinos. De esta forma, por ejemplo, desde el origen D hasta el destino C la distancia es de 1,5 km mientras que, en sentido opuesto de C a D, la distancia a recorrer es de 0,63 km.

Este ejemplo en específico demuestra que la matriz de distancias no es simétrica y, por tanto, la cantidad de posibles rutas se eleva a la inmensa cifra de  $(12-1)! = 39\ 916\ 800$ .

Los ordenadores actuales resultan incapaces de evaluar cada una de estas posibles rutas en un tiempo prudencial. Por esta razón se emplearán métodos. Que, aunque en algunos casos se alejan de la mejor solución, permiten en cambio una ganancia de tiempo considerable en encontrar buenas soluciones.

El criterio para calcular la ruta óptima fue el de lograr que la transportación se haga “con el menor recorrido posible”, que significará a su vez ahorros en tiempo de traslado y en consumo de combustible. Otras posibles evaluaciones se pueden hacer en función del tráfico producido, el mínimo tiempo de recorrido u otro tipo de ganancia.

### 2.3.1. Solución EMCOMED Mayarí

Tal como se muestra en la tabla 2.2, la ruta propuesta por EMCOMED sería la siguiente: A → B → C → D → I → E → F → G → H → J → K → L → A (EMCOMED Mayarí → Farmacia de Urgencia → Hospital Mayarí → Farmacia Bitiry → Policlínico Mayarí → Farmacia Cocal → Farmacia Principal Mayarí → Farmacia Chavaleta → Farmacia Naranjal → Farmacia Guatemala → Farmacia Felton → Farmacia Levisa → EMCOMED Mayarí). El valor de la sumatoria de las distancias entre los puntos es de 88,96 km.

Tabla 2.2. Solución EMCOMED Mayarí.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
A	0	0,74	0,89	1,30	3,40	2,10	3,60	3,20	1,50	13,60	22,00	18,00
B	0,37	0	0,15	0,61	2,60	1,40	2,90	2,50	0,80	13,80	21,00	18,57
C	0,88	0,15	0	1,50	2,70	1,40	2,90	2,50	0,82	14,10	21,10	18,72
D	1,50	0,61	0,63	0	2,00	0,75	2,30	1,90	0,21	13,90	22,20	17,00
E	3,70	3,00	3,00	2,00	0	1,80	3,30	3,10	2,40	15,10	24,20	21,20
F	1,90	1,20	1,20	0,75	3,20	0	1,50	1,30	0,67	13,40	20,00	16,00
G	3,40	2,70	2,70	2,30	3,30	1,50	0	1,30	2,20	13,40	18,00	15,00
H	3,00	2,30	2,30	1,90	3,10	1,30	1,30	0	1,80	12,00	19,00	16,00
I	1,20	0,52	0,54	0,41	2,40	1,20	2,70	2,30	0	14,30	21,00	17,00
J	14,00	14,80	14,90	15,20	17,30	17,00	13,40	12,00	13,90	0	30,00	27,00
K	22,00	21,00	21,00	20,00	21,00	20,00	18,00	19,00	20,00	30,00	0	19,00
L	18,00	17,00	17,00	16,50	18,00	16,00	15,00	17,00	17,00	27,00	19,00	0

### 2.3.2. Solución Directa

Las tablas 2.3 y 2.4 muestran la solución directa y la solución directa inversa.

La solución directa establece la ruta  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F \rightarrow G \rightarrow H \rightarrow I \rightarrow J \rightarrow K \rightarrow L \rightarrow A$  (EMCOMED Mayarí  $\rightarrow$  Farmacia de Urgencia  $\rightarrow$  Hospital Mayarí  $\rightarrow$  Farmacia Bitiry  $\rightarrow$  Farmacia Cocal  $\rightarrow$  Farmacia Principal Mayarí  $\rightarrow$  Farmacia Chavaleta  $\rightarrow$  Farmacia Naranjal  $\rightarrow$  Policlínico Mayarí  $\rightarrow$  Farmacia Guatemala  $\rightarrow$  Farmacia Felton  $\rightarrow$  Farmacia Levisa  $\rightarrow$  EMCOMED Mayarí) y una distancia a recorrer de 92,35 km.

La solución directa inversa es bastante similar a la solución directa, solo que en este caso se empieza a recorrer el camino en sentido inverso al anterior:  $A \rightarrow L \rightarrow K \rightarrow J \rightarrow I \rightarrow H \rightarrow G \rightarrow F \rightarrow E \rightarrow D \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow A$  (EMCOMED Mayarí  $\rightarrow$  Farmacia Levisa  $\rightarrow$  Farmacia Felton  $\rightarrow$  Farmacia Guatemala  $\rightarrow$  Policlínico Mayarí  $\rightarrow$  Farmacia Naranjal  $\rightarrow$  Farmacia Chavaleta  $\rightarrow$  Farmacia Principal Mayarí  $\rightarrow$  Farmacia Cocal  $\rightarrow$  Farmacia Bitiry  $\rightarrow$  Hospital Mayarí  $\rightarrow$  Farmacia de Urgencia  $\rightarrow$  EMCOMED Mayarí) y una distancia a recorrer de 92,09 km.

Ninguna de estas dos soluciones mejora la solución actual de EMCOMED Mayarí, que tiene un valor de 88,96 km a recorrer.

Tabla 2.3. Solución directa.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
A	0	0,74	0,89	1,30	3,40	2,10	3,60	3,20	1,50	13,60	22,00	18,00
B	0,37	0	0,15	0,61	2,60	1,40	2,90	2,50	0,80	13,80	21,00	18,57
C	0,88	0,15	0	1,50	2,70	1,40	2,90	2,50	0,82	14,10	21,10	18,72
D	1,50	0,61	0,63	0	2,00	0,75	2,30	1,90	0,21	13,90	22,20	17,00
E	3,70	3,00	3,00	2,00	0	1,80	3,30	3,10	2,40	15,10	24,20	21,20
F	1,90	1,20	1,20	0,75	3,20	0	1,50	1,30	0,67	13,40	20,00	16,00
G	3,40	2,70	2,70	2,30	3,30	1,50	0	1,30	2,20	13,40	18,00	15,00
H	3,00	2,30	2,30	1,90	3,10	1,30	1,30	0	1,80	12,00	19,00	16,00
I	1,20	0,52	0,54	0,41	2,40	1,20	2,70	2,30	0	14,30	21,00	17,00
J	14,00	14,80	14,90	15,20	17,30	17,00	13,40	12,00	13,90	0	30,00	27,00
K	22,00	21,00	21,00	20,00	21,00	20,00	18,00	19,00	20,00	30,00	0	19,00
L	18,00	17,00	17,00	16,50	18,00	16,00	15,00	17,00	17,00	27,00	19,00	0

Tabla 2.4. Solución directa inversa.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
A	0	0,74	0,89	1,30	3,40	2,10	3,60	3,20	1,50	13,60	22,00	18,00
B	0,37	0	0,15	0,61	2,60	1,40	2,90	2,50	0,80	13,80	21,00	18,57
C	0,88	0,15	0	1,50	2,70	1,40	2,90	2,50	0,82	14,10	21,10	18,72
D	1,50	0,61	0,63	0	2,00	0,75	2,30	1,90	0,21	13,90	22,20	17,00
E	3,70	3,00	3,00	2,00	0	1,80	3,30	3,10	2,40	15,10	24,20	21,20
F	1,90	1,20	1,20	0,75	3,20	0	1,50	1,30	0,67	13,40	20,00	16,00
G	3,40	2,70	2,70	2,30	3,30	1,50	0	1,30	2,20	13,40	18,00	15,00
H	3,00	2,30	2,30	1,90	3,10	1,30	1,30	0	1,80	12,00	19,00	16,00
I	1,20	0,52	0,54	0,41	2,40	1,20	2,70	2,30	0	14,30	21,00	17,00
J	14,00	14,80	14,90	15,20	17,30	17,00	13,40	12,00	13,90	0	30,00	27,00
K	22,00	21,00	21,00	20,00	21,00	20,00	18,00	19,00	20,00	30,00	0	19,00
L	18,00	17,00	17,00	16,50	18,00	16,00	15,00	17,00	17,00	27,00	19,00	0

### 2.3.3. Solución por el vecino más cercano

Como su nombre lo indica, la ruta a recorrer favorece al vecino más cercano del nodo actual. Por este método se obtiene la solución que se muestra en la tabla 2.5. La solución en este caso sería: A → B → C → I → D → F → H → G → E → J → L → K → A (EMCOMED Mayarí → Farmacia de Urgencia → Hospital Mayarí → Policlínico Mayarí → Farmacia Bitiry → Farmacia Principal Mayarí → Farmacia Naranjal → Farmacia Chavaleta → Farmacia Cocal → Farmacia Guatemala → Farmacia Levisa → Farmacia Felton → EMCOMED Mayarí) y una distancia a recorrer de 93,22 km.

Esta solución, que aparentemente resultaría más eficiente, tiene una distancia por recorrer de alrededor de un kilómetro por encima de las dos soluciones directas.

Tabla 2.5. Solución por el vecino más cercano.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
A	0	0,74	0,89	1,30	3,40	2,10	3,60	3,20	1,50	13,60	22,00	18,00
B	0,37	0	0,15	0,61	2,60	1,40	2,90	2,50	0,80	13,80	21,00	18,57
C	0,88	0,15	0	1,50	2,70	1,40	2,90	2,50	0,82	14,10	21,10	18,72
D	1,50	0,61	0,63	0	2,00	0,75	2,30	1,90	0,21	13,90	22,20	17,00
E	3,70	3,00	3,00	2,00	0	1,80	3,30	3,10	2,40	15,10	24,20	21,20
F	1,90	1,20	1,20	0,75	3,20	0	1,50	1,30	0,67	13,40	20,00	16,00
G	3,40	2,70	2,70	2,30	3,30	1,50	0	1,30	2,20	13,40	18,00	15,00
H	3,00	2,30	2,30	1,90	3,10	1,30	1,30	0	1,80	12,00	19,00	16,00
I	1,20	0,52	0,54	0,41	2,40	1,20	2,70	2,30	0	14,30	21,00	17,00
J	14,00	14,80	14,90	15,20	17,30	17,00	13,40	12,00	13,90	0	30,00	27,00
K	22,00	21,00	21,00	20,00	21,00	20,00	18,00	19,00	20,00	30,00	0	19,00
L	18,00	17,00	17,00	16,50	18,00	16,00	15,00	17,00	17,00	27,00	19,00	0

### 2.3.4. Solución por el método mejor primero (*Best First*)

La esencia de este método, que también se conoce como el “método del vecino más cercano con inserción”, ha sido explicada en el capítulo anterior. Si bien las soluciones anteriores se obtuvieron en un tiempo muy corto y sin esfuerzo computacional, este método sí que necesitará de un alto tiempo de cómputo manual si no se dispone de un algoritmo que se resuelva con ayuda de un ordenador.

La tabla 2.6 muestra esta solución en la que se propone el siguiente recorrido: A → B → C → I → J → H → G → K → L → F → E → D → A (EMCOMED Mayarí → Farmacia de Urgencia → Hospital Mayarí → Policlínico Mayarí → Farmacia Guatemala → Farmacia Naranjal → Farmacia Chavaleta → Farmacia Felton → Farmacia Levisa → Farmacia Principal Mayarí → Farmacia Cocal → Farmacia Bitiry → EMCOMED Mayarí) y una distancia a recorrer de 86,36 km. En el Anexo 2 se muestra la tabla con la secuencia en los cálculos por este método.

Tabla 2.6. Solución “mejor primero”.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
A	0	0,74	0,89	1,30	3,40	2,10	3,60	3,20	1,50	13,60	22,00	18,00
B	0,37	0	0,15	0,61	2,60	1,40	2,90	2,50	0,80	13,80	21,00	18,57
C	0,88	0,15	0	1,50	2,70	1,40	2,90	2,50	0,82	14,10	21,10	18,72
D	1,50	0,61	0,63	0	2,00	0,75	2,30	1,90	0,21	13,90	22,20	17,00
E	3,70	3,00	3,00	2,00	0	1,80	3,30	3,10	2,40	15,10	24,20	21,20
F	1,90	1,20	1,20	0,75	3,20	0	1,50	1,30	0,67	13,40	20,00	16,00
G	3,40	2,70	2,70	2,30	3,30	1,50	0	1,30	2,20	13,40	18,00	15,00
H	3,00	2,30	2,30	1,90	3,10	1,30	1,30	0	1,80	12,00	19,00	16,00
I	1,20	0,52	0,54	0,41	2,40	1,20	2,70	2,30	0	14,30	21,00	17,00
J	14,00	14,80	14,90	15,20	17,30	17,00	13,40	12,00	13,90	0	30,00	27,00
K	22,00	21,00	21,00	20,00	21,00	20,00	18,00	19,00	20,00	30,00	0	19,00
L	18,00	17,00	17,00	16,50	18,00	16,00	15,00	17,00	17,00	27,00	19,00	0

Hasta el momento, es esta la mejor de las soluciones encontradas, pues es menor en casi tres kilómetros a la solución de ENCOMED Mayarí. Sin embargo, para llegar a esta solución se tuvieron que realizar numerosos cálculos de forma manual, con un tiempo sumamente considerable para su ejecución.

Es posible, apoyándose en la teoría de los grafos, programar un algoritmo de cálculo que permita simular la secuencia de los cálculos y luego, elaborar un software a la medida que permita encontrar las soluciones.

### 2.3.5. Solución por el método de programación lineal con enteros binarios

La programación lineal generalmente permite encontrar buenas soluciones para satisfacer un objetivo, a través de la satisfacción de una serie de restricciones planteadas como ecuaciones lineales.

El objetivo en este caso es el de minimizar la sumatoria de las distancias a recorrer entre nodos, teniendo en cuenta que hay que hacer un ciclo cerrado que implica salir de un punto y retornar a ese mismo punto, pasando (entrar y salir) por cada uno de los nodos una única vez.

Para formular el problema se utilizará la variable  $X_{ij}$ , donde los subíndices  $j$  e  $i$  son los nodos (farmacias a visitar) de la matriz. Los valores que pueden tomar estos subíndices, y para ser congruente con el planteamiento que se ha estado trabajando con anterioridad, va desde  $A$  a  $L$ , es decir 12 nodos.

- ✓ **Función objetivo.** Esta función establece que la sumatoria de las distancias a recorrer sea mínima. En este caso se tiene que los coeficientes  $C_{ij}$  son las distancias entre los nodos  $i$  y los nodos  $j$ .

$$\text{Min } Z \sum_{i=A}^L \sum_{j=A}^L C_{ij} X_{ij} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

- ✓ **Restricciones**

Primer grupo (12 restricciones). Establece que el valor de la variable en la diagonal principal es cero:

$$X_{ij} = 0, \quad (\forall j = i) \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Segundo grupo (66 restricciones). Establece que cuando se salga de un nodo no se puede regresar a ese mismo nodo:

$$X_{ij} + X_{ji} \leq 1, \quad (\forall i = A \dots L, \forall j = 1 \dots n, \forall i \neq j) \quad (\text{Ec. 2.3})$$

Tercer grupo (12 restricciones). Establece que desde un nodo se puede visitar como máximo a un único nodo:

$$\sum_{i=A}^L X_{ij} \leq 1, \quad (\forall j = A \dots L) \quad (\text{Ec. 2.4})$$

Cuarto grupo (12 restricciones). Establece que un nodo destino puede tener como máximo un nodo origen:

$$\sum_{j=A}^L X_{ij} \leq 1, \quad (\forall i = A \dots L) \quad (\text{Ec. 2.5})$$

Condición de variable binaria (144 restricciones). Establece que la variable tomará únicamente

valores de cero y uno ( $X_{ij} = 0$ , si la variable no entra en el conjunto de soluciones;  $X_{ij} = 1$ , si la variable entra en el conjunto de soluciones):

$$X_{ij} \in \{0,1\}, \quad (\forall i = A \dots L, \forall j = A \dots L, \forall i \neq j) \quad (\text{Ec. 2.6})$$

Condición de heurística (una en cada caso si se requiere). El planteamiento de las restricciones anteriores no garantiza por sí solo que se creen sub-rutas, de modo que en algún momento habría que “impedir” que desde un determinado nodo se retorne al origen y/o establecer que desde un determinado nodo se devuelva al origen:

$$X_{ij} = 0, \quad (\forall j = A, i = \{B, C, \dots, K \text{ o } L\}) \quad (\text{Ec. 2.7})$$

$$X_{ij} = 1, \quad (\forall j = A, i = \{B, C, \dots, K \text{ o } L\}) \quad (\text{Ec. 2.8})$$

En resumen, el problema planteado para los 12 nodos está compuesto por 144 variables binarias, una función objetivo y 246 restricciones (sin incluir las restricciones heurísticas).

### 2.3.5.1. Solución del modelo con el *Solver* del Excel

El principal inconveniente del empleo del Solver del Excel es que no se pueden modelar problemas que incluyan más de 220 celdas cambiantes. Esta limitante fue la que determinó que no se pudieran trabajar más de 12 nodos ( $A, \dots, L$ ), que en primera instancia indican que se tendrán 144 variables (144 celdas cambiantes) más otras 66 celdas cambiantes que se deducen del segundo grupo de restricciones, para un total de 210 celdas cambiantes.

La figura 2.4 muestra una vista general de la plantilla de Excel empleada en la determinación de las rutas, según la demanda. Esta plantilla contiene un marco en el cual aparecen un grupo de controles del tipo *checkbox* que proporciona el *Visual Basic* para Office. Un *checkbox* marcado significa que la farmacia en cuestión está dentro de la programación de la ruta, mientras que un *checkbox* no chequeado indica que la farmacia correspondiente no se tendrá en cuenta para el cálculo de las rutas; por defecto, todos los *checkbox* aparecen marcados.



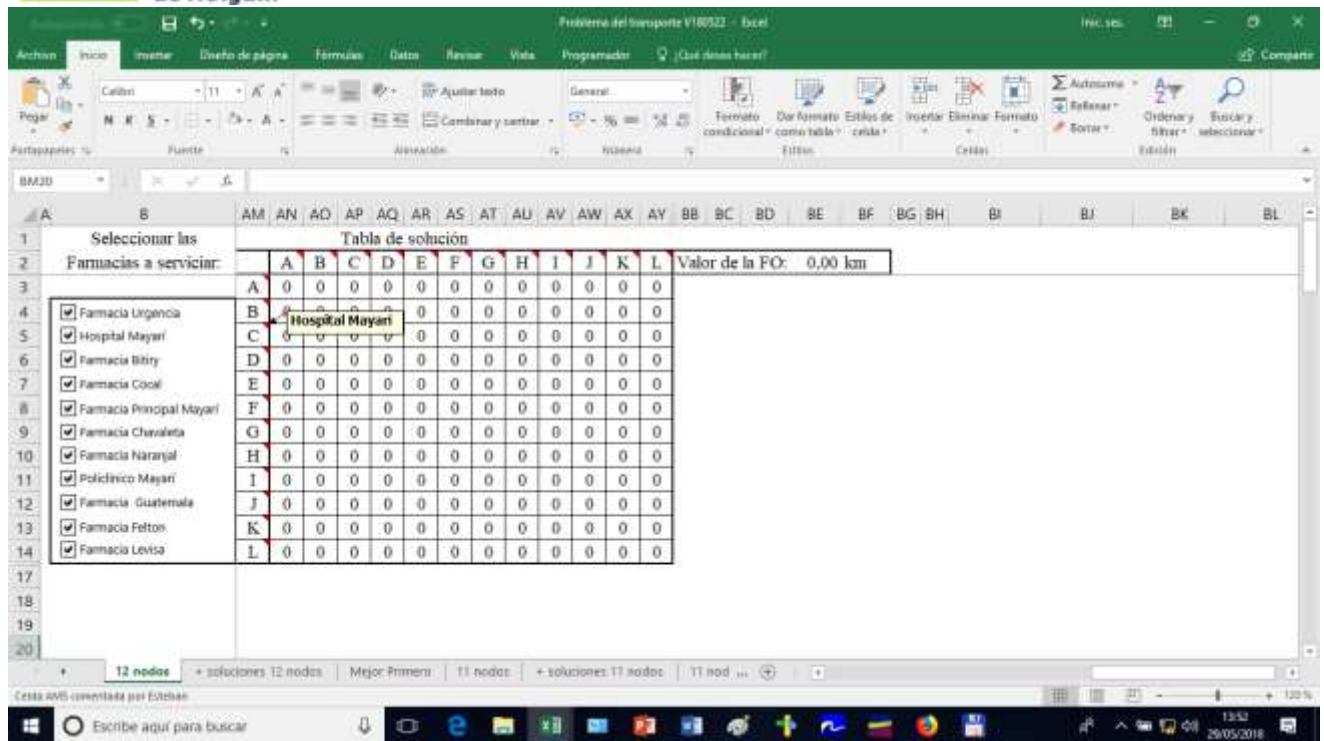


Figura 2.4. Vista general de la hoja de cálculo de Excel.

En la matriz “Tabla de solución”, tanto en la columna como en la fila que encabeza los orígenes (A, ..., L) y destinos (A, ..., L), se han insertado comentarios que revelan el nombre del nodo al pasar sobre la casilla el cursor del Excel.

Esta matriz tiene inicializada en cero cada una de sus 144 celdas; luego de resuelto el problema, aparecerán algunas casillas (en un máximo de 12) establecidas en valor “1” y el resto en ceros. Cada casilla establecida en “1” indica que se realizará la transportación desde el nodo del encabezamiento, hasta el nodo que está a la izquierda de la casilla.

El chequeo de los *checkbox* es lo primero que ha de hacerse, por cuanto a partir de aquí es que se crea una nueva tabla de distancias. La figura 2.5 muestra una nueva tabla de distancias en la que hipotéticamente se pretende eliminar del recorrido a las farmacias Bitiry, Policlínico de Mayarí y Levisa. Cada una de las casillas de las columnas y las filas correspondientes a estas localizaciones, más las casillas de la diagonal principal, están establecidas en cero; si se vuelven a chequear los *checkbox* se restablece la tabla de distancia a los valores primarios, excepto los de la diagonal principal que lógicamente seguirán teniendo valor de cero.

Seleccionar las Farmacias a servir:	Tabla final de distancias												
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	
<input checked="" type="checkbox"/> Farmacia Urgencia	0,00	0,74	0,89	0,00	3,40	2,10	3,60	3,20	0,00	13,60	22,00	0,00	
<input checked="" type="checkbox"/> Hospital Mayarí	0,37	0,00	0,15	0,00	2,60	1,40	2,90	2,50	0,00	13,80	21,00	0,00	
<input type="checkbox"/> Farmacia Bitiry	0,88	0,15	0,00	0,00	2,70	1,40	2,90	2,50	0,00	14,10	21,10	0,00	
<input checked="" type="checkbox"/> Farmacia Cocal	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
<input checked="" type="checkbox"/> Farmacia Principal Mayarí	3,70	3,00	3,00	0,00	0,00	1,80	3,30	3,10	0,00	15,10	24,20	0,00	
<input checked="" type="checkbox"/> Farmacia Chavaleta	1,90	1,20	1,20	0,00	3,20	0,00	1,50	1,30	0,00	13,40	20,00	0,00	
<input checked="" type="checkbox"/> Farmacia Naranjal	3,40	2,70	2,70	0,00	3,30	1,50	0,00	1,30	0,00	13,40	18,00	0,00	
<input type="checkbox"/> Policlínico Mayarí	3,00	2,30	2,30	0,00	3,10	1,30	1,30	0,00	0,00	12,00	19,00	0,00	
<input checked="" type="checkbox"/> Farmacia Guatemala	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
<input checked="" type="checkbox"/> Farmacia Felton	14,00	14,80	14,90	0,00	17,30	17,00	13,40	12,00	0,00	0,00	30,00	0,00	
<input type="checkbox"/> Farmacia Levisa	22,00	21,00	21,00	0,00	21,00	20,00	18,00	19,00	0,00	30,00	0,00	0,00	
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	

Figura 2.5. Nueva tabla de distancias en la que se ha suprimido a tres farmacias.

Como antes se indicó, existe otra cantidad de celdas cambiantes en un número de 66 (ver figura 2.6.) que son para satisfacer el segundo grupo de restricciones. Estas celdas están establecidas originalmente con valor de cero; luego de encontrada la solución, algunas de ellas (12 celdas como máximo) toman el valor de “1”.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
A		1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
B			1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C				0	0	0	0	0	1	0	0	0
D					0	1	0	0	1	0	0	0
E						1	1	0	0	0	0	0
F							0	0	0	0	0	0
G								0	0	0	0	1
H									0	1	0	0
I										0	0	0
J											1	0
K												1
L												

Figura 2.6. Celdas cambiantes generadas por el segundo grupo de restricciones.

### Estableciendo la Función Objetivo.

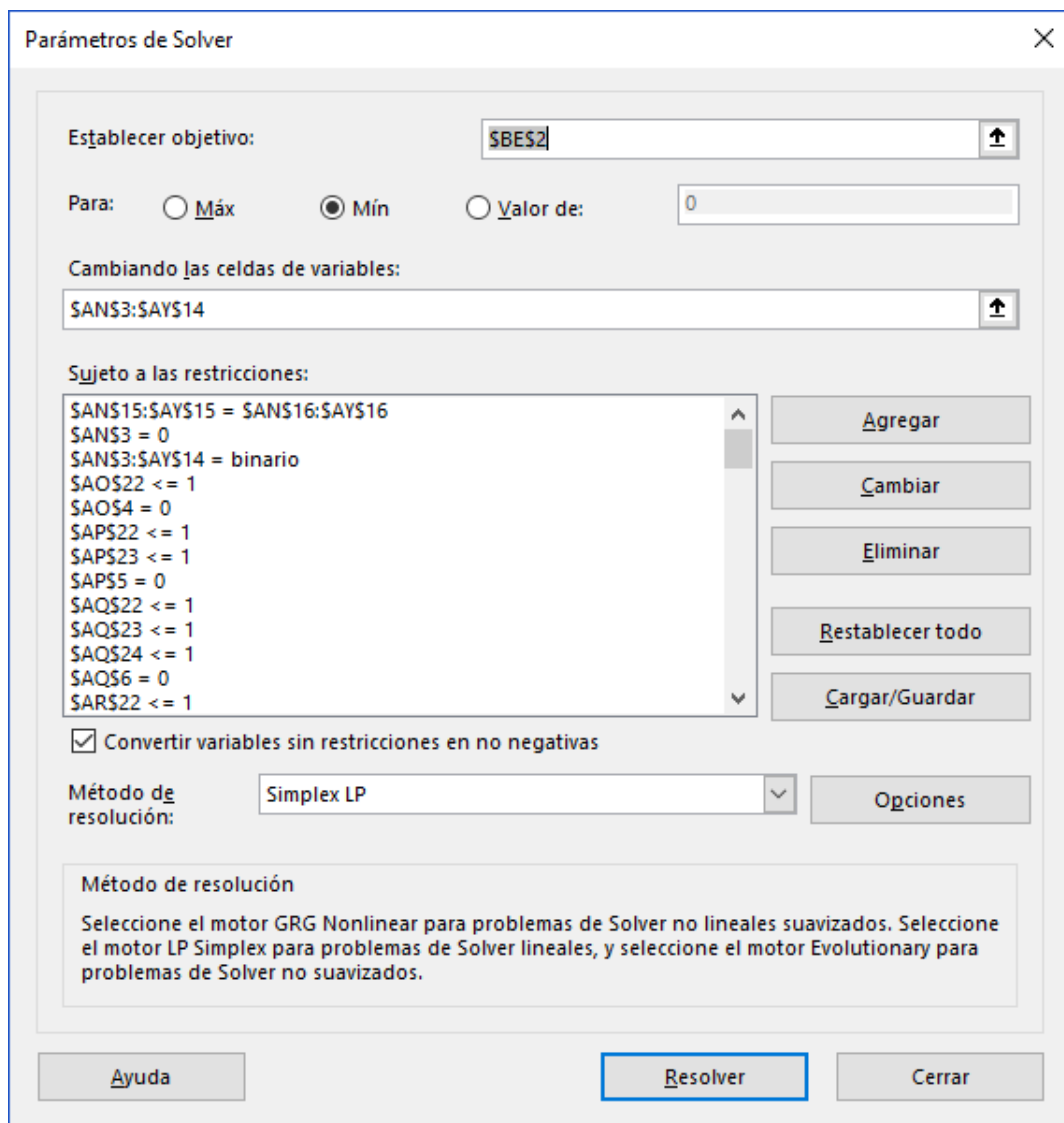
Una vez que se tienen la matriz de distancias y la matriz de solución, se establece una casilla en la cual se mostrará el valor de la función objetivo. Este valor se calcula mediante la función “SUMAPRODUCTO(Matriz1;Matriz2)” del Excel, donde “Matriz1” es la tabla de distancias y “Matriz2” es la matriz de la solución.

## Programando las restricciones.

Para programar cada una de las restricciones del modelo, se utiliza la ventana de entrada del *Solver* (ver figura 2.7). A esta ventana se accede desde la pestaña “Datos” en la cinta de opciones, haciendo clic en “*Solver*”.

Lo primero que hay que hacer es establecer cuál es la casilla de la función objetivo, que se calcula con la función SUMAPRODUCTO antes explicada, luego decir si se trata de un problema de “maximizar” o “minimizar”, en este caso se trata de minimizar la sumatoria de las distancias a recorrer.

A continuación, se establece el rango de celdas donde aparecerán los valores de las variables de decisión, esto se refleja en el cuadro de texto que sucede a la etiqueta “Cambiando las celdas de variables:”.



Parámetros de Solver

Establecer objetivo:

Para:  Máx  Mín  Valor de:

Cambiando las celdas de variables:

Sujeto a las restricciones:

- \$A\$15:\$A\$15 = \$A\$16:\$A\$16
- \$A\$3 = 0
- \$A\$3:\$A\$14 = binario
- \$A\$22 <= 1
- \$A\$4 = 0
- \$A\$22 <= 1
- \$A\$23 <= 1
- \$A\$5 = 0
- \$A\$22 <= 1
- \$A\$23 <= 1
- \$A\$24 <= 1
- \$A\$6 = 0
- \$A\$22 <= 1

Convertir variables sin restricciones en no negativas

Método de resolución:

Método de resolución

Seleccione el motor GRG Nonlinear para problemas de Solver no lineales suavizados. Seleccione el motor LP Simplex para problemas de Solver lineales, y seleccione el motor Evolutionary para problemas de Solver no suavizados.

Ayuda Resolver Cerrar

Figura 2.7. Ventana de entrada de parámetros del *Solver*.

Con el botón “Agregar” se agrega una a una, o por grupos si fuera posible, cada una de las restricciones del problema. La figura 2.8 muestra la ventana que se abre al pulsar sobre el botón de comando “Agregar”, como se aprecia. se quiere agregar un grupo de restricciones que en este caso específico corresponde a las 12 restricciones del cuarto grupo.

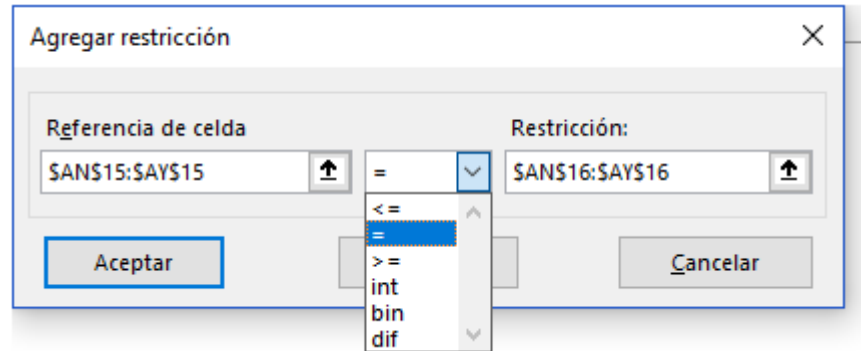


Figura 2.8. Ventana para agregar restricciones.

En “Referencia de celda”, que puede ser un conjunto de celdas tal como es el caso que se muestra, se pone cuál es la celda de referencia, al lado se selecciona el signo de la restricción (“<=”, “=” o “>=”), se indica si la variable es entera (“int”), si es binaria (“bin”) o si es diferente (“dif”) de un determinado valor. En el cuadro de texto correspondiente a “Restricción” se indica la casilla de la restricción o el grupo de casillas de la restricción que se quiere programar.

Una importante restricción por establecer, es decir que todas las variables de decisión son binarias, para ello se agrega una nueva restricción en la que, en “Referencia de celda”, se indique la matriz de celdas que contienen las variables de decisión y en el signo se especifique “bin”, para que indicar que estas variables son binarias, es decir, que solo pueden tomar valores de cero y uno.

### **Solución encontrada.**

Cuando todas las restricciones se hubieran agregado al *Solver*, se está en condiciones de solicitar la solución del problema; para hacerlo bastaría hacer clic en el botón “Resolver”. La figura 2.9 muestra el resultado de esta solución; el valor encontrado para la Función Objetivo es de 86,32 km.

Como se aprecia en la figura, la solución del problema es: A → B → C → I → D → F → E → G → L → K → J → H → A (EMCOMED Mayarí → Farmacia de Urgencia → Hospital Mayarí → Policlínico Mayarí → Farmacia Bitiry → Farmacia Principal Mayarí → Farmacia Cocal → Farmacia Chavaleta → Farmacia Levisa → Farmacia Felton → Farmacia Guatemala → Farmacia Naranjal → EMCOMED Mayarí).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
A	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
B	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
D	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
E	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
F	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
G	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
I	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
J	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
K	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
L	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0

Figura 2.9. Matriz de solución para el problema planteado con el Solver.

En la tabla de distancias se han resaltado los valores de la solución encontrada, la sumatoria de estos valores es efectivamente, 86,32 km.

Tabla 2.7. Solución con el Solver.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
A	0	0,74	0,89	1,30	3,40	2,10	3,60	3,20	1,50	13,60	22,00	18,00
B	0,37	0	0,15	0,61	2,60	1,40	2,90	2,50	0,80	13,80	21,00	18,57
C	0,88	0,15	0	1,50	2,70	1,40	2,90	2,50	0,82	14,10	21,10	18,72
D	1,50	0,61	0,63	0	2,00	0,75	2,30	1,90	0,21	13,90	22,20	17,00
E	3,70	3,00	3,00	2,00	0	1,80	3,30	3,10	2,40	15,10	24,20	21,20
F	1,90	1,20	1,20	0,75	3,20	0	1,50	1,30	0,67	13,40	20,00	16,00
G	3,40	2,70	2,70	2,30	3,30	1,50	0	1,30	2,20	13,40	18,00	15,00
H	3,00	2,30	2,30	1,90	3,10	1,30	1,30	0	1,80	12,00	19,00	16,00
I	1,20	0,52	0,54	0,41	2,40	1,20	2,70	2,30	0	14,30	21,00	17,00
J	14,00	14,80	14,90	15,20	17,30	17,00	13,40	12,00	13,90	0	30,00	27,00
K	22,00	21,00	21,00	20,00	21,00	20,00	18,00	19,00	20,00	30,00	0	19,00
L	18,00	17,00	17,00	16,50	18,00	16,00	15,00	17,00	17,00	27,00	19,00	0

## 2.4. Análisis de las soluciones

El mismo problema de ruta, del tipo “Agente Viajero”, se ha resuelto por seis vías. En la tabla 2.8 se resumen los resultados obtenidos en cada solución:

Tabla 2.8. Resumen de las soluciones para el problema de la ruta óptima para la distribución de medicamentos.

Método de solución	Valor de la F.O.
1. Vecino más cercano	93,22 km
2. Directa	92,35 km
3. Directa inversa	92,09 km
4. EMCOMED Mayarí	88,96 km
5. Mejor primero ( <i>Best First</i> )	86,36 km
6. Programación lineal con enteros	86,32 km

La mejor de las soluciones se alcanzó por el método de programación lineal (86,32 km), con un valor muy cercano al que se obtuvo por el método *Best First* (86,36 km). En orden le sigue la solución EMCOMED Mayarí (88,96 km) que dista en tan solo 2,64 km de la mejor solución encontrada.

A simple vista se destaca que el método del vecino más cercano, si bien da una solución factible, también puede ofrecer una mala solución respecto a otros métodos, según demuestra el ejemplo trabajado.

La solución que se puede encontrar por los métodos del vecino más cercano, *Best First* y por programación lineal, siempre va a devolver un valor no cambiante puesto que se obtienen a partir de un determinado algoritmo de cálculo.

Por otro lado, nótese que en las llamadas solución directa y directa inversa si se transponen las columnas entre sí, puede dar como resultado valores excepcionalmente óptimos, o valores extremadamente malos; el problema radica en que esta transposición de columnas en la matriz de distancias implicaría en la inmensa cantidad de 39 916 800 combinaciones de tabla de distancias.

Muy conveniente es simular el método de programación lineal en una interfaz como es el Excel, tal como se ha hecho en esta investigación. Quien tenga que tomar las decisiones de programar las rutas de abasto de medicamentos con una herramienta como esta, lo puede hacer en tiempo récord, con la certeza de obtener una solución que esté dentro del conjunto de soluciones óptimas, y con el valor añadido de poder quitar o adicionar nodos en función de la demanda.

#### 2.4.1. Consumo de combustible y eficiencia energética de las transportaciones

Para estimar el consumo de combustible, hay que conocer las características del vehículo que se usará en realizar la transportación. Entre estas características las más notables son la capacidad de carga y el indicador de consumo de combustible. La tabla 2.9 muestra el resumen de estos indicadores para las líneas de vehículos que se usan en EMCOMED Mayarí.

Tabla 2.9. Indicadores de las líneas de vehículos que se usan en EMCOMED Mayarí.

Marca	Tipo	Capacidad (t)	Índice de consumo (km/L)	Eficiencia energética (L/t·km)
<b>Hyundai</b>	Furgón	7,5	4,5	<b>0,0296</b>
<b>Citroën</b>	Panel	2,0	8,0	0,0625
<b>Hyundai</b>	Panel	1,5	9,5	0,0701
<b>Deer</b>	Furgón Refrigerado	0,5	12,0	0,1666

Deer	Furgón	0,5	12,0	0,1666
------	--------	-----	------	--------

El indicador de eficiencia energética a menudo es subvalorado en las entidades de transporte automotor y debería prestársele mayor atención. Por comodidad en los cálculos, se prefiere utilizar el indicador de consumo expresado en km/L o el inverso de este, que se expresa en L/100 km.

El indicador de eficiencia energética da una idea de la cantidad de combustible que consume cada línea de vehículo, para transportar una tonelada de mercancía a la distancia de un kilómetro. Como se observa de la tabla anterior, el furgón Hyundai, a pesar de ser el que más combustible consume por cada kilómetro de recorrido (0,22 L/km), es a su vez el que con mayor eficiencia emplea el combustible en la transportación: 0,0296 L/t·km.

La eficiencia energética de las transportaciones se calcula cada línea de vehículo por la siguiente fórmula:

$$Ee = \frac{1}{\frac{Ic}{Cc \cdot d}} \quad (\text{Ec. 2.9})$$

Donde:

*Ee*: Eficiencia energética de las transportaciones (L/t·km).

*Ic*: Índice de consumo de combustible (km/L)

*Cc*: Capacidad de carga (t)

*d*: distancia de la transportación (d = 1 km).

Según sea la longitud de las rutas, así será también el consumo de combustible de los vehículos. Los valores estimados de consumo de combustible que se muestran en la tabla 2.10, se obtuvieron a partir de la división de las distancias de cada ruta por el índice de consumo de los vehículos.

Tabla 2.10. Consumo estimado de combustible para la distribución de medicamentos, por ruta y vehículo.

Método	Hyundai Furgón	Citroën	Hyundai panel	Deer Furgón Refrigerado	Deer Furgón
1	20,71	11,65	9,81	7,76	7,76
2	20,52	11,54	9,72	7,69	7,69
3	20,46	11,51	9,69	7,67	7,67
4	19,76	11,12	9,36	7,41	7,41
5	19,191	10,795	9,090	7,196	7,196
6	<b>19,182</b>	<b>10,790</b>	<b>9,086</b>	<b>7,193</b>	<b>7,193</b>

Como es de esperar, mientras menor sea la distancia que recorrer, también será menor la cantidad de

combustible que se consuma, en este caso coincide para la ruta calculada por el Método 6 (86,32 km). Nótese que para cualquier tipo de vehículo la diferencia entre la solución de EMCOMED (Método 4) y la obtenida por programación lineal (Método 6), existe una diferencia de cerca de medio litro de combustible por consumir. En el caso del furgón Hyundai la diferencia entre estos dos métodos implica un ahorro de 0,58 L por cada recorrido.

Según sea el tipo de medicamento, y la cantidad total por transportar, se recomienda el uso de un determinado tipo de vehículo, atendiendo a su capacidad de carga y a la necesidad del uso del furgón refrigerado.

La cantidad de combustible que se consume en una determinada transportación depende, como ya se ha señalado, de la distancia a la cual se pretenda llevar la carga y del tipo de vehículo que se emplee; sin embargo, existen otros elementos que se deberían tener en cuenta y que se dejan como recomendación para trabajos futuros.

En el estudio que se ha hecho, se trata de un vehículo que ha de recorrer un camino, visitando a todos los clientes y regresando a su punto de partida. A la salida, el vehículo parte a plena capacidad de carga, luego poco a poco y en la medida que vaya visitando los clientes, va a ir decreciendo la carga a transportar hasta que el regreso, la carga será cero.

Este análisis sugiere también la posibilidad de, en lugar de optimizar la ruta minimizando la distancia por recorrer, mejor hacerlo minimizando el tráfico que se produzca. El minimizar el tráfico producido, aunque sea a cuenta de recorrer un camino más largo, razonablemente puede conducir a obtener un menor consumo de combustible.

Este último planteamiento queda abierto para su demostración, o refutación, en futuras investigaciones que al respecto se puedan llevar a cabo.

## **2.5. Conclusiones del Capítulo 2**

- El haber confeccionado una tabla general de distancias, ha sido una premisa indispensable para realizar el análisis de las rutas de reparto de medicamentos.
- Como se ha demostrado en esta investigación, no siempre el método del vecino más cercano, que es el que con mayor frecuencia se emplea en el problema de ruteo de vehículos, es el que da una buena solución.
- El método de programación lineal, implementado en el *Solver* del Excel, fue el que devolvió la mejor solución del problema analizado.



- La mejor solución, comparada con la propuesta de EMCOMED, permite ahorros de alrededor de medio litro de combustible, por cada distribución y tipo de vehículo a utilizado.

## Conclusiones

El complejo problema de establecer rutas óptimas de distribución de medicamentos en EMCOMED Mayarí, ha encontrado una respuesta adecuada en esta investigación.

Un importante aporte de esta investigación, sin el cual no hubiera sido posible todo el trabajo posterior, ha sido la confección de una tabla general de distancias entre cada uno de los clientes. La tabla está hecha de forma tal que se puedan establecer las distancias entre clientes, aún cuando estos no se encuentren dentro de la misma ruta de distribución.

El segundo aporte de esta tesis ha sido el demostrar, que mediante una plantilla de Microsoft Excel y con el auxilio de su herramienta *Solver*, se encuentran rutas óptimas de distribución de medicamentos de manera eficiente y eficaz. La eficiencia se muestra en la rapidez con que se encuentra la solución y la eficacia, en que permite establecer rutas según la demanda.

Es importante destacar que cualquier persona con un mínimo de conocimientos de Excel, puede operar la plantilla. Su operación es tan sencilla que basta tan solo con marcar o desmarcar las farmacias a servir y luego, proceder con la corrida del *Solver*.

La solución que se ha aportado por el método de programación lineal, que ha sido volcado en el *Solver*, permitió mejorar en 2,64 km la solución de EMCOMED Mayarí, lo que significa un ahorro de casi medio litro de combustible por recorrido y tipo de vehículo.

## Recomendaciones

1. Se recomienda continuar el estudio e implementar el modelo en cada una de las cinco rutas de reparto fundamentales.
2. En futuras investigaciones, determinar la factibilidad de en lugar de optimizar en función de las distancias, hacerlo en función del mínimo tráfico recorrido.

## Bibliografía.

1. Aynós Ambite, Álvaro y Pinto Hernández, Lucía. El problema del viajante del comercio: Análisis teórico y estrategias de solución. Universidad Carlos III de Madrid. 2008. 7p.
2. Bailey, Ryan, Carlton Moore. "Reactive Tabu Search in unmaned aerial reconnaisse simulations". Proceedings of the 1998 winter simulation conference. Vol 1. 1998. pp. 873-879.
3. Ballou, Raúl H, Logística. Administración de la Cadena de Suministros. México, Pearson Educación, 2004
4. Barbosa, Nector, BioCubaFarma; industria estratégica, con sólido posicionamiento internacional [Versión Electrónica]. Granma, Órgano Oficial del comité central del Partido Comunista de Cuba, correo: internet@granma.cu., 2016.
5. Barbuceanu, Teigen R: Agent-oriented supply chain management. Int. J. Flexible Manufacturing Systems 2000, 12:165– 188. 16, 17
6. Brummit, Stentz, "Dynamic mission planning for multiple mobile robots". Proceedings of the IEEE international conference on robotics and automation, April 1996.
7. Calviño Martínez, Aida. Cooperación en los problemas del viajante (TSP) y de rutas de vehículos (VRP): una panorámica. Máster Interuniversitario en Técnicas Estadísticas. JUNIO 2011. 112 p.
8. Calvo, Meri E. y otras. Matemáticas aplicadas a la economía y a la empresa. Madrid: Editorial AC (Thomson) 2003. 400 p.
9. Caudle, Angel y Whinston, Noonan. A Computer assited school bus scheduling. Managment Sciencie. pp. 279-288, 1972.
10. Chelouah, Saleh. "The design of the gobal navigation satelite system surveying networks using genetic algorithms". Engineering Applications of Artificial Intelligence 2004. 17. pp.111-122.
11. Cougil, Santos, Confección de rutas de reparto. el diario de un logístico , 2011.
12. Espinoza, Daniel. Editorial AC (Thomson) 2003. 400 p. El Problema del Vendedor Viajero (TSP) y Programación Entera (IP). Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Departamento de Ingeniería Industrial. 24 de julio de 2006. , 201 p.
13. Etal, Garza, Toma de decisiones empresariales: Un enfoque Multicriterio Multiexperto. Revista de Ingeniería Industrial, 2016.
14. Fariñas, Lisandra, Informan BioCubaFarma y Salud Pública sobre inestabilidad de medicamentos [Versión Electrónica], correos: lisandra@granma.cu, 2016.

15. Feitó Cespón. Selección de Rutas de Distribución en la Sucursal Villa Clara de Almacenes Universales, utilizando Optimización por Colonia de Hormigas Evento Provincial de Logística y Marketing (LOGMARK). Villa Clara, 2007.
16. García Travieso, María Victoria. Problema del viajante de comercio (TSP) Métodos exactos de resolución. Trabajo de Fin de Grado Universidad de la Laguna. 16 de julio de 2014. 53 p.
17. González Vargas, Guillermo y González Aristizabal, Felipe, (2006). Metaheuristics applied to vehicle routing. A case study: Parte 1: formulating the problem. Ing. Investig., Sep./Dec. 2006, vol.26, no.3, p.149-156. ISSN 0120-5609.
18. González, José R, “Cómo dar un paso más en la planificación de rutas a través de nuevas tecnologías que permitan una mejora en el servicio de entrega y una reducción de costes”, ¿ponencia ofrecida?, 2004.
19. Gorenstein, Saul. "Printing press scheduling for multi- edition periodicals." *Management Science* 16(6): B. 1970. 373-383.
20. Griffin, Thomas: Coordinated supply chain management. *European Journal of Operational Research* 1996, 94:1–15. 16.
21. Hernández, Odalys "Selección de Rutas de Distribución en un operador logístico aplicando un Procedimiento basado en VRP –TW.” Monografías 2014 de la Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”.
22. Hofstra, Gilbert, "A new multiperiod multiple traveling salesman problem with heuristic and application to a scheduling problem." *Decisions Sciences* 23.1992.pp. 250-259.
23. Jinhai, Yu y Rubo, Haiyan. "An implementation of evolutionary computation for path planning of cooperative mobile robots." *Proceedings of the fourth world congress on intelligent control and automation*, vol 3, 2002. pp.1798-1802.
24. López, Erasmo; Salas, Óscar y Murillo, Álex. El problema del agente viajero: un algoritmo determinístico usando búsqueda tabú. *Revista de Matemática: TEORÍA Y APLICACIONES* 2014 21(1):127–144 CIMPA – UCR. ISSN: 1409-2433.
25. Mahapatra, Narasimhan: Decision models in global supply chain management. *Industrial Marketing Management* 2004, 33:21– 27. 16.
26. Maranas, Gupta A: Managing demand uncertainty in supply chain planning. *Computers and Chemical Engineering* 2003, 27:1219–1227. 14, 16
27. Menger, K. Bericht über ein mathematisches Kolloquium. *Monatshefte für Mathematik und*

- Physik 38, 17-38. 1931.
28. Menoyo, Henríquez, Logística del transporte de cargas. Editora Logicuba. La Habana. (2007).
  29. MINSAP. Cuadro Básico de Medicamentos y Productos Naturales, 2018.
  30. Olivera, Alfredo. "Heurísticas para Problemas de Ruteo de Vehículos". Montevideo, Uruguay. 2004
  31. Pérez de Vargas Moreno, Beatriz. Resolución del Problema del Viajante de Comercio (TSP) y su variante con Ventanas de Tiempo (TSPTW) usando métodos heurísticos. Grado en Ingeniería de Organización Industrial. Universidad De Valladolid, Escuela De Ingenierías Industriales. Junio de 2015. 115 p.
  32. Quirós Morales, Fernando; López, Montiel, Martínez & Alcaraz. Modelo matemático del problema del agente viajero para encontrar la ruta óptima de distribución. Investigación gestión organizacional. Volumen1, número2, julio-diciembre de 2013. ISSN 2322-8393. pp. 9-26 (Sol WinQSB\_103-401-2-PB.pdf).
  33. Quirós Morales, Fernando; López Montiel, Modelo matemático del problema del agente viajero para encontrar la ruta óptima de distribución. Investigación gestión organizacional. Volumen1, número2, julio-diciembre de 2013. ISSN 2322-8393. pp. 9-26.
  34. Ragsdale Carter. Scheduling pre-printed newspaper advertising inserts using genetic algorithms. Omega 30(6). 2002. pp.415-421.
  35. Ruiz Escobedo. Saúl. y García Alderete, M. "Análisis de Decisiones. Solución de problemas de líneas de espera mediante WinQSB. 2009
  36. Simchi, Levi D. y Bramel, Chen: The Logic of Logistics. Springer 2005. 16
  37. Stockdale, María Lorena. El problema del viajante: un algoritmo heurístico y una aplicación. Universidad De Buenos Aires Facultad de Ciencias Exactas y Naturales Departamento de Matemática. Noviembre de 2011. 144 p.
  38. Svestka, Huckfel. "Computational experience with an m-salesman traveling Salesman algorithm." Managment Sciencie 19 (7). 1973. pp.790- 799.
  39. Yang, Tang y Rong, Liu. "A multiple traveling salesman problem model for hot rolling scheduling in Shanghai Baoshan Iron & Steel Complex". European Journal of Operational Research (124). 2000.pp. 267-282.

### Anexo 1. Tabla de distancias.

	Farmacia Urgencia	Hospital Mayari	Farmacia Bituy	Farmacia Cocal	Farmacia Principal Mayari	Farmacia Chavaleta	Farmacia Naranjal	Policlinico Mayari	Farmacia Guatemala	Farmacia Felton	Farmacia Levisa	Policlinico Levisa	Farmacia Las Pasas	Farmacia Nicaro	Hospital Nicaro	Entrada Municipio Frank País	Farmacia Barrera	Farmacia Rio Grande	Farmacia T/N	Farmacia País	Farmacia Especial Frank País
Emcomed	0.74	0.89	1.30	3.40	2.10	3.60	3.20	1.50	13.60	22.00	18.00	19.00	21.00	23.00	24.00	45.00	39.00	46.00	54.00	54.30	54.92
Farmacia Urgencia	0.00	0.15	0.61	2.60	1.40	2.90	2.50	0.80	13.80	21.00	18.57	18.00	21.00	23.62	24.57	45.57	39.57	46.72	54.72	54.72	55.02
Hospital Mayari	0.15	0.00	1.50	2.70	1.40	2.90	2.50	0.82	14.10	22.10	18.72	19.00	21.77	23.72	24.72	45.77	39.72	46.72	54.72	54.72	55.02
Farmacia Bituy	0.61	0.63	0.00	2.00	0.75	2.30	1.90	0.21	13.90	22.20	17.00	18.00	22.20	24.20	25.20	46.20	40.20	47.20	55.20	55.20	55.60
Farmacia Cocal	3.00	3.00	2.00	0.00	1.80	3.30	3.10	2.40	15.10	24.20	21.20	19.00	24.30	26.30	27.30	48.20	42.20	49.20	57.20	57.20	57.50
Farmacia Ppal Mayari	1.20	1.20	0.75	3.20	0.00	1.50	1.30	0.67	13.40	20.00	16.00	17.00	23.00	24.80	25.80	46.80	40.80	47.80	55.80	55.80	56.10
Farmacia Chavaleta	2.70	2.70	2.30	3.30	1.50	0.00	1.30	2.20	13.40	18.00	15.00	16.00	24.50	26.30	27.30	41.00	42.30	49.30	57.30	57.30	57.60
Farmacia Naranjal	2.30	2.30	1.90	3.10	1.30	1.30	0.00	1.80	12.00	19.00	16.00	17.00	23.80	21.00	22.00	43.00	42.10	48.80	56.80	56.80	57.10
Policlinico Mayari	0.52	0.54	0.41	2.40	1.20	2.70	2.30	0.00	14.30	21.00	17.00	18.00	22.40	22.00	25.80	46.10	40.10	47.10	55.10	55.10	55.40
Farmacia Guatemala	14.80	14.90	15.20	17.30	17.00	13.40	12.00	13.90	0.00	30.00	27.00	28.00	30.00	32.00	33.00	53.00	48.00	55.00	62.00	62.00	63.00
Farmacia Felton	21.00	21.20	20.00	21.00	20.00	18.00	19.00	20.00	30.00	0.00	19.00	19.00	22.00	23.00	24.00	45.00	39.00	47.00	54.00	54.00	54.30
Farmacia Levisa	17.00	17.00	16.50	18.00	16.00	15.00	17.00	17.00	27.00	19.00	0.00	0.82	3.60	5.50	6.30	27.00	21.00	28.70	36.70	36.70	36.30
Policlinico Levisa	18.00	17.80	17.64	19.00	17.00	15.00	17.00	17.00	27.00	19.00	0.51	0.00	3.40	5.30	6.10	26.40	20.49	28.30	36.30	36.30	36.00
Farmacia Las Pasas	21.00	20.00	22.20	24.20	19.00	18.00	19.00	20.00	30.00	22.00	3.60	3.40	0.00	3.40	4.30	29.00	23.00	31.00	38.00	38.00	38.30
Farmacia Nicaro	23.00	22.00	24.20	26.20	22.80	20.00	21.00	22.00	32.00	23.00	5.40	5.30	0.00	3.40	4.30	31.00	25.00	33.00	40.00	40.00	40.30
Hospital Nicaro	24.00	23.00	25.20	27.20	24.80	21.20	22.00	23.00	33.00	24.00	6.20	6.10	4.30	1.20	0.00	32.00	26.00	34.00	41.00	41.00	41.30
Entrada Mpio Frank País	44.00	44.00	46.20	48.20	46.80	41.00	43.00	43.00	53.00	45.00	27.00	27.00	29.00	31.00	32.00	0.00	11.00	17.00	9.00	9.00	9.30
Farmacia Barrera	38.00	37.85	40.20	42.20	40.80	36.00	37.00	38.00	48.00	21.00	21.00	21.00	23.00	25.00	26.00	11.00	0.00	12.00	19.00	19.00	20.30
Farmacia Rio Grande	46.00	45.85	47.90	48.20	46.00	42.70	44.70	44.70	55.00	28.70	29.00	28.00	30.70	32.70	33.70	1.70	12.70	0.00	7.30	7.30	7.70
Farmacia T/N Frank País	53.30	53.30	55.20	57.20	55.80	50.00	52.00	52.00	62.00	54.00	36.00	35.00	38.00	40.00	41.00	9.00	20.00	7.30	0.00	0.00	0.77
Farmacia Especial Frank País	53.00	53.30	55.50	57.50	55.20	50.30	52.30	52.30	63.00	54.30	36.30	36.30	38.30	40.30	41.30	9.30	20.30	7.70	0.77	0.77	0.00
Centro Higiene	54.00	53.70	55.90	57.90	55.00	50.70	52.70	52.70	63.00	54.70	36.70	36.70	38.70	40.70	41.70	9.70	20.70	8.10	0.62	0.62	0.63
PPU Frank País	54.90	54.00	56.20	58.20	56.80	51.00	53.00	53.00	64.00	55.00	37.00	37.00	39.00	41.00	42.00	10.00	21.00	8.50	1.60	1.60	1.10
Entrada Municipio Sagua	53.60	53.72	54.20	56.20	54.80	50.00	51.00	52.00	62.00	54.00	36.00	35.00	38.00	40.00	41.00	8.70	19.00	7.10	6.40	6.40	6.20
Farmacia Especial Sagua	58.00	58.00	59.20	61.20	59.80	55.00	56.00	57.00	67.00	59.00	41.00	40.00	43.00	45.00	46.00	13.70	24.00	12.10	11.40	11.40	11.20
Farmacia Sagua	58.00	58.40	59.60	61.60	60.22	55.40	56.40	57.40	67.40	59.40	41.40	40.40	43.40	45.40	46.40	14.10	24.40	12.50	11.80	11.80	11.60
Policlinico Sagua Tanamo	58.00	58.30	59.50	61.50	60.10	55.30	56.30	57.30	67.30	59.30	41.30	40.30	43.30	45.30	46.30	14.00	24.30	12.40	11.70	11.70	11.50
Hospital Sagua	58.60	58.40	59.60	61.60	60.20	55.00	56.40	57.40	67.40	59.40	41.40	40.40	43.40	45.40	46.40	14.10	24.40	12.50	11.80	11.80	11.60
Entrada Municipio Moa	87.00	88.77	89.20	91.20	92.80	84.00	86.00	86.00	97.00	88.00	70.00	70.00	72.00	74.00	75.00	43.00	54.00	41.00	41.00	41.00	41.00
Farmacia Centeno	90.10	91.10	92.30	94.30	98.00	87.10	89.10	89.10	100.1	91.10	73.10	73.10	75.10	77.00	78.10	46.10	57.10	44.10	44.10	44.10	44.10
Farmacia Urgencia	95.20	96.20	97.40	99.40	98.00	92.20	94.20	94.20	105.2	96.20	78.20	78.20	80.20	82.20	83.20	51.20	62.20	49.30	49.20	49.20	49.20
Hospital Guillermo Luis	94.90	95.90	97.10	99.10	97.70	91.90	93.90	93.90	104.9	95.90	77.90	77.90	79.50	81.90	82.90	50.90	61.90	48.90	48.90	48.90	48.90
Farmacia de Miraflores	95.50	96.50	97.70	99.70	98.30	92.50	94.50	94.50	105.5	96.50	78.50	78.50	80.50	82.50	83.50	51.50	62.50	49.50	49.50	49.50	49.50
Farmacia las Coloradas	95.70	96.70	97.90	99.90	98.50	92.70	94.70	94.70	105.7	96.70	78.70	78.70	80.70	82.70	83.70	51.70	62.70	49.70	49.70	49.70	49.70
Policlinico las Coloradas	96.10	97.10	98.30	100.2	98.90	93.10	95.10	95.10	106.1	97.10	79.10	79.10	81.10	83.10	84.10	52.10	63.10	50.10	50.10	50.10	50.10
Farmacia Bahia	95.50	96.50	97.70	99.70	98.30	92.50	94.50	94.50	105.5	96.50	78.50	78.50	80.50	82.50	83.50	51.50	62.50	49.50	49.50	49.50	49.50
Farmacia los Mangos	96.40	97.40	98.60	100.6	99.30	93.40	95.40	95.40	106.4	97.40	79.40	79.40	81.40	83.40	84.40	52.40	63.40	50.40	50.40	50.40	50.40
Farmacia Armando	94.80	95.80	97.00	99.00	97.60	91.80	93.80	93.80	104.8	95.80	77.80	77.80	79.80	81.80	82.80	50.80	61.80	48.80	48.80	48.80	48.80
Farmacia Especial	96.90	97.90	99.10	101.1	99.70	93.90	95.90	95.90	106.9	97.90	79.90	79.90	81.90	83.90	84.90	52.90	63.90	50.90	50.90	50.90	50.90
Centro Higiene Moa	97.00	98.00	99.20	101.2	99.50	94.00	96.00	96.00	107.0	98.00	80.00	80.00	82.00	84.00	85.00	53.00	64.00	51.00	51.00	51.00	51.00
Policlinica Rolo Monterey	96.90	98.00	99.38	101.4	99.80	94.30	96.30	96.30	107.3	98.30	79.90	79.90	82.30	84.30	85.30	53.30	64.30	51.30	51.30	51.30	51.30

	Centro Higiene Frank País	PPU Frank País	Entrada Municipio Sagua	Farmacia Especial Sagua	Farmacia Sagua	Policlinico Sagua Tanamo	Hospital Sagua	Entrada Municipio Moa	Farmacia Centeno	Farmacia Urgencia	Hospital Guillermo Luis	Farmacia de Miraflores	Farmacia las Coloradas	Policlinico las Coloradas	Farmacia Bahia	Farmacia los Mangos	Farmacia Armando Mestre	Farmacia Especial	Centro Higiene	Policlinico Rolo Monterey
Emcomed	54.70	55.00	53.00	58.00	59.00	58.30	58.40	88.00	91.00	96.20	95.90	96.50	96.70	97.10	96.50	97.40	95.80	97.90	98.00	98.30
Farmacia Urgencia	55.27	65.70	53.57	58.70	59.57	53.57	59.12	88.57	91.57	96.77	96.47	97.12	97.27	97.67	97.07	97.97	96.37	98.47	98.57	98.87
Hospital Mayari.	55.42	65.72	53.72	58.72	59.72	54.20	59.60	89.20	92.20	97.40	96.62	97.22	97.42	97.82	97.22	98.12	96.52	98.62	98.72	99.02
Farmacia Bituy	55.90	66.20	54.20	59.20	60.20	54.20	59.60	89.20	92.20	97.40	96.62	97.22	97.42	97.82	97.22	98.12	96.52	98.62	98.72	99.02
Farmacia Cocal	57.90	68.20	56.20	61.20	62.20	56.20	61.60	91.20	94.20	99.40	99.10	99.70	99.90	100.3	99.70	100.6	99.00	101.1	101.2	101.5
Farmacia Ppal Mayari.	56.50	66.80	54.80	59.80	60.80	54.80	60.20	89.80	92.80	98.00	97.90	98.30	98.50	98.90	98.30	993.2	97.60	99.10	99.80	100.1
Farmacia Chavaleta	58.00	68.30	56.30	61.30	62.30	56.30	61.70	91.30	94.30	99.50	99.20	99.80	100.0	100.4	99.80	100.7	99.10	101.2	101.3	101.6
Farmacia Naranjal	57.50	67.80	55.80	60.80	61.80	55.80	61.20	90.80	93.80	99.00	99.00	99.30	99.50	99.90	99.30	100.2	98.60	100.7	100.8	101.1
Policlinico Mayari	55.80	66.10	54.10	59.10	60.10	54.10	59.50	89.10	92.10	97.30	97.00	97.60	97.80	98.20	97.60	98.50	96.90	99.00	99.10	99.40
Farmacia Guatemala	62.70	63.00	62.00	67.00	68.00	67.30	67.40	96.00	99.00	104.2	103.9	104.5	104.7	105.1	104.5	105.4	103.8	105.9	106.0	106.3
Farmacia Felton	54.70	45.00	54.00	59.00	59.00	59.30	59.40	88.00	91.00	96.20	95.90	96.50	96.70	97.10	96.50	97.40	95.80	97.90	98.00	98.30
Farmacia Levisa	36.70	37.00	36.00	40.00	41.40	41.30	41.40	70.00	73.00	78.20	77.90	78.50	78.70	79.10	78.50	79.40	77.80	79.90	80.00	80.30
Policlinico Levisa	37.00	37.30	36.30	40.30	40.40	40.30	40.40	69.30	72.67	77.90	77.20	77.80	78.40	78.80	78.20	79.10	77.50	79.60	79.70	80.00
Farmacia Las Pasas	38.70	39.00	38.00	43.00	43.40	43.30	43.40	72.00	75.00	80.20	79.90	80.50	80.70	81.10	80.50	81.40	79.80	81.90	82.00	82.30
Farmacia Nicaro	40.70	41.00	40.00	45.00	45.40	45.30	45.40	74.00	77.00	82.20	81.90	82.50	82.70	83.10	82.50	83.40	81.80	83.90	84.00	84.30
Hospital Nicaro	41.70	42.00	41.00	46.00	46.40	46.30	46.40	75.00	78.00	83.20	82.90	83.50	83.70	84.10	83.50	84.40	82.80	84.90	85.00	85.30
Entrada Mpio Frank País	9.70	10.00	8.70	14.00	5.40	14.00	14.10	43.00	46.00	43.00	51.20	51.50	51.40	52.10	51.50	52.40	50.80	52.90	53.00	53.30
Farmacia Baredera	20.70	21.00	19.70	24.00	24.40	25.00	24.40	54.00	57.00	62.20	62.20	62.50	62.40	71.10	62.50	63.40	61.80	63.90	64.00	64.30
Farmacia Rio Grande	7.30	8.50	7.10	12.00	12.50	12.40	12.50	41.00	44.00	49.30	49.20	49.60	49.80	59.20	49.60	59.50	48.80	50.90	51.00	51.30
Farmacia T/N Frank País	1.10	1.60	6.40	11.40	11.80	11.70	11.80	40.40	43.40	48.60	48.60	48.90	49.10	58.50	48.90	49.80	48.20	50.30	50.40	50.70
Farmacia Especial Frank	0.63	1.10	6.20	11.20	11.60	11.50	11.60	40.20	43.20	48.40	48.40	48.70	48.90	58.30	48.70	49.60	48.00	50.10	50.20	50.50
Centro Higiene	0.00	1.00	7.00	12.00	12.40	12.30	12.40	41.00	44.00	49.20	49.20	49.50	49.70	59.10	49.50	50.40	48.80	50.90	51.00	51.30
PPU Frank País	1.00	0.00	7.50	12.50	12.90	12.80	12.90	41.50	44.50	49.70	49.70	50.00	50.20	59.60	50.00	50.90	49.30	51.40	51.50	51.80
Entrada Municipio Sagua	7.00	7.50	0.00	5.00	5.40	5.30	5.40	34.00	37.00	42.20	42.20	42.50	42.70	43.00	42.50	43.40	34.00	43.90	44.00	44.30
Farmacia Especial Sagua	12.00	12.50	5.00	0.00	0.36	5.00	0.58	33.42	3.58	38.78	38.78	39.08	46.78	39.58	39.08	39.98	38.38	40.48	40.58	40.80
Farmacia Sagua	12.40	12.90	5.40	0.36	0.00	0.38	0.51	33.49	33.51	38.71	38.71	39.01	46.71	39.51	39.01	39.91	38.31	40.41	40.51	40.81
Policlinico Sagua Tanamo	12.30	12.80	5.30	0.45	0.38	0.00	0.27	33.73	33.27	38.47	38.47	38.77	46.47	39.27	38.77	39.67	38.07	40.17	40.27	40.57
Hospital Sagua	12.40	12.90	5.40	0.58	0.51	0.27	0.00	30.00	33.00	38.20	38.20	38.50	46.20	39.00	38.50	39.40	37.80	39.90	40.00	40.30
Entrada Municipio Moa	41.00	42.00	34.00	29.00	29.00	30.00	30.00	0.00	3.00	8.20	7.90	8.50	8.70	9.00	8.50	9.40	7.80	9.90	10.00	10.30
Farmacia Centeno	44.10	45.10	37.00	32.10	32.00	33.10	33.00	3.10	0.00	6.60	6.30	6.90	7.10	7.40	6.90	7.90	6.30	8.30	8.50	8.70
Farmacia Urgencia	49.20	50.20	42.20	37.20	37.20	38.20	38.00	8.20	6.60	0.00	0.22	0.90	0.71	1.00	1.40	2.30	2.80	3.70	3.90	4.10
Hospital Guillermo Luis	48.90	49.90	41.90	36.90	36.90	37.90	37.00	7.90	6.20	0.22	0.00	1.20	1.40	1.70	1.60	2.60	2.40	4.00	4.10	4.30
Farmacia de Miraflores	49.50	50.50	42.50	37.50	37.50	38.50	38.00	8.50	6.90	1.10	1.20	0.00	0.80	0.93	1.90	2.60	3.10	4.20	4.40	4.60
Farmacia las Coloradas	49.70	50.70	42.70	37.70	37.70	38.70	38.00	8.70	7.10	0.71	1.40	1.40	0.00	0.33	1.10	2.00	2.80	3.40	3.60	3.80
Policlinico las Coloradas	50.10	51.10	43.10	38.10	38.10	39.10	39.00	9.10	7.40	1.00	1.70	1.50	0.33	0.00	1.40	1.50	3.10	3.70	3.90	4.10
Farmacia Bahia	49.50	50.50	42.50	37.50	37.50	38.50	38.00	8.50	6.80	1.30	8.50	2.00	1.00	1.30	0.00	0.97	2.10	2.70	2.90	3.10
Farmacia los Mangos	50.40	51.40	43.40	36.80	38.40	39.40	39.00	9.40	7.80	2.30	2.50	3.00	2.00	1.50	0.97	0.00	3.10	3.70	3.80	4.10
Farmacia Armando	48.80	49.80	41.80	36.80	36.80	37.80	37.00	7.80	6.20	2.70	2.40	3.10	2.80	3.10	2.10	3.10	0.00	2.80	3.00	3.20
Farmacia Especial	50.90	51.90	43.90	38.40	38.90	39.90	39.00	9.90	8.20	3.70	4.00	4.60	3.40	3.80	2.70	3.70	2.00	2.80	0.18	0.38
Centro Higiene Moa	51.00	52.00	44.00	39.00	39.00	40.00	40.00	10.00	8.40	3.90	4.10	4.60	3.60	3.90	2.90	3.80	3.00	0.22	0.00	0.30
Policlinico Rolo Monterey	51.30	52.30	44.30	39.30	39.30	40.30	41.00	10.30	8.60	4.10	4.30	4.80	3.80	4.10	3.10	4.00	3.20	0.38	0.30	0.00



## Anexo 2. Secuencia de cálculo por el método “Mejor primero”

Vecino más cercano con inserción: 86,36

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
A	0	0,74	0,89	1,30	3,40	2,10	3,60	3,20	1,50	13,60	22,00	18,00
B	0,37	0	0,15	0,61	2,60	1,40	2,90	2,50	0,80	13,80	21,00	18,57
C	0,88	0,15	0	1,50	2,70	1,40	2,90	2,50	0,82	14,10	21,10	18,72
D	1,50	0,61	0,63	0	2,00	0,75	2,30	1,90	0,21	13,90	22,20	17,00
E	3,70	3,00	3,00	2,00	0	1,80	3,30	3,10	2,40	15,10	24,20	21,20
F	1,90	1,20	1,20	0,75	3,20	0	1,50	1,30	0,67	13,40	20,00	16,00
G	3,40	2,70	2,70	2,30	3,30	1,50	0	1,30	2,20	13,40	18,00	15,00
H	3,00	2,30	2,30	1,90	3,10	1,30	1,30	0	1,80	12,00	19,00	16,00
I	1,20	0,52	0,54	0,41	2,40	1,20	2,70	2,30	0	14,30	21,00	17,00
J	14,00	14,80	14,90	15,20	17,30	17,00	13,40	12,00	13,90	0	30,00	27,00
K	22,00	21,00	21,00	20,00	21,00	20,00	18,00	19,00	20,00	30,00	0	19,00
L	18,00	17,00	17,00	16,50	18,00	16,00	15,00	17,00	17,00	27,00	19,00	0

<b>Iteración 1 (2 nodos)</b>		
1	$Z=AB+BA =$	1,11
<b>Iteración 2 (3 nodos)</b>		
1	$Z=AB+BC+CA =$	1,41
2	$Z=AC+CB+BA =$	1,77
<b>Iteración 3 (4 nodos)</b>		
1	$Z=AB+BC+CD+DA =$	2,45
2	$Z=AD+DB+BC+CA =$	3,15
3	$Z=AB+BD+DC+CA =$	3,37
<b>Iteración 4 (5 nodos)</b>		
1	$Z=AB+BC+CD+DI+IA =$	3,06
2	$Z=AI+IB+BC+CD+DA =$	4,08
3	$Z=AB+BI+IC+CD+DA =$	3,64
4	$Z=AB+BC+CI+ID+DA =$	2,57
<b>Iteración 5 (6 nodos)</b>		
1	$Z=AB+BC+CI+ID+DF+FA =$	4,12
2	$Z=AF+FB+BC+CI+ID+DA =$	5,50
3	$Z=AB+BF+FC+CI+ID+DA =$	5,02
4	$Z=AB+BC+CF+FI+ID+DA =$	4,43
5	$Z=AB+BC+CI+IF+FD+DA =$	3,78
<b>Iteración 6 (7 nodos)</b>		
1	$Z=AB+BC+CI+IF+FD+DH+HA =$	7,58
2	$Z=AH+HB+BC+CI+IF+FD+DA =$	8,91
3	$Z=AB+BH+HC+CI+IF+FD+DA =$	8,43

4	$Z=AB+BC+CH+HI+IF+FD+DA =$	7,84
5	$Z=AB+BC+CI+IH+HF+FD+DA =$	<b>6,21</b>
6	$Z=AB+BC+CI+IF+FH+HD+DA =$	6,23
<b>Iteración 7 (8 nodos)</b>		
1	$Z=AB+BC+CI+IH+HF+FD+DE+EA =$	10,31
2	$Z=AE+EB+BC+CI+IH+HF+FD+DA =$	12,14
3	$Z=AB+BE+EC+CI+IH+HF+FD+DA =$	11,76
4	$Z=AB+BC+CE+EI+IH+HF+FD+DA =$	11,07
5	$Z=AB+BC+CI+IE+EH+HF+FD+DA =$	9,91
6	$Z=AB+BC+CI+IH+HE+EF+FD+DA =$	11,21
7	$Z=AB+BC+CI+IH+HF+FE+ED+DA =$	<b>9,26</b>
<b>Iteración 8 (9 nodos)</b>		
1	$Z=AB+BC+CI+IH+HF+FE+ED+DG+GA =$	13,86
2	$Z=AG+GB+BC+CI+IH+HF+FE+ED+DA =$	15,19
3	$Z=AB+BG+GC+CI+IH+HF+FE+ED+DA =$	12,01
4	$Z=AB+BC+CG+GI+IH+HF+FE+ED+DA =$	14,12
5	$Z=AB+BC+CI+IG+GH+HF+FE+ED+DA =$	10,96
6	$Z=AB+BC+CI+IH+HG+GF+FE+ED+DA =$	<b>10,76</b>
7	$Z=AB+BC+CI+IH+HF+FG+GE+ED+DA =$	12,26
8	$Z=AB+BC+CI+IH+HF+FE+EG+GD+DA =$	12,66
<b>Iteración 9 (10 nodos)</b>		
1	$Z=AB+BC+CI+IH+HG+GF+FE+ED+DJ+JA =$	38,26
2	$Z=AJ+JB+BC+CI+IH+HG+GF+FE+ED+DA =$	38,19
3	$Z=AB+BJ+JC+CI+IH+HG+GF+FE+ED+DA =$	39,51
4	$Z=AB+BC+CJ+JI+IH+HG+GF+FE+ED+DA =$	39,42
5	$Z=AB+BC+CI+IJ+JH+HG+GF+FE+ED+DA =$	<b>34,86</b>
6	$Z=AB+BC+CI+IH+HJ+JG+GF+FE+ED+DA =$	<b>34,86</b>
7	$Z=AB+BC+CI+IH+HG+GJ+JF+FE+ED+DA =$	36,06
8	$Z=AB+BC+CI+IH+HG+GF+FJ+JE+ED+DA =$	41,06
9	$Z=AB+BC+CI+IH+HG+GF+FE+EJ+JD+DA =$	39,96
<b>Iteración 10 (11 nodos)</b>		
1	$Z=AB+BC+CI+IJ+JH+HG+GF+FE+ED+DL+LA =$	68,06
2	$Z=AL+LB+BC+CI+IJ+JH+HG+GF+FE+ED+DA =$	73,36
3	$Z=AB+BL+LC+CI+IJ+JH+HG+GF+FE+ED+DA =$	70,43
4	$Z=AB+BC+CL+LI+IJ+JH+HG+GF+FE+ED+DA =$	68,32
5	$Z=AB+BC+CI+IL+LJ+JH+HG+GF+FE+ED+DA =$	64,96
6	$Z=AB+BC+CI+IJ+JL+LH+HG+GF+FE+ED+DA =$	65,86
7	$Z=AB+BC+CI+IJ+JH+HL+LG+GF+FE+ED+DA =$	65,56
8	$Z=AB+BC+CI+IJ+JH+HG+GL+LF+FE+ED+DA =$	<b>64,36</b>
9	$Z=AB+BC+CI+IJ+JH+HG+GF+FL+LE+ED+DA =$	70,26
10	$Z=AB+BC+CI+IJ+JH+HG+GF+FE+EL+LD+DA =$	67,86

Iteración 11 (12 nodos)		
1	$Z=AB+BC+CI+IJ+JH+HG+GL+LF+FE+ED+DK+KA =$	105,06
2	$Z=AK+KB+BC+CI+IJ+JH+HG+GL+LF+FE+ED+DA =$	106,99
3	$Z=AB+BK+KC+CI+IJ+JH+HG+GL+LF+FE+ED+DA =$	106,31
4	$Z=AB+BC+CK+KI+IJ+JH+HG+GL+LF+FE+ED+DA =$	105,82
5	$Z=AB+BC+CI+IK+KJ+JH+HG+GL+LF+FE+ED+DA =$	100,46
6	$Z=AB+BC+CI+IJ+JK+KH+HG+GL+LF+FE+ED+DA =$	101,36
7	$Z=AB+BC+CI+IJ+JH+HK+KG+GL+LF+FE+ED+DA =$	100,06
8	$Z=AB+BC+CI+IJ+JH+HG+GK+KL+LF+FE+ED+DA =$	<b>86,36</b>
9	$Z=AB+BC+CI+IJ+JH+HG+GL+LK+KF+FE+ED+DA =$	87,36
10	$Z=AB+BC+CI+IJ+JH+HG+GL+LF+FK+KE+ED+DA =$	106,76
11	$Z=AB+BC+CI+IJ+JH+HG+GL+LF+FE+EK+KD+DA =$	105,56

