

# Modelamiento de distribución de productos cárnicos como un *TSP (Traveling Salesman Problem)* con teoría de grafos

Distribution modeling of meat products as a *TSP (Traveling Salesman Problem)* with graph theory

**Resumen:** El presente artículo tiene como objetivo utilizar el TSP (*Traveling Salesman Problem*) junto con la teoría de grafos para diseñar estrategias de ruteo en una red de distribución, buscando que ésta se realice de manera eficiente respecto a la distancia y tiempos utilizados en la atención de los pedidos de los clientes. Adicionalmente, se desarrolla un caso de aplicación de la metodología en una empresa de cárnicos ubicada en la ciudad de Medellín. Como resultado, se obtuvo que la utilización de TSP con grafos, permite obtener una ruta con la mínima distancia en la red de distribución, lo que se demuestra en el caso de aplicación.

**Palabras clave:** Distribución, grafos, ruteo, transporte, TSP.

**JEL:** L220, L6, L60, M1, M10

**Abstract:** This paper has as its main objective the use of the TSP (*Traveling Salesman Problem*) with graph theory in order to design routing strategies in a distribution network, looking forward an efficient way to be made in regard to distance and time used for attending the customer's requirements. Additionally, the paper develops a case of application of the methodology in a Meat Company located in the city of Medellín. As a result, we find that the use of TSP with graph produces a route with the minimum distance in the distribution network; it was demonstrated in the case of application.

**Keywords:** Distribution, graph, routing, transport, TSP.

## Rodrigo A. Gómez-Montoya

Ingeniero Industrial  
Magíster en Ingeniería Administrativa  
Docente investigador del Politécnico  
Colombiano Jaime Isaza Cadavid  
Medellín, Antioquia - Colombia  
Facultad de Ciencias Agrarias  
ragomez@elpoli.edu.co

## Abdul Zuluaga-Mazo

Ingeniero Industrial  
Especialista en Logística Integral y  
Magíster en Administración  
Docente investigador del Politécnico  
Colombiano Jaime Isaza Cadavid  
Medellín, Antioquia - Colombia  
Facultad de Administración  
azuluaga@elpoli.edu.co

## Jorge E. Espinosa-Oviedo

Ingeniero de Sistemas  
Magíster en Inteligencia Artificial  
Docente investigador del Politécnico  
Colombiano Jaime Isaza Cadavid  
Medellín, Antioquia - Colombia  
Facultad de Ingeniería  
jeespinosa@elpoli.edu.co

## Tipología:

Artículo de Investigación  
Científica y Tecnológica

## Fecha de Recibido:

Diciembre 01 de 2014

## Fecha de Aceptación:

Marzo 06 de 2015

## Para citar este artículo:

Gómez, M. R., Zuluaga, M. A., Espinosa, O. J. (2015). Modelamiento de distribución de productos cárnicos como un *tsp (traveling salesman problem)* con teoría de grafos, Clío América, 9 (17), 8 - 16

## Introducción

En el ámbito comercial y logístico, las redes de distribución permiten atender las necesidades de los clientes a partir de la coordinación de la demanda, con las capacidades de producción y logística de la compañía. De allí, la importancia de un adecuado diseño, gestión y mejoramiento de este tipo de procesos que pueden considerarse determinantes en la eficiencia y capacidad de la empresa para cumplir con los requerimientos del mercado.

El presente artículo tiene como objetivo utilizar el *TSP (Traveling Salesman Problem)* junto con la teoría de grafos para diseñar estrategias de ruteo en la red de distribución de una compañía de cárnicos, buscando que ésta se realizara de manera eficiente respecto a la distancia y tiempos utilizados en la atención de los pedidos de los clientes. Para la implementación del *TSP* con grafos se realizó un caso de aplicación en una empresa mediana de comercialización de productos cárnicos ubicada en la ciudad de Medellín. El público del artículo son investigadores, profesionales, estudiantes y personas interesadas en el ruteo de redes de distribución y logística, empleando herramientas cuantitativas.

El artículo está estructurado en cuatro partes: inicialmente se presenta una contextualización de las redes de distribución y transporte, incluyendo una revisión teórica y una aproximación al estado del arte del uso del *TSP*. Después se desarrolla la metodología de *TSP* con grafos aplicado al caso en la empresa de cárnicos. En la tercera parte se presentan los resultados y se realiza una discusión. Finalmente se establecen las conclusiones y posibilidades frente a trabajos futuros.

## Contextualización teórica

### Red de distribución y transporte de productos cárnicos

La distribución es definida por Navascués & Pau Cos (2000) como: “el conjunto de actividades que se encargan de mitigar las diferencias entre la demanda, el inventario y producción, con el fin de garantizar la disponibilidad de productos a través su transporte

entre los actores de la cadena de suministro buscando satisfacer las necesidades de los clientes” (p. 641). Dentro de la distribución es necesario utilizar instalaciones y sistemas de transporte que permiten el traslado de los productos para atender los requerimientos del mercado. Los sistemas de transporte utilizan políticas, operaciones y recursos (Ballou, 2004, p. 38). En las operaciones se considera el cargue, traslado, recogida, entrega, y descargue, entre otros. Entre los recursos, se consideran los medios de transporte, equipos de manejo de materiales y Tecnologías de la Información y Comunicaciones (TIC) (Anaya Tejero, 2007, p. 233).

Otro aspecto a considerar dentro de la distribución son las redes, las cuales, son un conjunto conformado por la estructura, procesos y recursos que más allá de la oferta comercial o punto de venta, incluyen procesos logísticos necesarios para satisfacer las necesidades de los clientes (Ducrocq, 1991, p. 182). Por su parte, Miquel Peris, Parra Guerrero, Lhermie & Miquel Romero (2006) establecen la red de distribución como la estructura organizativa y logística encargada de gestionar las relaciones entre la producción o centro de distribución y los puntos de venta, consumo y clientes (p. 280).

Por los motivos expuestos, puede indicarse que la red de distribución logística se encarga de planificar y controlar los flujos de información y productos entre el punto de producción y entrega del producto al cliente, de tal manera que se logren satisfacer las necesidades de estos, garantizando productos que cumplan con la referencia, cantidad, calidad y tiempos pactados. Cuando las organizaciones requieren diseñar o mejorar la configuración de la red de distribución para la empresa de cárnicos, se requiere considerar diferentes tipos de variables como las que se presentan en la tabla 1, las cuales afectan el tiempo de respuesta y los costos de operación, ((Ducrocq, 1991, pp. 202-205), (Chopra, 2001, p. 192), (Anaya Tejero, 2007, pp. 233-234)).

Cada una de las necesidades de satisfacción del cliente involucra un costo en una variable logística. El costo logístico está determinado por el número de instalaciones que la organización considere necesario para la distribución, el establecimiento de las rutas y el tiempo de respuesta que desee pro-

porcionar al cliente. Dependiendo de la sensibilidad que cada una de estas variables tiene en los costos y contribución a la satisfacción del cliente dentro de una red de distribución. Chopra (2001), propone los siguientes planteamientos: a) los productos van a ser entregados en la ubicación del cliente; b) si los productos serán recogidos por el cliente en un lugar específico; y c) determinar el flujo de productos a través de un intermediario o localización logística intermedia (pp. 197-198).

En los casos en que la empresa requiere entregar los productos en una ubicación del cliente o en una localización intermedia, suele requerirse el diseño de estrategias de ruteo, las cuales permiten establecer la secuencia en que deben visitarse los clientes o localizaciones logísticas donde deben entregarse los productos, y la asignación del tipo, cantidad y capacidad de los medios de transporte utilizados en la operación. El adecuado diseño del ruteo en la distribución contribuye a la atención eficaz a los pedidos de los clientes y un uso eficiente de los recursos logísticos de transporte e infraestructura, de allí la importancia de la utilización de diferentes métodos como el *VRP (Vehicle Routing Problem)*, *TSP (Traveler Salesman Problem)*, método de barrio, metaheurísticos, teoría de grafos, entre otros. Generalmente, los diferentes métodos buscan reducir las distancias, tiempos y costos de las rutas para satisfacer las necesidades de los clientes (Carvalho Oliveira & Matos, 2004).

En la literatura científica, se han realizado aplicaciones del *VRP* y *TSP* para establecer rutas de transporte de mínimo tiempo o distancia, con el fin de atender los requerimientos del cliente o desarrollar cadenas de suministro eficiente (Carvalho Oliveira & Matos, 2004, pp. 280-291). Implementaron un *VRP*, que permitió el diseño de rutas eficientes para recoger la basura de 202 localidades en Viseu, Portugal, empleando modelamiento de redes con colonias de hormigas.

Por su parte, Rodríguez & Ruiz (2012) resuelven un problema de ruteo *TSP* que permite obtener rutas de distancia mínima aplicado a casos de estudio de redes de transporte de mínimo 50 nodos, mostrando el aumento en la eficiencia, ya que obtuvieron mejoras en la eficiencia respecto a la reducción de

distancia en los recorridos (pp. 1570-1574). El artículo resalta la importancia del *TSP* en la planeación del transporte y el impacto en las redes logísticas.

Por su parte, Rizzoli, Montemanni, Lucibello & Gambardella (2007) desarrollaron casos de aplicación de *VRP* con *TSP* para el transporte y la distribución en una empresa de distribución en la ciudad italiana de Padua, en una cadena de supermercados y en una compañía de distribución en Lugano, Suiza (pp. 136-148). Con los modelos implementados, los autores muestran mejoras en la eficiencia en el sistema logístico del 7% respecto a métodos de planeación manual.

Finalmente, Gómez Montoya, Zuluaga Mazo & Vélez Uribe (2012) implementaron un modelo *VRP* con teoría de grafos que resuelve el problema *TSP* de ruteo en la preparación de pedidos aplicado en una empresa de colchones (p. 57-59). Tal modelo permitió mejorar la eficiencia y reducir los tiempos en un 12,5%, lo cual acusó un impacto en los costos y el servicio al cliente de la empresa, y evidenció el aporte empresarial de este tipo de modelos a la cadena de suministro.

A partir de la revisión de artículos científicos con aplicaciones de modelos *VRP* con *TSP* al ruteo en el transporte, se identificó el aporte a la eficiencia que estos pueden generar a las empresas en la cadena de suministro apoyado en el uso de modelos cuantitativos. Debe resaltarse que en la literatura no se identificaron artículos que utilizaran la teoría de grafos para modelar el *VRP* con *TSP* aplicado en la gestión del transporte y la distribución. Más bien se hallaron desarrollos con respecto al ruteo de la operación de preparación de pedidos en la gestión de almacenes, que son problemas similares. La diferencia estriba en que el primero tiene mayor complejidad debido a sus restricciones de vías, tiempos de recorridos y otras variables que justifican la importancia del presente artículo.

### ***TSP* para modelar la estrategia de ruteo en la distribución**

El problema del vendedor viajero (*TSP*) consiste en que dadas  $n$  ciudades un vendedor debe recorrer la ruta con menor distancia pasando por todas las

ciudades, partiendo y terminando en una misma ciudad. Hay que tener presente que entre cada par de ciudades, es decir una ciudad  $i$  y una ciudad  $j$ , hay una distancia  $d_{ij}$ . Por otra parte, debe indicarse que con este método se busca encontrar la ruta con la distancia mínima que permita atender las necesidades de los clientes.

De una revisión exploratoria del estado del arte en la literatura científica, considerando bases de datos como *Science Direct*, *Taylor and Francis*, *Emerald*, y *Google Scholar* se identificaron los siguientes enfoques del *TSP* como estrategia de ruteo en la red de distribución:

- a) Bożejko & Wodecki (2009), utilizan el método *TSP* con metaheurísticos como estrategia de ruteo buscando minimizar la tardanza total asociada garantizando la obtención de solución pseudo-óptima (pp. 273-275);
- b) Kallehauge (2008) realiza una revisión y aplicación del problema de ruteo de vehículos en las redes utilizando métodos exactos, conservando algunos principios del *TSP* (pp. 2320-2325);
- c) Armon, Avidor & Oded (2010) desarrollan un modelo de distribución basado en la cooperación en el *TSP*, lo cual permite que el comprador participe en el ruteo y las operaciones comerciales (p. 2848);
- d) Albiach, Sanchis & Soler (2008) utilizan el *TSP* como estrategia de ruteo considerando costos y tiempos, buscando satisfacer las necesidades de distribución de los clientes (p. 800); y
- e) Bin, Zhong-Zhen & Baozhen (2009), para realizar el ruteo de vehículos utilizan un algoritmo evolutivo de optimización basado en colonias de hormigas buscando reducir tiempos de procesos (pp. 173-174).

De la información revisada de los últimos avances, se identifica que el método *TSP* suele ser utilizado en el ruteo de vehículos en la red de distribución, buscando reducir los recorridos, agilizar las entregas a los clientes y realizar un adecuado uso de los recursos. Otro aspecto que se infiere es que el método *TSP* suele utilizarse conjuntamente con algoritmos exactos de Investigación de Operaciones y metaheurísticos, que permiten encontrar secuencias

de visitas de los nodos de los clientes en la red de distribución. Se puede estimar de igual manera con el método *TSP* distancias de recorrido variables, usando heurísticos para resolver problemas en la localización y el enrutamiento (Bahar Çavdar, 2014).

En la literatura académica y científica se ha identificado la utilización de la estrategia de modelamiento computacional denominada teoría de grafos, que permite desarrollar estrategias de ruteo en la red de distribución junto al *TSP*, a través de la representación de nodos, arcos e implementación de algoritmos como el algoritmo de Floyd-Warshall (todos los caminos mínimos), el algoritmo de Kruskal (árbol de coste total mínimo), el algoritmo de Prim (árbol de coste total mínimo), el algoritmo de Ford-Fulkerson (flujo máximo), el problema de transbordo/transporte buscando reducir el tiempo, los costos y los recorridos para atender las demandas en los productos de los clientes (Tutte, 2001) y (Rodríguez Villalobos, 2013).

Adicionalmente se ha encontrado literatura relacionada con el (*mTSP*) (*Multiple traveler salesman problem*) donde se permiten múltiples vendedores para múltiples destinos. Esta herramienta permite más aplicaciones y soportes para problemas reales articulando problemas de enrutamiento de vehículos (*VRP*) mediante la incorporación de restricciones laterales adicionales (Bektas, 2006).

Es de anotar que en la exploración del estado del arte descrita con anterioridad, no se identifican propuestas científicas que utilicen conjuntamente *TSP* con la teoría de grafos como estrategia para el transporte y distribución, con el fin aumentar la eficiencia de estos procesos en la cadena de suministro. Por tal motivo, el presente trabajo de investigación se concentra en el desarrollo de modelos *VRP* con *TSP* aplicados en la gestión del transporte y la distribución, y que se resuelvan con teoría de grafos, con el fin de obtener distancias mínimas en los procesos.

## Metodología

A continuación se presentan las etapas de la metodología utilizada para desarrollar una estrategia de ruteo en la red de distribución utilizando el método *TSP* con la teoría de grafos tomando como caso de

estudio una empresa que fabrica y comercializa cárnicos.

La metodología cubre desde la descripción de la empresa y la problemática de la red de distribución a estudiar, pasando por la formulación del método *TSP* hasta el modelamiento del grafo de ruteo utilizando el software grafos<sup>®</sup> que permita encontrar la ruta con menor recorrido para atender los pedidos de los clientes (Rodríguez Villalobos, 2013).

Descripción de la empresa y problemática en la red de distribución: Se seleccionó una empresa mediana ubicada en la ciudad de Medellín, que fabrica y comercializa aproximadamente 3000 productos cárnicos por mes.

La compañía desarrollaba diferentes procesos logísticos como compras, producción, almacenamiento de materias primas y productos terminados, transporte, distribución y logística inversa, los cuales permitían atender las necesidades de los clientes en condiciones de calidad, cantidad, lugar y tiempo. Adicionalmente, estos procesos buscaban utilizar adecuadamente los recursos de la empresa buscando garantizar la sostenibilidad y crecimiento organizacional.

La empresa tenía dos tipos de clientes. El primero son consumidores que adquieren los productos en alguno de los 4 puntos de venta propios ubicados en la ciudad de Medellín, Antioquia; el segundo, son clientes distribuidores que comercializan los cárnicos.

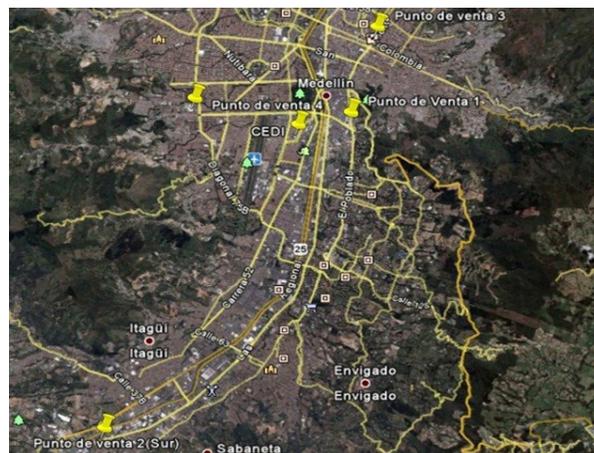
La red de distribución de la empresa presenta las siguientes características:

- Un centro de distribución (CEDI) asociado a la empresa y 4 puntos de venta, cuatro ubicados en la ciudad de Medellín y uno en el municipio de Itagüí. Por medio de la utilización de la herramienta informática Google Earth<sup>®</sup>, se representa geográficamente la ubicación de los nodos asociados a la red de distribución (Figura 1).
- Un vehículo (camión) de 5 toneladas, que requiere además de un conductor, un auxiliar de transporte encargado del cargue y descargue de la mercancía.

- Los pedidos que se distribuyen se solicitan a los puntos de venta un día antes de lo que se hace a la central de pedidos.
- La estrategia de ruteo actual se basa en la experiencia del coordinador de transporte y distribución.

Figura 1.

### Ubicación de nodo CEDI y puntos de venta de la empresa de cárnicos



Fuente: (Google Inc., s.f.)

En nuestro estudio se desarrolló una estrategia que permitió encontrar una ruta en la red de distribución de la empresa que reduzca el recorrido en km., lo cual tiene un impacto en la utilización de los medios de transporte y agiliza la entrega de los productos en los puntos de venta. Este planteamiento se realiza debido a que en la actualidad la empresa tiene asignado un solo vehículo de 5 toneladas para realizar la distribución en la red, y se estaban presentando retrasos en las entregas afectando los costos y la atención de los clientes.

Es importante anotar que para la aplicación de esta metodología, se debe partir de una visualización muy clara de la cadena de abastecimiento de la empresa, la ubicación de cada cliente y canal, así como las restricciones del entorno: horarios amarillos, restricciones de movilidad, fluctuaciones de

los precios de los combustibles, acciones de gremios transportadores, etc.

### Formulación del método TSP ruteo en la red de distribución empresa de cárnicos

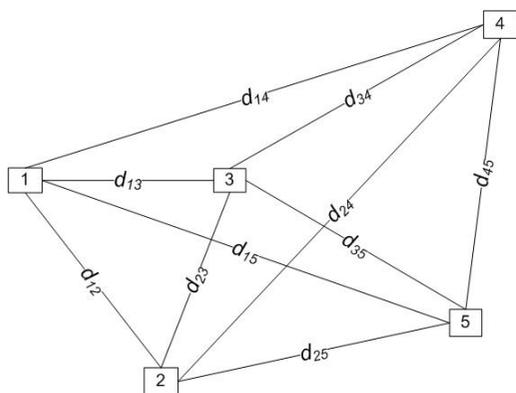
A continuación se presentan la función objetivo y las restricciones de la red de distribución de las empresas de cárnicos. Para el planteamiento que se presenta se toman como referencia autores como (Albiach, Sanchis, & Soler, 2008, p. 800) y (Armon, Avidor, & Oded, 2010, pp. 2851-2853).

El problema del vendedor viajero (TSP) para el ruteo en la red distribución consiste de cinco nodos ( $n=5$ ). El nodo inicial u origen corresponde al Centro de Distribución (CEDI), los cuatro nodos restantes son los puntos de venta.

En el modelo, el camión asignado debe visitar los diferentes puntos de venta, e iniciar y terminar el recorrido en el CEDI. Hay que tener presente que entre cada par de nodos  $i$  y  $j$ , existente una distancia  $d_{ij}$ . A continuación, en la Figura 2, se esquematiza el TSP para el ruteo.

Figura 2.

#### Esquema de la red de distribución TSP



Fuente: elaboración propia

La función objetivo que se plantea, permite medir el recorrido de la ruta en kilómetros de la red de distribución de cárnicos en estudio para atender

las demandas de los diferentes puntos de venta. La ecuación (1), muestra la función objetivo general.

$$\text{Min } \sum_i \sum_j d_{ij} X_{ij} \quad (1)$$

El modelo se encuentra sujeto a que en cada ruta se debe visitar un nodo (CEDI o punto de venta) una sola vez. Estas restricciones se representan matemáticamente a través de las ecuaciones (2), (3) y (4).

$$\sum_j X_{ij} = 1 \text{ Para cada } i. \quad (2)$$

$$\sum_i X_{ij} = 1 \text{ Para cada } j. \quad (3)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \notin S} X_{ij} \leq |S| - 1 \text{ Para } S \subset N. \quad (4)$$

$$j, i = 1, 2, \dots, n.$$

Por su parte, las ecuaciones (2) y (3) garantizan que los puntos de venta  $i$  y  $j$ , se visitan una sola vez en cada ruta de distribución para entregar los productos que permitan atender la demanda en la cadena de suministro. Por su parte, la ecuación (4) evita que se creen sub-tures en el conjunto de original de  $N$  nodos o puntos de ventas a distribuir los productos cárnicos.

A continuación, en la Figura 3 se presentan las variables asociadas al modelo de distribución que se modela como un problema TSP que se resuelve con teoría de grafos.

$d_{ij}$  = la distancia entre el nodo  $i$  y  $j$  en la red de distribución.

$S$  = Subviajes de distribución de cárnicos.

Figura 3.

#### Posibles valores de los nodos

$$X_{ij} = \left\{ \begin{array}{l} 1, \text{ Si la distancia entre los nodos } ij \text{ pertenecen a la ruta en la red de distribución.} \\ 0, \text{ si la distancia } ij \text{ no pertenece a la ruta de la red de distribución.} \end{array} \right\}$$

Fuente: elaboración propia

Modelamiento de distribución de productos cárnicos como un **TSP (Traveling Salesman Problem)** con teoría de grafos

**Implementación de modelo computacional TSP con teoría de grafos**

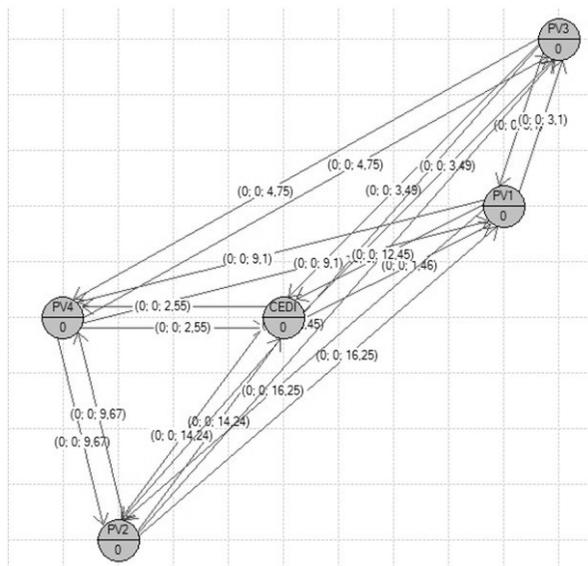
La implementación teoría de grafos para modelar la distribución de cárnicos como un problema TSP se realizó en el software GRAFOS® que fue desarrollado en la Universidad Politécnica de Valencia. Por los motivos descritos con anterioridad, se selecciona el TSP como estrategia para modelar el ruteo de la empresa de cárnicos.

El modelamiento del grafo, incluye actividades como: representación de los arcos y nodos de origen (CEDI) y puntos de venta de cárnicos, parametrización de restricciones, distancias entre los nodos, y ejecución TSP para encontrar la ruta de menor distancia en la red de distribución.

La representación de los nodos y arcos relacionados con el nodo CEDI y los 4 puntos de venta de la red de distribución de la empresa de cárnicos utilizando el software GRAFOS®, se presenta en la Figura 4.

Figura 4.

**Representación nodos y arcos red de distribución**



Fuente: elaboración propia, Grafos®

Las distancias en Km. entre el CEDI y los cuatro puntos de venta son calculados a través de la herramienta regla y ruta de Google Earth®, y verificado con información histórica de la empresa de cárnicos, presenta en la Tabla 1.

Tabla 1.

**Distancia entre CEDI y puntos de venta**

Origen \ Destino	CEDI	PV1	PV2	PV3	PV4
CEDI		1,46	14,24	3,49	2,55
PV1	1,46		16,25	3,1	9,1
PV2	14,24	16,25		12,45	9,67
PV3	3,49	3,1	12,45		4,75
PV4	2,55	9,1	9,67	4,75	

Fuente: elaboración propia

Para la ejecución del TSP con GRAFOS®, se utiliza el comando de la barra de herramientas Análisis de herramientas\_Viajante del comercio (TSP) al costo mínimo. Una vez realizada esta actividad, se generan los resultados de la ruta en la red de distribución de la empresa bajo el criterio de obtener la menor distancia posible de recorrido en Km.

**Resultados y Discusión**

La ejecución del grafo del ruteo en la red de distribución de la empresa de cárnicos, se realizó en un computador con un procesador Pentium Dual Core y 2 gigas de RAM. Una vez se corrió el modelo con el algoritmo TSP incluido en el Software GRAFOS®, se obtuvieron los resultados mostrados en la Figura 5.

Figura 5.

Resultados de TSP con software GRAFOS®

```

PROBLEMA DEL VIAJANTE DE COMERCIO
-----

Tiempo de modelado = 0 segundos
Tiempo de proceso = 0 segundos

SOLUCION OPTIMA ENCONTRADA
lp_solve -> 0

Valor de la función objetivo = 29.23000000

Valor actual de las variables:

x_1_0:: PV1 --> CEDI =      1
x_2_0:: PV2 --> CEDI =      0
x_3_0:: PV3 --> CEDI =      0
x_4_0:: PV4 --> CEDI =      0
x_0_1:: CEDI --> PV1 =      0
x_2_1:: PV2 --> PV1 =      0
x_3_1:: PV3 --> PV1 =      1
x_4_1:: PV4 --> PV1 =      0
x_0_2:: CEDI --> PV2 =      0
x_1_2:: PV1 --> PV2 =      0
x_3_2:: PV3 --> PV2 =      0
x_4_2:: PV4 --> PV2 =      1
x_0_3:: CEDI --> PV3 =      0
x_1_3:: PV1 --> PV3 =      0
x_2_3:: PV2 --> PV3 =      1
x_4_3:: PV4 --> PV3 =      0
x_0_4:: CEDI --> PV4 =      1
x_1_4:: PV1 --> PV4 =      0
x_2_4:: PV2 --> PV4 =      0
x_3_4:: PV3 --> PV4 =      0
    
```

Fuente: elaboración propia

De los resultados obtenidos en la figura 5, se puede concluir que la ruta para entregar los cárnicos solicitados en los puntos de venta en la red de distribución de la empresa de cárnicos utilizando el método TSP tiene un recorrido de 29 km. en un tiempo de 382 minutos aproximadamente, que puede considerarse como el camino más corto posible obtenido con el grafo.

La secuencia de la ruta sugerida por el TSP consiste en realizar el despacho del CEDI en la empresa de cárnicos, y visitar primero el punto de venta 4, la segunda visita se realiza en el punto de venta 2, después se atiende el punto de venta 3, finalmente

se visita el punto de venta 1 y el camión regresa al CEDI en espera de nuevos requerimientos de transporte.

La validación de los resultados obtenidos del TSP desarrollado por el software GRAFOS® en la ruta de la empresa de cárnicos, se realizó a través de la presentación de los resultados al coordinador de distribución, y una comparación con el recorrido promedio de la ruta actual que se encuentra en 34 Km. y un tiempo 420 minutos, incluyendo tiempo de cargue y descargue de los cárnicos en el CEDI.

Con los resultados obtenidos, se identifica que la utilización del VRP de la red de distribución para la empresa de cárnicos permitió reducir la distancia recorrida en aproximadamente 5 Km. y reducir un tiempo de 38 minutos por ruta, que en términos de eficiencia, permiten la disminución aproximada de un 14% de la distancia y 9% en el tiempo de cada ruta en la distribución de la empresa. Teniendo en cuenta que la empresa realiza aproximadamente unos 50 viajes por mes en la ruta en estudio con la implementación del VRP con grafos se alcanzó un ahorro de COP \$1'200.000/viaje (USD 600 aproximadamente). Esto contribuye a la eficiencia operacional y económica de la empresa, y se evidencia el beneficio de utilizar técnicas de modelamiento que apoye las decisiones logísticas de ruteo de distribución en empresas de cárnicos.

Conclusión

El análisis de los resultados no lleva a concluir que para apoyar las decisiones de ruteo en las redes de distribución pueden utilizarse diferentes métodos como el VRP (Vehicle Routing Problem), el TSP (Traveling Salesman Problem), el método de barrido, metaheurísticos, y la teoría de grafos entre otros. Se puede concluir que el enfoque TSP con grafos permite encontrar el recorrido de la ruta con menor distancia, impactando en la eficiencia y agilidad de la distribución. La aplicación de este enfoque en una empresa de cárnicos rindió beneficios importantes en términos de la reducción de la distancia y tiempo de recorrido.

Como trabajo futuro se plantea aumentar el alcance de la metodología desarrollada con TSP y grafos con

el uso coordinado de otras herramientas como *TMS (Transportation Management System)*, que permitan una gestión de la red de distribución en tiempo real buscando facilitar la planificación y control de los recursos logísticos que tiene asociados. Este enfoque, unido a ciertas aplicaciones como WAZE®, podrían permitir el diagnóstico del estado del tráfico en tiempo real y facilitar así la implementación de heurísticas adicionales para optimizar los tiempos de distribución.

El uso de este tipo de herramientas cuantitativas podrá ser utilizado por todo tipo de empresas dedicadas a la distribución de productos, especialmente para comercialización de productos de consumo, debido a su volumen y rotación.

El costo y la rentabilidad asociados a la implementación de este tipo de herramientas deberán contemplarse desde un enfoque financiero en su relación costo-beneficio, de manera que se puedan cuantificar con detalle los beneficios económicos y de reducción de costo logísticos para la empresa.

## Referencias Bibliográficas

- Albiach, J., Sanchis, J., & Soler, D. (2008). An asymmetric TSP with time windows and with time-dependent travel times and costs: An exact solution through a graph transformation. *European Journal of Operational Research*, 189(3), 789-802.
- Anaya Tejero, J. J. (2007). *Logística integral: la gestión operativa de la empresa*. Madrid: ESIC Editorial.
- Armon, A., Avidor, A., & Oded, S. (2010). Cooperative TSP. *Theoretical Computer Science*, 411(31 - 33), 2847-2863.
- Bahar Çavdar, J. S. (2014). A distribution-free TSP tour length estimation model for random graphs. *European Journal of Operational Research*, 588-598.
- Ballou, R. H. (2004). *Business Logistics management*. The United States: Prentice Hall.
- Bektas, T. (2006). The multiple traveling salesman problem: an overview of formulations and solution procedures. *Omega*, 209-219.
- Bin, Y., Zhong - Zhen, Y., & Baozhen, Y. (2009). An improved ant colony optimization for vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, 196(1), 171-176.
- Božejko, W., & Wodecki, M. (2009). Solving permutational routing problems by population-based metaheurísticos. *Computers & Industrial Engineering*, 57(1), 269-276.
- Carvalho Oliveira, R., & Matos, A. C. (2004). An Experimental Study of the Ant Colony System for the period Vehicle Routing Problem. *Lecture Notes in Computer Science*, 3172, 286-293.
- Chopra, S. (2001). *Designing the distribution network in supply chain*. The United States: Kellogg School of Management.
- Ducrocq, C. (1991). *Concurrence et stratégies dans la distribution*. París: Ed. Vuibert Entreprise.
- Gómez Montoya, R. A., Zuluaga Mazo, A., & Vélez Uribe, L. D. (2012). Preparación de pedidos eficiente en el Centro de Distribución utilizando VRP. *Revista Escuela Colombiana de Ingeniería*(88), 55-64.
- Google Inc. (s.f.). *Google Earth*. Recuperado el 12 de 10 de 2013, de <http://www.google.com/intl/es/earth/index.html>
- Kallehauge, B. (2008). Formulations and exact algorithms for the vehicle routing problem with time windows. *Computers & Operations Research*, 35(7), 2307-2330.
- Miquel Peris, S., Parra Guerrero, F., Lhermie, C., & Miquel Romero, M. J. (2006). *Distribución comercial* (Vol. 23). Madrid: ESIC Editorial.
- Navascués, R. d., & Pau Cos, J. (2000). *Manual de logística integral*. España: Ediciones Díaz de Santos.
- Rizzoli, A., Montemanni, R., Lucibello, E., & Gambardella, L. (2007). Ant colony optimization for real-world vehicle routing problems from theory to applications. *Swarm Intell*, 1, 135-151.
- Rodríguez Villalobos, A. (10 de Junio de 2013). *Grafos*. Obtenido de <http://personales.upv.es/arodrigu/grafos>
- Rodríguez, A., & Ruiz, R. (2012). The effect of the asymmetry of road transportation networks on the traveling salesman problem. *Computers & Operations Research*, 39, 1566-1576.
- Tutte, W. T. (2001). *Graph Theory*. Cambridge: Cambridge University Press.