

# Localización de bodegas y asignación de clientes en supermercados de Barranquilla

DIEGO FERNANDO SUERO PÉREZ<sup>1</sup>

HUGO MERCADO CERVERA<sup>2</sup>

HELMAN HERNÁNDEZ RIAÑO<sup>3</sup>

## RESUMEN

Los sistemas de distribución, localización y ruteo tienen importantes impactos en la competitividad de una compañía, especialmente en lo relacionado con costos de transporte y niveles de servicio. Por ello, el diseño de estrategias para minimizar costos es una alternativa recomendada para las organizaciones. En este artículo se presenta un esquema sugerido de ruteo y ubicación de centros de distribución, para lo cual se usan algoritmos de programación lineal y la heurística de Gillet y Miller para una empresa que fabrica aceite de oliva y lo comercializa en cadenas de supermercados de Barranquilla, Colombia. Las técnicas implementadas revelan como resultado la ubicación y el dimensionamiento de un solo centro de distribución en la zona centro, y no varios, como se esperaba. También se propone un enrutamiento recomendable para cada cliente.

**Palabras clave:** ruteo, centros de distribución, problemas de ruteo de vehículos (VRP), problema de enrutamiento de vehículos con capacidad (CVRP), problema de distribución en planta con restricción de capacidad (CFLP).

<sup>1</sup> Doctorante en Ingeniería Industrial por la Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia. Magíster en Ingeniería Industrial por la Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Ingeniero Mecánico por la Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia. Actualmente se desempeña como docente investigador en la Universidad Libre, seccional Barranquilla, Colombia. Correo electrónico: dsuero@unilibrebaq.edu.co

<sup>2</sup> Doctorante en Ingeniería Industrial por la Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia. Magíster en Ingeniería Industrial por la Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia. Actualmente se desempeña como docente de la Universidad de Magdalena, Santa Marta, Colombia. Correo electrónico: hmercado@unimagdalena.edu.co

<sup>3</sup> Doctorante en Ingeniería Industrial por la Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia. Magíster en Gestión de Organizaciones por la Universidad EAN, Bogotá, Colombia. Ingeniero industrial por la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Actualmente se desempeña como docente de la Universidad de Córdoba, Montería, Colombia. Correo electrónico: hhernandez@correo.unicordoba.edu.co

FECHA DE RECEPCIÓN: 11 DE FEBRERO DEL 2014 • FECHA DE APROBACIÓN: 3 DE NOVIEMBRE DEL 2014

Cómo citar este artículo: Suero Pérez, D. F., Mercado Cervera, H. y Hernández Riaño, H. (2015). Localización de bodegas y asignación de clientes en supermercados de Barranquilla. *Épsilon*, 24, 71-87.

## *Location of Warehouses and Customer Allocation in Supermarkets in Barranquilla, Colombia*

### ABSTRACT

Distribution, location and routing systems have significant impacts on a company's competitiveness, particularly with regard to transportation and service costs. Therefore, designing strategies to minimize costs is a recommended alternative for organizations. This paper presents a suggested routing and location scheme for distribution centers based on the use of linear programming algorithms and Gillet and Miller's heuristics for a company that produces olive oil and sells it in supermarket chains in Barranquilla, Colombia. The implemented techniques reveal, as a result, the location and dimensioning of a single distribution center in the downtown area and not several, as expected. A recommendable routing for each client is also proposed.

**Keywords:** routing, distribution centers, vehicle routing problems (VRP), capacitated vehicle routing problem (CVRP), Capacitated Facility Location Problem (CFLP).

---

### *Localização de armazéns e designação de clientes em supermercados de Barranquilla, Colômbia*

### RESUMO

Os sistemas de distribuição, localização e roteamento têm importantes impactos na competitividade de uma companhia, especialmente no que se refere aos custos de transporte e serviço. Por isso, o desenho de estratégias para minimizar custos é uma alternativa recomendada para as organizações. No artigo se apresenta um esquema sugerido de roteamento e a localização de centros de distribuição, a partir do uso de algoritmos de programação lineal e a heurística de Gillet e Miller para uma empresa que fabrica azeite de oliva e o comercializa em cadeias de supermercados de Barranquilla, Colômbia. As técnicas implementadas revelam como resultado a localização e o dimensionamento de um só centro de distribuição na zona centro, e não vários, como se esperava. Também se propõe um roteamento recomendável para cada cliente.

**Palavras chave:** roteamento, centros de distribuição, problemas de roteamento de veículos (VRP), problema de roteamento de veículos com capacidade (CVRP), problema de distribuição em planta com restrição de capacidade (CFLP).

## Introducción

Para configurar una red logística o cadena de suministro pueden involucrarse decisiones estratégicas que permitan determinar, por ejemplo, la cantidad de puntos de ventas y centros de distribución o de empresas, la localización o ubicación de estas, el tamaño adecuado, los modos de transporte y la asignación de vehículos. En una red logística constituida por plantas de manufactura, centros de distribución y puntos de venta, cada uno de los eslabones deberían desempeñar su rol de manera efectiva, para así garantizar la satisfacción del cliente; sin embargo, cuando un eslabón falla, toda la cadena también lo hace. Así, por ejemplo, las plantas manufactureras son responsables de producir los bienes para su distribución y venta, en tanto los centros de distribución se encargan de enviar la mercancía a puntos de venta para incrementar la disponibilidad de los productos, alcanzar economías de escala, respaldar medidas de emergencia y poder consolidar productos; por su parte, los puntos de venta deberían ser el acceso primario para los consumidores finales, pero en todo el proceso es improbable que hubiesen retrasos, faltantes, sobrecostos u otra serie de inconvenientes que pongan en riesgo la operación logística. Las medidas en pro de disminuir problemas en la cadena de suministro por medio de herramientas de modelación cada día tienen mayor importancia dentro de las organizaciones, debido a sus impactos positivos en los alcances propuestos.

El problema abordado es de localización y ruteo de vehículos. Se establecerá un número determinado de centros de distribución que atiendan una demanda determinística de puntos de ventas localizados, con una flota de camiones de capacidad conocida al mínimo costo. Para la solución se usó un modelo de localización de bodegas o centros de distribución de un grupo que se encuentran disponibles para alquilar en Barranquilla, con el objetivo de minimizar los costos de transporte y de envío de un producto específico. Asimismo, se utilizará el método de ruteo de vehículos de Gillet y Miller para dar cumplimiento a la demanda diaria de cada uno de los puntos de venta al menor costo posible, desde cada centro de distribución.

### El problema de localización de instalaciones con capacidad determinada

Es conocido en inglés como *capacitated facility location problem* (CFLP). Dado un conjunto de clientes y un conjunto de instalaciones potenciales, el problema

consiste en decidir qué plantas o instalaciones se utilizan y cómo son atendidos los clientes desde esas instalaciones. El objetivo es minimizar los costos fijos derivados de la utilización de una planta y los costos operativos (típicamente costos variables de producción y costos de transporte entre las plantas abiertas y los clientes) (Ortega, 2008).

Una de las principales formas de abordar los problemas de localización de bodegas es utilizando varias aproximaciones, incluyendo ramificaciones o relaciones con la programación lineal, la búsqueda tabú, la simulación y los algoritmos genéticos (Cura, 2010). Dentro de los algoritmos se encuentran los de base dual y primal-dual; sin embargo, la experiencia que se ha tenido en la modelación de eventos reales exhibe un gran número de soluciones no óptimas, por cuanto se presenta una gran relación entre el transporte y los costos fijos, lo cual dificulta la eliminación temprana de algunas bodegas (Michael y Van Hentenryck, 2003).

Por otra parte, algunos autores consideran que los problemas de localización de bodegas están altamente influenciados por factores cuantitativos, pero también cualitativos. Se incluyen criterios como tasa de incentivo, tasa estructural, habilidad de la fuerza laboral, calidad y confiabilidad de los modos de transporte, proximidad al consumidor final, entre otros (Demirel, Cetin y Kahraman, 2010). A la hora de cuantificar los valores de los criterios, priman las decisiones del mercado o la experiencia de los actores ante unas aproximaciones cercanas a la realidad.

Lo cierto es que existen muchos estudios sobre solución de problemas de localización de bodegas. Uno de estos es el desarrollo de un sistema de soporte de decisión geográfico: se selecciona el sitio de ubicación de bodegas, tras lo cual se manejan los criterios cuantitativos y cualitativos en función de visualizar la mejor ubicación (Vlachopoulou, Silleos y Manthou, 2001). Otro método redujo el problema a la escogencia de aquellos puntos, donde se minimice la suma de los costos de utilización de la bodega y los de transporte de los materiales (Sharma y Berry, 2007).

Actualmente, los avances para resolver este tipo de análisis han crecido significativamente. El *software* de sistemas de información de ubicación de bodegas se han desarrollado para que los industriales exploten la base de datos y escojan la ubicación de sus bodegas de acuerdo con sus criterios de selección (Colson y Dorigo, 2004).

De manera global, el principal objetivo en este tipo de problemas es minimizar la distancia máxima desde la instalación de los centros de distribución hasta los puntos de venta; sin embargo, la solución es de tipo *NP-hard*, lo cual implica mayor dificultad a la hora de encontrar una solución óptima. Por tal razón, se optó por elegir métodos heurísticos para plantear una solución razonable (Amiri-Arefa y Baboli, 2013). En general, las aplicaciones potenciales de este problema son para centros de servicio, centros de emergencia, policía, bomberos, centro de almacenes y, en nuestro caso, una empresa de alimentos cuyo producto principal es el aceite de oliva para uso doméstico.

El reto abordado surge de la necesidad de transportar los insumos requeridos desde las bodegas hasta cada uno de los puntos de los supermercados, dinámica en la que se genera un problema de enrutamiento de vehículos que implica asignar rutas e itinerarios a una flota de camiones. Se pueden dar dos tipos de problema de enrutamiento: en arcos y en nodos. En nuestra situación en particular, los vehículos no deben seguir un arco o cumplir con un recorrido, pero sí deben visitar cada uno de los nodos o puntos de venta, y de este modo se configura un problema de ruteo en nodos.

Existen varias técnicas de solución para problemas de enrutamiento en nodos; por ejemplo, la del árbol mínimo de envergadura máxima (AMEM), donde en una red dirigida, cada arco tiene un costo asociado y se recorren todos los nodos de la red de manera tal que se minimice la sumatoria de sus costos. El problema del agente viajero (PAV), desde el origen, consiste en que un agente vendedor debe visitar un conjunto de clientes exactamente una vez y regresar a su punto de partida. Allí, el costo mínimo constituye problemas básicos asociados usualmente al diseño de rutas de recolección (Salazar y Ruiz, 2009).

La heurística de Clarke y Wright para problemas de ruteo de vehículos (VRP) es un ejemplo de un método constructivo. Allí, inicialmente cada cliente es visitado por un vehículo; por tanto, existirán tantos vehículos como clientes. Luego, de acuerdo con la capacidad del vehículo, se determina si este puede visitar un segundo nodo cercano al primero; si esto es posible, entonces se constituye un ahorro de un viaje. Se continúa realizando el análisis hasta que la capacidad del vehículo esté copada y la totalidad de los arcos estén cubiertos.

Se han desarrollado diversas formas para abordar la solución del ruteo de vehículos con capacidad (CVRP), como son algunos algoritmos genéticos híbridos (Wang y Lu, 2009). Otra forma de abordar el problema es incluir dentro del modelo algunas variables como el consumo de combustible (Xiao *et al.*, 2012), o algoritmos constructivos que implementan algoritmos de búsqueda aleatoria con un algoritmo de búsqueda tabú (Augerat *et al.*, 1998).

Dadas las características del problema que enfrentamos, se optó por utilizar una de las técnicas de barrido. En la heurística de barrido geográfico de Gillet y Miller, los clientes son agrupados y se resuelve un PAV (problema del agente viajero) en cada grupo. Si las distancias son razonablemente euclidianas, entonces se obtendrán resultados satisfactorios. Se ubican clientes en un mapa y se realiza un barrido geográfico con una línea recta; se estudia así la factibilidad de incluir el cliente en la ruta, dependiendo de la capacidad del camión y de la disponibilidad de tiempo. El algoritmo finaliza cuando no hay más disponibilidad de vehículos o cuando todos los clientes están cubiertos.

Sin embargo, no es suficiente implementar los métodos de ruteo según la metodología ISM. De hecho, el análisis de los factores relevantes en la eficiencia de distribución de las cadenas de supermercados son estos: las medidas de restricción del tráfico urbano, la estructura de las empresas de logística, el nivel de información y, en menor medida, la infraestructura, el medioambiente, el número de vehículos de propiedad de las empresas de logística, el número de personal que participan en la gestión logística y el tiempo de realización de pedidos de los supermercados (Xu y Qiao, 2010).

## Hipótesis planteadas

- a) La modelación matemática permitirá encontrar la ubicación óptima de centros de distribución para los supermercados y las tiendas Olímpica.
- b) La modelación de la ubicación de varios centros de distribución equidistantes en la ciudad obtendrá costos razonables de operación de la distribución de aceite de oliva en los supermercados.

## Metodología

El proyecto se desarrolla en cuatro fases, como se muestra a continuación.

### *Identificación y búsqueda de bodegas viables*

Se realizó la búsqueda en el periódico local *El Herald* del 4 de abril del 2013, en los clasificados de arriendo de finca raíz, en la página web [www.metrocuadrado.com](http://www.metrocuadrado.com) y en algunas inmobiliarias. A continuación, en la tabla 1 se presentan los resultados de las 15 bodegas consultadas vía telefónica o internet, con sus respectivos datos de costo de arrendamiento, incluidos gastos de administración, dirección, capacidad<sup>4</sup> y posibles ubicaciones para el fin solicitado.

Tabla 1. Resultado de posibles bodegas como centros de distribución

BODEGA	CALLE	CARRERA	PRECIO DIARIO (\$)	CAPACIDAD TON POR M <sup>2</sup>
1	40	50B	83.333	43
2	49	52	200.000	120
3	48	67	300.000	156
4	30	40	433.333	260
5	39	38	333.333	260
6	43	35	173.333	156
7	38	46	200.000	182
8	30	10	666.667	39
9	111	34	560.000	364
10	30	26	309.833	186
11	100	30	192.000	150
12	1	10	456.667	260
13	98	58B	566.667	386
14	51	42	300.000	260
15	109	49D	433.333	260

Fuente: elaboración propia.

4 Consultar especificaciones del factor de escala en la fase 2 de la metodología.

## Determinación de variables de interés y su respectiva cuantificación

### Factor de capacidad en toneladas

Se seleccionó al azar un producto de una empresa real de la ciudad de Barranquilla: el aceite Girasol gourmet de 1000 cm<sup>3</sup> (figura 1), que se empaca en cajas de 12 unidades. Cada caja pesa 11,04 kg, y hay 55 cajas por estiba; por lo tanto, se da la relación 607,2 kg/estiba. Con 8,44 m de fondo, pasillos de 3 m, cuerpos de 2 m y 6 niveles de altura, se pueden almacenar 48 estibas en un área de 13 × 8,44 m (Callejas, 2013) (figuras 2 y 3).



Figura 1. Aceite Girasol gourmet



Figura 2. Bodega de almacenamiento de aceite de Girasol gourmet

Fuente: Callejas (2013).

Por lo tanto, nuestra área base es de 109,72 m<sup>2</sup>, y nuestro peso base es de 29145,6 kg, es decir, 29,14 t (48 estibas × 55 cajas × 11,04 kg). Para realizar la especificación de la capacidad de la bodega en toneladas, se usó el factor de escala, el cual es el cociente entre peso base y área base:

$$\text{factor de escala} = \frac{\text{Peso base}}{\text{Área base}} = \frac{29,14 \text{ t}}{109,72 \text{ m}^2} = 0,26 \text{ t/m}^2 \quad [1]$$

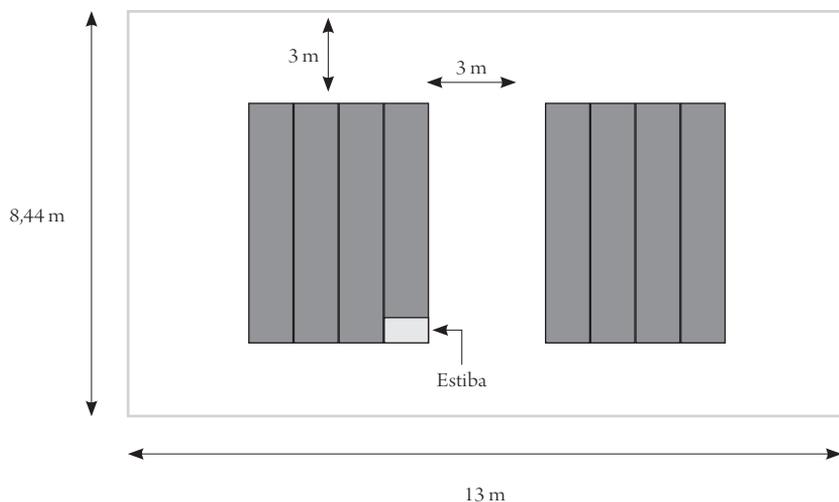


Figura 3. Vista superior de la Bodega base para cálculos con niveles de altura

Fuente: elaboración propia.

### *Supuestos y variables relevantes*

- *Determinación de distancias entre bodegas y clientes:* esta se obtuvo por medio del aplicativo web Google Maps, al digitar la ubicación entre cada bodega y los clientes, además de las distancias entre los clientes.
- *Costos fijos:* el costo por kilómetro recorrido fue de \$6600 (Callejas, 2013).

Los costos de arriendo, vigilancia y administración están incluidos en el precio del canon de arrendamiento.

### *Formulación del modelo matemático*

Para la solución del caso de estudio planteado es necesario resolver dos problemas de optimización combinatoria de manera secuencial:

- Problema de localización de bodegas y asignación de clientes con restricción de capacidad:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij} X_{ij} + \sum_{i=1}^m f_i Y_i \quad [1]$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^m X_{ij} = 1 \forall j \in N \quad [2]$$

$$\sum_{j=1}^n w_j X_{ij} \leq q_i Y_i \forall i \in B \quad [3]$$

$$X_{ij}, Y_i \in \{0,1\} \forall j \in N, \forall i \in B \quad [4]$$

Donde  $N$  son los conjuntos de puntos de venta ( $N = \{1, 2, \dots, n\}$ );  $B$  es el conjunto de sitios posibles para bodegas ( $B = \{1, 2, \dots, m\}$ );  $C_{ij}$  es el costo de transportar  $w_j$  unidades desde la bodega  $i$  hasta el punto de venta  $j$ ;  $w_j$  es la demanda del punto de venta  $j$ ;  $Y_i$  es igual a 1 si se localiza la bodega en el sitio  $i$ , o 0 en otro caso;  $X_{ij}$  es igual a 1 si el cliente  $j$  es servido por la bodega  $i$ , o 0 en otro caso;  $p$  es el número de bodegas;  $f_i$  es el costo fijo de instalar una bodega en el sitio  $i$ , y  $q_i$  es la capacidad de la bodega instalada en el sitio  $i$ .

Esta formulación describe el problema de localizar el número óptimo de bodegas considerando  $m$  posibles sitios. Además, se asignan  $n$  puntos de venta a las bodegas, con lo cual se minimizan la suma del costo total de transporte y el costo total de instalación. Puede indicarse que la ecuación [2] garantiza que cada cliente sea atendido por una sola bodega, en tanto la ecuación [3] establece que la sumatoria de la demanda de todos los clientes asignados a una bodega debe ser inferior a la capacidad de esta.

b) Ruteo de vehículos con restricción de capacidad (CVRP):

$$x_{ij}^k = \begin{cases} 1 & \text{si el camión } k \text{ sirve el arco } (i,j) \\ 0 & \text{si no} \end{cases} \quad \forall (i,j) \in A$$

$$y_{ij}^k = \begin{cases} 1 & \text{si un camión sirve el arco } (i,j) \\ 0 & \text{si no} \end{cases} \quad \forall (i,j) \in A$$

$$\text{Min} \sum_{l \leq k \leq K} \sum_{\forall (i,j) \in A} c_{ij} x_{ij}^k \quad [5]$$

Sujeto a:

$$\sum_{l \leq k \leq K} x_{ij}^k = y_{ij} \quad [6]$$

$$\sum_{l \leq j \leq n} y_{ij} = 1 \forall i \in N - \{1\} \quad [7]$$

$$\sum_{l \leq i \leq n} y_{ij} = 1 \forall j \in N - \{1\} \quad [8]$$

$$\sum_{l \leq j \leq n} y_{ij} = K \quad [9]$$

$$\sum_{l \leq i \leq n} y_{il} = K \quad [10]$$

$$\sum_{2 \leq i \leq n} \sum_{l \leq j \leq n} d_i x_{ij}^k \leq u \forall k = 1, 2, \dots, K \quad [11]$$

$$\sum_{i \in Q} \sum_{j \in Q} y_{ij} \leq |Q| - 1 \forall Q \in \{2, 3, \dots, n\} \quad [12]$$

$$y_{ij} \in \{0, 1\} \forall (i, j) \in A \quad [13]$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\} \forall (i, j) \in A, k = 1, 2, \dots, K \quad [14]$$

La anterior formulación matemática describe el problema de determinar el reparto de mínimo costo al considerar una flota de  $K$  vehículos homogéneos con capacidad finita  $u$ . Se considera un depósito común (nodo 1) y se atienden un conjunto de clientes (nodos  $2, 3, \dots, n$ ) cada uno con demanda  $d_j$ .

La función objetivo plantea la minimización del costo total de transporte, obtenido a partir de las sumatorias del costo de transporte de cada cliente  $c_{ij}$  visitado en la ruta, multiplicado por la variable de decisión  $x_{ij}^k$ .

La ecuación [6] controla que cada cliente sea visitado por un solo camión. La ecuación [7] controla que a todos los clientes llegue solo un camión. La ecuación [8] refiere a que de cada cliente salga el camión que llegó. Estas últimas restricciones

buscan mantener un equilibrio en el flujo. Por su parte, las ecuaciones [9] y [10] buscan garantizar que todos los camiones salgan y regresen al depósito, en tanto la ecuación [11] establece que la cantidad de producto entregado por cada camión  $k$  debe ser menor a su capacidad. Finalmente, la ecuación [12] garantiza que la solución sea un ciclo hamiltoniano (la solución no tiene subciclos), mientras que las ecuaciones [13] y [14] establecen el carácter binario de las variables de decisión.

### *Solución del modelo*

El problema de localización de bodegas y asignación de clientes con restricción de capacidad fue modelado y solucionado mediante el *software* de optimización General Algebraic Modeling System (GAMS), que permite modelar y resolver problemas de optimización lineal, no lineal y enteros mixtos.

Para la solución del problema de ruteo de vehículos con restricción de capacidad se usó la heurística de barrido (*sweep*). Se realizaron dos aplicaciones de la heurística: una iniciando el barrido a las 3:00 y otra a las 6:00; sin embargo, la de mejor resultado fue a las 3:00.

## **Resultados**

### *Identificación y especificación de bodegas candidatas*

La solución óptima obtenida por la solución de este problema en el *software* GAMS es esta:

- *Bodega seleccionada*: todos los  $Y_p$  excepto  $Y_{14p}$  obtuvieron un valor de 0, lo que implica que la seleccionada es la bodega 14, ubicada en la calle 51 con carrera 52.
- *Asignación de clientes*: todos los  $X_{ip}$  excepto los  $X_{14p}$  obtuvieron un valor de 0, lo que significa que todos los clientes son asignados a la bodega 14.
- La suma del costo total de transporte y el costo total de instalación obtenido es \$2.038.260 por día.

## Ruteo desde cada bodega

En la figura 4 se presenta la ruta correspondiente asignada a la demanda diaria. Cada arco dibujado corresponde al retorno del vehículo a la bodega, dependiendo de su capacidad y de la demanda del supermercado.

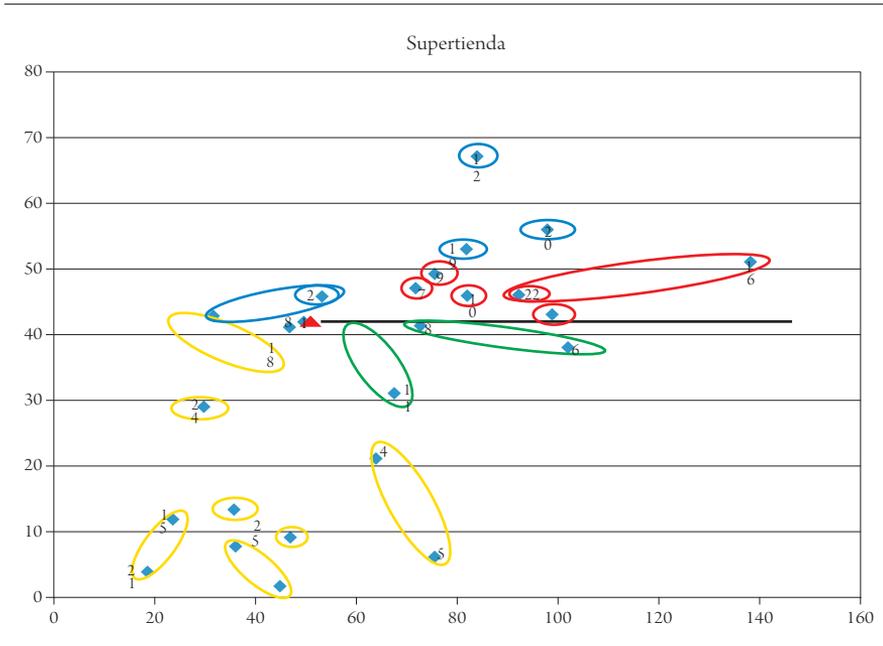


Figura 4. Diagrama de solución de la heurística del barrido

Fuente: elaboración propia.

Una vez aplicada la heurística de barrido, se obtuvieron cuatro rutas que permiten la atención de todos los supermercados incluidos en el presente caso de estudio. Dada la capacidad mínima de los vehículos, para cada ruta asignada tendría que retornarse entre 3 y 7 veces a la bodega (se mencionan las direcciones de cada uno de los supermercados), como se ilustra en la tabla 2.

Tabla 2. Ruteo de vehículos

RUTA			
1	2	3	4
Bodega	Bodega	Bodega	Bodega
Miramar	Buena Vista	Cordialidad	Calle 68
Bodega	Bodega	Bodega	Recreo
Calle 93	Alto Prado	Hipódromo	Bodega
Ciudadela	Bodega	Bodega	Campo Alegre
Bodega	Calle 84	Las Nieves	Bodega
Villa Campestre	Bodega	Carrera 14	
Bodega	Calle 53	Bodega	
Calle 82	Carrera 43	Carrera 8 Las Palmas	
Bodega	Bodega	Ciudadela	
Calle 72	Calle 30 (Centro)	Bodega	
Bodega	Bodega	Cordialidad (Macarena)	
Calle 76		Bodega	
Bodega		Carrera 21	
		Cordialidad Bosque	
		Bodega	

Fuente: elaboración propia.

A continuación, en la figura 4, a manera de ejemplo, se muestra la ruta 1 graficada a través de la aplicación Google Maps.

## Conclusiones

La hipótesis del estudio planteaba que se necesitarían varias bodegas, ubicadas de manera equidistante de los clientes, para obtener una solución razonable; por lo tanto, la hipótesis original no es retenida, sino la hipótesis contraria, donde solo se necesitó una bodega. El costo total de transporte y el costo total de instalación obtenido es \$2.038.260 por día.

Con respecto al ruteo de vehículos, cabe resaltar que la baja capacidad del camión (4,5 t) y el bajo porcentaje diario de productos que deben transportarse

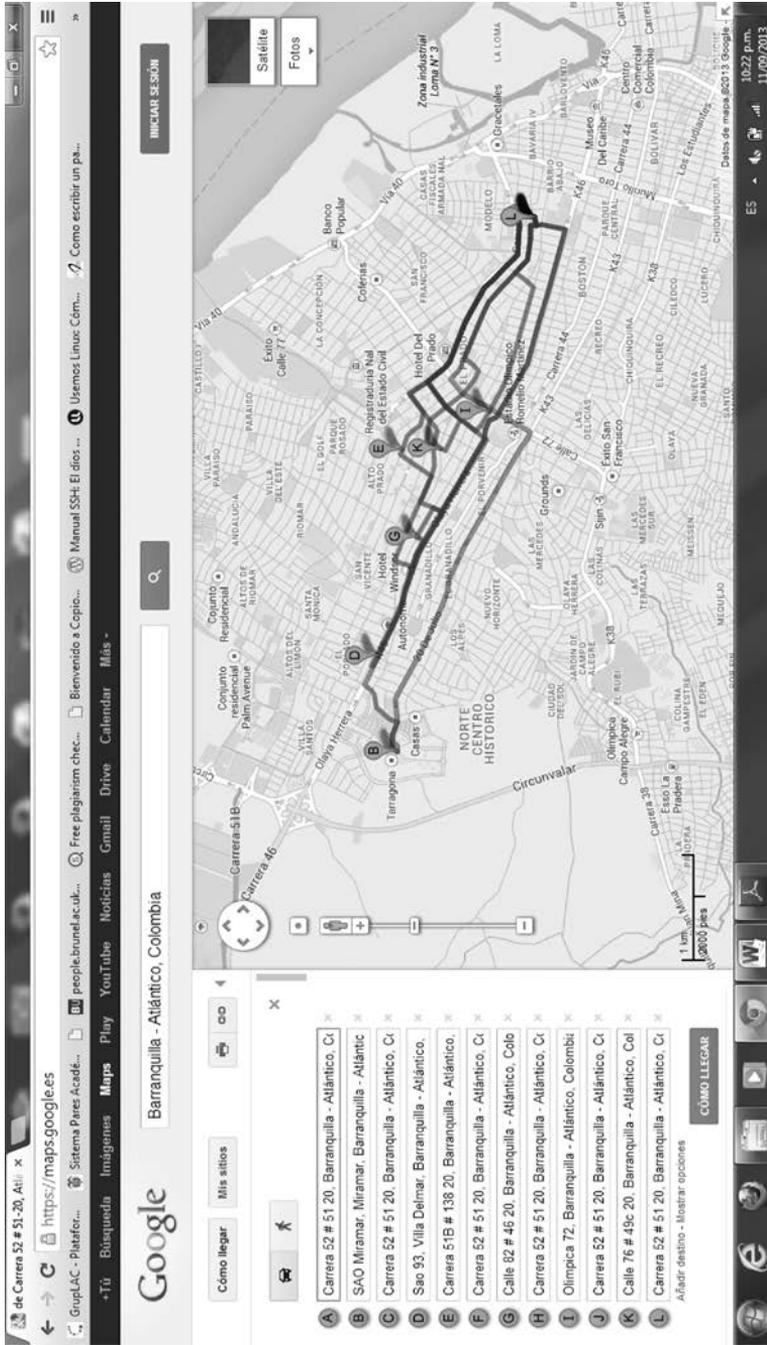


Figura 4. Ruta 1

Fuente: Google Maps.

(4 %) aumentan la distancia de las rutas, lo cual acrecenta el costo de transporte al incrementar innecesariamente el número de veces que el camión debe regresar al depósito. Según lo anterior, es recomendable estudiar el uso de camiones de mayor capacidad, con miras a lograr la disminución de los costos de transporte (sin embargo, esto también depende de las restricciones legales de cada zona).

Un aspecto relevante es que el modelo planteado no penaliza los desperdicios de capacidad de bodega, por lo que, a pesar de que la demanda diaria es de solo 68,33 t/día, la capacidad de la bodega seleccionada es 260 t/día. Una modificación al modelo en este sentido podría mejorar la calidad de las soluciones obtenidas.

Por último, en los modelos seleccionados para la solución del caso planteado no se consideran aspectos como los impactos ambientales, sociales, uso de infraestructura, congestión, etc., lo que limita la aplicabilidad de los resultados. Por ello, es conveniente el uso de modelos de optimización multiobjetivo o multicriterio que permitan encontrar soluciones más robustas a este tipo de problemas logísticos. Esto se convierte en un importante tema de investigación que podría ser desarrollado en futuros trabajos.

## Referencias

- Amiri-Arefa, M. y Baboli, A. (2013). The center location-dependent relocation problem. *Applied soft Computing*, 8(7), 3380-3391.
- Augerat, P., Belenguer, J., Benavent, E., Corberin, A. y Naddef, D. (1998). Separating capacity constraints in the CVRP using tabu search. *European Journal of Operational Research*, 106, 546-557.
- Callejas, A. (2013, 1 de agosto). Entrevista jefe de almacén de Casa Luker.
- Colson, G. y Dorigo, F. (2004). A public warehouses selection support system. *European journal of Operational Research*, 153(2), 332-349.
- Cura, T. (2010). A parallel local search approach to solving the uncapacitated warehouse location problem. *Computers & Industrial Engineering*, 59, 1000-1009.
- Demirel, T., Cetin, N., y Kahraman, C. (2010). Multi-criteria warehouse location selection using Choquet Integral. *Expert Systems with Application*, 37(5), 3943-3952.
- Michael, L. y Van Hentenryck, P. (2003). A simple tabu search for warehouse location. *European Journal of Operational Research*, 157(3), 576-591.

- Ortega Mier, M. A. (2008). *Utilización de métodos cuantitativos para el análisis de problemas de localización en logística inversa*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Salazar, E. y Ruiz, N. (2009). ACO model applied to the waste collection by containers. *Ingeniere:Revista Chilena*, 17(2), 236-243.
- Sharma, R. y Berry, V. (2007). Developing new formulations and relaxation of single stage capacitated warehouse location problem. *European Journal of Operational Research*, 51, 24-34.
- Vlachopoulou, M., Silleos, G. y Manthou, V. (2001). Geographic information systems in warehouse site selection decisions. *International Journal of Production Economics*, 77(1-3), 205-212.
- Wang, C.-H. y Lu, J.-Z. (2009). A hybrid genetic algorithm that optimizes capacitated vehicle routing problems. *Experts Systems with Applications*, 36(2), 2921-2936.
- Xiao, Y., Yuchun, X., Qihong, Zhao, B. y IkouKaku, C. (2012). Development of a fuel consumption optimization model for the capacitated vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 39, 1419-1431.
- Xu Feng, Z. y Qiao Yun, W. (2010). Analysis on distribution efficiency influencing factors of supermarket bases on interpretive structural model. *International Conferencia on Logistics Systems and Intelligent Management*, 3, 1476-1480. Doi: 10.1109/ICL-SIM.2010.5461213

