Aplicación de la p-mediana y ruteo de vehículos para la reducción de distancias en una empresa de servicio postal

David E. Sánchez y Eduardo Gutiérrez

Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, Dpto. de Ingeniería Industrial, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería y Ciencias Sociales y Administrativas, Instituto Politécnico Nacional, Av. Té No. 950, Iztacalco, México.
(correo-e: ime.david@outlook.com; guge610926@yahoo.com.mx)

Recibido Jun. 9, 2021; Aceptado Ago. 5, 2021; Versión final Sept. 29, 2021, Publicado Feb. 2022

Resumen

El presente estudio tiene como objetivo minimizar la distancia total recorrida, por una empresa de servicio postal con dos centros de distribución. Esto se realiza a través de la aplicación del algoritmo de p-mediana para agrupar clientes con el origen más cercano y resolver el problema de ruteo de vehículos. Las rutas que sigue la empresa son empíricas y parten de un solo origen. Se establece una solución inicial usando la heurística del vecino más cercano y se utiliza la herramienta computacional Excel Solver para obtener una segunda solución para un solo origen. Después, se aplica el algoritmo de p-mediana y se obtienen un par de distancias totales adicionales. Los resultados muestran una mejora del 20% con la p-mediana cuando se compara con la heurística del vecino más cercano. La p-mediana es también un 4% menor comparada a la herramienta Excel Solver. Se concluye que la p-mediana ayuda a reducir las distancias totales.

Palabras clave: p-mediana; problema de ruteo de vehículos; vecino más cercano; optimización del transporte

Application of p-median and vehicle routing for distance reduction in a postal service company

Abstract

The present study aims to minimize the total distance traveled by a postal service company with two distribution centers by applying the p-median algorithm to a group of customers with the closest origin while solving vehicle routing problems. The routes followed by the company are empirical and start from a single depot. First, the nearest neighbor heuristic approach is applied to determine an initial solution. Then, the computational tool Excel Solver is used to generate a second solution for a single origin by applying the p-median algorithm, which resulted in a couple of additional total distances. The results show an improvement of 20% by the p-median in comparison to the nearest neighbor approach. The p-median is also four percent lower than Excel Solver. It is concluded that the p-median algorithm successfully reduces total distances.

Keywords: p-median; vehicle routing problem; nearest neighbor; transport optimization

INTRODUCCIÓN

La optimización de las rutas de transporte de una empresa de servicio postal, para la distribución de paquetes en una ciudad, puede obtenerse a través de la aplicación de métodos matemáticos. Uno de los métodos más utilizados es el problema de ruteo de vehículos, también conocido como VRP debido a su nombre en inglés *Vehicle Routing Problem* (Keçeci et al., 2021; Huiying et al., 2016). Existen diversas variantes del VRP, siendo el más común el problema de ruteo de vehículos clásico o de capacidad. Se define por tener un origen y n cantidad de clientes los cuales deben ser visitados una sola vez por un solo vehículo. Los vehículos tienen una capacidad limitada y deben regresar al origen. Se busca minimizar la distancia, costo o tiempo de recorrido (Mohammed et al., 2017).

Otra de las principales variantes del problema de ruteo es cuando se tienen dos o más orígenes. Esta variante es conocida como el problema de ruteo de vehículos con múltiples depósitos. El MDVRP, por sus siglas en inglés, *Multi-Depot Vehicle Routing Problem*, es un problema en el cual los vehículos salen de un depósito en particular. Siguiendo su ruta de clientes y deben de regresar al mismo deposito del cual partieron. La distribución y la planeación de las rutas debe ser de tal forma que la demanda de cada cliente deba ser satisfecha, cada cliente debe ser visitado por solo un vehículo, la demanda total por ruta debe ser menor o igual a la capacidad del vehículo asignado a esa ruta y cumplir la condición que el vehículo regrese al mismo origen del cual partió (Chaabani, 2016; Crevier et al., 2007).

Existen diversos métodos para dar solución a los problemas de VRP. Rodríguez-Vásquez (2020) menciona que comúnmente se cuenta con tres métodos de solución, los cuales se dividen en: 1) metaheurísticas, son capaces de hacer búsquedas robustas en un espacio de soluciones; 2) heurísticas, se caracterizan por hacer búsquedas en espacios delimitados y por obtener soluciones en corto tiempo; 3) métodos exactos, caracterizados por tener una convergencia hacia la solución óptima. Uno de los métodos más fáciles, en su aplicación, para obtener una solución en un corto periodo de tiempo, en los problemas de VRP, es la heurística del vecino más cercano. Por otra parte, este tipo de método no asegura una solución óptima. Para ser un método de aproximación se dice que su respuesta es aceptable y no suele variar en gran proporción de la solución óptima (Karkory y Abudalmola, 2013).

Otra forma de obtener una solución para el VRP es la combinación de técnicas que generalmente se aplican a la resolución del problema del agente viajero TSP por sus siglas en ingles provenientes de *Traveling Salesman Problem*. Una de estas técnicas o metodologías de solución es la p-mediana (Herrán et al., 2019). La p-mediana se encarga de buscar soluciones para minimizar los costos o distancias entre los nodos de demanda, definiéndose como un problema de localización. Dado un conjunto de nodos V así como un conjunto de arcos E , pertenecientes a un grafo $G(V,E)$, $|V|=n$ se busca encontrar p nodos que minimicen la distancia (Avella, 2007). En la Figura 1 se observa una representación del funcionamiento de un p-mediana cuando $p=2$ siendo los círculos rellenos y $n=6$ los círculos sin relleno, mostrando como se buscan los nodos más cercanos a las p .

Fig. 1: Representación del p-mediana con $n=6$ y $p=2$ (Adaptado de Avella, 2016)

La optimización de rutas a través del VRP aplicado en empresas de servicio postal pueden encontrarse en diferentes trabajos de investigación como menciona Rodríguez-Vásquez (2020). Debido a que el servicio postal ofrece un desarrollo social y económico ya que ofrecen transacciones a diferentes sectores con reducidos costos, además se logra el acceso a infraestructura y a las redes de comunicaciones. El servicio postal ayuda a al desarrollo sustentable de un país. Este desarrollo depende de que el servicio sea asequible y eficiente. (Laganà et al., 2021; Ji y Chen, 2007). Drożdziel et al., (2017) muestran una investigación que

busca encontrar entre varios depósitos, cuál de ellos tiene las menores distancias respecto a los clientes para usarlo como centro de distribución. Aplicando el método de la p-mediana, se busca reducir los costos de transporte. Afirmando que una buena forma de lograr dicho ahorro es a través de la minimización de las longitudes de las rutas. Obtienen una reducción en el kilometraje total de recorrido, argumentando que dicha reducción de kilometraje beneficia a una minimización en las rutas, los vehículos y operarios que se usan.

Otro trabajo similar es el que presentan Tuzkaya et al. (2019) donde presentan una empresa de servicio postal ficticia con distintos centros de distribución, y una cantidad importante de clientes. Argumentan que el número de depósitos o centros de distribución en un gran número afecta la resolución del problema si se usa algún método exacto. Para facilitar dicha solución implementan la p-mediana para los centros de distribución basándose en las distancias entre los centros, formando agrupamientos entre los orígenes y los clientes. Obteniendo como resultado 11 agrupamientos con un total de 1,994.08 kilómetros recorridos en total. En una búsqueda en la literatura iberoamericana no se encontraron resultados de artículos que combinen el método de p-mediana y el VRP para dar solución a algún problema de la vida real. Solo se obtuvieron seis resultados buscando las palabras p-mediana y vehículos, pero estos resultados están más enfocados a otros campos de investigación.

Este artículo tiene como objetivo demostrar que el método de p-mediana ayuda a minimizar las distancias totales de recorrido para dos centros de distribución y 120 oficinas postales (clientes). Primeramente, agrupando los clientes con el centro de distribución que esté más cercano a dichos clientes. Seguido se resuelve el problema de VRP para cada centro de distribución y el conjunto de clientes que le corresponde, obteniendo una solución factible. Se debe tomar en cuenta que las rutas actuales son rutas empíricas y solo se reparte la materia postal desde un centro de distribución, llamado en el artículo origen A, por lo tanto, con el fin de establecer rutas predeterminadas se opta por aplicar la heurística del vecino más cercano como solución inicial. De tal forma que dicho método de solución proporcione un panorama que muestre rutas estandarizadas. A través de la aplicación del algoritmo de la p-mediana se busca mejorar los resultados obtenidos a través del método del vecino más cercano. La flota de vehículos es homogénea, la capacidad y la demanda se dan por conocidas.

En el artículo se muestra que al utilizar el origen A y el origen B al mismo tiempo existe una reducción en la distancia total recorrida de 339.49 y de 289.24 kilómetros, dependiendo del método usado, comparada con la distancia mayor obtenida en donde solo se lleva a cabo la repartición de materia postal mediante el origen A. Representando una mejora del 20% y del 17% respectivamente. El artículo propone utilizar los dos centros de distribución con los que cuenta una empresa de servicio postal en la ciudad de México a través de agrupamientos obtenidos por el método de la p-mediana. Para ello, la estructura del trabajo realizado se presenta de la siguiente forma; metodología, donde se mencionan los métodos del vecino más cercano, la herramienta *Excel Solver Spreadsheet*, así como el modelo matemático para p-mediana y su algoritmo computacional. Luego se presentan los principales resultados obtenidos seguido de la discusión de estos. Por último, se presentan las conclusiones obtenidas a través de los resultados.

METODOLOGÍA

En esta sección se describen las herramientas que se usaron para realizar la investigación y se divide en 4 secciones diferentes: 1) el vecino más cercano; 2) Herramienta computacional Excel Solver Spreadsheet; 3) modelo matemático p-mediana; 4) algoritmo computacional p-mediana.

El vecino más cercano

Para aplicar el método se deben seguir 3 pasos (Ghiani et al., 2013): 1) Empezar con un nodo arbitrario o nodo de origen preestablecido para que sea el inicio del camino; 2) Encontrar el nodo más cercano al último nodo que se agregó al camino; 3) Repetir el paso 2 hasta que se complete el tour. Para este artículo se optó por utilizar el programa Excel. Se establece la matriz de distancias con un origen y 120 clientes. Se inicia ubicando la fila de origen y se busca cuál es la distancia más corta con respecto al origen. Una vez encontrado el cliente 'x' más cercano se cancela la columna de ese cliente. Ahora se debe ubicar la fila del cliente 'x' y hacer la búsqueda del cliente más cercano con respecto a 'x'. Dicho procedimiento de buscar por fila y cancelar por columna se repite hasta completar la ruta. Se sigue el mismo procedimiento para completar todas las rutas posibles. Se utiliza una restricción de que al menos 10 clientes deben ser visitados por un vehículo. Se evita que los vehículos hagan rutas muy cortas y que aumente el número de rutas de manera desproporcionada. La Figura 2 muestra la posición de las diferentes oficinas postales o clientes (puntos) y un centro de distribución (cuadrado), origen A. De igual manera se observa la distribución de las rutas que se obtienen a través del método del vecino más cercano.

Fig. 2: Rutas obtenidas por el método el vecino más cercano

Herramienta computacional Excel Solver Spreadsheet

La herramienta de Excel Spreadsheet Solver es un programa de código abierto para Excel que ofrece soluciones a distintas variantes del problema de ruteo de vehículos (Karthik y Reddy, 2019). Se basa en 5 principios (Erdogan, 2017): 1) Locaciones, donde se establecen las direcciones y/o las coordenadas de el origen y los clientes. 2) Distancias, en base a los mapas digitales de *Bing Maps* se establecen las distancias que existen entre todos los nodos. 3) Vehículos, en esta parte se define la cantidad de vehículos, su capacidad e incluso horario de trabajo. 4) Solución, se forman tablas mostrando los resultados por cada vehículo. 5) Visualización, muestra una imagen de las rutas formadas. Para más información del funcionamiento de Excel Spreadsheet Solver revisar Erdogan (2017), donde se muestra de forma detallada el funcionamiento de la herramienta. Trabajos como Zapata y Ararat (2020) Karthik y Reddy (2019), muestran la aplicación de esta.

Modelo matemático p-mediana

En esta sección se presenta el modelo matemático de programación entera para el problema de p-mediana. En la Tabla 1 se presenta las variables utilizadas en el modelo matemático. El modelo como las variables son tomados de autores (Drożdziel et al., 2017) y (Daskin y Maass, 2015).

Tabla 1: Variables del modelo p-mediana.

Símbolo	Definición	Tipo
h_i	Demanda	Parámetro
d_{ij}	Distancias entre cada nodo i, j	Parámetro
x_{ij}	Asignación para cada nodo i, j	Variable
y_j	Asignación de una locación única	Variable
p	Número de locaciones definido	Parámetro
W	Conjunto finito de nodos no vacíos	Conjunto

$$\text{Min} = \sum_{i \in W} \sum_{j \in W} h_i d_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

$$\sum_{j \in W} y_j = p \quad (2)$$

$$\sum_{j \in W} x_{ij} = 1; \forall i \in W \quad (3)$$

$$x_{ij} - y_j \leq 0; \forall i \in W \forall j \in W \quad (4)$$

$$y_j \in \{0,1\}; \forall i \in W \quad (5)$$

La función objetivo (1) minimiza las distancias en la demanda. La restricción (2) se encarga de que se asignen exactamente p vértices respecto a la p -mediana. La restricción (3) satisface la demanda en el sitio j . La restricción (4) asigna a los nodos de demanda que pertenecen a la p -mediana. La restricción (5) establece a las variables y_j como variables binarias.

Algoritmo computacional p -mediana

El algoritmo de p -mediana visto en (Drożdziel et al., 2017) y (Daskin y Maass, 2015) se puede resolver a través del software CPLEX. Para ello se inicia definiendo el número de orígenes, destinos y el número p -mediana. En la Tabla 2 se muestra el algoritmo ejecutado en el programa CPLEX. Utilizado para resolver el modelo de p -mediana.

Tabla 2. Algoritmo p -mediana en CPLEX (adaptado de Drożdziel et al., 2017)

<i>Algoritmo p-mediana en CPLEX</i>
<pre> int destino = ...; // ← Definir el número de destinos int origen = ...; // ← Definir el número de orígenes int pmedian = ...; // ← Se define el número de la p-mediana range oficinas = 1..destino; // ← contador de destino de 1 hasta n range cdd = 1..origen; // ← contador de origen de 1 hasta n dvar boolean x[oficinas][cdd]; // ← relación de tablas de distancias entre oficinas y cdd dvar boolean y[cdd]; float m[oficinas][cdd]=...; minimize sum (i in oficinas, j in cdd) m[i][j]*x[i][j]; //← función objetivo (1) subject to { forall (i in oficinas) // sum (j in cdd) x[i][j]==1; // ←restricción (3) forall (i in oficinas, j in cdd) x[i][j]-y[j]<=0; //← restricción (4) sum (j in cdd) y[j]==p; // ← restricción (2) }</pre>

Para el algoritmo presentado en la Tabla 2, se deben definir en la parte de datos de CPLEX, el número de destinos, el número de orígenes, el número para la p -mediana el cual se define por el número de orígenes, estos se definen como constantes; también se define la matriz de distancias entre los orígenes y los destinos. Esto ayuda a las variables que se encuentran en el programa como “oficinas” y “cdd” para establecerlas como un contador y se establezcan como un origen (i) con destino (j).

Usar el algoritmo de esta forma permite que a cada centro de distribución se le asignen las oficinas postales (clientes) que tengan las distancias más cortas respecto a cada uno de ellos. En la Figura 3 se observa en (a) la distribución en el plano del origen A con sus correspondientes clientes y en (b) la distribución del origen B y los clientes resultantes. Los orígenes son representados por cuadrados y los clientes están representados por puntos. Mientras que en la Figura 4 se observa en (a) las rutas correspondientes a al origen A con 71 clientes y en (b) las rutas que corresponde al origen B con 49 clientes. Formando 5 rutas diferentes, tres rutas resultantes desde el origen A y dos rutas que se forman desde el origen B.

Fig. 3: (a) Plano de oficinas correspondientes al origen A y (b) plano corresponde a Origen B, obtenidas por p-mediana

Fig. 4: Rutas correspondientes a los orígenes A con 71 clientes (a) y B con 49 clientes.

RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a través del algoritmo p-median, así como los resultados obtenidos a través de la heurística del vecino más cercano y los resultados obtenidos a través de la herramienta Excel *Solver Spreadsheet*. Las pruebas de esta investigación se aplicaron en Microsoft Excel 365 y en CPLEX, ambos programas ejecutados en una computadora con Windows 10 de 64 bits, con un procesador Intel core i5 9300H, 16 gb de memoria ram, disco duro M2 de 128 gb. En el caso de Excel Solver Spreadsheet se optó por definir un tiempo de ejecución de 120 minutos. El trabajo realizado se aplica en una empresa de servicio postal de la Ciudad de México, México. Dicha empresa cuenta con dos centros de

distribución. Actualmente toda la materia postal se reparte a 120 oficinas postales desde un solo centro de distribución. Se utilizan 5 unidades vehiculares homogéneas para la distribución. Actualmente las rutas que siguen los transportistas son empíricas.

En la Tabla 3 se observan los resultados binarios de p-mediana para las oficinas postales que corresponden a cada centro de distribución. En las columnas de origen A y origen B se proporciona un uno (1) a las oficinas que deben ser vistas por dicho centro de distribución y un cero (0) en caso contrario, por ejemplo, para el cliente C-1, se observa un 1 en la celda de Origen B y el cliente C-7 tiene un 1 en el origen A. De este ejemplo se deduce que el origen A debe cubrir la demanda del cliente C-7 mientras que el origen B debe cubrir con la demanda del cliente C-1. De tal forma que al centro de distribución A se debe encargar de 71 oficinas postales (clientes) mientras que el centro de distribución B se le asignan 49 clientes para su distribución.

Tabla 3: Resultados binarios de p-mediana

Cliente	Origen A	Origen B	Cliente	Origen A	Origen B	Cliente	Origen A	Origen B	Cliente	Origen A	Origen B
C-1	0	1	C-31	0	1	C-61	0	1	C-91	1	0
C-2	0	1	C-32	1	0	C-62	1	0	C-92	0	1
C-3	0	1	C-33	0	1	C-63	1	0	C-93	0	1
C-4	0	1	C-34	1	0	C-64	0	1	C-94	0	1
C-5	0	1	C-35	0	1	C-65	1	0	C-95	1	0
C-6	0	1	C-36	0	1	C-66	1	0	C-96	0	1
C-7	1	0	C-37	1	0	C-67	1	0	C-97	1	0
C-8	1	0	C-38	1	0	C-68	1	0	C-98	1	0
C-9	0	1	C-39	1	0	C-69	0	1	C-99	1	0
C-10	1	0	C-40	0	1	C-70	0	1	C-100	1	0
C-11	1	0	C-41	1	0	C-71	1	0	C-101	1	0
C-12	0	1	C-42	0	1	C-72	1	0	C-102	1	0
C-13	0	1	C-43	0	1	C-73	1	0	C-103	1	0
C-14	1	0	C-44	1	0	C-74	1	0	C-104	1	0
C-15	0	1	C-45	1	0	C-75	1	0	C-105	0	1
C-16	0	1	C-46	0	1	C-76	1	0	C-106	0	1
C-17	0	1	C-47	1	0	C-77	0	1	C-107	1	0
C-18	1	0	C-48	1	0	C-78	1	0	C-108	1	0
C-19	0	1	C-49	1	0	C-79	0	1	C-109	1	0
C-20	1	0	C-50	0	1	C-80	0	1	C-110	1	0
C-21	1	0	C-51	0	1	C-81	0	1	C-111	1	0
C-22	0	1	C-52	1	0	C-82	1	0	C-112	1	0
C-23	1	0	C-53	0	1	C-83	1	0	C-113	1	0
C-24	0	1	C-54	1	0	C-84	0	1	C-114	1	0
C-25	1	0	C-55	1	0	C-85	1	0	C-115	1	0
C-26	1	0	C-56	1	0	C-86	1	0	C-116	1	0
C-27	0	1	C-57	1	0	C-87	0	1	C-117	1	0
C-28	1	0	C-58	1	0	C-88	0	1	C-118	1	0
C-29	0	1	C-59	0	1	C-89	1	0	C-119	1	0
C-30	0	1	C-60	0	1	C-90	0	1	C-120	1	0

En la Tabla 4 se observan las distancias recorridas totales obtenidas a través de los distintos algoritmos ejecutados computacionalmente. También se muestran el número de cliente que deben visitar y desde que origen parten los vehículos y el número de rutas que hay para cada origen. Por último, se muestra una columna con la diferencia de kilometraje con respecto a la solución del vecino más cercano. Observe que en la Tabla 4 se muestran las diferencias en las distancias totales recorridas con respecto a la solución 1. De esta manera se obtiene una reducción del 16.45% con respecto a la solución 2, un 17.15% respecto a la solución 3 y un 20.13% menor respecto a la solución 4. También se puede observar una reducción del 4.41% entre la solución 3 y la solución 4, siendo las de menor distancia recorrida total. Siendo la solución 4 la que menor distancia de recorrido ofrece y siendo la única que se obtiene a partir de la asignación de clientes a partir del algoritmo de la p-mediana.

Tabla 4: Distancias recorridas totales en kilómetros obtenidas computacionalmente.

<i>Solución</i>	<i>Algoritmo</i>	<i>Origen</i>	<i>Clientes</i>	<i>Numero de rutas</i>	<i>Distancia recorrida(km)</i>	<i>Total(km)</i>	<i>Diferencia (km)</i>
1	Vecino más cercano	A	120	4	1685.89	1685.89	0
2	Solver Spreadsheet	A	120	5	1408.51	1408.51	277.38
3	Solver Spreadsheet	A,B	120	5	1396.65	1396.65	289.24
4	P-mediana/Solver Spreadsheet	A	71	3	957.151	1346.39	339.49
	P-mediana/Solver Spreadsheet	B	49	2	389.241		

DISCUSIÓN

Autores como Zuñiga y Mendoza (2018), Joshi y Kaur (2015) muestran que la heurística del vecino más cercano es una de las metodologías más fáciles de aplicar para dar solución inicial a los problemas de VRP ya que permiten una solución factible en un corto periodo de tiempo. De esto modo se comprueba que solución 1, mostrada en la Tabla 4, se puede considerar como una solución que permite estandarizar las rutas que actualmente se llevan a cabo de manera empírica. Tomando en cuenta los resultados mostrados en la Tabla 4, se puede afirmar que la solución obtenida por la distribución de clientes para cada origen a través del algoritmo de p-mediana proporciona la menor distancia recorrida total. Se muestra una reducción de 339 kilómetros representado un 20.13% con respecto a la técnica del vecino más cercano. También se obtiene una reducción de 62.12 km comparada a solución 3 representando una reducción del 4.41%. Tomando en cuenta trabajos como el de Orrego et al. (2016) donde dependiendo del algoritmo usado, muestra mejoras entre el 4% y 10% en la reducción de distancias se confirman los resultados obtenidos como resultados satisfactorios.

A diferencia de lo establecido en Drożdziel et al. (2017) donde su modelo consiste en encontrar entre diversos centros de distribución el más cercano para todos los clientes, a partir de la p-mediana, en esta investigación se prioriza la cercanía de los clientes a los centros de distribución de tal forma que ambos centros de distribución puedan ser utilizados. Mostrando una reducción de distancias utilizando el algoritmo de p-mediana, y los dos centros de distribución para satisfacer a los 120 clientes.

El algoritmo de p-mediana ayuda a minimizar las distancias y los costos encontrando los nodos más cercanos al centro de distribución Mehdi et al. (2021). El algoritmo permite que problemas con clientes o nodos superiores a 100, se reduzcan de tal forma que los métodos existentes para dar solución al problema de ruteo de vehículos se puedan aplicar de una mejor forma. Por ejemplo, en la metaheurística presentada en el trabajo de Nisperuza et al. (2019) muestra la eficiencia que tiene al resolver problemas con 50 clientes, pero cuando se incrementa dicha cantidad, a 100 clientes como muestra su trabajo, la metaheurística pierde eficiencia. Por lo que dividir los nodos a su origen más cercano ayuda a diversificar los métodos que pudiesen utilizarse para resolver el problema de ruteo de vehículos.

Mehdi et al. (2021) muestra cómo se pueden aplicar métodos multinivel. Para el caso de este artículo se muestra usando como primer nivel usar la p-mediana para establecer los nodos correspondientes a cada origen dependiendo de su cercanía. Después, para un segundo se resuelve el problema de ruteo de vehículos para cada origen. Mostrando una mejoría en los resultados obtenidos en un 4% al aplicar la herramienta Solver Spreadsheet y una reducción de poco más del 20% si se compara con la heurística del vecino más cercano, esto se observa en la Tabla 4. Al utilizar en un primer nivel el método de p-mediana y establecer nodos cercanos al origen, permite que la herramienta en el segundo nivel minimice los ya establecidos nodos cercanos al origen.

Dar solución al problema de ruteo de vehículos utilizando primero el método de la p-mediana permite mejorar la red logística a través de la verificación de distancias mínimas entre los centros de distribución y los clientes, así como minimizar las distancias totales entre los orígenes y los destinos (Drożdziel et al., 2017). Facilitando la aplicación de los métodos que den solución al problema de ruteo. Se debe tener en cuenta que este artículo no toma en cuenta factores como los tiempos de traslado o la importancia en la que se debe visitar cada oficina. También vale la pena mencionar que una vez resulto el algoritmo de p-mediana se utilizaron herramientas heurísticas, por lo que sería conveniente intentar usar otros métodos de solución que mejoren dichos resultados.

CONCLUSIONES

Después de analizar los resultados obtenidos a través de la selección de clientes para cada centro de distribución por parte del algoritmo de p-mediana se puede concluir lo siguiente: 1) El algoritmo de la p-mediana asigna a los clientes al centro de distribución que tengan más cercano, permitiendo reducir la distancia de recorrido total demostrando su eficiencia frente a las heurísticas mostradas. 2) el modelo propuesto permite el uso de los dos centros de distribución con los que cuenta la empresa, reduciendo el recorrido total en comparación de cuando solo se utiliza un centro de distribución. Teniendo mejoras entre un 4% y 20% dependiendo del método con el que se compara. 3) asignar los clientes al centro de distribución más cercano permitió que los tamaños para la aplicación del problema de ruteo de vehículos sean menores a 100 cuando se da solución por centro de distribución lo que permite tener otras opciones para obtener la solución al VRP cuando ya se define a que clientes debe visitar cada origen. El algoritmo de la p-mediana muestra su eficiencia cuando se compara con métodos de solución heurísticos, por lo que sería conveniente probar su funcionamiento con algún otro tipo de método, exacto o metaheurístico.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto Politécnico Nacional plantel UPIICSA y a la Maestría en Ingeniería Industrial en su línea de conocimiento de Investigación y gestión de las operaciones y cadena de suministro. También un agradecimiento al CONACyT.

REFERENCIAS

- Avella, P., Sassano, A., y Vasil'ev, I., Computational study of large-scale p-median problems, <https://doi.org/10.1007/s10107-005-0700-6>, Mathematical Programming, 109(1), 89–114 (2007)
- Chaabani, A., Bechikh, S., y Ben Said, L., A memetic evolutionary algorithm for bi-level combinatorial optimization: a realization between Bi-MDVRP and Bi-CVRP, <https://doi.org/10.1109/CEC.2016.7743988>, 2016 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), 1666-1673 (2016)
- Crevier, B., Cordeau, J. F., y Laporte, G., The multi-depot vehicle routing problem with inter-depot routes, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.08.015>, European Journal of Operational Research, 176(2), 756–773 (2007)
- Daskin, M. S., y Maass, K. L., The p-median problem, https://doi.org/10.1007/978-3-319-13111-5_2, En Location Science by Laporte, G., Nickel, S., y Saldanha da Gama, F., Springer, Cham, Switzerland, 21-45 (2015)
- Drożdźiel, P., Wińska, M., Madleňák, R., y Szumski, P., Optimization of the post logistics network and location of the local distribution center in selected area of the Lublin province, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.023>, Procedia Engineering, 192, 130-135 (2017)
- Erdoğan, G., An open source spreadsheet solver for vehicle routing problems, <https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.02.022>, Computers and Operations Research, 84, 62-72 (2017)
- Herrán, A., Colmenar, J. M., y Duarte, A., A variable neighborhood search approach for the Hamiltonian p-median problem, <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.04.033>, Applied Soft Computing, 80, 603–616 (2019)
- Huiying, C., Lei, L., Bo, H., y Yong, W., Optimization model of vehicle scheduling for postal region transportation, <https://doi.org/10.5013/IJSSST.a.17.14.06>, International Journal of Simulation Systems, Science & Technology, 17(14), 6.1-6.5 (2016)
- Ji, P., y Chen, K., The vehicle routing problem: the case of the Hong Kong postal service, <http://doi.org/10.1080/03081060701390841>, Transportation Planning and Technology, 30(2-3), 167–182 (2007)
- Karkory, F. A., y Abudalmola, A. A., Implementation of heuristics for solving travelling salesman problem using nearest neighbor and minimum spanning tree algorithms, <https://doi.org/10.5281/zenodo.1088390>, International Journal of Computer and Information Engineering, 7(10), 1524-1534 (2013)
- Karthik, G. P., y Reddy, K. D., A comparative analysis of vehicle routing problem in APSRTC firm, International Journal of Applied Engineering Research, ISSN: 0973-4562, 14(21), 4042-4046, (2019)
- Keçeci, B., Altıparmak, F., y Kara, İ., A mathematical formulation and heuristic approach for the heterogeneous fixed fleet vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery, <https://doi.org/10.3934/jimo.2020012>, Journal of Industrial & Management Optimization, 17(3), 1069-1100 (2021)
- Laganà, D., Laporte, G., y Vucatur, F., A dynamic multi-period general routing problem arising in postal service and parcel delivery systems, <https://doi.org/10.1016/j.cor.2020.105195>, Computers & Operations Research, 129, 105195, 1-13 (2021)
- Mehdi, Z., Maryam, A., y Jafar, F., The minimum information approach to the uncapacitated p-median facility location problem, <https://doi.org/10.1080/19427867.2020.1864595>, Transportation Letters, 1-10 (2021)

Mohammed, M. A., Abd Ghani, M. K., y otros cinco autores, Solving vehicle routing problem by using improved k-nearest neighbor algorithm for best solution, <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2017.04.012>, Journal of Computational Science, 21, 232–240 (2017)

Nisperuza, P.A., López, J.M., y Hernández, H.E., Una Metaheurística basada en el Algoritmo Genético de Ordenamiento No-Dominado II, aplicado al Problema de Ruteo de Vehículos de Productos Perecederos, <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642019000600223>, Información Tecnológica, 30(6), 223-232 (2019)

Orrego, J., Ospina, D., y Toro, E., Solución al problema de ruteo de vehículos con capacidad limitada (CVRP) usando una técnica metaheurística, <https://doi.org/10.22517/23447214.9013>, Scientia Et Technica, 21(3), 225-233 (2016)

Rodríguez-Vásquez, W. C., Modelado de un Problema de Ruteo de Vehículos con Múltiples Depósitos, Ventanas de tiempo y flota heterogénea de un servicio de mensajería, <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642020000100207> Información Tecnológica, 31(1), 207-214 (2020)

Tuzkaya, G., Şensu, Ş., Arslan, Z., y Ekinci, R., A vehicle routing model for postal service operations and an application, <https://doi.org/10.7240/jeps.453159>, International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences, 31(4) , 267-272 (2019)

Zapata, U. P., y Ararat, H. C., Un problema de enrutamiento del vehículo con enfoque de ventanas de tiempo para mejorar el proceso de entregas, <https://doi.org/10.14483/23448393.15271>, Ingeniería, 25(2), 117-143 (2020)

Zuñiga, B. C., y Mendoza, A. M., Propuesta de un modelo de ruteo de vehículos abierto en una institución prestadora de servicios de salud, <https://doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.2.4761>, Entramado, 14(2), 288-298 (2018)