

Universidad de Lima  
Facultad de Ingeniería  
Carrera de Ingeniería Industrial



# **MEJORA APLICADA AL PROCESO DE DISTRIBUCIÓN MEDIANTE EL MODELO P- MEDIANA Y EL ALGORITMO DE COLONIA DE HORMIGAS EN UNA EMPRESA DISTRIBUIDORA DE AGUA EMBOTELLADA**

Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Industrial

Artículo Científico

**Steve Michael Gomez Camargo**

**Código 20190852**

**Karim Andre Saman Limaymanta**

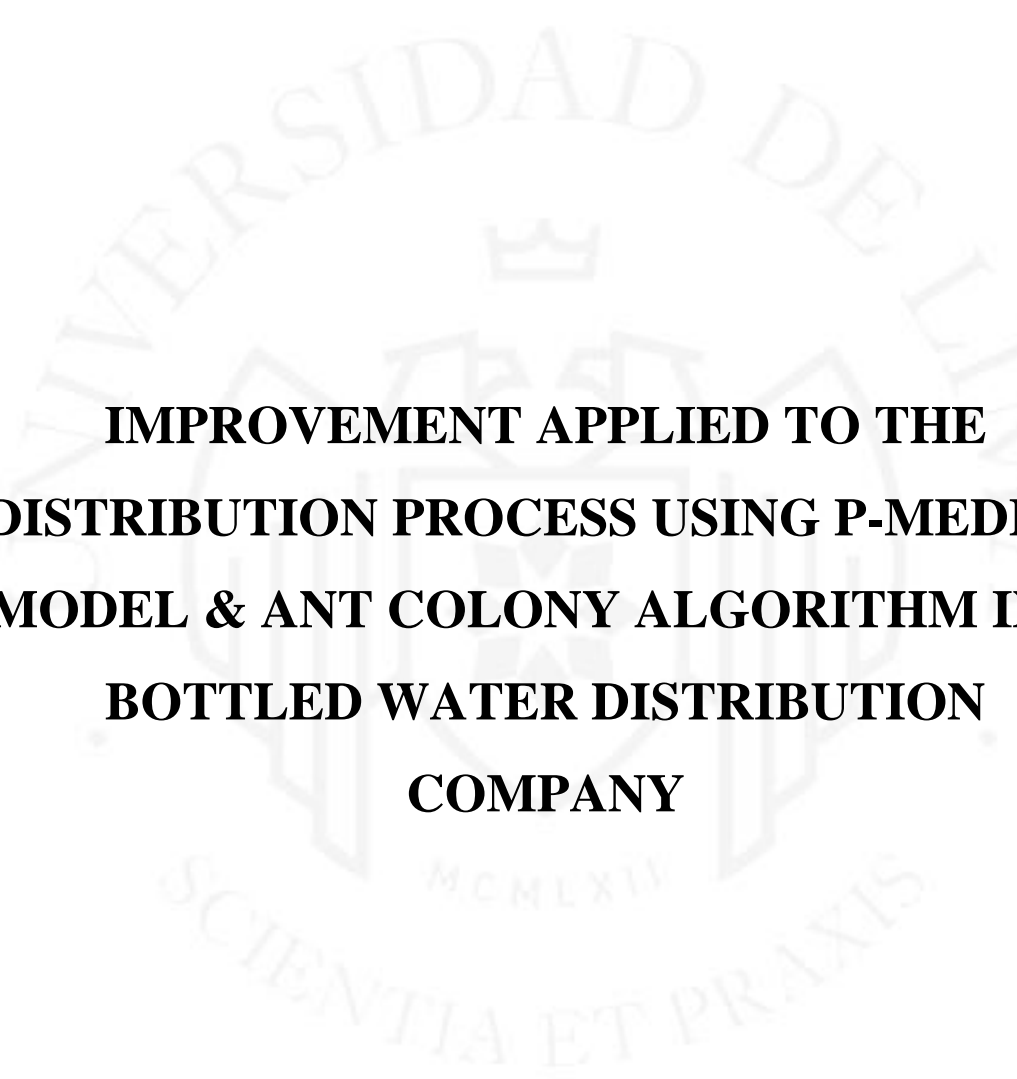
**Código 20191847**

**Asesor**

**José Antonio Taquía Gutiérrez**

Lima – Perú  
Junio de 2025

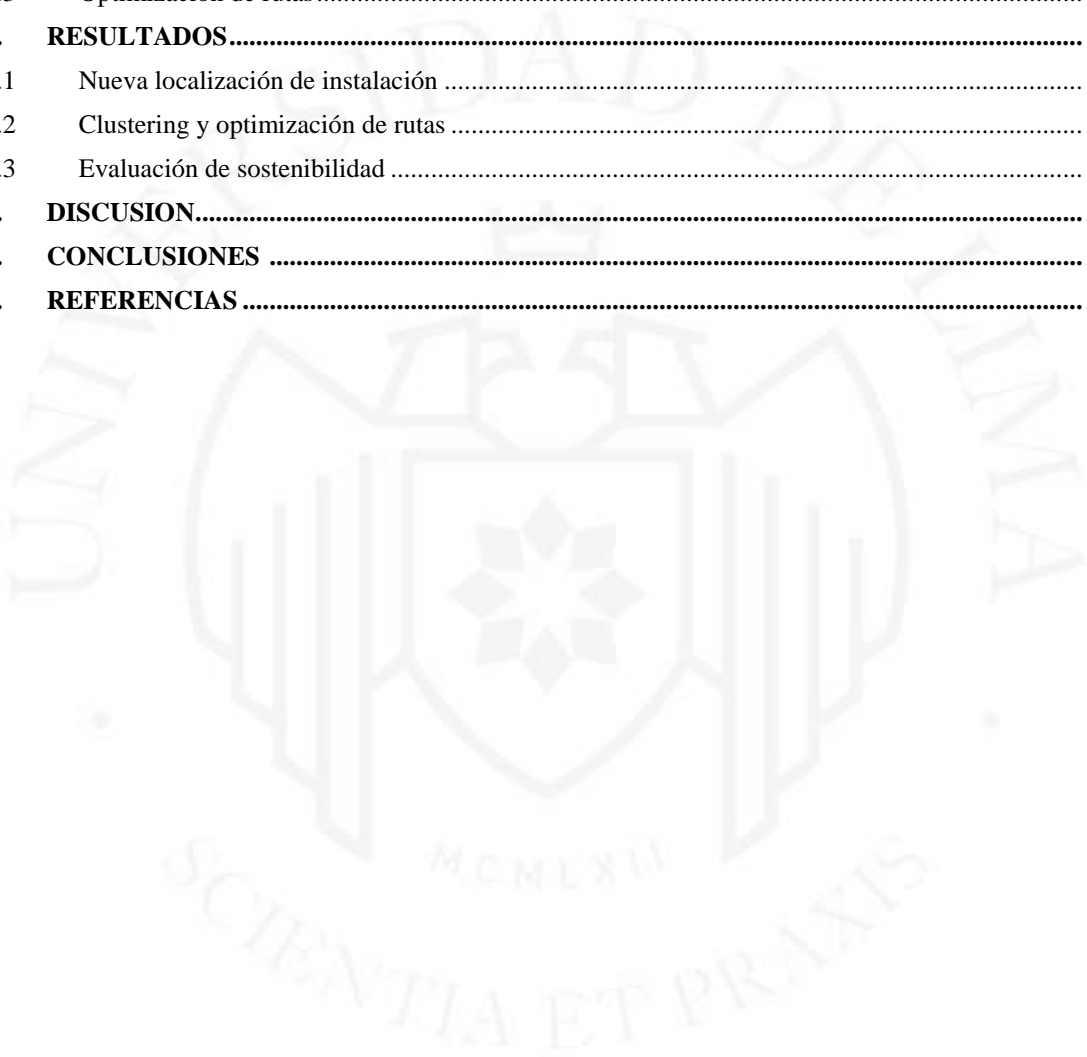




**IMPROVEMENT APPLIED TO THE  
DISTRIBUTION PROCESS USING P-MEDIAN  
MODEL & ANT COLONY ALGORITHM IN A  
BOTTLED WATER DISTRIBUTION  
COMPANY**

# TABLA DE CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>8</b>
<b>2. METODOLOGÍA .....</b>	<b>11</b>
2.1 Localización de almacén .....	11
2.2 K-means Clustering .....	13
2.3 Optimización de rutas.....	14
<b>3. RESULTADOS.....</b>	<b>15</b>
3.1 Nueva localización de instalación .....	15
3.2 Clustering y optimización de rutas .....	16
3.3 Evaluación de sostenibilidad .....	19
<b>4. DISCUSION.....</b>	<b>20</b>
<b>5. CONCLUSIONES .....</b>	<b>21</b>
<b>6. REFERENCIAS .....</b>	<b>23</b>



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1	Parámetros operativos.....	15
Tabla 2.2	Geocodificación de puntos de entrega para iteración ACO.....	15
Tabla 3.1	Recorridos diarios con Ant Colony Optimization .....	18
Tabla 3.2	Evaluación de resultados de programación por día .....	19
Tabla 3.3	Resultados económicos de mejora aplicada .....	19
Tabla 3.4	Temperatura mínima, máxima y la humedad relativa en 2024 .....	19



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Puntos de demanda y centro de distribución .....	11
Figura 3.1 Geolocalización de nuevo centro de distribución.....	16
Figura 3.2 Resultado inicial silhouette scores .....	17
Figura 3.3 Clustering de los puntos de demanda .....	17
Figura 3.4 Ruta óptima trazada por ACO para Día 1 .....	18
Figura 3.5 Resultado total de emisiones de gases de efecto invernadero .....	20



# **Mejora aplicada al proceso de distribución mediante el modelo p-mediana y el algoritmo de colonia de hormigas en una empresa comercializadora de agua embotellada**

**Steve Michael Gómez Camargo**

20190852@aloe.ulima.edu.pe

Universidad de Lima

**Karim Andre Samán Limaymanta**

20191847@aloe.ulima.edu.pe

Universidad de Lima

**Resumen:** Esta investigación tiene como objetivo presentar una propuesta de mejora aplicada al sistema de distribución de una empresa comercializadora de agua embotellada. Se propone un estudio de caso con la aplicación de la P-Median para localizar un almacén y el algoritmo de colonia de hormigas para optimizar la programación de rutas; para ello, se utilizaron hojas de cálculo y el lenguaje de programación Python. La propuesta demostró tener impactos operativos y económicos beneficiosos. Al obtener la nueva localización del almacén y programar las rutas, se redujo en un 36% el tiempo de entrega, el kilometraje recorrido disminuyó en 57% y la capacidad de entrega promedio incrementó en 62,5%. Adicionalmente, el software COPERT V permitió calcular el impacto ambiental de la solución proyectando una disminución del 10% de toneladas de  $CO_2$  generadas en un año. Finalmente, se estima que el beneficio semestral sea de hasta S/ 10 000.

**Palabras Clave:** Localización óptima de instalaciones, p-median, optimización de colonia de hormigas, optimización de rutas, optimización de distribución.

**Abstract:** This research aims to present an improvement proposal applied to the distribution system of a company that distributes bottled water. A case study is proposed where the P-median method is applied to locate a warehouse and the ant colony algorithm is used to optimize route programming; For this, spreadsheets and Python programming language were used to encode the algorithms used. The proposal had a positive economic impact. By having the new warehouse location and programming routes, the delivery

time was reduced by 36%, total distance was diminished by 57% and average delivery capacity increased by 62,5%. Additionally, the COPERT V software was used to calculate the impact of the solution on the emission of polluting gases and in a year, there would be a reduction of 10% of the  $CO_2$  generated. Finally, the semestral benefit is estimated to be up to S/ 10 000.

**Keywords:** Optimal facility location, p-median, ant colony optimization, route optimization, distribution optimization.

## 1. INTRODUCCIÓN

Uno de los principales problemas relacionados con los sistemas de distribución y la logística en Perú son los altos costos. En Perú, los costos de distribución representan el 18,2% de las ventas para pequeñas empresas; asimismo, estas solo alcanzan un 34,5% de pedidos satisfactorios para sus clientes. Esto difiere de manera significativa, lo cual es elevado en comparación con otros países como EE. UU. (8,7%), el promedio de Europa (11,9%) y Sudamérica (14,7%) (ComexPeru, 2022). Además, Esto se debe a la falta de estandarización en los sistemas de distribución en general. Por otro lado, una de las barreras principales que enfrentan las empresas peruanas es la ausencia de la administración de transporte que incluye metodologías para optimizar tiempos de recorrido y distancias (Dirección General de Políticas y Regulación en Transporte Multimodal, 2020).

La empresa en estudio produce y envasa agua de mesa ozonizada y embotellada bajo su marca propia. Esta misma distribuye sus productos a sus clientes con 1 furgoneta de reparto propia por toda la ciudad de Lima, se encuentra dentro del 18,9% de empresas que realiza la distribución de manera directa (Peru Retail, 2022). Si bien realiza la distribución de bienes, se encuentra en una posición complicada, pues no cuenta con un sistema de distribución establecido, asimismo, existen largas distancias entre los puntos de demanda y el almacén, que genera altos tiempos de entrega y una baja cantidad de pedidos diarios entregados (Agárdi et al., 2021). Actualmente, la distancia promedio entre el almacén y los puntos de demanda es de 23.34 km, la utilización del vehículo es del 60% y la distancia total promedio recorrida por día es de 82 km. Finalmente, la furgoneta asignada a los repartos tiene un consumo promedio de 35 km/galón y con el costo por

galón promedio en S/ 20,5 (OSINERGIM, 2025), se obtiene un costo de distribución total de S/ 48 diarios aproximadamente.

El objetivo principal de la investigación es proponer un modelo de mejora aplicada al proceso de distribución de agua embotellada en una empresa del sector para reducir los tiempos de entrega y la distancia recorrida total. Los objetivos específicos incluyen revisar el marco teórico para la comprensión del problema y las técnicas elegidas, proponer soluciones de ingeniería y validar su viabilidad económica, y finalmente evaluar los indicadores clave de la solución propuesta.

### **Problema de localización de un almacén**

Uno de los principales desafíos existentes en los sistemas de distribución es la gestión eficiente del abastecimiento a todos los clientes, quienes se encuentran geográficamente dispersos entre sí y a los centros de distribución. En este contexto, las empresas buscan minimizar los costos operativos y tiempos de entrega. Esta problemática se enmarca en la teoría de localización discreta, cuyo objetivo es determinar la ubicación óptima de una o varias instalaciones con el fin de optimizar la distancia y tiempo de recorrido.

Uno de los modelos más utilizados para abordar este tipo de problemas es el P-median, que consiste en localizar un número  $p$  de instalaciones de manera que se minimice la suma de las distancias ponderadas entre los puntos de demanda y sus respectivas ubicaciones asignadas (Jaya et al, 2024). Esta metodología funciona bien para problemas de escala pequeña o media, pues el tiempo para generar la solución de la p-median se reduce mientras más puntos de entrega se deban tomar en consideración (Gwalani et al., 2021). Esta metodología es altamente versátil y aplicable a diversos contextos, dado que la distribución es un componente crítico en múltiples sectores; puede emplearse en la localización óptima de estaciones de carga para vehículos eléctricos (He et al., 2022) y ser más eficiente que otros métodos de localización como el SCP (Set Covering Model) y el MCLP (Maximal covering location model). También, en determinar centros de eliminación de desperdicios (Jaya et al., 2024) y muchos otros.

Asimismo, el modelo P-Median puede ser adaptado a variantes más complejas. Se puede emplear una versión del modelo que incorpora restricciones presupuestarias, con el propósito de minimizar el costo total de transporte bajo un presupuesto asignado (Espejo & Marín, 2023). Por otro lado; se ha logrado implementar el modelo P-median en una hoja de cálculo de Excel con el fin de evaluar su viabilidad computacional para

resolver problemas de localización discreta. Los resultados indican que, si bien es posible utilizar Excel para este tipo de problemas, la herramienta presenta limitaciones en cuanto al número de puntos de demanda que puede gestionar eficientemente, debido a su propia estructura y capacidad de procesamiento (Brusco, 2022).

Por otro lado, Octaria et al. (2024) utilizan el modelo para ubicar de manera estratégica centros de eliminación de residuos en la ciudad de Palembang, Indonesia para solucionar la problemática del exceso de residuos que afecta a la ciudad. Además, se han presentado casos en el que se ha logrado reducir el costo de transporte total en un 57,75% implementando la P-median (Sbastian et al, 2021) mostrando así el gran impacto que puede tener la ubicación estratégica de un almacén. Si bien en algunas situaciones la P-median prevalece como el método más eficiente, hay otras en las que es igual de eficaz que el método con el que se compara como con el P-center.

### **Optimización de Rutas**

Las empresas necesitan transportar mercancía a sus clientes diariamente, por lo que los responsables de la gestión de rutas deben tomar decisiones de forma rápida y óptima, con el fin de maximizar la productividad de las operaciones (Le et al., 2022). En este contexto, la optimización de rutas busca resolver el Problema de Ruteo de Vehículos (Vehicle Routing Problem, VRP), siendo la función objetivo la minimización de la longitud total de la ruta (Agárdi et al., 2022).

Dado que el VRP es un problema de alta complejidad computacional, se recurre al uso de técnicas metaheurísticas que permiten desarrollar algoritmos capaces de resolver problemas de programación combinatoria, ya que es necesario iterar y evaluar cada una de las rutas posibles.

### **Optimización Algoritmo de Colonia de Hormigas**

El algoritmo de colonia de hormigas (Ant Colony Optimization, ACO) es una de las técnicas por excelencia en optimización de rutas, trata de imitar el comportamiento de las hormigas en la búsqueda de comida y su regreso a las colonias. El ACO puede reducir los costos de distribución de bienes en un 2% (Barcos et al., 2002) y en contextos más similares al del caso de estudio puede darse hasta un 30% aproximadamente (Seçkiner et al., 2021). Cabe considerar que en ese caso las distancias entre puntos de entrega son a través de un país; mientras que en este las distancias son más cortas al tratarse de una ciudad. Finalmente, en un estudio de optimización usando el ACO en Beijing, el tiempo

de viaje promedio fue reducido en 10,6% y la distancia viajada en un 13,3%, que representa un costo 7,6% menor asociado a logística y emisiones de carbono (Chen et al., 2022).

Las técnicas metaheurísticas han probado ser más efectivas al resolver estos tipos de problemas. Al comparar los resultados de técnicas de algoritmo de colonia de hormigas y el método de Clarke y Wright, en la primera la distancia total es menor en un 13,4%, con un tiempo de servicio y rotación mejor en un 10% (Oikhova et al., 2020). Esto ocasiona que los programadores y tomadores de decisiones se inclinen a este tipo de soluciones con softwares avanzados que se encuentran más fácilmente en las empresas.

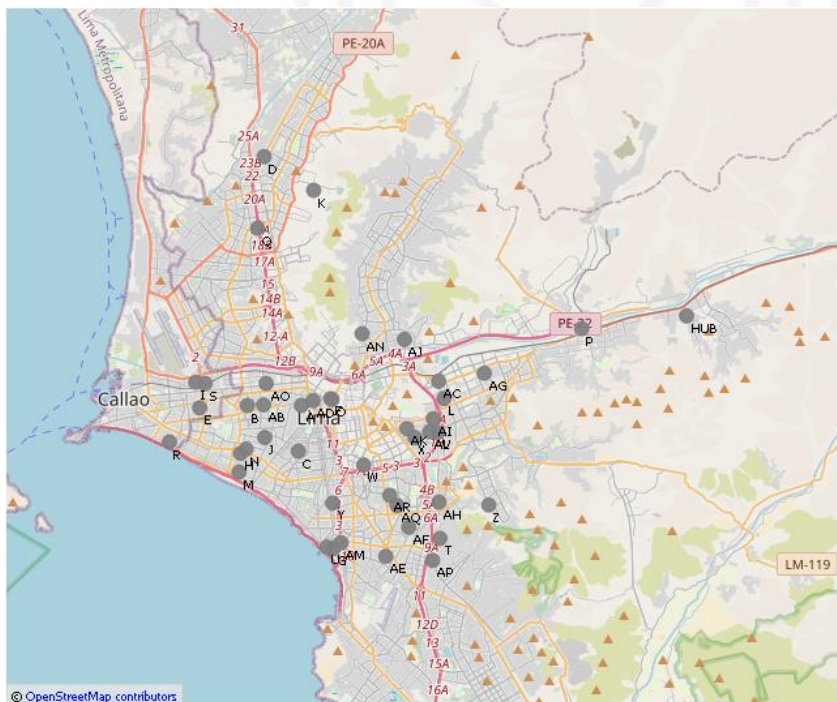
## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Localización de almacén

El primer paso para la optimización del sistema de distribución la empresa de embotellamiento de agua es localizar un almacén dado que la ubicación de los puntos de demanda y su distancia del almacén a cada uno de los puntos es excesivamente grande: hay 43 puntos de demanda y un centro de producción y distribución “HUB” como se evidencia en la Figura 2.1.

#### Figura 2.1

*Puntos de demanda y centro de distribución*



Es necesario considerar un almacén que tome en consideración el peso de cada punto de demanda, así como las distancias de uno del otro. Primero, un estudio ABC se realizará en el que los ingresos mensuales de cada clientes serán tomados en cuenta para la metodología P-Median (solo los que representan el 85% de ventas).

Luego, para las distancias entre coordenadas en la matriz de distancia, la fórmula Haversine debe ser usada de modo que la matriz use las distancias tomando en consideración la forma de esfera del planeta. La metodología de la P-median trata en localizar un número de instalaciones P para que la distancia ponderada entre las instalaciones p y los puntos de demanda sea la mínima. La P-Median puede ser explicada como lo siguiente (1-6).

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

Sujeto a

$$\sum_j Y_{ij} = 1 \quad \forall i \quad (2)$$

$$\sum_j X_j = P \quad (3)$$

$$Y_{ij} - X_j \leq 0 \quad \forall i, j \quad (4)$$

$$X_j = 0, 1 \quad \forall j \quad (5)$$

$$Y_{ij} = 0, 1 \quad \forall i, j \quad (6)$$

Donde

- $h_i$ = Peso de cada punto de demanda
- $d_{ij}$ = Distancia
- $Y_{ij}$ = Variable de decisión que indique si el viaje entre el nodo i y j se realiza

Luego, la fórmula Haversine se explica a continuación:

$$2 \sin^{-1} \left[ \sqrt{\sin^2 \left( \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2} \right) + \cos \varphi_1 \cdot \cos \varphi_2 \cdot \sin^2 \left( \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{2} \right)} \right] \quad (7)$$

Donde

- $\varphi_1, \varphi_2$  son la latitud del punto 1 y latitud de del punto 2.
- $\lambda_1, \lambda_2$  son la longitud de del punto 1 y la longitud de del punto 2.

Finalmente, las hojas de cálculo de Excel se usan para llevar a cabo la metodología P-Median como lo hizo Brusco (2022) y la coordenada resultante será la que cumpla con las condiciones.

## 2.2 K-means Clustering

El agrupamiento es un paso previo a la optimización de rutas dado que permite reducir la magnitud del VRP (Le et al., 2022). En este caso de estudio, el objetivo del algoritmo K-means es determinar la agrupación óptima de clientes de acuerdo con su geolocalización para programar entregas de manera eficiente.

El algoritmo itera reiteradamente para decidir los miembros de cada clúster basado en la distancia mínima desde el centro del clúster. Estos centros son definidos de manera aleatoria hasta que se logre la clasificación óptima, que maximiza la distancia interclase y minimiza la distancia intraclase, resultando en un puntaje Silhouette Score (puntaje de silueta), el cual a mayor valor indica una mejor cohesión intraclase y mayor separación interclase. Se calcula mediante la fórmula:

$$S(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max\{a(i), b(i)\}}$$

- a: es la distancia media entre una muestra y todos los otros puntos de la misma clase
- b: es la distancia media entre una muestra y todos los otros puntos en el siguiente clúster más cercano

Le et al. (2022) explica el modelo matemático de la siguiente manera: dado un conjunto de datos  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  donde cada  $x_i$  es un vector en  $\mathbb{R}^d$ , se agrupan los datos en K clústeres  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_K\}$  de modo minimice la distancia intraclase, es decir con respecto a su centroide:

$$\min_C \sum_{i=1}^K \sum_{x \in C_i} \|x - \mu_i\|^2$$

Donde  $\mu_i$  es el centroide del clúster  $C_i$ :

$$\mu_i = \frac{1}{|C_i|} \sum_{x \in C_i} x$$

Para este caso de estudio, el procedimiento K-means usa la métrica de la distancia euclidiana y los centros de los clústeres empezarán a través del muestreo aleatorio.

### 2.3 Optimización de rutas

El algoritmo de optimización por colonia de hormigas (ACO) es un método metaheurístico inspirado en el comportamiento colectivo de hormigas reales para encontrar rutas óptimas entre su colonia y fuentes de alimento. (Korzeń & Gisterek, 2024)

Para determinar la secuencia óptima de atención que reduzca la distancia recorrida se utilizó el algoritmo ACO. La función objetivo del código fue encontrar el camino de recorrido óptimo para atender los puntos de demanda basado en la distancia euclidiana entre puntos.

Las variantes conocidas de este son: capacidad limitada del camión (600 litros), el camión sale del almacén y regresa al mismo almacén, los tiempos de entrega varían dependiendo del volumen y funciona bajo demanda constante.

El sistema se representa como grafo  $G = (N, E, D)$  donde:

- $N$ : Conjunto de nodos (clientes, centros de distribución)
- $E$ : Conjunto de aristas (rutas posibles)
- $D = \{d_{ij}\}$ : Matriz de distancias euclidianas entre nodos

#### Mecanismo de actualización de feromonas

En un principio, se define la probabilidad  $p_{ij}^k$  de que una hormiga seleccione la ruta  $(i,j)$  combina feromonas e información heurística (distancia inversa o atractivo de la ruta):

$$p_{ij}^k = \frac{[\tau_{ij}]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{l \in \text{vecinos}} [\tau_{il}]^\alpha \cdot [\eta_{il}]^\beta}$$

- $\eta_{ij} = 1/d_{ij}$  (heurística de distancia)

Cada ruta  $(i,j)$  tiene un nivel de feromona  $\tau_{ij}$  que se actualiza iterativamente, las hormigas artificiales depositan feromonas al recorrer rutas, con mayor intensidad en trayectorias más cortas.

$$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}$$

donde  $\rho \in [1]$  es la tasa de evaporación y  $\Delta\tau_{ij}$  el refuerzo feromonal proporcional al desempeño de la ruta. Como resultado, el algoritmo calcula la distancia total que toma recorrer cada ruta y busca minimizar la distancia total recorrida:

$$\text{Min } Z = \sum_{(i,j) \in R} d_{ij} \cdot x_{ij}$$

donde  $x_{ij}$  es la variable binaria que indica uso de la ruta  $i \rightarrow j$  y  $R$  representa la solución.

## Parámetros operativos

**Tabla 2.1**

*Parámetros operativos*

Variable	Influencia	Rango óptimo
$\alpha$	Atracción feromonal	1
$\beta$	Peso distancia	2
$\rho$	Evaporación	0.1

Asimismo, se requieren los siguientes datos de entrada para poder ejecutar la programación:

**Tabla 2.2**

*Geocodificación de puntos de entrega para iteración ACO*

Punto	Latitud	Longitud	Cluster	Demanda
Almacén	-12.1293	-77.0289	C1	80
G	-12.1293	-77.0289	C1	60
U	-12.1285	-77.0323	C1	80
W	-12.0864	-77.013	C1	40
Y	-12.1059	-77.0293	C1	70

## 3. RESULTADOS

### 3.1 Nueva localización de instalación

Los siguientes puntos de demanda fueron ubicados en la figura 2.1. Después de haber realizado el estudio ABC, se obtuvieron puntos que representan el 85% de las ventas en un mes. Además, aquellos puntos que se encuentren en zonas urbanas no son

considerados dentro del estudio. Los puntos aptos serán utilizados para la metodología P-Median.

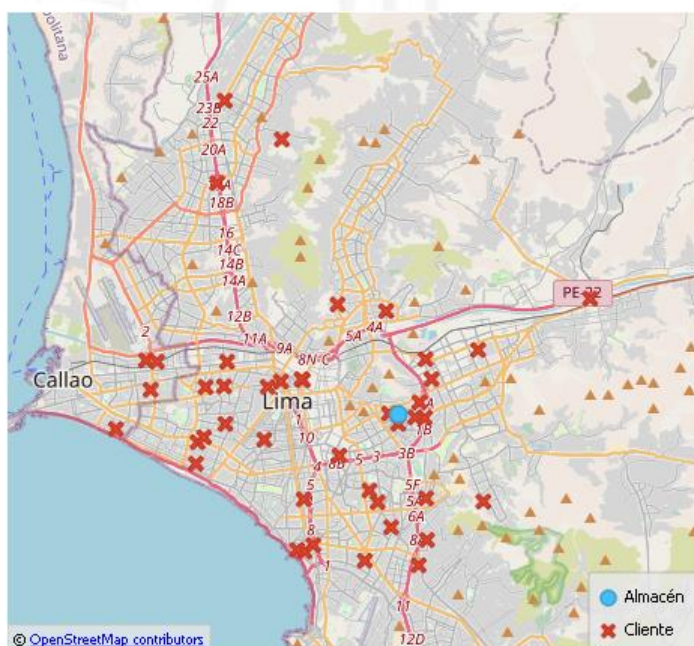
Finalmente, se obtuvieron 3 puntos óptimos para la nueva localización del almacén. Estos 3 cuentan con las menores distancias al recorrer todos los puntos y regresar al punto de partida. Para obtener el resultado final, se realizó una matriz de enfrentamiento considerando 3 factores fundamentales: Número de almacenes existentes, costo por metro cuadrado y acceso a las calles. Tras haber realizado el estudio se decidió que la opción óptima para ubicar el almacén es en la zona cercana al punto de demanda número 3 (Jirón Mariscal Agustín Gamarra 422, San Luis 15022).

Después de que se obtenga el punto que asegure el menor recorrido para la localización óptima del nuevo almacén, se obtienen las siguientes coordenadas y se presentan en la figura 3.1:

- Latitud: -12.0678748; Longitud: -76.9859742

### Figura 3.1

*Geolocalización de nuevo centro de distribución.*

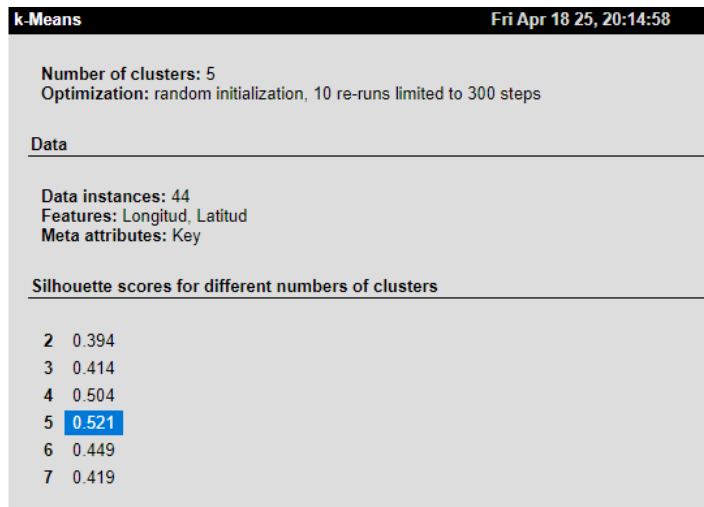


### 3.2 Clustering y optimización de rutas

En primer lugar, se ejecutó el algoritmo de clustering K-means. Inicialmente, el algoritmo indicaba un mejor puntaje de silueta a la cantidad de 5 clústeres como se aprecia a continuación.

**Figura 3.2**

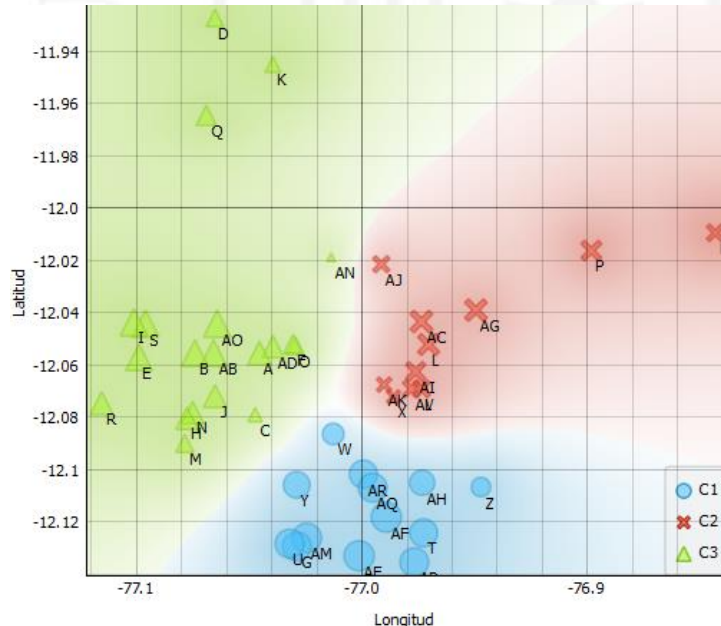
*Resultado inicial silhouette scores*



Sin embargo, se optó por elegir 3 clústeres, ya que dos grupos contaban con pocas instancias para ser consideradas como un clúster. El resultado final del agrupamiento se aprecia en la siguiente figura:

**Figura 3.3**

*Clustering de los puntos de demanda*



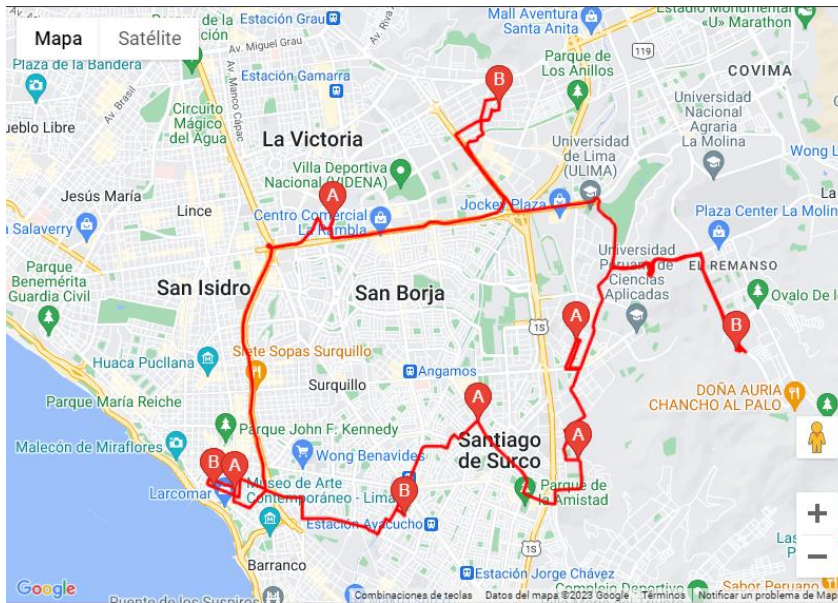
Consolidados los clústeres y la demanda de los puntos de entrega, se ejecutó la programación de rutas usando ACO. Los resultados principales de la simulación: distancia recorrida por día, demanda atendida por día y secuencia de atención a cada punto de demanda por día. En los siguientes gráficos y tablas se pueden apreciar la ruta trazada por el algoritmo utilizado para el día 1, la comparativa de distancias recorridas

por día antes y después de la solución, una comparativa entre los resultados de programación por día y los resultados económicos asociados a la solución.

Se evidencia la ruta trazada a recorrer en la Figura 3.4.

**Figura 3.4**

*Ruta óptima trazada por ACO para Día 1*



**Tabla 3.1**

*Recorridos diarios con Ant Colony Optimization*

Día	Secuencia	Recorridos Mejora Propuesta (km)	Recorridos Escenario Base (km)
1	ALM, W, U, G, AE, AF, T, Z, AH, ALM	45.4	70.7
2	ALM, L, AG, P, AH, T, G, U, ALM	62.1	92.5
3	ALM, X, V, P, AG, AC, L, ALM	35.8	79.3
4	ALM, AD, A, C, AB, B, E, K, ALM	73.1	70.5
5	ALM, AD, A, C, R, D, ALM	77.8	90.1
6	ALM, F, B, H, E, K, ALM	74.6	81.2
7	ALM, Q, I, E, H, J, O, ALM	64.9	141.8
8	ALM, J, N, M, E, O, ALM	48.2	78.0
9	ALM, Y, N, E, S, O, ALM	45.1	97.0

**Tabla 3.2***Evaluación de resultados de programación por día*

<b>Concepto</b>	<b>Escenario Base</b>	<b>Mejora Propuesta</b>	<b>Variación %</b>
Distancia promedio Almacén – Clientes (km)	21.2	7.3	-65.6%
Eficiencia de camión	60%	96%	36.0%
Distancia total recorrida por día (km)	82	58.5	-28.7%
Costo de combustible	48.03	34.26	-28.7%
Costo fijo del vehículo	35.75	35.75	-
Jornada del conductor	66.67	66.67	-
Demanda diaria (litros)	353	575	62.9%
Costo unitario (soles/litro)	0.43	0.24	-44.2%

**Tabla 3.3***Resultados económicos de mejora aplicada*

<b>Concepto</b>	<b>Costo</b>	<b>Beneficio</b>
Beneficio en costo (soles/mes)		S/ 2,710
Beneficio en utilidad marginal (soles/mes)		S/ 1,896
Costos asociados a la mejora (soles/mes)	S/ 2,852	
<b>Total/mes</b>		<b>S/ 1,754</b>

### 3.3 Evaluación de sostenibilidad

Se evaluó el software COPERT V para medir el impacto ambiental de la solución aplicada. En primer lugar, se necesitan las temperaturas (°C) mínimas y máximas, así como la humedad relativa y el número de vehículos utilizados (1 vehículo), la velocidad promedio anual (45 Km/h), el kilometraje aproximado anual (41 600) y el tipo de flota (Euro3).

**Tabla 3.4***Temperatura mínima, máxima y la humedad relativa en 2024*

<b>Mes</b>	<b>T<sub>min</sub></b>	<b>T<sub>max</sub></b>	<b>H<sub>rel</sub></b>
Enero	18,9	24,4	83
Febrero	20	24,4	83
Marzo	19,8	25,1	83
Abril	18,3	25,1	83

(continúa)

(continuación)

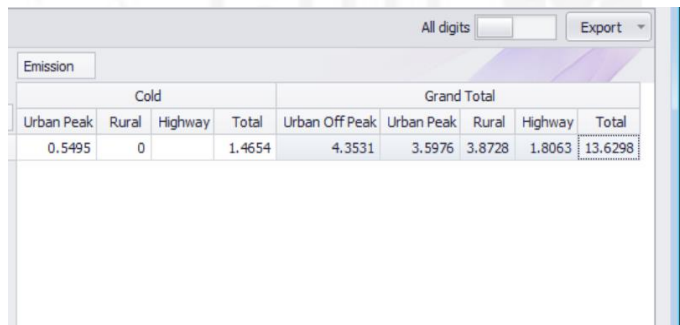
Mes	Tmin	Tmax	Hrel
Mayo	16,4	23,7	81
Junio	15	21,7	80
Julio	14,3	20,2	78
Agosto	14,1	19,6	77
Septiembre	14,4	19,6	77
Octubre	15	20,7	78
Noviembre	15,8	21,6	79
Diciembre	17,4	23	81

Nota. De Climate Data. <https://es.climate-data.org/america-del-sur/peru/lima/lima-1014/>

En la figura 3.5 se pueden apreciar los resultados del COPERT V, que demuestran que la aplicación del método heurístico utilizado es óptima al mostrar las toneladas de gases de efecto de invernadero por la reducción del kilometraje. La emisión de gases de efecto de invernadero se redujo en 10% (1,36 Toneladas de gases de dióxido de carbono).

### Figura 3.5

*Resultado total de emisiones de gases de efecto invernadero*



The screenshot shows the COPERT V software interface. At the top, there are options for 'All digits' and 'Export'. Below this is a table with the following data:

Cold				Grand Total				
Urban Peak	Rural	Highway	Total	Urban Off Peak	Urban Peak	Rural	Highway	Total
0.5495	0		1.4654	4.3531	3.5976	3.8728	1.8063	13.6298

## 4. DISCUSION

El problema de localización discreta fue resuelto de manera eficiente mediante el uso de la P-Median y las hojas de cálculo de Excel junto con el complemento Solver como se hizo lo hizo Brusco (2022). Este último permitió su solución sencilla, pues la problemática no contaba con una cantidad grande de puntos de demanda; caso contrario, las limitaciones del Solver no hubieran permitido solucionar el problema tal como se evidencia en (Gwalani et al., 2021). La P-Median se recomienda para optimizar sistemas de distribución que se encuentran en una etapa temprana de desarrollo por su cantidad menor de puntos de demanda y volumen de productos a entregar.

Respecto al apartado económico de la P-median, se obtuvo una reducción de costo de transporte de 16,44% (Considerando costo fijo del vehículo y combustible) que si bien no se compara con el 56,75% logrado en otros estudios (Sbatian et al, 2021), es un resultado para nada despreciable pues a diferencia del estudio. Este caso de estudio se desarrolla en una ciudad; mientras que, el estudio con el que se compara se realiza en unas 10 ciudades. Por otro lado,

Al usar el estudio ABC, la P-Median solo toma en consideración los puntos de demanda más importantes. Asimismo, el almacén localizado se encuentra considerablemente más cerca a todos los puntos, disminuyendo la distancia entre los puntos de entrega y el almacén en un promedio de 65,6% como lo hicieron Espejo y Martin (2023). Además, recursos utilizados para los despachos como el tiempo y combustible se reducen al tener menores distancias que recorrer entre puntos y también entre los puntos de demanda y el almacén.

El uso del COPERT V demuestra que tras la propuesta de solución existen ventajas relacionadas al ámbito ambiental. En este contexto, se logró reducir en un 10% la emisión de los gases de efecto de invernadero considerando datos del año 2024.

Para la optimización de las entregas, el algoritmo K-means fue requerido para la determinación de las áreas de servicio y poder segregar los puntos de entrega. También, las entregas se programaron por clúster y demanda sujetos a la capacidad máxima del camión. El impacto se evidenció en la capacidad utilizada del camión que aumentó a 93%, una mejora positiva como en (Le et al., 2022). Respecto a la planificación de rutas, el ACO junto con la técnica de clustering han demostrado la reducción de la distancia promedio recorrida en un 28%. Por otro lado, al comparar la reducción de 16,44% de costos de transporte (Seçkiner et al., 2021) con el caso de estudio, se observa una mejora no tan alejada dando a entender que los resultados de mejora al aplicar el algoritmo de colonia de hormigas no difieren mucho.

## **5. CONCLUSIONES**

En primer lugar, se revisó y comprendió el marco teórico relacionado con el problema de distribución y las técnicas de optimización empleadas. La aplicación de métodos como el modelo p-mediana, el algoritmo de clustering K-means y la metaheurística Ant Colony Optimization (ACO) permitió abordar el problema de distribución desde una perspectiva

integral, combinando herramientas de localización de centros de distribución, agrupamiento de demanda y optimización de rutas.

Se demostró que la técnica P-median es eficaz y efectiva para solucionar problemas asociados a la definición de la ubicación de instalaciones. Esta puede ser complementada con una técnica de selección de instalación, como la de Brown-Gibson. Luego, se propuso un modelo de mejora aplicado al proceso de distribución de agua embotellada, el cual integra dichas técnicas en una solución sinérgica. Esta propuesta de solución de ingeniería permitió redistribuir estratégicamente los puntos de entrega, asignar rutas más eficientes al vehículo y optimizar el uso de recursos logísticos que podrían asignarse a otro departamento.

La validación de la solución mediante la simulación evidenció una reducción significativa tanto en el kilometraje total recorrido como en los tiempos de entrega, lo que se tradujo en una mejora sustancial en los costos operativos. Además, se observó un incremento en la capacidad de atención de la demanda, lo cual valida la viabilidad económica de la propuesta. Estos resultados confirman la efectividad del modelo propuesto como una solución aplicable y escalable para la mejora de procesos logísticos en empresas del sector.

Las empresas cuya cadena de suministros incluya despacho propio deberían desarrollar soluciones que mejoren su sistema de ruteo para optimizar su productividad y la satisfacción de sus clientes. Además, los métodos planteados para este tipo de problemáticas se caracterizan por su bajo costo y fácil implementación.

El beneficio económico no se reflejará de manera inmediata sino hasta un año de ejecución para obtener una data en un periodo de tiempo con la cual pueda analizarse el verdadero impacto; sin embargo, a simple vista se puede calcular un monto no tan alejado de la realidad, pues los resultados entre estudios no difieren mucho uno del otro.

Por último, el uso de COPERT V en problemas de ruteo se pueden obtener las métricas para determinar el impacto ambiental de un proyecto. El programa ofrece un indicador de rendimiento ambiental que ayuda a conocer el impacto real de la propuesta de solución, y especifica la cantidad de toneladas de dióxido de carbono que se evitan. Asimismo, se puede configurar el COPERT V para que los resultados sean lo más exactos posibles al indicar el tipo de flota, kilometraje recorrido en un año y las temperaturas mínimas y máximas en la zona en la que el estudio se realice.

## 6. REFERENCIAS

- Agárdi, A., Kovács, L., & Bányai, T. (2021). Ant Colony Algorithms For The Vehicle Routing Problem With Time Window, Period And Multiple Depots. *Manufacturing Technology Journal*, 21(4), 422-433. doi: 10.21062/mft.2021.054
- Barcos, L., Rodríguez, M., Álvarez, M. (2002). Algoritmo basado en la optimización mediante colonias de hormigas para la resolución del problema del transporte de carga desde varios orígenes a varios destinos. V Congreso de Ingeniería del Transporte.
- Brusco, M. (2022). Solving Classic Discrete Facility Location Problems Using Excel Spreadsheets. *INFORMS TRANSACTIONS ON EDUCATION*, 22(3) 160-171.
- Chen, H., Hatzenbühler, J., Jenelius, E. (2022). Pick-Up and Delivery Problem for Sequentially Consolidated Urban Transportation with Mixed and Multi-Purpose Vehicle Fleet. *Journal of Advanced Transportation*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/2920532>
- ComexPeru. (2022, 8 de abril). *Los costos logísticos de las empresas del país son del 16% en promedio, pero un 21.1% para las microempresas*. ComexPeru <https://www.comexperu.org.pe/articulo/los-costos-logisticos-de-las-empresas-en-el-pais-son-del-16-en-promedio-pero-un-21-1-para-las-microempresas>
- Dirección General de Políticas y Regulación en Transporte Multimodal. (2020). *Encuesta Nacional de Logística*. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/4331508/Encuesta%20Nacional%20de%20Log%C3%ADstica%202020.pdf?v=1681934904>
- Espejo, I., Marín, A. (2023). The p-median problem with upgrading of transportation costs and minimum travel time allocation. *Computers & Operations Research*, 159. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2023.106354>
- Gwalani, H., Tiwari, C., Mikler, A. (2021). Evaluation of heuristics for the p-median problem: Scale and spatial demand distribution. *Computers, Environment and Urban Systems*, 88. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2021.101656>

- He, S., Kuo, Y., Wu, P., (2022). Incorporating institutional and spatial factors in the selection of the optimal location of public electric vehicle charging facilities: A case study of Beijing, China. *Transportation Research*, 67(2016), 131-148.  
<https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.02.003>
- Jaya, P. et al. (2024). Optimization of temporary disposal facilities location with set covering problem model and ant colony optimization algorithm in Ilir Barat I District Palembang. *AIP Conference Proceedings*, 3046(1).  
<https://doi.org/10.1063/5.0194636>
- Korzeń, M., & Gisterek, I. (2024). Applying Ant Colony Optimization to Reduce Tram Journey Times. *Sensors*, 24(19), 6226. <https://doi.org/10.3390/s24196226>
- Le, T. D. C., Nguyen, D. D., Oláh, J., & Pakurár, M. (2022). CLUSTERING ALGORITHM FOR a VEHICLE ROUTING PROBLEM WITH TIME WINDOWS. *Transport*, 37(1), 17-27.  
<https://doi.org/10.3846/transport.2022.16850>
- Octarina, S. et al. (2024). Determining the optimal temporary waste disposal sites in the Alang-Alang Lebar sub-district Palembang using the P-centre location problem and P-median problems. *Journal of Mathematics and Its Applications*, 18(4), 2685-2702. <https://doi.org/10.30598/barekengvol18iss4pp2685-2702>
- Olkhova, M. et al. (2020). City Delivery Routes Planning Based on the Ant Colony Algorithm. *Science & Technique*, 19(4), 356-362.  
<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-4-356-362>
- Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería. (s.f.). Precio del galón de gasolina Premium en soles en Lima. Recuperado el 30 de diciembre de 2024, de <https://www.facilito.gob.pe/facilito/actions/PreciosCombustibleAutomotorAccion.do>
- Peru Retail. (2022, 6 de abril). *Empresas logísticas en el Perú encuentran dificultades en los terminales portuarios*. Peru Retail. <https://www.peru-retail.com/empresas-logisticas-en-el-peru-encuentran-dificultades-en-los-terminales-portuarios/>

Seçkiner, S., Shumye, A., Geçer, C. (2021). Minimizing Solid Waste Collection Routes Using Ant Colony Algorithm: A Case Study in Gaziantep District. *Journal of Transportation and Logistics*, 6(1). [10.26650/JTL.2021.894265](https://doi.org/10.26650/JTL.2021.894265)

Sbastian, F., Ridwan, A., Novitasari, Ni. (2021). Feasibility Analysis of Financial Aspect in Determining Optimal Last Mile Warehouse Location Using P-Median Method. *Advances in Engineering Research*, 210, 332-344.  
10.2991/aer.k.220131.050






## 4% Overall Similarity

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.

### Filtered from the Report

- Bibliography
  - Quoted Text
- 

### Top Sources

- 3%  Internet sources
  - 1%  Publications
  - 2%  Submitted works (Student Papers)
-