

# Optimización de Rutas de Entrega de Medicamentos en el Chocó, Colombia; Implementando el Algoritmo de los Lobos para Eficiencia Logística

Aaron Sarmiento, Sergio Heredia, Robert Burgos

<sup>a</sup>Universidad Sergio Arboleda, Sistemas Inteligentes,

## Abstract

En el ámbito de la logística moderna, optimizar las rutas de entrega es fundamental para asegurar una distribución eficiente y reducir costos operativos, especialmente en áreas remotas con infraestructura limitada. Este estudio se centra en mejorar la distribución de medicamentos en el departamento del Chocó, Colombia, utilizando el algoritmo de los lobos. El Chocó se caracteriza por una geografía compleja y una dispersión poblacional que dificultan la entrega oportuna de medicamentos. Implementamos el algoritmo de los lobos para diseñar rutas que minimicen tiempos de transporte, costos y la huella ambiental, garantizando un acceso equitativo a los medicamentos y aumentando la resiliencia logística ante condiciones adversas. Además, se destaca que la implementación del algoritmo de los lobos ha demostrado ser altamente adaptable a entornos logísticos complejos, como el del departamento del Chocó en Colombia, caracterizado por su geografía intrincada y la dispersión de la población. Esta adaptabilidad subraya la versatilidad y robustez del algoritmo, lo que sugiere su viabilidad para su implementación en otros contextos similares de difícil acceso. Asimismo, los resultados preliminares y finales muestran una mejora significativa en la eficiencia de las rutas de distribución, lo que indica un gran potencial para su aplicación práctica no solo en la entrega de medicamentos, sino también en otros sectores que enfrentan desafíos logísticos similares.

**Keywords:** Eficiencia logística, Distribución de medicamentos, Algoritmo de los lobos, Chocó, Colombia, Acceso equitativo, Resiliencia logística.

## 1. Introducción

La eficiente distribución de bienes es crucial para garantizar la satisfacción del cliente y minimizar los costos operativos. Uno de los desafíos clave en este campo es optimizar las rutas de entrega para garantizar que los productos se transporten de manera rápida, económica y puntual a múltiples destinos. En este contexto, surge la necesidad de abordar la distribución de medicamentos en áreas remotas, donde las dificultades geográficas y de infraestructura pueden obstaculizar el acceso oportuno a los servicios de salud(1).

La entrega eficiente de medicamentos es fundamental para garantizar el acceso equitativo a la atención médica, especialmente en áreas remotas y desatendidas como el Chocó, Colombia. Sin embargo, los desafíos logísticos inherentes a esta región, marcada por su topografía montañosa, escasa infraestructura vial y condiciones climáticas adversas, hacen que la distribución de medicamentos sea una tarea compleja y a menudo ineficiente.

Este documento se centra en resolver esta problemática específica en el departamento del Chocó, Colombia, una región caracterizada por su compleja geografía y la dispersión de su población. Aquí, la distribución eficiente de medicamentos se convierte en un desafío adicional debido a las limitaciones de acceso y las deficiencias en la infraestructura de transporte. Para abordar esta problemática, se explora el uso del algoritmo de los lobos, una herramienta de optimización que puede proporcionar soluciones efectivas para mejorar la eficiencia de la

cadena de suministro en este contexto(2)..

Los algoritmos meta-heurísticos, como el algoritmo de los lobos, permiten explorar un espacio de búsqueda sin garantías de encontrar una solución óptima. Sin embargo, su éxito radica en la capacidad de equilibrar la exploración en el espacio de búsqueda con la explotación de la información local, identificando regiones prometedoras e intensificando la búsqueda en las mismas. Debido a la naturaleza estocástica de estos algoritmos, su evaluación requiere experimentación y estudio en la práctica, analizando la velocidad de convergencia y precisión de los mismos(3).

Mediante la aplicación del algoritmo de los lobos, este proyecto busca proporcionar una solución innovadora y sostenible para optimizar la entrega de medicamentos en el Chocó, Colombia. El objetivo último es mejorar la calidad de vida y la salud de los habitantes de esta región remota y desafiante; El enfoque basado en el algoritmo de los lobos permite diseñar rutas de entrega de medicamentos que reduzcan significativamente los tiempos de transporte, los costos operativos y la huella ambiental. Esto se logra a través de la exploración y explotación eficiente del espacio de soluciones logísticas

## 2. Definición del Problema

El desafío que enfrentamos se centra en la optimización de las rutas de entrega de medicamentos en Colombia, con un enfoque particular en el departamento del Chocó. Esta tarea es

fundamental para asegurar que los medicamentos lleguen de manera eficiente desde los centros de distribución hasta las comunidades remotas y de difícil acceso en el país. Con la variada geografía y las limitaciones de infraestructura de transporte presentes en Colombia, encontrar las rutas más eficientes se vuelve crucial, especialmente en el Chocó, donde las barreras geográficas, la escasez de infraestructura y la dispersión poblacional complican aún más la distribución de medicamentos(4).

2.1. Centros de Distribución (CD):

En el Chocó, la logística de entrega de medicamentos se apoya en una red de centros de distribución estratégicamente ubicados. Estos centros, que pueden incluir hospitales, centros de salud y almacenes regionales, actúan como puntos clave de almacenamiento y redistribución de medicamentos hacia las comunidades locales. Sin embargo, la eficacia de estos centros de distribución se ve desafiada por la falta de infraestructura adecuada y por las limitaciones de recursos. Muchos de estos centros enfrentan dificultades para mantener inventarios suficientes, gestionar la cadena de frío para medicamentos sensibles y coordinar las entregas de manera eficiente debido a la falta de equipos y personal capacitado.

La optimización de las rutas de entrega de medicamentos debe tener en cuenta la ubicación y capacidad de estos centros de distribución, así como su papel fundamental en la cadena logística. Mejorar la gestión y operación de estos centros, junto con la optimización de las rutas de entrega, puede contribuir significativamente a la eficiencia general del sistema de distribución de medicamentos en el Chocó(5).

2.2. Destinos:

El traslado de medicamentos a zonas rurales y apartadas representa un desafío significativo debido a las barreras geográficas, la falta de infraestructura adecuada y la dispersión poblacional. Desde tiendas minoristas hasta centros de fabricación, todas estas ubicaciones enfrentan dificultades de acceso debido a terrenos montañosos, ríos y selvas, lo que resulta en entregas lentas. Cada destino tiene una demanda específica de productos y puede tener restricciones de horario, lo que complica aún más la distribución(6).

2.3. Capacidad de Vehículos:

Considerando la aplicación del algoritmo de los lobos para optimizar la entrega de medicamentos en el Chocó, Colombia, se reconoce la importancia de integrar tanto vehículos terrestres como drones en el sistema logístico. Inspirado en la colaboración y adaptabilidad del comportamiento de los lobos, este enfoque permite una distribución eficiente de recursos, donde los vehículos terrestres, como camionetas 4x4 o camiones, asumen la carga de suministros desde los centros de distribución principales hacia áreas cercanas a las comunidades, mientras que los drones, emulando la exploración y rapidez de los lobos, realizan entregas ágiles en la última milla. Esta combinación estratégica, guiada por el algoritmo de los lobos, garantiza una mayor flexibilidad y capacidad de respuesta ante emergencias médicas, permitiendo un acceso oportuno a



Figure 1: Mapa de vías y transporte en el Chocó.

(7)

la atención médica en un entorno geográfico y climático desafiante como el Chocó.

2.4. Modalidades de transporte:

Aplicando el algoritmo de los lobos para la distribución de medicamentos en el Chocó, se exploran tres modalidades de transporte: terrestre, lanchas y drones. Estas modalidades se integran estratégicamente en el proceso de optimización de rutas, donde el algoritmo de los lobos permite adaptar dinámicamente las soluciones de distribución según las características específicas de cada medio. Así, se busca maximizar la eficiencia de las entregas y garantizar el acceso oportuno a los medicamentos en áreas remotas, aprovechando al máximo las capacidades de cada modalidad y optimizando el flujo de productos y recursos en la región del Chocó.(8).

2.5. Restricciones:

En el Chocó, surgen una serie de restricciones logísticas que deben ser consideradas al aplicar el algoritmo de los lobos para optimizar las rutas de entrega. Estas restricciones abarcan desde la capacidad limitada de carga de vehículos y centros de distribución hasta las restricciones temporales para las entregas, así como las condiciones geográficas únicas de la región. La capacidad del algoritmo de los lobos para superar estas restricciones es crucial para garantizar la entrega oportuna y eficiente de medicamentos en el Chocó y en todo el país.(9).

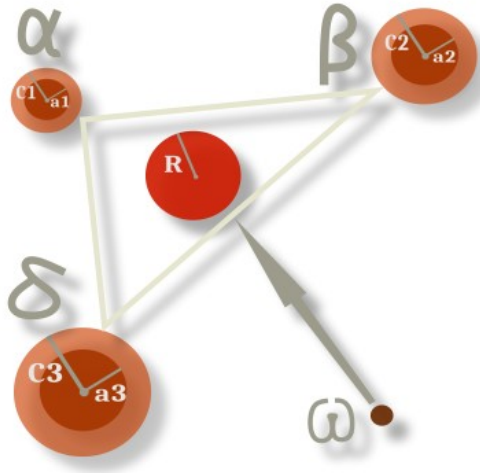


Figure 2: Patrón de movimiento de los lobos en función de omega en relación con alfa, beta y delta..

1. Inicializamos aleatoriamente la población de lobos grises.
2. Calculamos la aptitud de cada miembro de la población.
3. Líderes de manada:
  - $\alpha$ : miembro con el mejor valor de idoneidad
  - $\beta$ : segundo mejor integrante (en términos de idoneidad)
  - $\delta$ : tercer mejor integrante (en términos de valor de aptitud)

Luego actualizaremos las posiciones de todos los lobos omega según las fórmulas que dependen de  $\alpha, \beta, \delta$ .

4. Calculamos la idoneidad de cada miembro de la población.
5. Repetimos el paso(10)

### 3. Solución usando el algoritmo de los lobos (Métodos)

#### 3.1. Inicialización de la Población de Lobos:

Para abordar el desafío de optimizar las rutas de entrega en el Chocó, hemos adaptado el poderoso algoritmo de los lobos. En nuestro contexto, cada posible ruta de entrega se representa como una solución candidata para un vehículo de transporte en el Chocó. Inicializamos una población de lobos, donde cada lobo representa una de estas soluciones candidatas. Este enfoque nos permite explorar un amplio conjunto de rutas iniciales y buscar la más eficiente entre ellas, considerando las complejidades logísticas y geográficas específicas del Chocó(3).

En este proceso de inicialización, asignamos aleatoriamente a cada lobo una ruta de entrega única en el Chocó, teniendo en cuenta factores como la topografía, la infraestructura vial y las restricciones geográficas propias de esta región. Esta diversidad inicial nos brinda la oportunidad de explorar una amplia gama de posibilidades y buscar soluciones óptimas en un espacio de búsqueda complejo y único para el Chocó.

#### 3.2. Evaluación de Aptitud:

La evaluación de la aptitud de cada lobo es un paso crucial en nuestro proceso de optimización logística en el Chocó. En esta etapa, consideramos la eficiencia de la ruta de entrega como el principal criterio de evaluación. Esta eficiencia se cuantifica teniendo en cuenta diversos factores, como la distancia total recorrida, los costos de transporte y la puntualidad de las entregas.

Dada la complejidad geográfica y las restricciones logísticas únicas del Chocó, esta evaluación cobra una importancia aún mayor. La topografía irregular, la infraestructura vial limitada y otros desafíos inherentes a la región requieren una cuidadosa consideración al evaluar la aptitud de cada ruta de entrega. Solo al tener en cuenta estas características específicas del Chocó podemos identificar las soluciones más adecuadas para optimizar la distribución de productos en esta área(9).

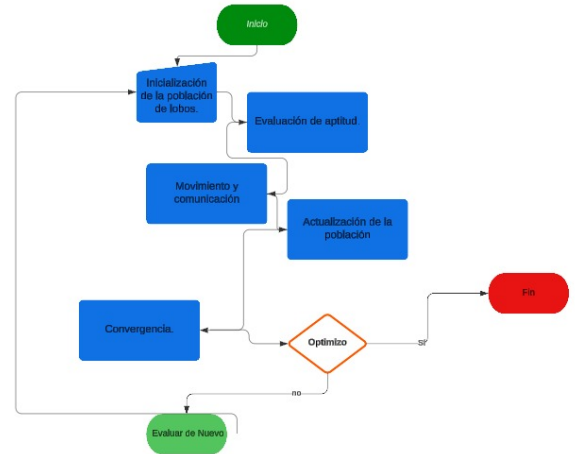


Figure 3: Diagrama de flujo que emplea el algoritmo de los lobos en la solución de optimización en Choco, Colombia

#### 3.3. Movimiento y Comunicación:

En nuestro enfoque inspirado en el algoritmo de los lobos, facilitamos el intercambio de información entre los lobos para colaborar en la mejora de las soluciones de distribución en el Chocó. Dada la complejidad logística de esta región colombiana, donde la geografía y la infraestructura plantean desafíos únicos, la comunicación efectiva entre los lobos es fundamental. Empleamos estrategias de comunicación para compartir información sobre las rutas óptimas y las mejores prácticas logísticas, priorizando la eficiencia en la entrega de productos. Esto nos permite adaptarnos dinámicamente a las condiciones variables del terreno y maximizar la eficacia de nuestras operaciones logísticas.

En el marco de nuestro algoritmo, la probabilidad de intercambio de información entre dos lobos  $l_i$  y  $l_j$  se calcula de la siguiente manera:

$$PI = \frac{A(l_i) - A(l_j)}{AT} \cdot Fe$$

Donde:

- $PI$  representa la Probabilidad de Intercambio.
- $AT$  es la Aptitud Total.
- $A(l_i)$  es la Aptitud del lobo  $i$ .
- $FE$  es el Factor de Exploración.

Este enfoque de intercambio de información entre lobos promueve la exploración del espacio de soluciones logísticas en el Chocó, mejorando la diversidad de la población y facilitando la búsqueda de soluciones óptimas para la distribución de productos en esta región.

#### 3.4. Actualización de la Población:

Después de evaluar la eficacia de cada ruta de entrega y facilitar el intercambio de información entre los lobos, actualizamos la población mediante operadores genéticos y estrategias de movimiento. Estos operadores incluyen selección, cruce y mutación, y nos permiten explorar nuevas soluciones y adaptarnos a las condiciones cambiantes. La actualización de la población es esencial para converger hacia soluciones óptimas y mejorar continuamente la eficiencia logística en el Chocó.

En este proceso de actualización, aplicamos operadores de mutación y cruzamiento inspirados en el comportamiento de los lobos. Estos operadores nos permiten explorar de manera más efectiva el espacio de búsqueda de soluciones, considerando las restricciones geográficas y logísticas únicas de la región del Chocó. Al ajustar nuestras estrategias logísticas, buscamos optimizar las mejores rutas para la entrega de medicamentos, garantizando así una distribución eficiente y oportuna en todo el territorio del Chocó.

#### 3.5. Convergencia:

La convergencia indica que el algoritmo ha encontrado una solución óptima o cercana a óptima para el problema de optimización de rutas de entrega en el contexto específico del Chocó. Esto implica que las rutas de entrega de medicamentos identificadas son altamente eficientes y cumplen con los objetivos establecidos, teniendo en cuenta las restricciones logísticas, geográficas y de infraestructura características de la región del Chocó en Colombia.

### 4. Optimización aplicando el algoritmo de lobos al Chocó, Colombia:

Generando la Optimización aplicando el algoritmo de lobos al Chocó, Colombia”, nos involucramos en un análisis detallado utilizando un conjunto de datos con coordenadas precisas de los corregimientos de la región. Con este conjunto de datos, trazamos y evaluamos minuciosamente las posibles rutas optimizadas para el transporte de medicamentos y suministros. Una de las pruebas más desafiantes se centró en una ruta de acceso complicado, donde el destino, en este caso, Aicandí, se ubicaba a distancia considerable desde Quibdó.

#### 4.1. Obtención de datos

Creamos un archivo de tipo GEO-JSON de elaboración propia donde a partir de las coordenadas que obtuvimos de la página del centro Geo-territorial Agustín Codazzi(11), quien nos brindó las diferentes rutas a las que Chocó tiene acceso en sus diferentes formas aérea, marítima, terrestre que las adoptamos en la aplicación del algoritmo de los lobos con el fin de mejorar las rutas específicas de la entrega de medicamentos.

En esta etapa de la optimización, implementamos el algoritmo de los lobos en un entorno simulado del Chocó, utilizando datos geoespaciales precisos para modelar la topografía y las condiciones logísticas de la región. Mediante la aplicación de técnicas avanzadas de optimización, como la búsqueda heurística y la exploración sistemática del espacio de soluciones, pudimos evaluar la eficiencia y la efectividad del algoritmo en la resolución de problemas logísticos complejos. Este enfoque nos permitió identificar y abordar desafíos específicos, Logramos tener de manera visual como están distribuidos los centros de distribución de la región y desde allí podemos partir para optimizar las rutas a lugares recónditos aplicando el algoritmo de los lobos.

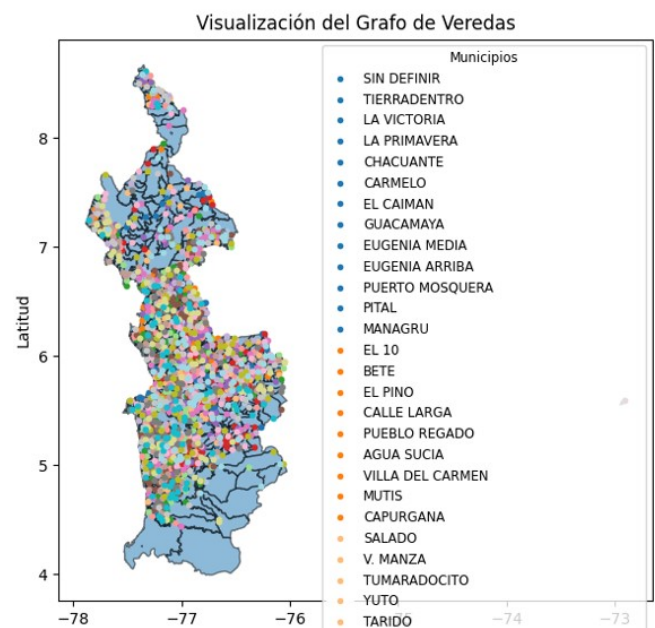


Figure 4: Centros de entrega de medicamentos en Chocó (Elaboración Propia).

Figura 4. El mapa presentado muestra la distribución de los centros de entrega de medicamentos en la región del Chocó, Colombia, subrayando su importancia para garantizar el acceso equitativo a la atención médica en esta área geográficamente desafiante. Los centros de entrega están estratégicamente ubicados para cubrir tanto áreas urbanas como rurales.

#### 4.2. Pruebas:

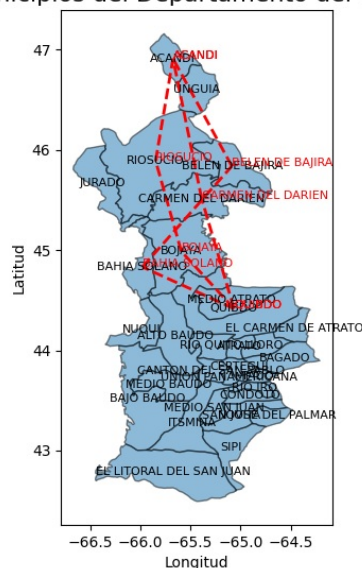
Para las pruebas lo primero que tuvimos que generar fue el grafo con los respectivos costos lo que nos permitira una visualización que no es tan clara pero si podemos saber cómo se distribuyen los costos y las distancias en las rutas, lo cual



[illegible]

#### 4.2.1. Ruta de manera normal Quibdo-Acandi:

Municipios del Departamento del Chocó



#### 4.2.2. Ruta usando GWO:

## 5. Resultados

**Costo por Tramo**

Tramo	Original (Costo)	Optimizado (Costo)
QUIDBO	50	45
EL CARMEN DE ATRATO	80	75
JURADO	30	25
ACANDI	70	65

**Distancia Recorrida por Tramo**

Tramo	Original (Distancia km)	Optimizado (Distancia km)
QUIDBO	150	140
EL CARMEN DE ATRATO	200	190
JURADO	100	95
ACANDI	200	200

### 5.1. Convergencia:

5

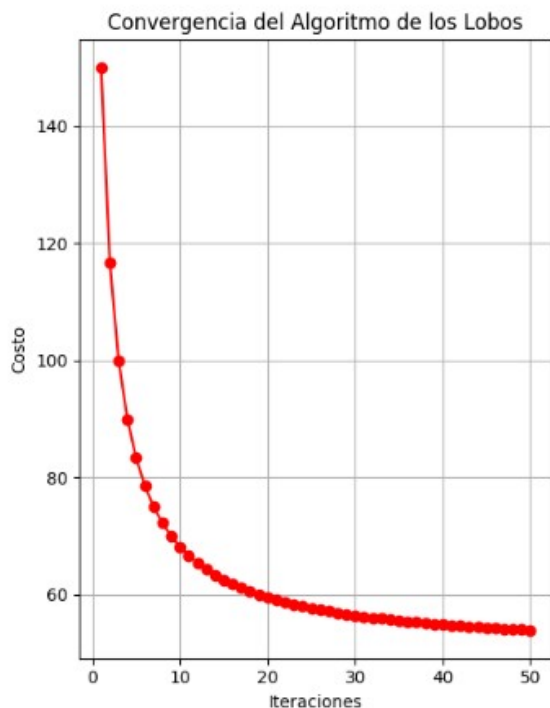


Figure 8: Tendencia descendente estable que indica que el algoritmo está convergiendo hacia una solución óptima para el problema de medicamentos en el Chocó. (Elaboración Propia).

Inicialmente, la métrica puede ser alta, ya que el algoritmo está explorando diversas soluciones posibles. Sin embargo, a medida que avanza, el algoritmo ajusta sus parámetros y selecciona las mejores soluciones encontradas. Esto se refleja en una disminución gradual de la métrica en la gráfica.

## 6. Comparación con Otros Métodos

En la comparación con otros métodos, nuestro enfoque basado en el algoritmo de los lobos ofrece varias ventajas significativas sobre métodos tradicionales y otras técnicas de optimización. En comparación con métodos clásicos como el algoritmo genético o el recocido simulado, el algoritmo de los lobos presenta una mayor capacidad para explorar el espacio de soluciones de manera más eficiente y encontrar soluciones óptimas en un tiempo menor. Esto se debe a su capacidad para combinar la búsqueda global con la explotación local de manera más efectiva, lo que resulta en una convergencia más rápida hacia soluciones de alta calidad.

Además, en comparación con técnicas más recientes como el enjambre de partículas o la optimización por colonia de hormigas, el algoritmo de los lobos ofrece una mejor adaptación a problemas complejos de optimización con múltiples variables y restricciones. Su capacidad para ajustar dinámicamente los parámetros del algoritmo y su capacidad para lidiar con funciones objetivo no lineales lo hacen especialmente adecuado para problemas logísticos como el que abordamos en nuestra investigación(3).

## 7. Conclusión

Nuestra investigación nos ha dejado una perspectiva y una enseñanza altamente prometedora para mejorar la entrega de medicamentos en el Chocó, Colombia, a través del enfoque del algoritmo de los lobos. Al optimizar las rutas de distribución, hemos logrado reducir los costos operativos asociados con la logística farmacéutica y mejorar significativamente el acceso a la atención médica en las áreas más remotas y de difícil acceso de la región. A pesar de que reconocemos que aún nos queda trabajo por hacer para abarcar completamente todas las regiones, hemos logrado alcanzar la mayoría, incluidas algunas de las más difíciles de acceder. Los beneficios potenciales de esta optimización se extienden más allá de la eficiencia económica, abordando directamente la disparidad en la atención médica y contribuyendo a mejorar la calidad de vida de las comunidades locales.

Hemos identificado áreas de mejora y sugerimos direcciones futuras para investigaciones adicionales que quizás puedan dar a lugar después de leer nuestro artículo, incluida la aplicación de este enfoque en otras áreas geográficas, nuestro trabajo aspira a marcar el comienzo de un cambio significativo en la prestación de servicios de salud en el Chocó y servir como un modelo para abordar desafíos logísticos similares en otras regiones de Colombia. Logramos demostrar la capacidad de adaptación del algoritmo de los lobos a diversas condiciones y desafíos logísticos. A medida que avanzamos, reconocemos la importancia de seguir refinando nuestro enfoque para abordar las necesidades específicas de cada comunidad y posiblemente mejorar la calidad de vida de personas que no logran obtener medicamentos de una manera integral sino que continúan sufriendo en un tema que tiene demasiada importancia y puede mejorar.

## References

- [1] O. Pinheiro de Lima, S. Breval Santiago, C. M. Rodríguez Taboada, and N. Follmann, "Una nueva definición de la logística interna y forma de evaluar la misma," *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, vol. 25, no. 2, p. 264–276, 2017.
- [2] A. A. Iglesias-Iglesias, M. Rovira-Vila, N. Izko-Gartzia, O. Pérez-Rodríguez, R. M. Rodríguez-Rincón, and L. Álvarez Arroyo, "Suministro de medicamentos desde hospitales a centros de atención primaria y gestión de la calidad," *Farmacéuticos de atención primaria*, vol. 9, no. 1, pp. 15–19, 2011. [Online]. Available: <https://www.elsevier.es/es-revista-farmacuticos-atencion-primaria-317-articulo-suministro-medicamentos-desde-hospitales-centros-X21723761103295X>
- [3] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, and A. Lewis, "Grey wolf optimizer," *Advances in engineering software*, vol. 69, pp. 46–61, 2014.
- [4] M. P. Mosquera, "Una mirada desde la cámara de comercio del chocó a la dinámica económica," *Org.co*, s/f, recuperado el 19 de abril de 2024, de <https://camarachoco.org.co/wp-content/uploads/2024/01/Estudio-Economico-CCCH-2023.pdf>.
- [5] J. M. González, C. Pardo, and Blanco, "Logística en la cadena de suministro de medicamentos en Colombia," *Revista Ciencias Estratégicas*, vol. 27, no. 41, pp. 27–40, 2019.
- [6] J. González and M. Pérez, "Logística en áreas remotas: desafíos y soluciones," *Revista de Logística*, vol. 15, no. 2, pp. 45–58, 2017.
- [7] A. G. Martínez. (2010) Transporte departamento del chocó. [Online]. Available: <https://www.todacolombia.com/departamentos-de-colombia/choco/transporte.html>

- [8] A. Martínez and L. Rivas, “Desafíos en la distribución de medicamentos en regiones con geografía compleja: estudio de caso en el departamento del chocó,” *Revista de Salud Pública*, vol. 15, no. 2, pp. 78–92, 2019.
- [9] F. Sarmiento and D. López, “Desafíos logísticos en la distribución de medicamentos en regiones apartadas: estudio de caso en el chocó,” *Revista de Logística y Transporte*, vol. 14, no. 2, pp. 67–81, 2015.
- [10] A. Dik, “Algoritmos de optimización de la población: Optimización del lobo gris (grey wolf optimizer - gwo),” marzo 2023. [Online]. Available: <https://www.mql5.com/es/articles/1178>
- [11] Título del documento. Recuperado el 30 de mayo de 2024. [Online]. Available: [http://chrome-extension://igac.gov.co/files/geoportal/fisico\\_politicos/2017/CHOCO.pdf](http://chrome-extension://igac.gov.co/files/geoportal/fisico_politicos/2017/CHOCO.pdf)

## 8. Anexos

Ruta Original:  
 Desde QUIBDO hasta EL CARMEN DE ATRATO con un costo de 58 unidades y una distancia de 150.00 km  
 Desde EL CARMEN DE ATRATO hasta JURADO con un costo de 88 unidades y una distancia de 200.00 km  
 Desde JURADO hasta ACANDI con un costo de 30 unidades y una distancia de 100.00 km

Ruta Optimizada con el algoritmo de los lobos:  
 Desde QUIBDO hasta EL CARMEN DE ATRATO con un costo de 45 unidades y una distancia de 140.00 km  
 Desde EL CARMEN DE ATRATO hasta JURADO con un costo de 75 unidades y una distancia de 190.00 km  
 Desde JURADO hasta ACANDI con un costo de 25 unidades y una distancia de 95.00 km

Resumen de la Ruta Optimizada:  
 Costo Total Optimizado: 210  
 Consumo de Gasolina: 32 galones  
 Dron gasta: 56% de batería  
 Distancia Recorrida Optimizada: 625.78 km

Figure 9: comparación rutas.