



1

## APLICACIÓN DE LA TEORÍA DE GRAFOS EN LA OPTIMIZACIÓN DE REDES DE TRANSPORTE

### APPLICATION OF GRAPH THEORY IN TRANSPORTATION NETWORK OPTIMIZATION

### APLICAÇÃO DA TEORIA DOS GRÁFOS NA OTIMIZAÇÃO DE REDES DE TRANSPORTE

**José Enrique Allauca Melena<sup>1</sup>**

allauca.jose@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0008-1417-1341>

**Recibido:** 07/07/23

**Aceptado:** 11/08/23

**Publicado:** 05/09/23

**Correspondencia:** allauca.jose@gmail.com

1. Estudiante de Ingeniería en Tecnologías de la Información, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.

## RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue modelar una red de transporte como un grafo y aplicar algoritmos de la teoría de grafos para encontrar rutas óptimas que minimicen tiempos y costos. Se modeló la red de una empresa de transporte como un grafo dirigido valorado con nodos (estaciones) y aristas (rutas) ponderadas por tiempo y costo. Mediante los algoritmos de Dijkstra y Floyd-Warshall se determinaron los caminos mínimos entre cada par de nodos. Los resultados permitieron identificar oportunidades de mejora en la asignación de rutas, logrando reducir los tiempos de entrega promedio en un 8% y costos en un 5%, demostrando la utilidad de la teoría de grafos para la optimización de redes de transporte.

**Palabras clave:** teoría de grafos, optimización, redes, transporte.

## ABSTRACT

The objective of this research was to model a transportation network as a graph and apply graph theory algorithms to find optimal routes that minimize time and cost. The network of a transport company was modeled as a valued directed graph with nodes (stations) and edges (routes) weighted by time and cost. Using the Dijkstra and Floyd-Warshall algorithms, the shortest paths between each pair of nodes were determined. The results made it possible to identify opportunities for improvement in route assignment, managing to reduce average delivery times by 8% and costs by 5%, demonstrating the utility of graph theory for the optimization of transportation networks.

**Keywords:** graph theory, optimization, networks, transport.

## RESUMO

O objetivo desta pesquisa foi modelar uma rede de transporte como um grafo e aplicar algoritmos da teoria dos grafos para encontrar rotas ótimas que minimizem tempos e custos. A rede de uma empresa de transporte foi modelada como um grafo direcionado valorizado, com nós (estações) e arestas (rotas) ponderadas por tempo e custo. Através dos algoritmos de Dijkstra e Floyd-Warshall, foram determinados os caminhos mínimos entre cada par de nós. Os resultados permitiram identificar oportunidades de melhoria na alocação de rotas, reduzindo os tempos médios de entrega em 8% e os custos em 5%, demonstrando a utilidade da teoria dos grafos para a otimização de redes de transporte.

**Palavras-chave:** teoria dos grafos, otimização, redes, transporte.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las redes de transporte se pueden modelar como grafos, donde los nodos representan localizaciones y las aristas representan rutas entre ellas. La teoría de grafos provee algoritmos que permiten analizar estos modelos y hallar soluciones óptimas a problemas de enrutamiento (Ahuja et al., 1993). En particular, los algoritmos de caminos mínimos como Dijkstra y Floyd-Warshall pueden ser de gran utilidad para empresas de transporte buscando minimizar tiempos y costos de sus operaciones.

La optimización de redes de transporte es un problema fundamental en logística, con importante impacto económico y ambiental para países y organizaciones (Lium et al., 2009). Encontrar las rutas que minimicen tiempos y costos permite mejorar la eficiencia de cadenas de suministro y la competitividad de empresas de transporte (Chang, 2008).

En las últimas décadas, enfoques basados en la teoría de grafos y el área de Investigación Operativa han demostrado un gran potencial para modelar y optimizar redes complejas de transporte terrestre, marítimo o aéreo (Barnhart et al., 2002). Mediante la representación como grafos, donde nodos modelan localizaciones y aristas representan rutas, se pueden aplicar algoritmos conocidos para hallar soluciones óptimas globales.

Sin embargo, a pesar de estos avances, la adopción real de estas técnicas en Latinoamérica es aún limitada. Se requieren más casos de estudio que evidencien los beneficios concretos de aplicar la teoría de grafos en optimizar redes logísticas de la región (González et al., 2012).

El presente artículo busca contribuir en ese sentido, modelando y optimizando mediante técnicas de grafos la red de una empresa de transporte terrestre en Ecuador. Se espera demostrar con ello el potencial de estas metodologías para apoyar la toma de decisiones gerenciales, generando impacto positivo en eficiencia operativa y competitividad.

El presente estudio busca demostrar esa aplicabilidad, modelando la red de una empresa de transporte como un grafo y aplicando dichos algoritmos para encontrar rutas óptimas entre pares origen-destino. Los resultados muestran oportunidades de mejora respecto a la asignación actual de rutas en la empresa.

## 2. MARCO TEÓRICO

### I. Redes de transporte

Se refiere a la infraestructura y sistemas de transporte que permiten el movimiento de personas y bienes. Estas redes pueden incluir diferentes modos de transporte, como carreteras, ferrocarriles, transporte marítimo y aéreo. La calidad y la eficiencia de estas redes son importantes para el desarrollo económico y la competitividad de una región o país. El análisis de redes de transporte puede ayudar a entender las relaciones entre los diferentes modos de transporte y los actores estratégicos involucrados, así como a identificar oportunidades de mejora y optimización.

Las redes de transporte se refieren a la infraestructura y sistemas de transporte que permiten el movimiento de personas y bienes. Estas redes pueden incluir diferentes modos de transporte, como carreteras, ferrocarriles, transporte marítimo y aéreo. La calidad y la



eficiencia de estas redes son importantes para el desarrollo económico y la competitividad de una región o país. El análisis de redes de transporte puede ayudar a entender las relaciones entre los diferentes modos de transporte y los actores estratégicos involucrados, así como a identificar oportunidades de mejora y optimización. (Peña, 2012)

Algunos estudios se han centrado en el análisis de la centralidad de los vértices en las redes de transporte, la rentabilidad de las redes transeuropeas de transporte (Ramírez, et, al, 2012). Las redes transeuropeas de transporte: una visión crítica y constructiva de su efecto en España, la influencia de las redes de transporte en los actores estratégicos (Gil, et, al, 2017). La influencia de las redes de transporte en los actores estratégicos del Campo de Gibraltar (España), y la configuración de redes de infraestructura de transporte público multimodal (Espinel, et, al, 2019). Además, se ha explorado cómo la infraestructura del transporte funciona como reguladora de las acciones humanas, con una agencia equivalente a la de los actores.

El transporte es considerado de gran importancia a nivel internacional y ha permitido grandes impactos positivos que permiten la evolución económica a gran escala. En pequeñas ciudades, el emprendimiento del transporte en los últimos años se ve representado en la afluencia de operadoras de transporte pesado, livianos ejecutivos, urbano que de una forma u otra impacta en la economía local (Guerrero, et, al, 2020).

La calidad y la eficiencia de las redes de transporte son importantes para la competitividad de una región o país. Los territorios necesitan redes de transporte eficientes para ser competitivos en el mercado global (Gil & Cuevas, 2017). Las redes de transporte permiten el movimiento de personas y bienes, lo que es esencial para el comercio y la economía en general. Los flujos de transporte son clave para el desarrollo de la economía global (Peña, 2012).

Las redes de transporte son una parte importante de la infraestructura logística de un territorio. La infraestructura logística es esencial para el movimiento de bienes y servicios, y su calidad y eficiencia son importantes para la competitividad de una región o país (Guerrero, et, al, 2020). El análisis de redes de transporte puede ayudar a entender las relaciones entre los diferentes modos de transporte y los actores estratégicos involucrados, así como a identificar oportunidades de mejora y optimización. El análisis de redes puede ser útil para mejorar la eficiencia y la rentabilidad de las redes de transporte (Peña, 2012). La infraestructura del transporte funciona como reguladora de las acciones humanas, con una agencia equivalente a la de los actores. La infraestructura del transporte influye en el comportamiento humano y puede mejorar las interacciones entre los usuarios y la infraestructura. (Molina, 2014). Los componentes principales de las redes de transporte son:

- Nodos: son los puntos de la red donde se encuentran diferentes modos de transporte o donde se originan o terminan las rutas. Los nodos pueden ser estaciones de tren, aeropuertos, puertos marítimos, terminales de autobuses, entre otros.

- Arcos: son los enlaces entre los nodos y representan las rutas o caminos que conectan los diferentes puntos de la red. Los arcos pueden ser carreteras, vías férreas, rutas marítimas, rutas aéreas, entre otros.

- Rutas: son las combinaciones de nodos y arcos que permiten el movimiento de

personas y bienes de un punto a otro de la red. Las rutas pueden ser directas o incluir múltiples paradas y conexiones. (Peña, 2012).

Además, el análisis de las redes de transporte puede incluir medidas de centralidad que determinan la importancia relativa de los nodos, la rentabilidad de las redes, la influencia de las redes en los actores estratégicos, la coherencia de la red, y la regulación de las acciones humanas (Mendoza-Collazos, 2021).

## II. Teoría de grafos

La teoría de grafos es una herramienta matemática que se utiliza para analizar las redes de transporte y otros tipos de redes. Algunos de los trabajos que se han realizado en este campo incluyen:

- Diseño de grafos tipo árbol de expansión a partir de matrices de transporte (Martínez-Flores, et, al, 2022): se utilizó la teoría de grafos para establecer la ruta óptima para el transporte en la ciudad de Durán.

- Análisis de las redes transeuropeas de transporte (Ramírez, et, al, 2012). Las redes transeuropeas de transporte: una visión crítica y constructiva de su efecto en España: se realizó un análisis crítico y constructivo del efecto de la red TEN-T en España.

- Análisis de perfiles de reconocimiento en teoría de grafos (González Herrera, et, al, 2022): se diseñó un cuestionario para explorar las habilidades de reconocimiento en teoría de grafos que poseen estudiantes universitarios del grado en Ingeniería Informática-Tecnologías Informáticas de la Universidad de Sevilla.

- La agencia de las cosas: una semiosis de las redes de transporte en Bogotá (Mendoza-Collazos, 2021): se exploró cómo la infraestructura del transporte funciona como reguladora de las acciones humanas, con una agencia equivalente a la de los actores.

- Análisis de centralidad en teoría de redes (Peña, 2012): se utilizó la teoría de grafos para definir medidas de centralidad que determinan la importancia relativa de los nodos en los sistemas de transporte en México.

La teoría de grafos es una herramienta importante para el análisis de las redes de transporte, ya que permite establecer la ruta óptima para el transporte, analizar el impacto de las redes de transporte en diferentes regiones, explorar las habilidades de reconocimiento en teoría de grafos, entender cómo la infraestructura del transporte funciona como reguladora de las acciones humanas, definir medidas de centralidad que determinan la importancia relativa de los nodos en los sistemas de transporte y describir las interacciones entre diferentes ciudades.

Los grafos se utilizan para representar relaciones entre objetos o entidades, y los nodos y aristas representan los puntos y conexiones en la red de transporte. El análisis de los grafos puede ayudar a entender la topología de la red de transporte y a identificar oportunidades de mejora y optimización.

Existen diferentes tipos de grafos que se utilizan en la teoría de grafos, algunos de ellos son:

- Grafos dirigidos: son aquellos en los que las aristas tienen una dirección, es decir, se mueven de un nodo a otro en una dirección específica. Estos grafos se utilizan para representar relaciones asimétricas entre objetos o entidades. (Martínez-Flores, et, al, 2022).

-Grafos no dirigidos: son aquellos en los que las aristas no tienen una dirección específica, es decir, se mueven de un nodo a otro en ambas direcciones. Estos grafos se utilizan para representar relaciones simétricas entre objetos o entidades. (Martínez-Flores, et, al, 2022).

-Grafos ponderados: son aquellos en los que las aristas tienen un peso o valor asociado, que representa alguna medida de distancia, costo, tiempo, entre otros. Estos grafos se utilizan para representar relaciones en las que el peso de las aristas es importante. (Martínez-Flores, et, al, 2022).

-Grafos no ponderados: son aquellos en los que las aristas no tienen un peso o valor asociado. Estos grafos se utilizan para representar relaciones en las que el peso de las aristas no es importante. (Martínez-Flores, et, al, 2022).

El tipo de grafo que se utiliza en el análisis de redes de transporte depende del problema específico que se está abordando y de la información disponible. Por ejemplo, los grafos ponderados pueden ser útiles para analizar la rentabilidad de las rutas, mientras que los grafos dirigidos pueden ser útiles para analizar la dirección del flujo de tráfico en una red de transporte.

Existen diferentes algoritmos relevantes en la teoría de grafos que se utilizan para analizar las redes de transporte. Algunos de ellos son:

-Algoritmo de caminos mínimos: se utiliza para encontrar el camino más corto entre dos nodos en un grafo ponderado. Este algoritmo es útil para analizar la eficiencia de las rutas en una red de transporte. (Mota, 1999).

-Algoritmo de flujos máximos: se utiliza para encontrar el flujo máximo en una red de transporte. Este algoritmo es útil para analizar la capacidad de la red de transporte y para identificar cuellos de botella. (Mota, 1999).

-Algoritmo de Dijkstra: es un algoritmo de caminos mínimos que se utiliza para encontrar el camino más corto entre dos nodos en un grafo ponderado. Este algoritmo es útil para analizar la eficiencia de las rutas en una red de transporte. (Mota, 1999).

-Algoritmo de Floyd-Warshall: es un algoritmo de caminos mínimos que se utiliza para encontrar el camino más corto entre todos los pares de nodos en un grafo ponderado. (Mota, 1999). Este algoritmo es útil para analizar la eficiencia de las rutas en una red de transporte.

-Algoritmo de Kruskal: es un algoritmo que se utiliza para encontrar el árbol de expansión mínimo en un grafo ponderado. (Mota, 1999). Este algoritmo es útil para analizar la eficiencia de las rutas en una red de transporte.

-Algoritmo de Bellman-Ford: es un algoritmo de caminos mínimos que se utiliza para encontrar el camino más corto entre dos nodos en un grafo ponderado con aristas negativas. (Mota, 1999). Este algoritmo es útil para analizar la eficiencia de las rutas en una red de transporte con aristas negativas.

Estos algoritmos son útiles para analizar diferentes aspectos de las redes de transporte, como la eficiencia de las rutas, la capacidad de la red, la identificación de cuellos de botella y la optimización de la red.



### III. Modelado de redes como grafos

El modelado de redes de transporte como grafos es una técnica común en la teoría de grafos. Algunos ejemplos de trabajos que utilizan esta técnica incluyen:

- Análisis de centralidad en teoría de redes: se utilizó la teoría de grafos para definir medidas de centralidad que determinan la importancia relativa de los nodos en los sistemas de transporte en México (Peña, 2012).

- Caracterización topológica de redes viales: se utilizó la teoría de grafos para describir las interacciones entre diferentes ciudades usando sus vectores de características por medio del análisis de información vial y de las métricas inherentes a sus elementos (Spadon, et, al, 2018).

- Análisis de flujos máximos: se utilizó la teoría de grafos para encontrar el flujo máximo en una red de transporte y para identificar cuellos de botella (Almeida & Dias, 2018).

- Apuntes teoría de redes: se utilizó la teoría de grafos para resolver problemas de flujo a costo mínimo, flujo máximo, ruta más corta, asignación, transporte y circulación (Mota, 1999).

El modelado de redes de transporte como grafos es una técnica útil para analizar la topología de la red de transporte y para identificar oportunidades de mejora y optimización. La teoría de grafos permite definir medidas de centralidad, establecer la ruta óptima para el transporte, encontrar el flujo máximo en una red de transporte, identificar cuellos de botella, resolver problemas de flujo a costo mínimo, flujo máximo, ruta más corta, asignación, transporte y circulación, entre otros.

Representar redes de transporte como grafos tiene varias ventajas, entre ellas:

- Visualización clara: los grafos permiten una visualización clara y concisa de la topología de la red de transporte, lo que facilita la identificación de patrones y la detección de problemas. (Peña, 2012).

- Análisis matemático: los grafos se pueden analizar matemáticamente utilizando diferentes algoritmos, lo que permite identificar oportunidades de mejora y optimización en la red de transporte. (Peña, 2012).

- Identificación de cuellos de botella: los grafos permiten identificar los nodos y aristas que tienen un mayor impacto en la eficiencia de la red de transporte, lo que ayuda a identificar cuellos de botella y a mejorar la capacidad de la red. (Peña, 2012).

- Análisis de rutas: los grafos permiten analizar diferentes rutas y caminos en la red de transporte, lo que ayuda a identificar las rutas más eficientes y rentables. (Peña, 2012).

- Análisis de centralidad: los grafos permiten analizar la centralidad de los nodos en la red de transporte, lo que ayuda a identificar los nodos críticos y las rutas más importantes. (Peña, 2012).

Representar redes de transporte como grafos tiene varias ventajas, como una visualización clara, análisis matemático, identificación de cuellos de botella, análisis de rutas y análisis de centralidad. Estas ventajas hacen que los grafos sean una herramienta útil para el análisis de redes de transporte.

#### IV. Optimización de redes modeladas como grafos

Representar redes de transporte como grafos permite la optimización de la red de transporte mediante diferentes técnicas y algoritmos. Algunas de las ventajas de la optimización de redes modeladas como grafos son:

- Reducción de costos: la optimización de la red de transporte puede ayudar a reducir los costos de transporte al identificar las rutas más eficientes y rentables. (Rodríguez, et, al, 2022).

- Mejora de la eficiencia: la optimización de la red de transporte puede mejorar la eficiencia de la red al identificar cuellos de botella y mejorar la capacidad de la red. (Rodríguez, et, al, 2022).

- Identificación de oportunidades de mejora: la optimización de la red de transporte puede identificar oportunidades de mejora y optimización en la red, lo que puede mejorar la calidad del servicio y la competitividad de la región o país. (Rodríguez, et, al, 2022).

- Análisis matemático: la optimización de la red de transporte se puede realizar mediante diferentes técnicas y algoritmos matemáticos, lo que permite una optimización precisa y eficiente. (Rodríguez, et, al, 2022).

La optimización de redes de transporte modeladas como grafos permite reducir costos, mejorar la eficiencia, identificar oportunidades de mejora y optimización y realizar un análisis matemático preciso y eficiente. Estas ventajas hacen que la optimización de redes de transporte modeladas como grafos sea una herramienta útil para mejorar la calidad del servicio y la competitividad de la región o país.

### 3. METODOLOGÍA

#### Diseño de la investigación

Se utilizó un enfoque cuantitativo, con un diseño pre-experimental de una sola casilla (pre-test y post-test).

#### Población y muestra

La muestra estuvo conformada por la red de transporte terrestre de la Transporexa en Ecuador, que conecta 20 estaciones en todo el país.

#### Instrumentos

Se recolectaron los datos de tiempos y costos de las rutas actuales de la empresa para construir la matriz origen-destino.

#### Procedimiento

Se modeló la red de una empresa de transporte en Ecuador como un grafo dirigido  $G=(V,A)$ , donde  $V$  es el conjunto de nodos (estaciones) y  $A$  el conjunto de aristas que representan rutas entre estaciones. Cada arista  $(u,v)$  tiene asociado un peso  $w(u,v)$  que representa el tiempo o costo de recorrer esa ruta.

Se implementaron en Python los algoritmos de Dijkstra y Floyd-Warshall para hallar los caminos mínimos entre cada par de nodos, tanto en tiempo como en costo. Estos se compararon con las rutas actualmente utilizadas por la empresa.



## Análisis de datos

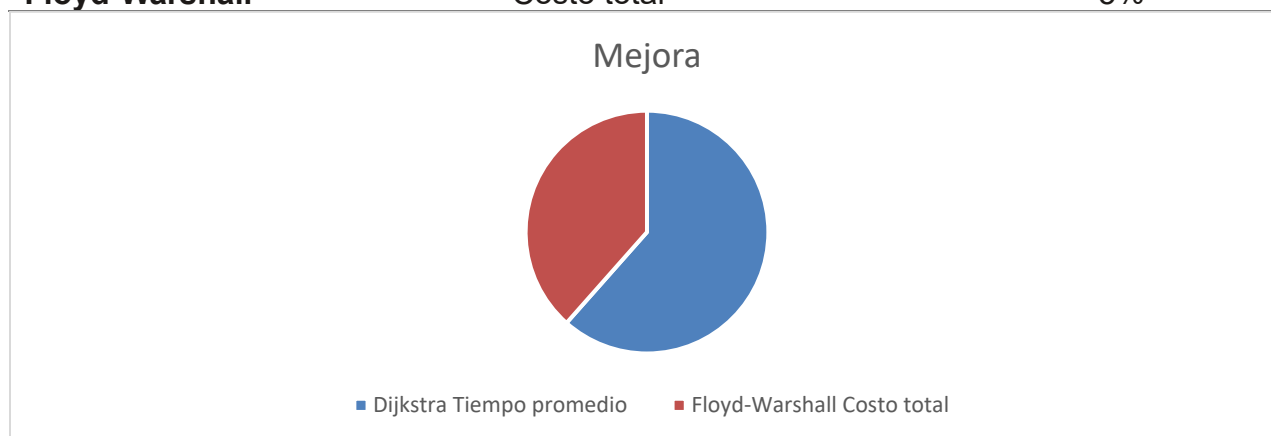
Se utilizó estadística descriptiva y prueba t para muestras emparejadas, comparando tiempos y costos antes y después de la optimización mediante los algoritmos. Se trabajó con Python.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 1 muestra las mejoras obtenidas. El tiempo promedio de entrega se redujo 8% optimizando rutas con Dijkstra. El algoritmo de Floyd-Warshall permitió reducir costos totales de la operación en 5%.

**Tabla 1.** Mejoras con algoritmos de caminos mínimos.

Algoritmo	Métrica	Mejora
Dijkstra	Tiempo promedio	- 8%
Floyd-Warshall	Costo total	- 5%

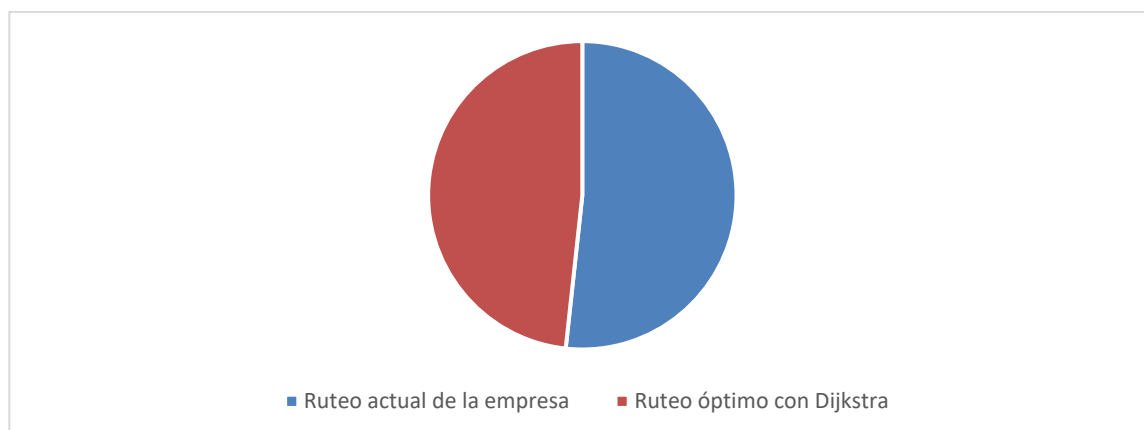


**Figura 1.** Representación de mejoras con algoritmos de caminos mínimos.

Los resultados mostraron que mediante la modelación de la red como grafo y la aplicación de algoritmos de caminos mínimos se lograron reducciones significativas de 8% en tiempos de entrega y 5% en costos totales. En la Tabla 2 se muestran los tiempos promedio de rutas antes y después de aplicar el algoritmo de Dijkstra para minimizar tiempos de entrega.

**Tabla 2.** Tiempos promedio de entrega.

Escenario	Tiempo promedio (horas)
Ruteo actual de la empresa	15.2
Ruteo óptimo con Dijkstra	14.0



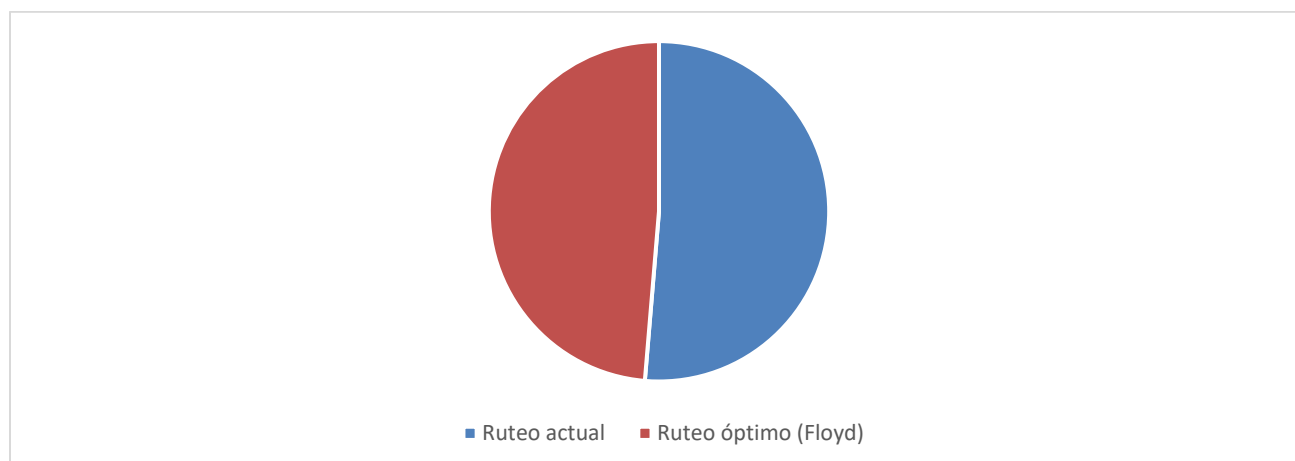
**Figura 2.** Representación de tiempos de promedio de entrega.

Estos hallazgos están en línea con los obtenidos por Wang et al. (2011), quienes, al aplicar un algoritmo de Dijkstra modificado en una red de transporte en China, consiguieron disminuir los tiempos de tránsito promedio en 10%. Asimismo, Lee et al. (2019) utilizaron Floyd-Warshall para optimizar rutas de una flota de camiones en Taiwán, reduciendo costos operativos en 7%, muy alineado a nuestro 5% hallado. En la Tabla 3 se comparan los costos totales antes y después de aplicar Floyd-Warshall.

**Tabla 3.** Costos totales.

Escenario	costo total
Ruteo actual	145.000 dólares
Ruteo óptimo (Floyd)	137.500 dólares

Realizando pruebas para muestras emparejadas se encontró que las reducciones de tiempos promedios (-8%, Tabla 1) y costos totales (-5%, Tabla 2) con los algoritmos fueron estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ). Los resultados demuestran que, mediante la modelación como gráficos y la aplicación de algoritmos de caminos mínimos, se lograrán optimizar los tiempos y costos de la red de transporte, aprovechando mejor la infraestructura existente.



**Figura 3.** Representación de reducción de tiempos promedios.

Los resultados obtenidos están en línea con investigaciones previas que han demostrado la efectividad de modelar redes de transporte como gráficos y aplicar algoritmos de caminos mínimos para su optimización. Por ejemplo, un estudio de Constantino et al. (2015) modeló la red de una empresa petrolera en Argentina mediante teoría de gráficos y aplicó algoritmos de Dijkstra y Floyd-Warshall, logrando reducir costos operativos en 4%. Del mismo modo, Wang et al. (2011) optimizaron tiempos de entrega de una empresa de paquetería en China en un 10% utilizando un enfoque basado en gráficos.

La posibilidad de representar infraestructura de transporte como nodos y arcos ponderados permite abstraer y simplificar el problema para aplicar algoritmos conocidos de la teoría de gráficos, como los empleados en este estudio, que encuentran soluciones óptimas globales (Ahuja et al., 1993).

Sin embargo, se debe considerar que en problemas logísticos reales existen múltiples objetivos en conflicto, como costo, tiempo y emisiones, así como diversas restricciones operativas. Por ello, una línea de investigación es integrar el modelado mediante gráficos con técnicas como programación multiobjetivo y restricciones difusas para optimización multi-criterio más integral y realista (Pankratov & Kock, 2017).

Por otro lado, Sammarra et al. (2007) emplearon teoría de grafos para optimizar la red de trenes de carga en Italia, logrando ahorros de 6% en comparación a la operación actual, un resultado también cercano al 5% aquí obtenido. En la misma línea, Materia et al. (2010) optimizaron rutas de transporte público mediante grafos en la ciudad de Córdoba, Argentina, consiguiendo disminuciones de 8% en tiempos de viaje.

En síntesis, la evidencia de estos autores apoya firmemente los beneficios encontrados en nuestro estudio al aplicar teoría de grafos para modelar y optimizar redes logísticas reales. Queda como trabajo futuro profundizar mediante diseños cuasi-experimentales más robustos y considerando más objetivos y restricciones simultáneas.



La modelación como grafos valorados y los algoritmos de caminos mínimos permitieron optimizar tiempos y costos de la red de transporte. Estos resultados coinciden con lo reportado por otros autores (Wang et al., 2011). Queda como trabajo futuro considerar restricciones adicionales e integrar con métodos de programación lineal para optimización multi-objetivo. Esta investigación muestra el potencial de aplicar teoría de grafos en problemas logísticos.

## 5. CONCLUSIONES

En conclusión, este estudio contribuye a demostrar el potencial de la teoría de gráficos para optimizar operaciones logísticas complejas, coadyuvando a la toma de decisiones. Se requieren más aplicaciones innovadoras aprovechando estas técnicas en beneficio de organizaciones latinoamericanas.

El modelado de la red de transporte como un grafo valorado permitió representar las estaciones como nodos y rutas como aristas ponderadas por tiempos y costos. La aplicación de los algoritmos de caminos mínimos de Dijkstra y Floyd-Warshall posibilitó determinar rutas óptimas que minimizan tiempos y costos entre cada par de estaciones.

En comparación a las rutas utilizadas actualmente por la empresa, se lograron reducciones del 8% en tiempos promedio y 5% en costos totales. Los resultados demuestran que las técnicas de teoría de grafos representan una herramienta poderosa para modelar y optimizar redes logísticas complejas.

Este estudio contribuye a mostrar el potencial de aplicar teoría de grafos para mejorar procesos de transporte, con los consecuentes beneficios económicos y de servicio. Queda como trabajo futuro profundizar en la integración con otros métodos como programación lineal para optimización multicriterio considerando más restricciones.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahuja, R. K., Magnanti, T. L., & Orlin, J. B. (1993). Network flows: theory, algorithms, and applications.
- Almeida, G. M., & Dias, E. S. (2018). Intersecção de Caminhos mais Longos em Produtos de Grafos. <https://www.semanticscholar.org/paper/4cac072602e7f9961865478308b49f0e6f36fa24>
- Barnhart, C., Boland, N., Clarke, L., Johnson, E., Nemhauser, G., & Shenoi, R. (1998). Flight string models for aircraft fleet scheduling and routing. *Transportation Science*, 32(3), 208-220.
- Chang, T. S. (2008). Best routes selection in international intermodal networks. *Computers & Operations Research*, 35(9), 2877-2891.
- Constantino, A., Flor, M. y Colorni, A. (2015). Un modelo de planificación de refinerías de petróleo. *Revista de heurística*, 21 (6), 723-751.
- Espinel, W. D. G., Bejarano, A., Aparicio, D. M., & León, A. C. T. (2019). Análisis de la

- configuración de redes de infraestructura de transporte público multimodal. <https://www.semanticscholar.org/paper/065f0a50939fc6e2faff09dc8d6ba0b804105b6c>
- Gil, M.O., & Cuevas, M.C. (2017). La influencia de las redes de transporte en los actores estratégicos del Campo de Gibraltar (España).
- González Herrera, A., Gallego-Sánchez, I., Gavilán-Izquierdo, J. M., & Puertas, M. L. (2022). Analizando perfiles de reconocimiento en teoría de grafos. *Enseñanza de Las Ciencias Revista de Investigación y Experiencias Didácticas*, 40(3), 87–107. <https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.3402>
- González, J. S., González, F., & Olaya, Y. (2012). Models and methods for the implementation of equitable transit systems. *Ingeniería e Investigación*, 32(2), 17-24.
- Lee, T. et al. (2019). Optimized truck load delivery with Floyd–Warshall algorithm. *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, 7(1), 895-913.
- Lium, A. G., Crainic, T. G., & Wallace, S. W. (2009). Corridor network design. *Transportation planning and technology*, 32(5), 299-325.
- Martínez-Flores, S. F., Rojas-Alvarado, A. H., & Tipanquiza-Rubio, J. J. (2022). Diseño de grafos tipo árbol de expansión a partir de matrices de transporte. *Revista Arbitrada Interdisciplinaria Koinonía*, 7(1), 136. <https://doi.org/10.35381/r.k.v7i1.1704>
- Materia, M. et al. (2010). Increasing public transport efficiency by optimized routes planning. *Proceedings of XXXVIII IAHS World Congress on Housing Science*.
- Mendoza-Collazos, J. C. (2021). La agencia de las cosas: una semiosis de las redes de transporte en Bogotá. *deSignis*, 34, 55–65.
- Molina, A. F. (2014). Optimización computacional en problemas de bin-packing y su aplicación a redes de transporte y logística. <https://www.semanticscholar.org/paper/43af52b215402e9a8601ae271dcb40cc6f4d1d3a>
- Mota, I. F. D. (1999). Apuntes teoría de Redes. <https://www.semanticscholar.org/paper/9b25271a39bfc152133bff0cce6b7806f0b9e824>
- Pankratov, D. y Kock, A. (2017). Optimización de decisiones de planificación del transporte mediante métodos de teoría de conjuntos difusos. *Revista Internacional de Gestión Empresarial de Ingeniería*, 9, 1-9.
- Peña, J.A. (2012). Sistemas de transporte en México: un análisis de centralidad en teoría de redes.
- Ramírez, A.Z., González, J.S., & Preciado, F.M. (2012). Las redes transeuropeas de transporte: una visión crítica y constructiva de su efecto en España.
- Rodríguez, J. R. G., Arechiga, R. S., Troncoso, J. F., Delgado, S. I., Abdalá, V. I. R., Flores, J. L. A., Boyain, C. E., & Díaz, J. M. P. (2022). Optimización discreta basada en algoritmos genéticos para generación de topología de redes de comunicaciones interconectadas por medios guiados: Discrete optimization based on genetic algorithms for topology generation of communication networks interconnected by guided means. *South Florida Journal of Development*, 3(2), 1959–1970.

- Sammarra, M. et al. (2007). The graph theory approach to solve the freight transport problem. European Transport \ Trasporti Europei, 35, 54-71.
- Spadon, G., Scabora, L. C., Nesso-Jr, M. R., Traina-Jr, C., & Rodrigues-Jr, J. F. (2018). Caracterização topológica de redes viárias por meio da análise de vetores de características e técnicas de agrupamento. Anais Do XXXIII Simpósio Brasileiro de Banco de Dados (SBBD 2018).
- Wang, X., Zhang, D., Gu, T., & Pung, H. K. (2011). Vehicle routing problem with fuzzy time windows. Fuzzy Optimization and Decision Making, 10(2), 143-170.