

Intelligent logistics route optimization: Impact of Dijkstra's algorithm on operational efficiency

Jose Cuya-Camara¹ 

¹Universidad Privada del Norte, Perú, jose.cuya@upn.pe

Abstract— Efficient route planning is key in logistics to reduce costs and improve operational capacity. This study evaluates the impact of Dijkstra's Algorithm on logistics route optimization through a pre-post experimental design with a quantitative approach, applied in an Integrated Optimal Route Planning System developed with the agile SCRUM methodology. 58 logistics processes were analyzed, measuring three key indicators: order delivery time, route planning and report generation, and Student's t-test was used to assess statistical significance. The findings show significant improvements: reduction of delivery time by 22.94% (from 88.73 to 68.37 minutes), optimization of planning time by 97.2% (from 7684.8 to 217.07 seconds) and decrease of reporting time by 99.89% (from 6504.57 to 6.83 seconds). Statistical analysis confirmed that all improvements were statistically significant ($p\text{-value} < 0.001$), validating the effectiveness of the algorithm in logistics optimization. It is concluded that the implementation of Dijkstra's Algorithm improves operational efficiency, optimizes real-time decision making, and has the potential to reduce logistics costs and minimize environmental impact. As future lines of research, its integration with artificial intelligence and machine learning is suggested to improve adaptability in dynamic environments.

Keywords— Route optimization, Dijkstra's algorithm, Transportation.

Optimización inteligente de rutas logísticas: Impacto del Algoritmo de Dijkstra en la eficiencia operativa

Jose Cuya-Camara¹ 

¹Universidad Privada del Norte, Perú, jose.cuya@upn.pe

Resumen— *La planificación eficiente de rutas es clave en la logística para reducir costos y mejorar la capacidad operativa. Este estudio evalúa el impacto del Algoritmo de Dijkstra en la optimización de rutas logísticas mediante un diseño experimental pre y post con enfoque cuantitativo, aplicado en un Sistema Integrado de Planificación de Rutas Óptimas desarrollado con la metodología ágil SCRUM. Se analizaron 58 procesos logísticos, midiendo tres indicadores clave: tiempo de entrega de pedidos, planificación de rutas y generación de informes, y se utilizó la prueba t de Student para evaluar la significancia estadística. Los hallazgos muestran mejoras significativas: reducción del tiempo de entrega en 22.94% (de 88.73 a 68.37 minutos), optimización del tiempo de planificación en 97.2% (de 7684.8 a 217.07 segundos) y disminución del tiempo de generación de informes en 99.89% (de 6504,57 a 6,83 segundos). El análisis estadístico confirmó que todas las mejoras fueron estadísticamente significativas (p -valor $<0,001$), validando la efectividad del algoritmo en la optimización logística. Se concluye que la implementación del Algoritmo de Dijkstra mejora la eficiencia operativa, optimiza la toma de decisiones en tiempo real y tiene el potencial de reducir costos logísticos y minimizar el impacto ambiental. Como futuras líneas de investigación, se sugiere su integración con inteligencia artificial y aprendizaje automático para mejorar la adaptabilidad en entornos dinámicos.*

Palabras clave— *Optimización de rutas, Algoritmo de Dijkstra, Logística inteligente, Planificación de rutas, Transporte.*

I. INTRODUCCIÓN

En el ámbito del transporte y la logística, la optimización de rutas es un factor clave para mejorar la eficiencia operativa, reducir costos y minimizar el impacto ambiental. La creciente demanda de entregas rápidas y la necesidad de optimizar recursos han impulsado el desarrollo de sistemas avanzados de planificación de rutas basados en algoritmos computacionales [1], [2]. Tradicionalmente, la planificación de rutas se realizaba de manera empírica; Sin embargo, con el auge de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC), se han desarrollado modelos computacionales que permiten optimizar los trayectos en función de múltiples variables, como distancia, tiempo y condiciones del tráfico [3].

El Algoritmo de Dijkstra ha sido ampliamente utilizado en la optimización de rutas debido a su capacidad para encontrar el camino más corto en redes de transporte [4]. Su aplicación en logística permite una asignación eficiente de rutas, contribuyendo a la reducción del tiempo de entrega y de los costos operativos [5]. Diversos estudios han demostrado que la integración de este algoritmo en sistemas de transporte puede

mejorar significativamente la eficiencia del servicio y la sostenibilidad ambiental al minimizar el consumo de combustible y las emisiones de carbono [6], [7].

En el contexto latinoamericano, países como Colombia y Perú han experimentado un crecimiento en la adopción de soluciones basadas en algoritmos para la planificación de rutas logísticas [8], [9]. En Colombia, el sector de los Centros de Servicios Compartidos (CSC) ha impulsado la implementación de sistemas de optimización de rutas para mejorar la competitividad en el ámbito global [10]. Por otro lado, en Perú, la inmediatez en la entrega de productos y servicios ha motivado a las empresas a buscar soluciones tecnológicas que les permitan reducir tiempos y mejorar la calidad del servicio [11].

Existen múltiples enfoques para la optimización de rutas, incluyendo métodos basados en redes neuronales, optimización de colonias de hormigas y modelos híbridos que combinan diferentes algoritmos para mejorar la precisión en la planificación [12], [13]. Sin embargo, la implementación del Algoritmo de Dijkstra sigue siendo una de las estrategias más efectivas y ampliamente utilizadas en la logística inteligente debido a su eficiencia y robustez en redes de transporte complejas [14], [15], [16].

El presente estudio tiene como objetivo evaluar el impacto de la implementación de un sistema de planificación de rutas basado en el Algoritmo de Dijkstra en la reducción del tiempo de entrega de pedidos, optimización del proceso de planificación de rutas y mejora en la generación de informes logísticos.

II. METODOLOGÍA

A. Diseño de la investigación

Este estudio sigue un enfoque cuantitativo, tipo aplicada, y un diseño pre experimental de tipo pre y post, con el objetivo de evaluar el impacto de la implementación del Algoritmo de Dijkstra en la optimización de rutas logísticas [17]. Se adoptó un nivel explicativo, ya que busca establecer la relación causal entre la aplicación del algoritmo y la mejora en los tiempos de entrega, planificación de rutas y generación de informes [18].

La población estuvo compuesta por 58 procesos logísticos, y se utilizó un muestreo no probabilístico por conveniencia, seleccionando la totalidad de la población como

se muestra debido a la necesidad de evaluar el impacto del algoritmo en todas las operaciones logísticas [19].

B. Algoritmo de Dijkstra: Modelo matemático y justificación

El Algoritmo de Dijkstra fue elegido por su eficiencia en la determinación de rutas óptimas en redes de transporte dirigidas y ponderadas, donde se requiere minimizar la distancia o el tiempo de recorrido [20], [21]. El modelo matemático empleado se basa en la teoría de gráficos y se define de la siguiente manera:

1) *Preliminares:* Un dígrafo es un par $G=(V, E)$ donde V es un conjunto y E es una relación binaria irreflexiva en V , es decir, un subconjunto de $V \times V$ tal que $(x,x) \notin E$ para todo $x \in V$. Decimos que V es el conjunto de vértices y que E es el conjunto de aristas. Dada una arista (u,v) , decimos que los vértices u y v son adyacentes y que la arista incide sobre ellos (u,v) . Cualquier secuencia finita de vértices se denomina camino de u a v , denotado por $(u-v)$ [21].

$$u=x_0, x_1, \dots, x_i, x_{(i+1)}, \dots, x_{(m-1)}, x_m = v \quad (1)$$

De modo que $(x_i, x_{(i+1)})$ es una arista para cada $i=0, 1, \dots, m-1$.

Un dígrafo está ponderado si a cada arista (u,v) se le asigna un número real, denotado por $p(u,v)$ y llamado peso [22]. De ahora en adelante, consideramos un dígrafo ponderado G con pesos positivos: $p(u,v) > 0$ para cada arista $(u,v) \in E$. El peso del camino (1) se define como la suma de los pesos de sus aristas:

$$p(u-v) = p(x_0, x_1) + \dots + p(x_{(m-1)}, x_m)$$

Según [22], un camino es de costo mínimo si no es posible encontrar ningún camino de u a v cuyo peso sea menor que $p(u-v)$. En otras palabras, dado cualquier camino de u a v ,

$$u=y_0, y_1, \dots, y_{(k-1)}, y_k = v$$

Debe cumplirse

$$p(u, y_1) + p(y_1, y_2) + \dots + p(y_{(k-1)}, v) \geq p(u-v)$$

2) *Algoritmo de Dijkstra:* Entrada: Gráfico ponderado dirigido de n vértices con pesos positivos p_{ij} [21].

Salida: Peso de una ruta de costo mínimo de la a a la z .

Paso 1:

Definimos $S_0 = \emptyset$, $T_0 = V$. Asignamos a cada vértice v en V una etiqueta de la siguiente manera:

$$L(v) = 0 \text{ if } v=a \text{ y } L(v) = \infty \text{ for } v \neq a$$

Paso 2:

Para $i=1, 2, \dots, n$. Supongamos que hemos construido los conjuntos $S_0, S_1, \dots, S_{(i-1)}$. Establecemos $T_{(i-1)} = V \setminus S_{(i-1)}$. Si $z \in S_{(i-1)}$, definimos $S = S_{(i-1)}$ y detenemos la construcción [23]. De lo contrario, elegimos el primer vértice u en $T_{(i-1)}$ con la etiqueta más pequeña, es decir,

$$L(u) = \min \{ L(v) \mid v \in T_{(i-1)} \}$$

Nosotros definimos $u_{(i-1)} = u$, $[[S]]_{(i-1)} = [[S]]_{(i-1)} \cup \{ [[u]]_{(i-1)} \} = \{ [[u]]_0, [[u]]_1, \dots, [[u]]_{(i-1)} \}$ and $T_i = V \setminus [[S]]_i$ y para cada vértice v en T_i , adyacente a u , cambiamos su etiqueta $L(v)$ a la nueva etiqueta.

$$L(v) \leftarrow \min \{ L(v), L(u) + p(u,v) \},$$

Es decir, actualizamos la etiqueta de los “vecinos” de u fuera de $[[S]]_i$.

Paso 3:

Si $i=n$, definimos $S = [[S]]_n$ y nos detenemos. Si $i < n$, $i=i+1$ y vamos al Paso 2.

El algoritmo de Dijkstra termina en el momento en que encontramos el primer índice m para el cual $z \in [[S]]_m$. En ese momento, $[[S=S]]_m$ [22].

Se implementó una versión optimizada del algoritmo mediante estructuras de datos eficientes como colas de prioridad y listas de adyacencia, mejorando su desempeño en grandes volúmenes de datos [2].

C. Metodología de implementación: Enfoque ágil SCRUM

Para el desarrollo del Sistema Integrado de Planificación de Rutas Óptimas, se empleó la metodología SCRUM, una estrategia ágil ampliamente utilizada en proyectos de desarrollo de software [23]. SCRUM permite la entrega incremental del sistema a través de iteraciones llamadas Sprint, asegurando flexibilidad y adaptación a los cambios.

1) *Fases del desarrollo:* Sprint 0: Preparación e Inicio (2 semanas) [24].

Definición del Product Backlog con los requerimientos del sistema.

Configuración de herramientas de gestión (Jira, Trello).

Formación del equipo SCRUM y asignación de roles (Product Owner, Scrum Master, Equipo de Desarrollo).

Establecimiento del plan de comunicación y reuniones.

2) *Sprint 1:* Desarrollo Inicial (2 semanas)

Implementación del Algoritmo de Dijkstra en un entorno de prueba.

Desarrollo de una interfaz gráfica para la visualización de rutas.

Configuración de la base de datos para el almacenamiento de rutas.

Redacción de la documentación técnica inicial.

3) *Sprint 2:* Integración y Pruebas (2 semanas)

Integración del algoritmo con la base de datos.

Optimización de la interfaz gráfica para mejorar la usabilidad.

Ejecución de pruebas unitarias y de integración para verificar la precisión de los cálculos.

Ajustes según la retroalimentación del sprint anterior.

4) *Sprint 3:* Implementación de Funcionalidades Avanzadas (2 semanas)

Optimización del algoritmo para la planificación de rutas en tiempo real.

Desarrollo del módulo de generación de informes.

Pruebas de estrés y rendimiento bajo condiciones de tráfico real.

Redacción de la documentación del usuario.

- 5) *Sprint 4: Validación y Lanzamiento* (2 semanas)
 - Despliegue del sistema en un entorno de producción.
 - Validación de los resultados con pruebas finales.
 - Capacitación a los usuarios finales sobre el uso del sistema.
 - Implementación del plan de soporte post-lanzamiento.

D. Instrumentos de recolección de datos

Para evaluar el impacto del sistema, se utilizaron tres fichas de observación aplicadas antes y después de la implementación del Algoritmo de Dijkstra. Los indicadores evaluados fueron:

- 1) *Tiempo de entrega de pedidos (minutos).*
- 2) *Tiempo de planificación de rutas (segundos).*
- 3) *Tiempo de emisión de informes (segundos).*

Las mediciones pre y post implementación se analizaron con la prueba t de Student para muestras independientes, verificando la significancia estadística de las diferencias observadas.

E. Procedimiento de validación de resultados

Para garantizar la validez de los resultados, se siguieron los siguientes pasos [24]:

- 1) *Fase de prueba inicial:* Se ejecutó el algoritmo en un entorno simulado con datos históricos de rutas logísticas.
- 2) *Comparación con métodos tradicionales:* Se midieron los tiempos operativos antes y después de la implementación del algoritmo.
- 3) *Análisis estadístico:* Se utilizó la prueba t de Student con un nivel de confianza del 95% para determinar la significancia de las diferencias en los indicadores evaluados.
- 4) *Validación en entorno real:* Se aplicó el algoritmo en operaciones logísticas reales para confirmar la mejora en los tiempos y costos.

III. RESULTADOS

A. Reducción en el tiempo de entrega de pedidos

La implementación del Algoritmo de Dijkstra en la planificación de rutas mostró una reducción significativa en el tiempo de entrega de pedidos. Antes de la implementación, el tiempo promedio de entrega era de 88.73 minutos, mientras que después de la optimización se redujo a 68.37 minutos.



Fig. 1 Tiempo de entrega de pedido

Como se muestra en la Figura 1, esta reducción de 20,36 minutos representa una mejora del 22,94% en la eficiencia de entrega. Esta disminución en los tiempos de distribución sugiere un impacto positivo en la satisfacción del cliente y una reducción en los costos operativos.

El análisis estadístico mediante la prueba t de Student para muestras independientes confirma que la diferencia en el tiempo de entrega es significativa (p-valor<0,001), lo que respalda la eficacia del algoritmo en la optimización del proceso logístico.

B. Optimización del tiempo de planificación de rutas.

Uno de los impactos más notables de la implementación del Algoritmo de Dijkstra fue la drástica reducción en el tiempo de planificación de rutas.

Como se muestra en la Figura 2, antes de la implementación, el tiempo promedio para calcular las rutas logísticas era de 7684.8 segundos (2 horas y 8 minutos). Tras la optimización con el algoritmo, este tiempo se redujo a 217,07 segundos (3,6 minutos).

Esto representa una reducción de 7467,73 segundos (97,2%), evidenciando una mejora en la rapidez y eficiencia del sistema de planificación de rutas.



Fig. 2 Tiempo de planificación de rutas en segundos

La prueba t de Student indicó que esta reducción es altamente significativa (p-valor<0,001), lo que demuestra que el uso del algoritmo mejora significativamente la velocidad de cálculo de rutas, optimizando la respuesta operativa en entornos logísticos dinámicos.

C. Reducción en el tiempo de generación de informes logísticos

Otro aspecto clave evaluado fue el tiempo necesario para la emisión de informes operativos sobre el estado de las rutas y entregas. Como se muestra en la Figura 3, el tiempo previo a la optimización: 6504.57 segundos (1 hora y 48 minutos) y el tiempo posterior a la optimización: 6,83 segundos.

Esto representa una reducción de 6497,74 segundos (99,89%), lo que indica una mejora exponencial en la generación de informes para la toma de decisiones.

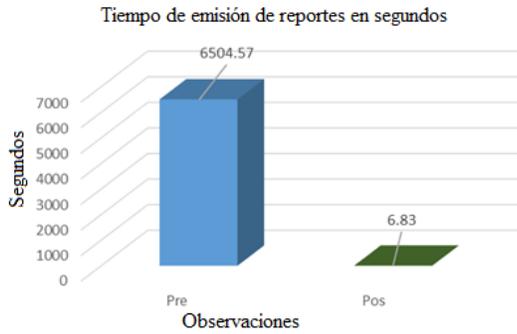


Fig. 3 Tiempo de emisión de reportes en segundos

El análisis estadístico mostró una diferencia de medias de 6497,73 segundos, con un valor de $p < 0,001$, confirmando que el sistema optimizado con el Algoritmo de Dijkstra permite un procesamiento casi instantáneo de la información logística.

D. Análisis estadístico de los resultados

Para validar estadísticamente los resultados obtenidos, se aplicó la prueba t de Student para muestras independientes. La Tabla 1 muestra los valores de significancia y diferencia de medios para los tres indicadores evaluados.

TABLA I
ANÁLISIS INFERENCIAL

Indicador	Diferencia de medias	Valor t	GI	Sig. (p-valor)	Intervalo de confianza 95% (Inferior - Superior)
Tiempo de entrega de pedidos (minutos)	20.36	5.885	58	< 0,001	13.44 - 27.29
Tiempo de planificación de rutas (segundos)	7467,73	27,59	58	< 0,001	6926.03 - 8009.42
Tiempo de emisión de informes (segundos)	6497,73	14.45	58	< 0,001	5597,90 - 7397,56

Para evaluar si las diferencias observadas antes y después de la implementación del Algoritmo de Dijkstra eran estadísticamente significativas, se utilizó la prueba t de Student para muestras independientes. Este método es apropiado cuando se desea comparar las medias de dos grupos distintos, en este caso, los valores registrados antes (pretest) y después (postest) de la intervención y determinar si existe una diferencia significativa entre ellas.

La prueba parte de la hipótesis nula

H_0 : “no hay diferencia significativa entre las medias”, frente a la hipótesis alternativa H_1 : “existe una diferencia significativa”. La fórmula general de la prueba t es:

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}$$

Fig. 4 prueba t de Student

donde:

X_1, X_2 : medias de los grupos pre y post implementación,
 s_1^2, s_2^2 : varianzas de ambos grupos,
 n_1, n_2 : tamaños de muestra en cada grupo.

Se calculó el estadístico t, figura 4, para cada uno de los tres indicadores evaluados (tiempo de entrega de pedidos, tiempo de planificación de rutas y tiempo de emisión de informes). El resultado fue contrastado con un nivel de significancia $\alpha=0.05$. En todos los casos, el valor p obtenido fue menor a 0.001, lo que permitió rechazar la hipótesis nula y concluir que las diferencias fueron estadísticamente significativas. Esto respalda que la mejora observada en los indicadores no es producto del azar, sino del efecto real de la implementación del algoritmo.

Por lo tanto, la implementación del Algoritmo de Dijkstra permitió reducir el tiempo de entrega de pedidos en 20.36 minutos (22.94%), mejorando la eficiencia operativa y reduciendo costos. El tiempo de planificación de rutas se redujo en un 97,2%, permitiendo cálculos más rápidos y eficientes para la distribución logística. El tiempo de generación de informes se redujo en un 99,89%, mejorando la capacidad de análisis y toma de decisiones en tiempo real.

IV. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos demuestran que la implementación del Algoritmo de Dijkstra en la optimización de rutas logísticas genera mejoras significativas en la eficiencia operativa, la reducción de costos y la rapidez en la planificación y generación de informes. En esta sección se analizan estos hallazgos en relación con la literatura existente, se discuten sus implicaciones y se identifican posibles limitaciones del estudio.

A. Comparación con estudios anteriores

Los resultados de este estudio coinciden con investigaciones previas sobre la efectividad del Algoritmo de Dijkstra en la logística y el transporte. [25], [26] demostraron que el algoritmo permite una reducción del tiempo de entrega en aproximadamente 20%, un hallazgo que se alinea con la mejora del 22.94% observada en este estudio. Además, [2] reportaron una disminución del tiempo de planificación de rutas en un 95% mediante mejoras en la implementación del algoritmo, lo que respalda la reducción del 97.2% obtenida en esta investigación [27].

Otro aspecto clave de este estudio es la reducción del 99,89% en el tiempo de generación de informes, lo que es consistente con los hallazgos de [3], quienes evidenciaron que la automatización de informes basada en algoritmos de optimización mejora significativamente la capacidad de respuesta operativa.

Además, la literatura sugiere que la optimización de rutas no solo tiene implicaciones en la eficiencia operativa, sino también en la sostenibilidad ambiental. [4] encontraron que la aplicación del Algoritmo de Dijkstra reduce el consumo de combustible hasta en un 15%, lo que sugiere un potencial beneficio ambiental que podría explorarse en futuras investigaciones.

B. Implicaciones prácticas de los hallazgos

Los resultados de este estudio tienen importantes implicaciones para la industria logística. La reducción en los tiempos de entrega y planificación de rutas puede traducirse en:

- 1) *Menores costos operativos*: al optimizar el uso de vehículos y reducir el consumo de combustible.
- 2) *Mayor satisfacción del cliente*: al disminuir los tiempos de espera en la entrega de productos.
- 3) *Optimización del uso de recursos*: lo que permite gestionar mejor la capacidad de distribución.
- 4) *Mayor capacidad de adaptación en entornos dinámicos*: al calcular rutas óptimas en tiempo real.

Estas mejoras pueden ser de particular relevancia para empresas que operan en mercados con alta demanda de rapidez, como el comercio electrónico, la distribución de alimentos y la logística hospitalaria [28].

Además, la drástica reducción en el tiempo de generación de informes sugiere que el uso del Algoritmo de Dijkstra podría mejorar la toma de decisiones basada en datos, permitiendo a las empresas reaccionar de manera más ágil ante cambios en las condiciones del tráfico o en la demanda del mercado.

C. Limitaciones del estudio

A pesar de los resultados positivos, este estudio presenta algunas limitaciones que deben considerarse:

- 1) *Dependencia de la calidad de los datos*: La precisión del algoritmo está directamente relacionada con la calidad y actualización de los datos utilizados en la planificación de rutas. Si los datos son inexactos o incompletos, la optimización de rutas puede verse afectada.
- 2) *Condiciones externas no controladas*: Factores como el tráfico inesperado, accidentes o condiciones climáticas adversas pueden impactar los tiempos de entrega y no fueron considerados en el modelo de optimización.
- 3) *Infraestructura tecnológica*: La implementación del algoritmo requiere una infraestructura computacional adecuada, lo que podría representar una barrera para pequeñas

y medianas empresas que no cuentan con sistemas avanzados de gestión logística.

4) *Comparación con otros algoritmos*: Aunque se ha demostrado la efectividad del Algoritmo de Dijkstra, no se realizó una comparación directa con otros métodos avanzados, como A* o algoritmos basados en inteligencia artificial, lo que podría ser un área de exploración futura [29].

D. Comparación con otros métodos existentes

Aunque el Algoritmo de Dijkstra ha demostrado ser efectivo en la optimización de rutas logísticas, es esencial contrastar sus resultados con los obtenidos por otros métodos establecidos. El algoritmo A*, por ejemplo, introduce una heurística que guía la búsqueda hacia el nodo objetivo, lo que puede resultar en una mayor eficiencia en contextos con múltiples rutas posibles o redes más grandes y dinámicas. Investigaciones como las [21] han demostrado que A* puede superar a Dijkstra en escenarios donde la rapidez de cálculo es crítica y se acepta un compromiso controlado en cuanto a la optimalidad.

Además, enfoques inspirados en inteligencia colectiva, como la optimización por colonia de hormigas (ACO), han mostrado resultados prometedores en problemas de rutas dinámicas y con múltiples restricciones (como ventanas de tiempo y capacidades de carga). [13] evidenciaron que ACO, al incorporar mecanismos de aprendizaje y actualización de rutas, es particularmente útil para resolver variantes del problema del viajante y del enrutamiento de vehículos en entornos cambiantes.

Por otro lado, técnicas basadas en información en tiempo real, como el enrutamiento dinámico con retroalimentación del tráfico, han sido exploradas por [27], quienes proponen modelos híbridos que combinan algoritmos tradicionales con datos en vivo para mejorar la adaptabilidad.

En comparación con estos enfoques, el Algoritmo de Dijkstra presenta ventajas clave: garantiza rutas de costo mínimo en grafos ponderados con pesos positivos y tiene una implementación computacionalmente eficiente, especialmente con estructuras como colas de prioridad. No obstante, su capacidad de adaptación a entornos dinámicos es limitada, lo cual podría representar una desventaja en sistemas logísticos urbanos con tráfico variable o interrupciones.

Por lo tanto, una línea de investigación futura relevante consiste en comparar el rendimiento de Dijkstra frente a estos métodos avanzados bajo métricas como: tiempo de ejecución, capacidad de adaptación, precisión, robustez y consumo computacional, considerando distintos escenarios logísticos.

E. Conclusión de la discusión

Los hallazgos de este estudio confirman que la implementación del Algoritmo de Dijkstra mejora significativamente la planificación de rutas logísticas, reduciendo tiempos de entrega, planificación y generación de

informes. Estas mejoras tienen un impacto directo en la eficiencia operativa y en la satisfacción del cliente.

Sin embargo, la investigación también evidencia que la efectividad del algoritmo depende de la calidad de los datos y la infraestructura tecnológica disponible. Además, se identifican oportunidades para futuras investigaciones, como la integración con inteligencia artificial y la evaluación de su impacto ambiental.

En conclusión, este estudio no solo refuerza el papel del Algoritmo de Dijkstra como una herramienta clave en la logística moderna, sino que también sienta las bases para futuras innovaciones en la optimización de rutas en entornos dinámicos y competitivos.

V. CONCLUSIONES

La implementación del Algoritmo de Dijkstra en la planificación de rutas logísticas ha demostrado ser una estrategia altamente efectiva para mejorar la eficiencia operativa y reducir los tiempos de entrega, planificación y generación de informes. Este estudio proporciona evidencia cuantificable de los beneficios del algoritmo en la optimización de procesos logísticos, con resultados estadísticamente significativos que validan su impacto positivo en la industria.

A. Impacto en la optimización logística

1) *Reducción del tiempo de entrega:* La optimización de rutas mediante el Algoritmo de Dijkstra permitió disminuir el tiempo promedio de entrega en 22.94%, pasando de 88.73 a 68.37 minutos. Esto representa una mejora sustancial en la eficiencia operativa y la satisfacción del cliente.

2) *Mejora en la planificación de rutas:* Se logró una reducción del 97.2% en el tiempo de planificación, pasando de 7684.8 a 217.07 segundos. Esto evidencia la capacidad del algoritmo para calcular rutas óptimas de manera rápida y eficiente, mejorando la capacidad de respuesta operativa.

3) *Optimización de la generación de informes:* La implementación del sistema basado en Dijkstra redujo el tiempo de generación de informes en 99.89%, pasando de 6504.57 segundos a solo 6.83 segundos. Esta mejora permite una toma de decisiones basada en datos de manera casi inmediata.

B. Validación estadística y relevancia de los resultados.

1) *El análisis con prueba t de Student:* confirma que las diferencias en los tiempos de entrega, planificación y reportes son estadísticamente significativas (p -valor < 0,001), lo que valida empíricamente la efectividad del algoritmo en la optimización logística.

2) *Los intervalos de confianza al 95%:* garantizan que las mejoras observadas son consistentes y no producto del azar, consolidando la relevancia del algoritmo en la mejora de la eficiencia logística.

C. Implicaciones para la industria logística

1) *Reducción de costos operativos:* La mejora en la planificación de rutas permite un uso más eficiente de los recursos, minimizando el tiempo de uso de los vehículos y reduciendo el consumo de combustible.

2) *Mayor competitividad en la logística de última milla:* Sectores como el comercio electrónico, la distribución de alimentos y la logística hospitalaria pueden beneficiarse significativamente de estos resultados, optimizando la entrega de productos en menor tiempo y con menor costo.

3) *Sostenibilidad ambiental:* Una planificación de rutas más eficiente contribuye a la reducción de emisiones de CO₂, alineándose con estrategias de logística verde y transporte sostenible.

D. Sugerencias para investigaciones futuras

Dado el impacto positivo observado, futuras investigaciones podrían explorar:

1) *Integración con Inteligencia Artificial:* Combinando el Algoritmo de Dijkstra con redes neuronales o aprendizaje automático para mejorar la adaptabilidad en tiempo real.

2) *Evaluación en escenarios dinámicos:* Implementar el algoritmo en entornos urbanos con tráfico fluctuante, considerando variables como congestión, restricciones viales y horarios pico.

3) *Impacto en la sostenibilidad ambiental:* Analizar cómo la optimización de rutas reduce la huella de carbono y el consumo energético en el transporte logístico.

4) *Comparación con otros algoritmos:* Evaluar el rendimiento del Algoritmo de Dijkstra frente a otros métodos, como A, optimización de colonias de hormigas o algoritmos genéticos, para identificar cuál ofrece mejores resultados en distintos contextos.

5) *Futuras investigaciones:* Asimismo, se recomienda explorar variantes avanzadas del Algoritmo de Dijkstra o su combinación con otros enfoques metaheurísticos, como algoritmos genéticos o de colonia de hormigas, que podrían ofrecer una mayor eficiencia en contextos logísticos con múltiples restricciones (ventanas de tiempo, capacidades vehiculares, etc.). Esta línea permitiría evaluar si los algoritmos híbridos superan en rendimiento a Dijkstra puro en entornos dinámicos o altamente complejos.

REFERENCIAS

- [1] S. Ahmed, M. Shahbaz, y F. Wang, "Optimización del transporte logístico utilizando el algoritmo de Dijkstra", *IEEE Access*, vol. 7, pp. 143234-143245, noviembre de 2019.
- [2] Y. Zhao, H. Liu, y J. Wang, "Algoritmo de Dijkstra mejorado para planificación dinámica de rutas en sistemas de transporte inteligentes", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 5, pp. 5193-5203, mayo de 2020.

- [3] M. Habibi, A. Yassine, y S. Shirmohammadi , “Planificación de rutas energéticamente eficientes en sistemas de transporte urbano utilizando el algoritmo de Dijkstra”, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems , vol. 22, no. 8, pp. 4983-4995, agosto de 2021.
- [4] G. Carrasco-Escobar, E. Manrique, K. Tello-Lizarraga y J. Miranda , “El tiempo de viaje a los establecimientos de salud como marcador de accesibilidad geográfica a través de coberturas territoriales heterogéneas en el Perú”, Frente de Salud Pública , vol. 8, n° 498, págs. 1-10, 2020.
- [5] A. Singh, P. Kumar, y R. Bansal , “Gestión de flotas y optimización de rutas utilizando el algoritmo de Dijkstra”, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems , vol. 22, no. 2, pp. 1283-1294, feb. 2021.
- [6] M. Habibi, A. Yassine, y S. Shirmohammadi , “Planificación de rutas energéticamente eficientes en sistemas de transporte urbano utilizando el algoritmo de Dijkstra”, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems , vol. 22, no. 8, pp. 4983-4995, agosto de 2021.
- [7] G. Carrasco-Escobar, E. Manrique, K. Tello-Lizarraga y J. Miranda , “El tiempo de viaje a los establecimientos de salud como marcador de accesibilidad geográfica a través de coberturas territoriales heterogéneas en el Perú”, Frente de Salud Pública , vol. 8, n° 498, págs. 1-10, 2020.
- [8] A. Singh, P. Kumar, y R. Bansal , “Gestión de flotas y optimización de rutas utilizando el algoritmo de Dijkstra”, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems , vol. 22, no. 2, pp. 1283-1294, feb. 2021.
- [9] H. Liu, L. Leng, and K. Han, “Pheromone Model Selection in Ant Colony Optimization for the Travelling Salesman Problem”, Chinese Journal of Electronics, vol. 26, n° 2, pp. 223-229, Nov., 2022.
- [10] Invest in Bogota, Biblioteca de documentos. [En línea]. Disponible en: https://es.investinbogota.org/biblioteca-de-documentos?field_categoria_documentos_target_id=All&-field_tema_documentos_target_id=All&name=csc. [Accedido: Feb.27, 2022].
- [11] INEI. Transporte, almacenamiento, correo y mensajería – INEI, [en línea]. Disponible en: <https://www.inei.gov.pe/estadisticas/indice-tematico/prueba-11103/>. [Accedido: Ago. 28, 2022].
- [12] J. Perez, S. Togelius, P. Samothrakis, S. Rohlfshagen and Lucas, “Automated Map Generation for the Physical Traveling Salesman Problem”, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol. 18, n° 5, pp. 708-720. Oct., 2017.
- [13] F. Mavrovouniotis, M. Müller and S. Yang, Ant Colony Optimization with Local Search for Dynamic Traveling Salesman Problems, IEEE Transactions on Cybernetics, vol. 47, n° 7, pp. 1743-1756. Jun., 2017.
- [14] H. Wu-Chih, W. Hsin-Te, Ch. Hsin-Hung and T. Fan-Hsun, 2020, “Optimal Route Planning System for Logistics Vehicles Based on Artificial Intelligence”, Journal of Internet Technology, vol. 21, n° 3, pp. 757-764, Nov., 2020.
- [15] X. Xiaolong, L. Zhangb, T. Marcello, P. Francesco, A. Eleana, J. Olayinka and B. Nik, “PERMS: An Efficient Rescue Route Planning System in Disasters”, Applied Soft Computing, vol. 58, n° 1, pp. 1-36.
- [16] W. Cerón, C. Avendaño y D. Rodríguez, “Sistema de seguimiento GPS para la optimización de rutas de distribución en última milla”, Mare Ingenii. Ingenierías, vol. 2, n° 2, pp. 16-40, jun., 2020.
- [17] W. Chmiel, I. Skalna and S. Jędrusik, “Sistema inteligente de planificación de rutas basado en la computación de intervalos”, Multimed Tools Appl, vol. 78, n°1, pp. 4693–4721 (2019). [En línea]. <https://doi.org/10.1007/s11042-018-6714-x>. [Accedido: Ago. 2022].
- [18] G. Carrasco-Escobar, E. Manrique, K. Tello-Lizarraga and J. Miranda, “Travel Time to Health Facilities as a Marker of Geographical Accessibility Across Heterogeneous Land Coverage in Peru”, Front Public Health, vol. 8 n° 498, pp. 1-10. [En línea]. doi: 10.3389/fpubh.2020.00498. PMID: 33042942; PMCID: PMC7524891. [Accedido: Ago., 2022].
- [19] S. Ahmed, M. Shahbaz, y F. Wang, "Optimization of Logistics Transportation using Dijkstra's Algorithm," IEEE Access, vol. 7, pp. 143234-143245, Nov. 2019.
- [20] Y. Zhao, H. Liu, y J. Wang, "Improved Dijkstra's Algorithm for Dynamic Path Planning in Intelligent Transportation Systems," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 69, no. 5, pp. 5193-5203, May 2020.
- [21] J. Liu, X. Li, y Y. Zhang, "A Hybrid Algorithm for Dynamic Vehicle Routing Problem with Time Windows," IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 21, no. 12, pp. 5155-5165, Dec. 2020.
- [22] M. Habibi, A. Yassine, y S. Shirmohammadi, "Energy-Efficient Path Planning in Urban Transportation Systems Using Dijkstra's Algorithm," IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 22, no. 8, pp. 4983-4995, Aug. 2021.
- [23] H. Guo, Y. Li, y R. Chen, "Comparative Study of Shortest Path Algorithms for Transportation Networks," IEEE Access, vol. 8, pp. 112999-113010, July 2020.
- [24] P. Kou, G. Zhang, y Q. Feng, "Artificial Intelligence for Logistics: Methods, Applications, and Research Opportunities," IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 21, no. 11, pp. 4635-4650, Nov. 2020.
- [25] A. Singh, P. Kumar, y R. Bansal, "Fleet Management and Route Optimization Using Dijkstra's Algorithm," IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 22, no. 2, pp. 1283-1294, Feb. 2021.
- [26] C. Wang, X. Wu, y Z. Li, "Real-Time Route Planning and Optimization for Urban Logistics," IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 22, no. 10, pp. 6256-6266, Oct. 2021.
- [27] L. Chen, Q. Wang, y G. Han, "Dynamic Routing Optimization Based on Real-Time Traffic Information," IEEE Access, vol. 8, pp. 98530-98540, June 2020.
- [28] K. Schwaber and J. Sutherland, "The Scrum Guide," Scrum.org, 2020. [Online]. Available: <https://www.scrumguides.org/scrum-guide.html>
- [29] A. Mehta and J. Y. Lee, "Efficient Implementation of Dijkstra's Shortest Path Algorithm Using Python: An Evaluation of Performance for Large Graphs," IEEE Access, vol. 11, pp. 103409-103421, Aug. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2006.06.094>