

# Problema de enrutado del arco capaticado

Comparación de técnicas meta-heurísticas competitivas del estado arte

Derlis Rolando Gómez Fernández<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional de Asunción. Facultad Politécnica.  
Maestría en Ciencias de la Computación

01 de Noviembre de 2024

# Contenido

- 1 Resumen
- 2 Introducción
- 3 Revisión de la Literatura
- 4 Metodología
- 5 Justificación de la Elección
- 6 Resultados
- 7 Referencias

# Contenido

- 1 Resumen
- 2 Introducción
- 3 Revisión de la Literatura
- 4 Metodología
- 5 Justificación de la Elección
- 6 Resultados
- 7 Referencias

## Aplicación de Técnicas Meta-Heurísticas en el Problema de Enrutamiento con Arcos Capacitados (CARP)

Este trabajo aborda el **Problema de Enrutamiento con Arcos Capacitados (CARP)**, que consiste en planificar rutas óptimas para vehículos con **capacidad limitada**, con tareas como **recoger basura o entregar suministros**. Este problema es crucial tanto en la **industria** (logística y transporte) como en el **ámbito académico**, por los **desafíos de optimización** que presenta.

En este estudio, se **revisan y comparan técnicas meta-heurísticas avanzadas**, centrándose en su **eficiencia y aplicabilidad** para resolver el CARP. Estas técnicas permiten encontrar **soluciones cercanas al óptimo** para problemas complejos. El objetivo es identificar cuál de estas técnicas es más efectiva, proporcionando una **comparación rigurosa**.

# Contenido

- 1 Resumen
- 2 Introducción**
- 3 Revisión de la Literatura
- 4 Metodología
- 5 Justificación de la Elección
- 6 Resultados
- 7 Referencias

El **Problema de Enrutamiento con Arcos Capacitados (CARP)** es un desafío combinatorio que implica la optimización de rutas en redes con capacidades definidas. Este problema no solo tiene una importancia teórica, sino que también encuentra aplicaciones prácticas en sectores como la logística, distribución y gestión de redes, donde la optimización de rutas es esencial para minimizar costos y maximizar la eficiencia.

Dada su relevancia, el CARP ha sido objeto de extensas investigaciones tanto en el ámbito académico como en la industria. Sin embargo, la obtención de soluciones precisas resulta compleja, especialmente en instancias de gran escala. Para abordar esta dificultad, las técnicas meta-heurísticas han surgido como herramientas prometedoras, ya que permiten encontrar soluciones aproximadas en tiempos razonables.

En este trabajo, se realiza una revisión exhaustiva de las técnicas meta-heurísticas más avanzadas, evaluando su efectividad y aplicabilidad al CARP. No solo se busca entender estas técnicas, sino también compararlas en términos de rendimiento y precisión, proporcionando una guía clara sobre qué estrategias resultan más adecuadas para diferentes escenarios del problema.

# Contenido

- 1 Resumen
- 2 Introducción
- 3 Revisión de la Literatura**
- 4 Metodología
- 5 Justificación de la Elección
- 6 Resultados
- 7 Referencias



Basada en las guías de revisión sistemática de Kitchenham.

## **Definición de palabras clave:**

- ① Capacitated Arc Routing Problem.
- ② Metaheuristics for CARP.
- ③ Algorithm for CARP.

## **Editoriales Consideradas:**

- ① Springer
- ② IEEE Xplore.

## Criterios de Exclusión:

- Estudios publicados hace más de 5 años.
- Trabajos que no estén enfocados principalmente en CARP (por ejemplo, si CARP es solo una pequeña parte o una aplicación menor en un estudio más amplio).
- Estudios que no propongan, comparen o evalúen enfoques algorítmicos o metaheurísticos.
- Trabajos que no presenten resultados empíricos o simulaciones.
- Solo artículos científicos.

**Metodología de Selección:** Se realizó una búsqueda manual en las bases de datos de Springer e IEEE Xplore, utilizando filtros de palabras clave y año de publicación. Tras revisar los títulos y resúmenes, se identificaron los artículos con potencial interés para la aplicación propuesta, los cuales fueron anotados para un análisis más detallado. Por otro lado, los artículos que no cumplían con los criterios de exclusión fueron descartados.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada editorial:

- **Springer:**

- Clave 1: 424 resultados.
- Clave 2: 10 resultados.
- Clave 3: 190 resultados (se excluyeron revistas relacionadas a ciencias vivas).

- **IEEE Xplore:**

- Clave 1: 39 resultados.
- Clave 2: 3 resultados.
- Clave 3: 17 resultados.

## **A novel model for sustainable waste collection arc routing problem: Pareto-based algorithms (2022).**

Un modelo novedoso para el problema de enrutamiento con arcos en la recolección sostenible de residuos: Algoritmos basados en Pareto.

El estudio aborda la gestión sostenible de residuos sólidos municipales (MSW), proponiendo un modelo de programación lineal mixta-entera (MILP) para resolver el Problema de Enrutamiento con Arcos Capacitados Periódico (PCARP) en la recolección de residuos. El objetivo es optimizar costos, reducir emisiones de gases de efecto invernadero, maximizar la satisfacción ciudadana y minimizar la desviación de la carga de trabajo. Para resolver el problema, se desarrolla un algoritmo híbrido de optimización multiobjetivo llamado MOSA-MOIWOA, que combina el algoritmo de recocido simulado multiobjetivo (MOSA) con el algoritmo de optimización de maleza invasiva multiobjetivo (MOIWOA). La técnica de diseño de Taguchi se utiliza para optimizar los parámetros del algoritmo.

## **Waste Collection Routing: A Survey on Problems and Methods (2023).**

Este trabajo ofrece una revisión exhaustiva de la literatura actual sobre el enrutamiento en la recolección de residuos, destacando los problemas más comunes y las soluciones propuestas en operaciones de recolección. Se clasifica la literatura en problemas de enrutamiento general, nodal y de arcos, con énfasis en métodos como el Problema de Enrutamiento con Arcos Capacitados (CARP). Se abordan diversas características de los problemas, como la sostenibilidad, la incertidumbre en la demanda y la planificación del personal, presentando métodos exactos, heurísticos y metaheurísticos. Entre las metaheurísticas utilizadas están las que estaremos presentando en la siguiente sección con las metaheurísticas de: el Recocido Simulado (SA), Búsqueda de Vecindario Variable (VNS), y la extensión del Algoritmo Optimización de Maleza Invasiva (IWO), que es el Algoritmo de Optimización de Maleza Invasiva Multiobjetivo (MOIWOA).

# Contenido

- 1 Resumen
- 2 Introducción
- 3 Revisión de la Literatura
- 4 Metodología**
- 5 Justificación de la Elección
- 6 Resultados
- 7 Referencias

**Descripción detallada del método científico utilizado:** Se han seleccionado estudios basados en la revisión literaria que aplican enfoques metaheurísticos para resolver diferentes variantes del problema CARP y otros problemas de enrutamiento similares. Estos trabajos serán analizados en detalle para extraer sus metodologías. Además, se buscará una implementación de estas metaheurísticas para un mismo problema, en este caso el Problema de Enrutamiento con Arcos Capacitados Periódico (PCARP), con el objetivo de verificar y comparar su eficacia específicamente para esta variante del problema.

## Elección de tres enfoques metaheurísticos basados en la revisión literaria:

- 1 **Simulated Annealing (SA):** El recocido simulado es un algoritmo de búsqueda local inspirado en el proceso físico de enfriamiento de metales. Es eficiente para encontrar soluciones cercanas al óptimo global en problemas de optimización combinatoria como el CARP. El algoritmo acepta soluciones menos óptimas con una probabilidad decreciente a medida que la "temperatura" baja, lo cual permite escapar de óptimos locales y encontrar soluciones de mayor calidad.

**Implementación particular:** Se inicializaron las rutas utilizando un enfoque de *Vecino Más Cercano* para construir soluciones iniciales factibles. Los arcos no visitados fueron asignados a los vehículos priorizando la capacidad y la distancia mínima. La generación de soluciones vecinas se realizó intercambiando dos aristas dentro de una misma ruta. Se definió una temperatura inicial y se aplicó una tasa de enfriamiento hasta alcanzar una temperatura mínima, siguiendo el esquema clásico del SA.



- ② **Invasive Weed Optimization (IWO):** Es una metaheurística inspirada en la colonización de malezas, diseñada para optimización global. Es eficiente para problemas como el CARP y su variante periódica (PCARP), permitiendo encontrar rutas óptimas minimizando costos y respetando restricciones de capacidad. Destaca por su adaptabilidad y exploración efectiva del espacio de búsqueda, siendo adecuada para variantes del CARP debido a su flexibilidad y robustez en entornos con múltiples restricciones.

**Implementación particular:** Se dividió el grafo en áreas utilizando *K-Means Clustering*, asignando clústeres a los vehículos. Se inicializaron rutas conectadas para cada vehículo basadas en estos clústeres, asegurando cubrir todas las aristas con demanda. La población evolucionó aplicando mutaciones que mantienen la conectividad y cobertura de demandas, seleccionando las mejores soluciones basadas en el costo total, siguiendo el esquema de IWO.

- ③ **Variable Neighborhood Search (VNS):** La búsqueda de vecindad variable explora sistemáticamente diferentes estructuras de vecindad para encontrar soluciones óptimas. Es un enfoque iterativo donde se alterna entre vecindades más pequeñas y más grandes para evitar quedar atrapado en óptimos locales. En el contexto del CARP, es eficaz para manejar restricciones de capacidad y múltiples viajes.
- Implementación particular:** Se agruparon las aristas del grafo en clústeres geográficos utilizando *K-Means*, asignando cada clúster a un vehículo. Las rutas iniciales se generaron asegurando que todas las aristas con demanda fueran cubiertas. La fase de *Shaking* se realizó generando nuevas soluciones mediante intercambios aleatorios de arcos entre rutas, y la búsqueda local utilizó movimientos tipo 2-opt para mejorar las soluciones. Se aplicó un esquema iterativo alternando entre diferentes vecindades hasta cumplir los criterios de parada.

La variante seleccionada para estudiar dentro del **Capacitated Arc Routing Problem (CARP)** es el **Problema de Enrutamiento de Arcos con Capacidad Periódica (PCARP)**, enfocado únicamente en la minimización del costo total de las rutas durante el período.

**El Problema de Enrutamiento de Arcos con Capacidad Periódica (PCARP)** busca optimizar rutas de recolección de residuos en múltiples períodos, reduciendo el costo total a lo largo del horizonte planificado. Esto incluye minimizar la distancia recorrida, el consumo de combustible y otros costos operativos, respetando la capacidad de los vehículos en cada día de recolección.

# Contenido

- 1 Resumen
- 2 Introducción
- 3 Revisión de la Literatura
- 4 Metodología
- 5 Justificación de la Elección**
- 6 Resultados
- 7 Referencias

# Justificación de la Elección

Elegí esta variante del PCARP por los siguientes motivos:

- 1 **Simplicidad relativa:** Al concentrarse únicamente en la minimización de costos, se reduce la complejidad del modelo, lo que facilita su implementación y permite una evaluación más clara de las técnicas meta-heurísticas en términos de eficiencia y convergencia.
- 2 **Adecuación para técnicas meta-heurísticas:** La minimización de costos en un horizonte de tiempo extendido requiere un enfoque de optimización que maneje bien las restricciones de capacidad y las rutas eficientes, lo cual es ideal para técnicas como el *Simulated Annealing (SA)* y el *Invasive Weed Optimization (IWO)*.
- 3 **Relevancia en la gestión de residuos:** La minimización del costo total es una prioridad clave en la gestión de residuos, ya que permite una asignación más efectiva de recursos y una reducción directa de los gastos operativos en ciudades de mediano a gran tamaño.

# Contenido

- 1 Resumen
- 2 Introducción
- 3 Revisión de la Literatura
- 4 Metodología
- 5 Justificación de la Elección
- 6 Resultados**
- 7 Referencias

En este estudio, se evaluaron tres algoritmos meta-heurísticos: **Simulated Annealing (SA)**, **Invasive Weed Optimization (IWO)** y **Variable Neighborhood Search (VNS)**, aplicados a la solución del PCARP (Problema de Enrutamiento de Arcos Capacitados Periódico) en las regiones de *Maramburé, Luque, Paraguay, Lambaré, Paraguay* y *Mariano Roque Alonso, Paraguay*. Las pruebas se realizaron en una computadora **Asus ROG Zephyrus** equipada con **16 GB de RAM**, un **procesador Intel Core i7 de 9ª generación** y una **GPU RTX 2030**. El desarrollo y las simulaciones fueron llevadas a cabo en **Python**, usando **PyCharm** en su versión PyCharm 2024.2.4 (Professional Edition).



# Rendimiento en Maramburé, Luque

Se realizaron cinco simulaciones para cada algoritmo con **3 vehículos** y **capacidad de 600** en *Maramburé, Luque, Paraguay*. Los resultados promedio fueron:

Algoritmo	Costo Prom.	T. Prom. (s)
Simulated Annealing (SA)	6,541.4	14.26
Invasive Weed Optimization (IWO)	82,729.4	59.20
Variable Neighborhood Search (VNS)	87,693.8	576.01

## Observaciones:

- **SA** fue eficiente, generando rutas de menor costo en tiempos competitivos.
- **IWO** presentó costos mayores, cubriendo más completamente el área.
- **VNS** tuvo el mayor costo y tiempos de ejecución más prolongados.

# Rendimiento en Lambaré, Paraguay

Se realizaron simulaciones con **10 vehículos** y **capacidad de 1200** en *Lambaré, Paraguay*. Los resultados fueron:

Algoritmo	Costo de ruta	Tiempo (s)
Simulated Annealing (SA)	12,672	4,075
Invasive Weed Optimization (IWO)	1,680,772	3,719
Variable Neighborhood Search (VNS)	2,707,162	274.8

## Observaciones:

- **SA** generó rutas de bajo costo, aunque con un tiempo de ejecución elevado.
- **IWO** produjo rutas con mayor cobertura espacial pero a un costo significativamente mayor.
- **VNS** tuvo el mayor costo pero fue el más rápido en términos de tiempo de ejecución.

# Rendimiento en Mariano Roque Alonso, Paraguay

Se realizaron simulaciones con **10 vehículos** y **capacidad de 1200** en *Mariano Roque Alonso, Paraguay*. Los resultados fueron:

Algoritmo	Costo de ruta	Tiempo (s)
Simulated Annealing (SA)	13,099	4,744.29
Invasive Weed Optimization (IWO)	1,889,618	3,666
Variable Neighborhood Search (VNS)	3,297,339	212

## Observaciones:

- **SA** produjo rutas de menor costo, aunque con mayor tiempo de ejecución.
- **IWO** generó rutas con mayor cobertura, resultando en costos más altos.
- **VNS** tuvo el costo más elevado pero fue el más rápido en ejecución.

Los resultados muestran que el **Simulated Annealing (SA)** fue el algoritmo más eficiente en términos de costo de las rutas en todas las regiones evaluadas. Sin embargo, presentó tiempos de ejecución mayores, especialmente en regiones más grandes como *Lambaré y Mariano Roque Alonso*.

El **Invasive Weed Optimization (IWO)** generó rutas con mayor cobertura espacial, llenando el espacio hasta agotar la capacidad de los vehículos, lo que resultó en costos significativamente más altos. No obstante, sus tiempos de ejecución fueron menores que los de SA en las regiones más grandes.

El **Variable Neighborhood Search (VNS)** fue el algoritmo más rápido en términos de tiempo de ejecución en las regiones más grandes, pero produjo rutas con los costos más altos, lo que indica una menor eficiencia en la optimización de las rutas.

Es importante destacar que, aunque el IWO mostró rutas más completas en las visualizaciones, esto se debió a su enfoque en cubrir todas las aristas con demanda, incrementando el costo total de las rutas al priorizar la cobertura completa sobre la optimización del costo.

# Visualización y Comparación

Las visualizaciones de las rutas generadas confirmaron que el **Simulated Annealing (SA)** produjo rutas más cortas y optimizadas en términos de costo, aunque no necesariamente cubriendo todas las áreas posibles. Por otro lado, las rutas generadas por el **Invasive Weed Optimization (IWO)** mostraron una cobertura más extensa del área, llenando el espacio disponible hasta agotar la capacidad de los vehículos, lo que se reflejó en los costos más altos.

El **Variable Neighborhood Search (VNS)** generó rutas con menos optimización en costos, reflejado en los costos más altos, pero fue más eficiente en tiempo de ejecución en las regiones más grandes.

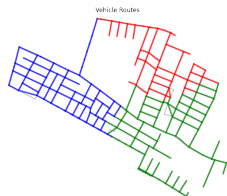
Estas diferencias resaltan cómo cada algoritmo, en el uso, prioriza distintos aspectos: SA se enfoca en minimizar costos, IWO en la implementación realizada a maximizar la cobertura, y VNS en reducir el tiempo de cómputo, aunque todos los algoritmos tengan como objetivo minimizar el costo total de las rutas.

El análisis comparativo demuestra que, en las implementaciones realizadas, el **Simulated Annealing (SA)** sobresalió como la opción más favorable para resolver el PCARP en las regiones evaluadas, debido a su capacidad de encontrar soluciones de menor costo, aunque a costa de mayores tiempos de ejecución en regiones más grandes.

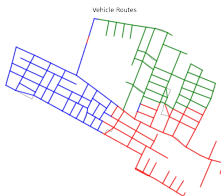
El **Invasive Weed Optimization (IWO)** es adecuado cuando se busca una cobertura más completa de las aristas con demanda, aceptando costos más altos. El **Variable Neighborhood Search (VNS)** puede ser útil cuando se requiere rapidez en la obtención de soluciones, aunque las rutas resultantes puedan no ser las más óptimas en términos de costo.

Estos resultados resaltan la importancia de seleccionar el algoritmo adecuado según las prioridades específicas del problema, ya sea minimización de costos, cobertura completa de demandas o tiempos de respuesta rápidos.

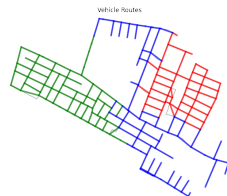
## Gráficos de las rutas generadas por cada algoritmo



(a) IWO



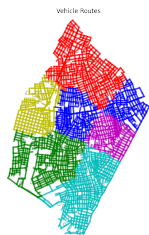
(b) VNS



(c) SA

Figura: Rutas generadas por cada algoritmo en 'Maramburé, Luque, Paraguay'

## Gráficos de las rutas generadas por cada algoritmo



(a) IWO



(b) VNS



(c) SA

Figura: Rutas generadas por cada algoritmo en 'Lambare, Paraguay'



## Gráficos de las rutas generadas por cada algoritmo



(a) IWO



(b) VNS



(c) SA

Figura: Rutas generadas por cada algoritmo en 'Mariano Roque Alonso, Paraguay'

# Contenido

- 1 Resumen
- 2 Introducción
- 3 Revisión de la Literatura
- 4 Metodología
- 5 Justificación de la Elección
- 6 Resultados
- 7 Referencias**



Christina Hess, Alina G. Dragomir, Karl F. Doerner, Daniele Vigo.  
*Waste collection routing: a survey on problems and methods.*  
Central European Journal of Operations Research 32, 399–434 (2024).



Erfan Babaee Tirkolaee, Alireza Goli, Selma Gütmen, Gerhard-Wilhelm Weber, Katarzyna Szwedzka.  
*A novel model for sustainable waste collection arc routing problem: Pareto-based algorithms.*  
Annals of Operations Research 324, 189–214 (2023).



Erfan Babaee Tirkolaee, Alireza Goli, Maryam Pahlevan, Ramina Malekalipour Kordestanizadeh.  
*A robust bi-objective multi-trip periodic capacitated arc routing problem for urban waste collection using a multi-objective invasive weed optimization.*  
Waste Management & Research 37, 1–13 (2019).