

CVRP Optimizado con metaheurísticas para la recolección de contenedores denominados” Puntos Verdes” en la ciudad de Puebla.

Optimized CVRP Using Metaheuristics for the Collection of “Green Points” Containers in the City of Puebla.

Abstract

The collection of municipal solid waste represents a challenge for today’s society. The ‘Green Points’ initiative in the city of Puebla aims to support waste separation for resource recovery. In this work, we present three metaheuristics: Jaya, Grey Wolf Optimizer, and Simulated Annealing to plan the collection routes for these points, with the goal of minimizing the total travel distance by solving a Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP).

Resumen

La recolección de residuos sólidos urbanos representa un desafío para la sociedad actual. La iniciativa” Puntos Verdes” en la ciudad de Puebla pretende ayudar a separar los residuos para su aprovechamiento. En este trabajo presentamos 3 metaheurísticas Jaya, Lobo Gris y Recocido Simulado para planear la ruta de recolección’ de dichos puntos para minimizar la distancia recorrida mediante un problema de Ruteo de Vehículos Capacitados (CVRP).

Keywords and phrases: CVRP, Jaya, Lobo gris, Recocido simulado, metaheurísticas

2020 Mathematics Subject Classification: 68N01

1 Introducción

A medida que crece la producción, transporte y consumo de bienes y servicios de una nación también se incrementa la demanda de recursos y la generación de residuos. Si estos últimos no son gestionados adecuadamente pueden tener impactos negativos en la salud humana y en el ambiente. Debido a que los hábitos de consumo y producción han sufrido un cambio importante’ en los últimos años, cada vez es más difícil minimizar, clasificar y separar correctamente los residuos para su valoración y tratamiento. [1]

El municipio de Puebla comenzó a mediados de 2019 con la iniciativa “Puntos Verdes”, que consiste en contenedores ubicados en todo el municipio accesibles a la población, que permiten separar los residuos que pueden reciclarse. Dichos puntos luego son recolectados y llevados a alguna planta de aprovechamiento o al sitio de disposición final.

El problema de Ruteo de Vehículos podría permitirnos hallar una ruta que minimice el impacto ambiental de la recolección. Para ello se usarían ubicaciones (puntos verdes), demandas estimadas (capacidad), vehículos y matriz de distancias. En este trabajo modelamos el problema y obtenemos soluciones potenciales que minimicen la distancia del recorrido de recolección de los puntos.

Fecha de recepción: septiembre 1, 2020 / Fecha de aceptación: octubre 5, 2020

2 Marco Teórico y Estado del Arte

El CVRP modela la distribución de mercancías desde un depósito a un conjunto de clientes usando una flota homogénea de vehículos con capacidad limitada.

Cada cliente se visita exactamente una vez y cada ruta debe respetar la capacidad del vehículo.

El objetivo más habitual es minimizar la distancia total (o el coste) recorrida por todos los vehículos. El problema fue introducido originalmente para optimizar el reparto de combustible [11] y sigue siendo clave en logística de última milla, retail y cadenas de suministro.

El CVRP generaliza al TSP, por lo que es NP-hard [12]. El número de rutas posibles crece exponencialmente con los clientes, de modo que los algoritmos exactos (branch-and-cut, column generation, etc.) solo resuelven instancias pequeñas o medianas. Esta dificultad ha impulsado el desarrollo de aproximaciones heurísticas y metaheurísticas durante más de cinco décadas [13].

2.2 Estado del Arte

Las tendencias actuales apuntan a métodos híbridos y auto adaptativos que combinan intensificación local, mecanismos de memoria y resolución exacta parcial, alcanzando soluciones muy cercanas al óptimo en minutos u horas de cálculo.

- Búsqueda Tabú / Búsqueda Iterada [14]: exploran sistemáticamente intercambios y reubicaciones de clientes mediante listas tabú y reinicios; han mejorado múltiples óptimos publicados del CVRP estándar.
- Algoritmos Genéticos Híbridos (HGA) [17]: combinan cruce de rutas, intensificación local y control adaptativo de diversidad; alcanzan errores $< 1\%$ en grandes conjuntos de prueba clásicos.

3 Arquitectura de la Aplicación

A continuación, se presenta el planteamiento del proyecto considerando las necesidades para el CVRP, los datos fueron en su mayoría extraídos de fuentes oficiales, pero no actuales (2014,2016) debido a la falta de accesibilidad a dichos datos.

3.1. Tipos de contenedor y ubicaciones

El gobierno del estado reporta para el segundo semestre de 2024 que existían 127 puntos verdes ubicados en 63 puntos de la ciudad [5] dispuestos como se muestra en la siguiente figura



Figura 1. Localización de puntos verdes en la ciudad de Puebla

Para generar el mapa de la figura anterior se utilizaron las latitudes y longitudes de cada ubicación reportada en [5], utilizando la API de Google Maps Geocoding; sin embargo, solo fue posible obtenerlas para 57 de las 63 ubicaciones.

El tipo de contenedor utilizado por el municipio no se encuentra reportado en la página de datos abiertos. Para identificar el tipo de contenedor más probable, utilicé la versión gratuita de ChatGPT con acceso a internet. La respuesta nos dio las siguientes opciones:

Contenedor Vanguard 2200, Contenedor de basura Vanguard 3200 con una capacidad de 2,200 y 3,200 litros respectivamente. Asumiremos que cada punto verde actual tiene la máxima capacidad de 3,200 litros, lo que representa 0.8 toneladas.

3.2 Datos del Modelo

3.2.1. Demanda máxima

En los municipios de México, el peso volumétrico de los RSU sin compactar oscila entre 125 y 250 kg/m³ [6].

En 2017, el INEGI reportó en [9] que en el municipio de Puebla se recolectaban 1,733,745 kg de manera selectiva por día, lo que representa la demanda máxima diaria.

Sin demandas individuales por contenedor, asumiremos que cada uno está a su máxima capacidad antes de ser recolectado, es decir, 0.8 toneladas (capacidad máxima por nodo).

3.2.2. Matriz de distancias

Como se mencionó anteriormente, usando una API convertimos todas las ubicaciones disponibles a sus coordenadas de latitud y longitud.

Los datos abiertos públicos de [5] están detallados en 5 sectores:

- sur-pte
- sur-ote
- nor-ote
- centro

Dos frecuencias de recolección:

- semanal
- quincenal

17 rutas:

1. miércoles 1 y 2
2. viernes 1 y 2
3. lunes 1 y 2
4. lunes 2
5. martes 1 y 2
6. sábado 1
7. sábado 1 y 2
8. viernes 2
9. jueves 1
10. jueves 1 y 2
11. miércoles 2
12. sábado 2

13. martes 2
14. jueves 2
15. martes 1
16. viernes 1
17. lunes 1
- 18.

Podemos ver que esto resulta en 24 combinaciones de sector, frecuencia y recolección, lo que nos da una idea del costo del recorrido actual.

Para calcular la matriz de distancias entre las ubicaciones calculamos la distancia del semiverseno, que mide la distancia entre dos puntos tomando en cuenta la curvatura de la Tierra, lo que resulta en una matriz simétrica de 57×57.

3.2.3 Capacidad máxima de los contenedores

Además de la restricción de la demanda, debemos considerar la capacidad máxima de cada contenedor, que es de 3,200 litros por contenedor.

Nosotros no incluiremos el sector como una restricción, ya que puede suceder que colonias adyacentes se encuentren en distintos sectores, pero a una corta distancia, lo cual debe ser considerado en el ruteo óptimo.

Al extender las rutas por día y frecuencia obtenemos dos frecuencias de recolección: diaria con frecuencia de tipo semanal o quincenal. Cada día y frecuencia tienen asociadas un número de campanas, cada una con capacidad de 3,200 litros, por lo que la capacidad máxima por punto verde se muestra en la tabla 2.

Esto nos muestra que en la ruta semanal existen 13 puntos que deben ser visitados y 10 de forma quincenal. Resolveremos cada uno de estos por separado.

3.2.4. Unidades de recolección disponibles

Reportado también en el INEGI [9], el municipio de Puebla contaba en 2017 con 417 vehículos con compactador destinados a la recolección. Sin embargo, esta cantidad de camiones es para recolectar todos los residuos, no solo los puntos verdes. Así que calcularemos el número mínimo de camiones para recolectar la demanda diaria, de tal forma que, un camión con compactador usualmente tiene una capacidad de entre 15 y 24 metros cúbicos de basura compactada y una carga útil de entre 13 y 15 toneladas [10].

El problema consiste en recolectar basura de 114 contenedores, distribuidos en diferentes ubicaciones. Cada contenedor se encuentra al máximo de su capacidad, es decir, contiene: 0.8 toneladas.

Por lo tanto, la demanda total a recolectar en un día es:

$$Demanda\ total \times 0.8 = demanda\ por\ punto\ en\ toneladas.$$

Entonces:

$$Demanda\ total / n\ veh\acute{c}ulos \geq 15$$

Para la recolección semanal y quincenal, el **número mínimo de vehículos es 5**.

3.2.5 Punto de salida y llegada

El punto de inicio y fin será la Planta de Aprovechamiento de Residuos (FIRSU), creada a mediados de 2024, ubicada en “Industrial Resurrección, 72228 Heroica Puebla de Zaragoza, Pue.”

3.3 Modelo

El modelo final es un modelo CVRP, ya que consideraremos la capacidad del camión y los contenedores. Existen múltiples ubicaciones que contienen contenedores de basura, cada uno con una capacidad máxima de carga. Se cuenta con una flota de camiones recolectores, los cuales inician y finalizan su recorrido en un depósito central. Los camiones deben regresar al depósito una vez que alcanzan su capacidad máxima. El objetivo es minimizar la distancia total recorrida por los vehículos.

Ruta	Frecuencia	Numero de nodo	Ubicación	Campanas	Demanda Máxima (litros)
jueves1	quincenal	[9, 16, 53]	Av. 5 Pte. 2522, La Paz, 72160 Puebla, Pue.,	7	22,400
jueves1	semanal	[14, 22, 23, 30]	Blvd. Hermanos Serdán 630, Pino Suárez, 72020...	8	25,600
jueves2	quincenal	[37]	Calle progreso dentro del parque Romero Varga...	3	9,600
jueves2	semanal	[14, 22, 23, 30]	Blvd. Hermanos Serdán 630, Pino Suarez, 72020.	8	25,600
lunes1	quincenal	[51, 59]	Libramiento Tehuacán S/N, Maravillas, 72220 P...	4	12,800
lunes1	semanal	[3, 12, 26]	Blvd. Valsequillo 7716, Ex hacienda, San José.	6	19,200
lunes2	quincenal	[4, 10, 28, 35, 36, 38, 40, 60, 61]	C. 11-J 4 2, Bosques de San Sebastián, 72310 ...	17	54,400
lunes2	semanal	[3, 12, 26]	Blvd. Valsequillo 7716, Ex hacienda, San José	6	19,200
martes1	quincenal	[39, 56]	Avenida 59 Poniente, entre 5 B sur y 5 sur...	4	12,800
martes1	semanal	[5, 13, 21, 27, 54, 55]	Calle 11 Sur 11904, INFONAVIT Agua Santa, 724...	14	44,800
martes1y	semanal	[11]	Prolongación 16 de Septiembre Sur 3 No. 14101...	2	6,400
martes2	quincenal	[29, 33, 34]	Av. 9 Sur 11302, Col 69, Popular Coatepec, 72...	4	12,800
martes2	semanal	[5, 13, 21, 27, 54, 55]	Calle 11 Sur 11904, INFONAVIT Agua Santa, 724...	14	44,800
miercoles1	semanal	[1, 24, 25]	C. 11 Sur 3104, Insurgentes Chula Vista, 7242...	6	19,200
miercoles2	quincenal	[17, 32, 41, 62]	C.111 D Oriente S/N , Los Héroes Puebla 1° Se...	7	22,400
miercoles2	semanal	[1, 24, 25]	C. 11 Sur 3104, Insurgentes Chula Vista, 7242...	6	19,200
sabado1	quincenal	[6, 15, 20, 44, 50]	Blvd Héroes del 5 de mayo 418	9	28,800

sabado1	semanal	[7]	5 Sur S/N entre 17 y 19 Poniente, Chula vista	2	6,400
sabado2	quincenal	[18, 47, 48, 49, 52, 58]	C. 15 Sur entre 17 y 19 Poniente	15	48,000
sabado2	semanal	[7]	5 Sur S/N entre 17 y 19 Poniente, Chula vista.	2	6,400
viernes1	quincenal	[42, 45, 46, 57, 63]	Río Lerma frente al número 5331, Jardines de San Manuel	8	25,600
viernes1	semanal	[2, 31, 43]	Av. San Baltazar 3230, Centro Comercial Bodega Aurrera	5	16,000
viernes2	quincenal	[8, 19]	Av. San Cristóbal la Calera, Rincones de la Calera	6	19,200
viernes2	semanal	[2, 31, 43]	Av. San Baltazar 3230, Centro Comercial Bodega.	5	16,000

Tabla 1. Puntos de recolección y su demanda máxima asociada

3.3.1 Restricciones

1. Cada ubicación debe ser atendida exactamente una vez:

$$\sum_{k=1}^V y_{ik} = 1, \quad \forall i = 1, \dots, N$$

2. Conservación del flujo:

$$\sum_{j=0}^N x_{kij} = \sum_{j=0}^N x_{kji}, \quad \forall i, k$$

3. Capacidad del vehículo

$$\sum_{i=1}^N q_i \cdot y_{ik} \leq Q, \quad \forall k = 1, \dots, V$$

4. Inicio y fin en depósito

$$\sum_{j=1}^N x_{k0j} = 1, \quad \sum_{i=1}^N x_{ki0} = 1, \quad \forall k = 1, \dots, V$$

5. Función objetivo

$$\min \sum_{k=1}^V \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N d_{ij} \cdot x_{kij}$$

3.3.2 Parámetros

- **N**: Número de ubicaciones (sin contar el depósito)
- **C**: Número total de contenedores distribuidos en las ubicaciones
- **Q**: Capacidad máxima de cada camión (toneladas)
- **q_i**: Demanda en la ubicación *i*, en toneladas
- **d_{ij}**: Distancia entre la ubicación *i* y la ubicación *j*
- **V**: Número de camiones disponibles
- **Nodo 0**: Depósito central (inicio y fin de cada ruta)

3.3.3 Solución permutacional

Se generarán soluciones de tamaño igual al número de nodos que deben visitarse, cada lugar de la permutación representa el nodo y el valor que se guarda en el índice representa el camión

asignado a su recolección, cada permutación tendrá asociada una distancia total que se calculará como la distancia entre elementos adyacentes de la permutación basado en la matriz de distancias. Este será el costo asociado a dicha solución.

3.4 Metaheurísticas

Para hallar una solución al problema antes planteado, utilizaremos 3 metaheurísticas:

- **Jaya** — https://www.growingscience.com/ijiec/Vol7/IJIEC_2015_32.pdf
- **Lobo Gris** — <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0965997813001853>
- **Recocido Simulado** —

[http://wexler.free.fr/library/files/kirkpatrick%20\(1983\)%20optimization%20by%20simulated%20annealing.pdf](http://wexler.free.fr/library/files/kirkpatrick%20(1983)%20optimization%20by%20simulated%20annealing.pdf)

Cada algoritmo tiene distintos parámetros, que se describen en la siguiente tabla

Metaheurística	Parámetros	Símbolo	Descripción
Jaya	Sin parámetros específicos	—	El algoritmo Jaya no requiere parámetros de control, lo que simplifica su implementación y evita la necesidad de ajuste de parámetros.
Lobo Gris	Tamaño de la manada \sim	N	Número total de lobos en la población, incluyendo líderes y seguidores.
	Iteraciones	T	Numero de ciclos de actualización de posiciones de los lobos.
	Coeficientes de control	a, A, C	Parámetros que controlan el equilibrio entre exploración y explotación durante la búsqueda.
Recocido Simulado	Temperatura inicial	T_0	Valor inicial de la temperatura que permite aceptar soluciones peores al principio.
	Tasa de enfriamiento	α	Factor que determina como disminuye la temperatura en cada iteración.
	Iteraciones por temperatura	L	Numero de soluciones evaluadas antes de reducir la temperatura.

Tabla 2. Parámetros de las metaheurísticas utilizadas

4. Resultados

El problema se dividió en dos subproblemas: el de la recolección semanal y el de la recolección quincenal. Para cada uno, los parámetros de capacidad son los mismos:

- 5 camiones mínimo
- Máxima capacidad de cada camión: 15 toneladas
- Máxima capacidad de cada contenedor: 0.8 toneladas
- Cada vez que el camión llegue a su límite de carga, debe volver al nodo de inicio
- El nodo de inicio es el mismo sin importar la ruta

Los datos que son específicos a la frecuencia de recolección son:

- Puntos a visitar: 10 para la frecuencia quincenal y 13 para la semanal
- Demanda dada por los puntos en la ruta: la frecuencia semanal tiene que visitar 84,

mientras que la ruta quincenal debe visitar 81, lo que da un total de 165 puntos verdes.

- La demanda por ruta se calculará como $0.8 \times$ número de contenedores en la ubicación.

La solución esperada será un arreglo para cada camión que contenga el orden en el que deben visitarse los nodos.

Cada algoritmo se corrió 3 veces para cada frecuencia de recolección. Los resultados de la mejor iteración, considerando la complejidad del algoritmo y el tiempo de ejecución, se muestran en la tabla siguiente.

Frecuencia recolección	de	Metaheurística	Parámetros	Mejor costo (Distancia en km)	Rutas	Tiempo de ejecución (s)
Semanal		Jaya	población = 50 iteraciones = 2000	85.161424	Camión 1: [0, 10, 12, 9, 11, 0] Camión 2: [0, 6, 0] Camión 3: [0, 8, 5, 1, 0] Camión 4: [0, 4, 0] Camión 5: [0, 3, 7, 2, 0]	5.16
Semanal		GW	población = 30 iteraciones = 500	80.14822025080541	Camión 1: [0, 9, 1, 3, 0] Camión 2: [0, 4, 0] Camión 3: [0, 6, 5, 0] Camión 4: [0, 7, 8, 2, 0]	1.506
Semanal		RS	T0 = 1000 $\alpha = 0.99$ iteraciones = 10000	85.1614248	Camión 1: [0, 12, 10, 9, 11, 0] Camión 2: [0, 1, 5, 8, 0] Camión 3: [0, 4, 0] Camión 4: [0, 2, 7, 3, 0] Camión 5: [0, 6, 0]	0.10584
Quincenal		Jaya	población = 50 iteraciones = 2000	70.87147585	Camión 1: [0, 8, 0] Camión 2: [0, 2, 0] Camión 3: [0, 6, 5, 0] Camión 4: [0, 7, 0] Camión 5: [0, 9, 1, 3, 4, 0]	9.5067

Quincenal		GW	población = 30 iteraciones = 500	70.87147	Camión 1: [0, 7, 0] Camión 2: [0, 5, 6, 0] Camión 3: [0, 9, 1, 3, 4, 0] Camión 4: [0, 8, 0] Camión 5: [0, 2, 0]	1.4305
Quincenal		RS	T0 = 1000 $\alpha = 0.99$ iteraciones = 10000	70.8714	Camión 1: [0, 4, 3, 1, 9, 0] Camión 2: [0, 8, 0] Camión 3: [0, 7, 0] Camión 4: [0, 5, 6, 0] Camión 5: [0, 2, 0]	0.09609

Tabla 3. Resultados Obtenidos

Podemos ver que, para la recolección semanal, la distancia mínima alcanzada fue de 80 km, visitando todos los nodos y utilizando 5 camiones. El mejor algoritmo, basado en el valor mínimo de la distancia, fue el del Lobo Gris (GW), ejecutado en 1.56 segundos de tiempo real. En este caso hay más variabilidad de soluciones debido a que el espacio de búsqueda es más grande.

- Para la recolección quincenal, se llegó con los 3 algoritmos al mismo resultado: 70.87 km de distancia total. Esto implica que puede ser un mínimo global de este caso. Como en los 3 casos se obtuvo la misma distancia, podemos elegir el mejor basado en el menor tiempo de ejecución; este es el Recocido Simulado (RS), con menos de 1 segundo.

5 Conclusiones y trabajo a futuro

En este trabajo probamos 3 metaheurísticas (Jaya, GW, RS) para el problema de ruteo de vehículos capacitado para la recolección de “Puntos Verdes” en el municipio de Puebla. Los resultados son interesantes si observamos que obtuvimos valores similares con cada algoritmo. Esto puede indicar que es posible encontrar un mínimo global en cada ruta de recolección.

Sin embargo, cabe resaltar que en este trabajo se asumieron situaciones que no representan la situación real. Esto se debe principalmente a la falta de datos abiertos actualizados sobre la recolección de residuos sólidos urbanos no solo en Puebla, sino en todo el país. Como trabajo futuro, puede implementarse un modelo con datos más actuales y reales; por ejemplo, aquí asumimos que todos los botes están a su máxima capacidad, sin embargo, es bastante probable que al momento de la recolección se sobrepase este máximo o sea menor.

Así como el punto de salida e ingreso: en este trabajo suponemos que todos los camiones y residuos son enviados al mismo lugar porque todos son de tipo reutilizable, pero ¿qué pasa cuando en el contenedor encontramos desechos que no pertenecen a la planta FIRSU? Debe entonces haber un segundo punto de destino final para este tipo de residuos.

Los algoritmos probados aquí fueron desarrollados en Python, y tanto Jaya como GW son algoritmos recientes (2016 y 2014, respectivamente), mientras que Recocido Simulado es antiguo pero eficiente. Por otro lado, Jaya y GW no necesitan parámetros, lo que hace su uso más sencillo.

Este tipo de estudios pueden ser de gran utilidad en el camino hacia una sociedad más sustentable.

Agradecimientos

Los autores de este artículo agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y a la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla por el apoyo otorgado en la realización de este trabajo.

Referencias

- [1] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2022). *Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de Residuos de Manejo Especial, 2022-2024*.
- [2] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2022). *Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, 2022-2024*.
- [3] Proyectos México. (s.f.). *Ciclo de inversión en infraestructura en México: Residuos sólidos*. Recuperado de <https://www.proyectosmexico.gob.mx/como-invertir-en-infraestructura-en-mexico/ciclo-inversion/residuos-solidos/>
- [4] Gobierno Municipal de Puebla. (s.f.). *Toneladas de residuos sólidos urbanos ingresadas al relleno sanitario de Chiltepeque*. Recuperado de <https://datos.pueblacapital.gob.mx/dataset/toneladas-de-residuos-s%C3%B3lidos-urbanos-ingresadas-al-relleno-sanitario-de-chiltepeque-2>
- [5] Gobierno Municipal de Puebla. (s.f.). *Ubicación de contenedores tipo campana denominados "Puntos Verdes"*. Recuperado de <https://datos.pueblacapital.gob.mx/dataset/ubicaci%C3%B3n-de-contenedores-tipo-campana-denominados-puntos-verdes/resource/fac95210-b503-499b>
- [6] García Vargas, M. C., Rangel García, E. I., & García Arreola, A. (2016). *Caracterización de los residuos sólidos urbanos del municipio de Zitácuaro, Michoacán*. 21° Encuentro Nacional sobre Desarrollo Regional en México, Mérida, Yucatán. Recuperado de <https://ru.iiec.unam.mx/3252/1/276-Garcia-Rangel-Garcia.pdf>
- [7] SMADSOT Puebla. (s.f.). *Programa Estatal de Residuos*. Recuperado de <https://smadsot.puebla.gob.mx/images/Programa%20Estatal%20de%20Residuos%20%20compressed.pdf>
- [8] INAES. (s.f.). *Cooperativas de reciclaje*. Recuperado de <https://www.gob.mx/inaes/articulos/cooperativas-de-reciclaje?idiom=es>
- [9] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2017). *Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Demarcaciones Territoriales*. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/programas/cngmd/2017/>
- [10] Volkswagen Camiones y Buses México. (s.f.). *Entrega de camiones compactadores Constellation*. Recuperado de <https://vwcamionesybuses.com.mx/volkswagen-camiones-y-buses-entrega-constellation-compactador-a-la-empresa-sana-a>
- [11] Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. (1959). The truck dispatching problem. *Management Science*, 6(1), 80-91. <https://doi.org/10.1287/mnsc.6.1.80>
- [12] Lenstra, J. K., & Rinnooy Kan, A. H. G. (1981). Complexity of vehicle routing and scheduling problems. *Networks*, 11(2), 221-227. <https://doi.org/10.1002/net.3230110211>
- [13] Laporte, G. (2009). Fifty years of vehicle routing. *Transportation Science*, 43(4), 408-416. <https://doi.org/10.1287/trsc.1090.0301>
- [14] Subramanian, A., Uchoa, E., & Ochi, L. S. (2013). A hybrid algorithm for a class of vehicle routing problems. *Computers & Operations Research*, 40(10), 2519-2531. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2013.01.013>
- [15] Arnold, F., & Sörensen, K. (2019). Knowledge-guided local search for the vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 105, 32-46. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2019.01.002>
- [16] Christiaens, J., & Vanden Berghe, G. (2020). Slack induction by string removals for vehicle routing problems. *Transportation Science*, 54(2), 417-433. <https://doi.org/10.1287/trsc.2019.0914>
- [17] Vidal, T., Crainic, T. G., Gendreau, M., & Prins, C. (2013). A hybrid genetic algorithm with adaptive diversity management for a large class of vehicle routing problems with time windows. *Computers & Operations Research*, 40(1), 475-489. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2012.07.018>
- [18] Máximo, V., & Nascimento, M. (2021). A hybrid adaptive iterated local search with diversification control for the capacitated vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, 294(2), 1108-1119. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.01.021>