

Análisis Comparativo de Heurísticas Aplicadas a Instancias de Homberger y Gehrin para Ruteo Vehicular

¹ Ricardo Pérez-Rodríguez*, ²María de los Ángeles Silva-Olvera, ³Sergio Frausto-Hernández

¹SECIHTI – Tecnológico Nacional de México/Tecnológico de Aguascalientes, Departamento Económico Administrativo

²Tecnológico Nacional de México/Tecnológico de Aguascalientes, Departamento Económico Administrativo

³Tecnológico Nacional de México/Tecnológico de Aguascalientes, Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica

dr.ricardo.perez.rodriguez@gmail.com

Recibido: 3 de noviembre de 2025

Aceptado: 30 de noviembre de 2025

RESUMEN

Esta investigación tuvo como propósito establecer una evaluación comparativa de tres heurísticas mediante un análisis cuantitativo para identificar cuál de estas ofrece los mejores resultados. Las heurísticas son asignación estocástica, segmentación geoespacial y heurística de vecindad. Para comparar la efectividad de estas heurísticas, se han aplicado pruebas de validación estadística utilizando la distribución t de Student y basadas en métricas clave como la comparación de medias, se evalúa el cumplimiento de ventanas de tiempo y la distancia recorrida en cada escenario para determinar cuál heurística reduce los trayectos. La heurística de segmentación geoespacial reduce la distancia recorrida hasta en un 28%. Los resultados obtenidos en esta evaluación proporcionan una base sólida para la toma de decisiones en la gestión del transporte. La comparación de estas heurísticas contribuye a entender qué estrategias pueden ser más beneficiosas en distintos contextos y cómo pueden integrarse en sistemas de ruteo vehicular.

Palabras claves: ruteo vehicular, asignación estocástica, segmentación geoespacial, heurística de vecindad.

ABSTRACT

Finding a set of vehicles' minimum-travel routes is the goal of the Vehicle Routing Problem (VRP). A group of clients with established needs are included in the routes. Every vehicle leaves and arrives at the same depot. Each vehicle in the vehicle routing problem with time windows (VRPTW) must return to the depot ahead of schedule and arrive within a certain time frame with each customer. The goal of this study was to compare three heuristics using a quantitative analysis in order to determine which produces the greatest outcomes. The neighborhood heuristic, geographic segmentation, and stochastic allocation are the heuristics.

Statistical validation tests using the t Student distribution were used to compare the efficacy of these heuristics based on important metrics like means comparison. Compliance with time windows was assessed, and the distance traveled in each scenario was examined to ascertain which heuristic shortens travel times.

The geographic segmentation heuristic reduces the distance traveled by up to 28%. The evaluation's findings offer a strong foundation for transportation management decision-making. By contrasting these heuristics, we can learn which approaches could work best in various situations and how to incorporate them into vehicle routing systems.

1. INTRODUCCIÓN

El problema de ruteo vehicular con ventanas de tiempo (por sus siglas en inglés VRPTW) es un desafío logístico fundamental que impacta directamente la eficiencia operativa de empresas de distribución y transporte. Su estudio es crucial porque permite desarrollar estrategias de optimización que mejoran la planeación de rutas, reducen costos y garantizan el cumplimiento de restricciones temporales en las entregas. La correcta gestión de rutas no solo influye en la rentabilidad de las empresas, sino también en la sostenibilidad ambiental, al minimizar el consumo de combustible y las emisiones de carbono. Además, el VRPTW es un problema de alta complejidad, lo que lo convierte en un campo de estudio ideal para la aplicación de algoritmos avanzados, modelos matemáticos, exploración continua de nuevas metodologías y mejoras en los enfoques existentes. Desde una perspectiva académica, abordar este problema contribuye al desarrollo de soluciones aplicables en la vida real, fortaleciendo la vinculación entre la investigación y la industria. Empresas de logística, transporte y distribución pueden beneficiarse directamente de los hallazgos obtenidos, mejorando sus procesos y aumentando su competitividad en el mercado. Las heurísticas que se comparan en este estudio son implementadas en Microsoft Excel, lo que permite una comprensión práctica y detallada de las técnicas y su aplicación en entornos empresariales reales, lo que no solo potencia las habilidades técnicas que son esenciales en el mundo organizacional, sino que también sienta las bases para el desarrollo de tecnologías más avanzadas en la planeación de rutas y distribución de mercancías.

El VRPTW, que consiste en una flotilla de vehículos con cierta capacidad transportando mercancías en ciertas rutas y de acuerdo a un horario preestablecido con el cliente, llamado ventana de tiempo, para cubrir sus entregas (Bustos-Atalah, 2023). Es un problema de transporte de mercancías que va desde un depósito o punto de origen a todos los clientes a través de rutas teniendo en cuenta las restricciones o limitantes previamente establecidas (Kosolsombat y Ratanavilisagul, 2022). Las características clave del VRPTW son los siguientes; cada cliente debe ser visitado exactamente una vez por un vehículo, la demanda total de clientes en cada recorrido no debe superar la capacidad predeterminada del vehículo, el objetivo global es minimizar el costo/distancia/tiempo total asociado a todos los recorridos del vehículo (Maroof et al., 2023). Además, es importante aclarar que la planeación de rutas se vuelve complejo por factores imprevistos y las necesidades cambiantes de los clientes, sin embargo, entender estos problemas permite encontrar soluciones más efectivas para el reparto (Machuca-García, 2022). El problema del ruteo vehicular (por sus siglas en inglés VRP) es un reto complejo dentro de la rama de la investigación operativa pues a diferencia del problema del agente viajero (por sus siglas en inglés TSP), el VRP tiene aplicaciones prácticas más amplias, ya que las soluciones exactas suponen un reto para aquellos casos con un gran número de paradas para los vehículos. El problema se complica aún más cuando se ve involucrada una ventana de tiempo, esto significa que no basta con encontrar la ruta más corta, sino que también hay que asegurarse de que cada parada se haga dentro de un intervalo de tiempo específico (Kosolsombat y Ratanavilisagul, 2022).

La formulación del VRPTW implica cumplir con diversas restricciones que afectan la planeación de las rutas, es decir, cada cliente tiene un intervalo de tiempo específico en el que debe ser atendido. Si un vehículo llega antes, debe esperar; si llega tarde, la entrega no se puede realizar. Los vehículos tienen una capacidad limitada, por lo que la suma de las demandas de los clientes en una ruta no puede exceder dicha capacidad. En algunos casos, el VRPTW también incluye restricciones adicionales, como disponibilidad de conductores, horarios de operación del depósito y limitaciones en la infraestructura de transporte. Además, a medida que el número de puntos de entrega o vehículos aumenta, el número de posibles soluciones crece de manera exponencial, lo que complica la búsqueda de una solución óptima y por consiguiente su cálculo se incrementa.

Al igual que el VRP, el VRPTW requiere especial atención por parte de los investigadores debido a su peculiar complejidad y su interesante utilidad en casos reales de logística. Existen estudios sobre

métodos de solución para el VRPTW en Golden y Assad (1986), Desrochers et al (1988), Solomon y Desrosiers (1988), y Bräysy y Gendreau (2005). Algunos desarrollos particulares se pueden encontrar en Potvin y Rousseau (1993), Rochat y Taillard (1995), Thangiah et al (1995), Potvin y Bengio (1996), Homberger y Gehring (1999), Cordeau et al (2001), Tan et al (2001), Berger y Barkaoui (2004), Cordeau et al (2004), y Mester et al (2007). Se pueden encontrar estudios recientes sobre VRP y sus variantes en Braekers et al (2016), Montoya-Torres et al (2015), Gendreau et al (2015), y Koç, et al (2016).

La mayoría de las heurísticas para resolver el VRPTW son enfoques de dos fases, es decir, en primer lugar, se utiliza una heurística de construcción para generar una solución inicial factible y solución inicial tan buena como sea posible. La calidad de un método de dos fases depende de si la elección de la heurística de construcción y mejora de la solución se ajusta a la naturaleza del espacio de búsqueda. Según lo establece el autor Frank (2022) “la heurística de construcción debe producir una ubicación inicial lo suficientemente buena como para que el algoritmo de mejora comience en una región en la que se puedan alcanzar buenas soluciones”. Posteriormente la heurística de mejora debe ser capaz de eludir un número de mínimos locales para llegar a una buena solución.

En esta investigación es de interés confirmar cual heurística de las que son comparadas produce los mejores resultados para el problema ya mencionado. Esto se hace con el fin de determinar si existe realmente, entre estas heurísticas, una diferencia estadísticamente significativa en los procesos de construcción de soluciones.

2. METODOLOGÍA

La investigación contempla las tres heurísticas indicadas anteriormente, para asegurar una comprensión integral y rigurosa del problema de estudio. Dichas heurísticas utilizan como datos de entrada los casos o instancias de Homberger y Gehring (1999), las cuales han sido ampliamente utilizadas en la comunidad científica para resolver el VRPTW. El conjunto de casos disponible está compuesto por 50 instancias y en esta investigación se abordan solamente 10 de esos casos ya que implementar instancias en Microsoft Excel requiere más tiempo para obtener resultados.

En cada caso se cuenta con las coordenadas X y Y donde se encuentra ubicados los clientes a atender y para su interpretación en el plano cartesiano, la demanda correspondiente de cada cliente, el momento más pronto en el que un vehículo puede ser atendido por cada cliente y donde antes de este tiempo, el servicio no puede ser realizado (en inglés Ready Time), así como el momento máximo en el que el vehículo debe completar la entrega (en inglés Due Time). En los casos bajo estudio se tiene una flota de 50 vehículos con una capacidad de 700 unidades cada uno.

La Tabla 1 describe un extracto de los datos de la instancia 1 provista por Homberger y Gehring (1999).

Tabla 1: extracto de los datos de la instancia 1

Cliente	Coordenada X	Coordenada Y	Demanda	Tiempo inicial	Tiempo final
1	33	78	20	750	809
2	59	52	20	553	602
3	10	137	30	147	219

Ahora bien, se diseñan y analizan 5 escenarios distintos para cada caso o instancia, considerando las tres heurísticas indicadas anteriormente. Esto significa que, al contar con 10 casos, se generan un total de 50 escenarios de prueba para cada heurística (10 casos \times 5 escenarios cada uno), lo que permite evaluar y comparar la eficiencia de cada enfoque buscando minimizar la distancia total recorrida como función objetivo.

Para el caso de la heurística -Asignación estocástica- la primera fase consiste en crear aleatoriamente una secuencia de visita de los clientes a atender considerándolos a todos en una sola ruta. Una vez que dicha secuencia de visita es establecida, esta debe partirse en tantas rutas factibles como sea necesario en la segunda fase de la heurística. Para determinar en qué posición de la secuencia de visita debe partirse se debe considerar las restricciones, demanda y ventana de tiempo. En caso de alguna de las restricciones no se cumpla, el vehículo debe volver al depósito o punto de origen, y finalmente debe obtenerse la distancia total recorrida por el vehículo. El proceso mencionado se repite tantas veces como sea necesario hasta que todos los clientes han sido asignados a alguna ruta. El Pseudocódigo 1 describe lo previamente comentado.

Pseudocódigo 1

```
Hacer mientras haya clientes no visitados
    Elegir un cliente aleatoriamente del conjunto de clientes no visitados
    Incorporar cliente elegido en la secuencia de visita
    Retirar al cliente del conjunto de clientes no visitados
Fin Hacer

Recorrer la secuencia de visita mientras haya clientes sin ruta asignada
    Hacer mientras haya capacidad y posibilidad de entrega
        Evaluar si existe capacidad en el vehículo
        Evaluar si en el momento de llegada es posible hacer la entrega
        Asignar el cliente a la ruta
    Fin Hacer
Si existen clientes sin asignar a alguna ruta repetir
    Calcular distancias de recorrido de cada ruta
    Obtener distancia total
```

En la heurística de -Segmentación espacial- las soluciones se construyen basándose en la distribución geográfica de los clientes. En esta heurística se construyen escenarios diferentes, los cuales fueron desarrollados considerando la ubicación en el plano cartesiano de cada cliente, usando para esto un gráfico de dispersión en Microsoft Excel. Los escenarios mencionados se construyen partiendo el plano en secciones iguales e identificando que clientes han quedado en cada sección. Posteriormente, se construyen las rutas para cada sección obtenidas previamente tomando en cuenta las restricciones, demanda y ventana de tiempo. Y como en la heurística anterior, en caso de alguna de las restricciones no se cumpla, el vehículo debe volver al depósito o punto de origen, y finalmente debe obtenerse la distancia total recorrida por el vehículo. El proceso mencionado se repite tantas veces como sea necesario hasta que todos los clientes de dicha sección han sido asignados a alguna ruta. Todo lo indicado se realiza para cada sección hasta terminar. El Pseudocódigo 2 detalla lo previamente comentado.

Pseudocódigo 2

```
Crear gráfico de dispersión con la ubicaciones de los clientes
Partir el gráfico en zonas iguales
Identificar los clientes que se ubican en la misma zona

Recorrer las zonas mientras haya clientes sin ruta asignada
    Hacer mientras haya capacidad y posibilidad de entrega
        Evaluar si existe capacidad en el vehículo
        Evaluar si en el momento de llegada es posible hacer la entrega
        Asignar el cliente a la ruta
    Fin Hacer
Si existen clientes sin asignar a alguna ruta repetir
    Calcular distancias de recorrido de cada ruta
    Obtener distancia total
```

En la heurística del -vecino más cercano- la primera fase es construir una secuencia de visita de los clientes a atender considerándolos a todos en una sola ruta. Se selecciona un cliente al azar que actúe como referencia para la ruta inicial. Ahora bien, del conjunto de clientes no elegidos se selecciona aquel que cuenta con la distancia mas cercana al cliente que se encuentra ya en la ruta. En este punto la ruta ya cuenta con dos clientes. El proceso se repite eligiendo a aquel cliente de los no elegidos que cuente con la distancia más cercana al último cliente insertado en la ruta. Esta heurística finaliza en el momento en que ya no hay clientes sin asignar a la ruta. Al igual que en la heurística de asignación estocástica una vez que dicha secuencia de visita es establecida, esta debe partirse en tantas rutas factibles como sea necesario en la segunda fase de la heurística. El Pseudocódigo 3 enuncia lo previamente establecido.

Pseudocódigo 3

```

Elegir un cliente aleatoriamente del conjunto de clientes no visitados
Hacer mientras haya clientes no visitados
    Incorporar cliente elegido en la secuencia de visita
    Retirar al cliente del conjunto de clientes no visitados
    Calcular la distancia entre el cliente elegido y el resto de clientes
    Elegir la menor distancia y seleccionar al cliente correspondiente
    Ubicar al cliente correspondiente en la secuencia de visita
Fin Hacer

Recorrer la secuencia de visita mientras haya clientes sin ruta asignada
Hacer mientras haya capacidad y posibilidad de entrega
    Evaluar si existe capacidad en el vehículo
    Evaluar si en el momento de llegada es posible hacer la entrega
    Asignar el cliente a la ruta
Fin Hacer
Si existen clientes sin asignar a alguna ruta repetir
    Calcular distancias de recorrido de cada ruta
    Obtener distancia total

```

La distribución t de Student se utiliza en esta investigación para realizar la comparación estadística entre las tres heurísticas. La distribución t de Student es una distribución de probabilidad en estadística similar a la normal, pero con colas más anchas. Se utiliza para estimar la media de una población distribuida normalmente cuando se trabaja con muestras pequeñas (generalmente menos de 30 datos) y la desviación estándar de la población es desconocida.

3. RESULTADOS.

La Tabla 2 describe los resultados obtenidos por las 3 heurísticas usando los datos de la instancia 1 provista por Homberger y Gehring (1999).

Tabla 2: Resultados de la distancia total obtenida en la instancia 1

Escenario	Heurística Asignación estocástica	Heurística Segmentación espacial	Heurística Vecino más cercano
1	4029.90	2953.29	3264.56
2	4051.86	3105.58	2833.60
3	3586.04	3025.58	3000.96
4	4076.80	2704.05	2791.21
5	4031.16	2480.51	2838.08
Promedios	3955.15	2853.80	2945.68
Desviaciones	207.21	257.18	195.41

La Tabla 3 presenta el mejor escenario obtenido de todos los resultados por cada una de las instancias

Tabla 3: Mejor escenario obtenido en relación a la distancia total

Instancia	Heurística Asignación estocástica	Heurística Segmentación espacial	Heurística Vecino más cercano
1	4031.16	2480.51	3032.27
2	3875.34	2218.74	2838.08
3	3870.57	1928.40	2485.87
4	3118.07	1537.50	2316.38
5	4016.41	1961.00	2949.72
6	4016.41	1854.22	2705.56
7	4007.54	1864.28	2654.26
8	3977.38	1872.63	2690.92
9	3852.32	1591.40	2584.62
10	3907.20	1716.90	2517.23
Promedio	3867.24	1902.55	2677.49
Desviación	272.09	280.34	218.25

Un gráfico de caja y bigotes es presentado en la Figura 1 para mostrar la dispersión de los resultados para cada una de las instancias.

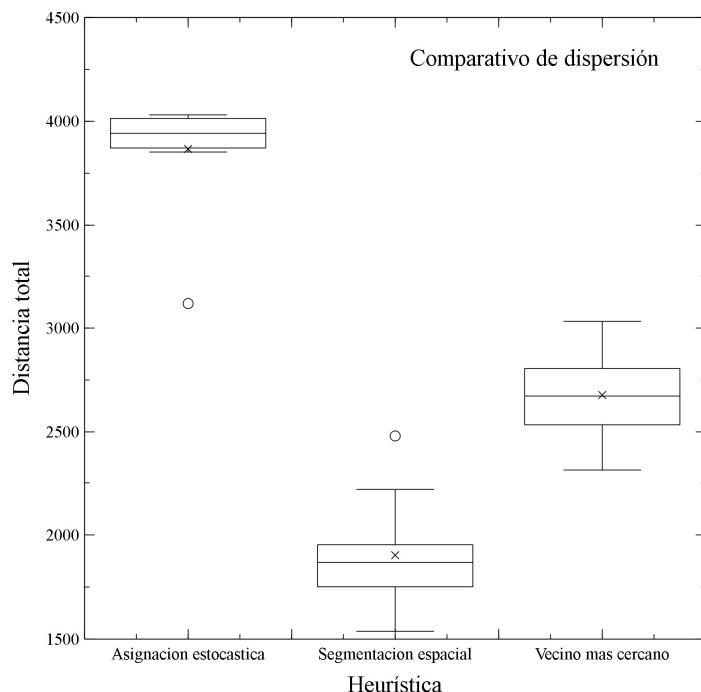


Figura 1: Gráfico de dispersión de los resultados

En base a la Tabla 3 y la Figura 1, del desempeño de las distintas heurísticas, se ha determinado que el enfoque de Segmentación Espacial es el que obtiene la mejor asignación de rutas, logrando la menor distancia recorrida para satisfacer la demanda de los clientes en sus entregas. No obstante, para validar estos hallazgos, es necesario llevar a cabo pruebas estadísticas que permitan confirmar la significancia de los resultados y evaluar su fiabilidad frente a las otras dos heurísticas. Para llevar a cabo la validación estadística, primeramente, se establece lo siguiente:

- Método A: Asignación Estocástica

- Método B: Segmentación Espacial
- Método C: Heurística de Vecindad

Posteriormente, es fundamental definir ambas hipótesis, en donde la hipótesis alterna representa la afirmación que se busca contrastar mientras que la hipótesis nula es la afirmación opuesta, en este caso:

Hipótesis Alterna (H1): El método B es mejor que el método A y C

Hipótesis Nula (H0): El método B no es mejor que el método A y C

(En términos de menor distancia recorrida)

Considerando el número de casos analizados se justifica el uso de la distribución t Student. La distribución t de Student es más apropiada cuando el número de casos son pocos y la varianza poblacional es desconocida o los datos presentan una mayor variabilidad, ya que las colas de la distribución permiten estimaciones más conservadoras en muestras de tamaño moderado. En este sentido, la elección depende completamente de la disponibilidad de información.

Dado que se están evaluando tres enfoques o métodos distintos, es fundamental establecer un proceso de validación progresivo para garantizar la coherencia y precisión de los resultados. En primera instancia, se realiza una comparación y verificación estadística entre el método B y el método A, analizando si los hallazgos obtenidos son consistentes. Una vez completada esta fase, se procede a una segunda validación estadística, contrastando el método B con el método C. Para ello, se establece lo siguiente:

Hipótesis Alterna (H1): El método B es mejor que el método A

Hipótesis Nula (H0): El método B no es mejor que el método A

(En términos de menor distancia recorrida)

La Tabla 4 describe los resultados en relación a los métodos descritos en la comparación.

Tabla 4: Prueba de hipótesis, Método B vs Método A

Hipótesis	Estadístico de prueba (valor t)	Grados de libertad	Potencia de la prueba (valor p)
Método A – Método B	15.9	9	4.83e-12

Basado en los datos obtenidos y presentados en la Tabla 4, se rechaza la hipótesis nula de que no hay diferencia estadísticamente significativa entre los métodos comparados.

Ahora bien, la segunda prueba de hipótesis es:

Hipótesis Alterna (H1): El método B es mejor que el método C

Hipótesis Nula (H0): El método B no es mejor que el método C

(En términos de menor distancia recorrida)

La Tabla 5 muestra los resultados en relación a los métodos descritos en la comparación.

Tabla 5: Prueba de hipótesis, Método B vs Método C

Hipótesis	Estadístico de prueba (valor t)	Grados de libertad	Potencia de la prueba (valor p)
Método C – Método B	6.897	9	1.89e-06

Basado en los datos obtenidos y presentados en la Tabla 5, se rechaza la hipótesis nula de que no hay diferencia estadísticamente significativa entre los métodos comparados.

4. DISCUSION

Los datos previamente expuestos indican que los hallazgos del trabajo se consideran evidencia científica. La investigación se estructuró en un proceso que incluyó el uso de los tres métodos presentados anteriormente. Los resultados de este trabajo permiten construir un enfoque realista, sirviendo como base para la ejecución de un modelo computacional a futuro. Además, la implementación de las heurísticas casos en Microsoft Excel, se validó estadísticamente para confirmar la significancia de los resultados y evaluar su fiabilidad.

Considerando el número de casos analizados se justifica el uso de la distribución t Student. Los resultados de las pruebas de hipótesis permiten rechazar la hipótesis nula en ambas comparaciones, lo que confirma estadísticamente que la heurística de -segmentación espacial- es la opción más eficiente para la asignación de rutas refiriéndose a la menor distancia recorrida para el cumplimiento de entregas. Esto ultimo es debido a que la heurística de -segmentación espacial- toma en consideración la ubicación geográfica de los clientes entre sí, esto permite ir construyendo rutas que garantizan la reducción de la distancia total, objetivo primario en esta investigación.

Las principales limitaciones de este estudio son principalmente que las instancias utilizadas solo son el 20% del total de instancias que corresponden al conjunto de instancias de Homberger y Gehring. Otras instancias de otros autores serán utilizadas como trabajo futuro a fin de confirmar si existe tendencia en los resultados expuestos sobre este trabajo. Adicional, el tiempo y coste computacional no son considerados en este estudio ya que la construcción de las soluciones no se realiza a través de un lenguaje computacional, dichas soluciones son construidas mediante hojas de cálculo donde la intervención de las personas en el programa se hace presente.

5. CONCLUSIONES Y/O PROYECTOS FUTUROS.

Este artículo analiza el VRPTW, que tiene en cuenta restricciones de tiempo adicionales. En este caso, el servicio a un cliente debe comenzar dentro de una ventana de tiempo. El vehículo no debería llegar antes del tiempo inicial de atención ni después del tiempo límite. Un vehículo que llegue antes del tiempo inicial generará un tiempo de espera. Un vehículo que llegue después del tiempo límite incurrirá en un retraso. Para resolver este problema, proponemos el esquema de comparación de heurísticas. Mediante experimentos numéricos, se genera soluciones competitivas. Esta investigación concluye que la heurística de segmentación espacial ofrece mejores soluciones a la luz de estos resultados. La heurística de segmentación espacial reduce la distancia recorrida hasta en un 28% sobre las instancias utilizadas en la comparativa. Dado que las pruebas de hipótesis son consistentes, resulta adecuado para su implementación en software con fines prácticos. Las futuras líneas de investigación podrían abordar una ampliación de este estudio para crear módulos eficaces para usuarios específicos del sector. Además, una proyección de implementación práctica podría atender el uso de otro tipo de heurísticas y/o metaheurísticas. Por último, la comparación realizada podría utilizarse en otros tipos de ruteo vehicular. Esta investigación se centra en un solo tipo de vehículo, es decir, una flota homogénea de vehículos. Por lo tanto, una flota heterogénea de vehículos parece variar significativamente en entornos dinámicos. Asignar el vehículo adecuado a cada cliente también puede afectar al tiempo de viaje. Esto puede ser una investigación para llevarse a cabo en el futuro. Además, nuestra investigación debería ampliarse para tener en cuenta otros factores de retraso, como el tráfico, las ausencias de los conductores y otros cambios que pueden abordarse.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Berger, J., y Barkaoui, M. (2004). A parallel hybrid genetic algorithm for the vehicle routing problem with time windows. *Computers y Operations Research*, 31, 2037–2053.
- Braekers, K., Ramaekers, K., y Van Nieuwenhuyse, I. (2016). The vehicle routing problem: State of the art classification and review. *Computers y Industrial Engineering*, 99, 300–313
- Bräysy, O., y Gendreau, M. (2005). Vehicle routing problem with time windows, Part II: Metaheuristics. *Transportation Science*, 39, 119–139.
- Bustos-Atalah, S.A. (2023). Método de clusterización para el VRPTW con consideraciones de balanceo de tiempo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. repositorio.uchile.cl
- Cordeau, J. F., Laporte, G., y Mercier, A. (2004). Improved tabu search algorithm for the handling of route duration constraints in vehicle routing problems with time windows. *Journal of Operational Research Society*, 55, 542–546.
- Cordeau, J. F., Laporte, G., y Mercier, A. (2001). A unified tabu search heuristic for vehicle routing problems with time windows. *Journal of the Operational Research Society*, 52, 928–936.
- Desrochers, M., Lenstra, J., Savelsbergh, M., y Soumis, F. (1988). Vehicle routing with time windows: Optimization and approximation. In B. Golden, y A. Assad (Eds.). *Vehicle routing: Methods and studies*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers.
- Frank, A. (2022). Análisis del tiempo de trayecto variable en un VRPTW. Repositorio institucional de la Universidad de La Laguna. Universidad de La Laguna, Facultad de Economía, Empresa y Turismo. <http://riull.ull.es/xmlui/handle/915/30239>
- Gendreau, M., Ghiani, G., y Guerriero, E. (2015). Time-dependent routing problems: A review. *Computers y Operations Research*, 64, 189–197.
- Golden, B., y Assad, A. (1986). Perspectives on vehicle routing: Exciting new developments. *Operations Research*, 34, 803–809.
- Homberger, J., y Gehring, H. (1999). Two evolutionary metaheuristics for the vehicle routing problem with time windows. *INFOR*, 37, 297–318.
- Koç, C., Bektaş, T., Jabali, O., y Laporte, G. (2016). Thirty years of heterogeneous vehicle routing. *European Journal of Operational Research*, 249(1), 1–21.
- Kosolsombat, S., y Ratanavilisagul, C. (2022). Modified ant colony optimization with selecting and elimination customer and re-initialization for VRPTW. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 11(6), 3471-3482. DOI: 10.11591/eei.v11i6.3943
- Machuca-García, S. D. (2022). El transporte de última milla: un desafío en el presente mercado. *Neuronum*, 8(4), 1 – 4.
- Maroof, A., Ayvaz, B., y Naeem, K. (2023). Logistics optimization using hybrid genetic algorithm (HGA): A solution to the vehicle routing problem with time windows (VRPTW). In *IEEE Access*, vol. 12, pp. 36974 – 36989. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3373699
- Mester, D., Bräysy, O., y Dullaert, W. (2007). A multi-parametric evolution strategies algorithm for vehicle routing problems. *Expert Systems with Applications*, 32, 508–517.
- Montoya-Torres, J., López-Franco, J., Nieto-Isaza, S., Felizzola-Jiménez, H., y Herazo- Padilla, N. (2015). A literature review on the vehicle routing problem with multiple depots. *Computers y Industrial Engineering*, 79, 115–129.
- Potvin, J. Y., y Bengio, S. (1996). The vehicle routing problem with time windows – Part II: Genetic search. *INFORMS Journal on Computing*, 8, 165–172.

- Potvin, J. Y., y Rousseau, J. M. (1993). A parallel route building algorithm for the vehicle routing and scheduling problem with time windows. *European Journal of Operational Research*, 66, 331–340.
- Rochat, Y., y Taillard, É. (1995). Probabilistic diversification and intensification in local search for vehicle routing. *Journal of Heuristics*, 1, 147–167.
- Solomon, M., y Desrosiers, J. (1988). Time window-constrained routing and scheduling problems. *Transportation Science*, 22, 1–13.
- Tan, K. C., Lee, L. H., Zhu, Q. L., y Ou, K. (2001). Heuristic methods for vehicle routing problem with time windows. *Artificial Intelligence in Engineering*, 15, 281–295.
- Thangiah, S. R., Osman, I. H., Vinayagamoorthy, R., y Sun, T. (1995). Algorithms for the vehicle routing problems with time deadlines. *American Journal of Mathematical and Management Sciences*, 13, 323–355.