

## Aplicación del modelo TSP en la planificación de rutas de una empresa de servicio de limpieza

TSP Model to Route Planning in a Cleaning Services Company

Marlenne Cruz Romero<sup>1</sup>, Jenaro Nosedal Sánchez<sup>2</sup>, Danae Abodón Lira<sup>3</sup>  
Jeddiel Gabriel Chavez Talavera<sup>4</sup>, José Aparicio Urbano<sup>5</sup>

Tecnológico Nacional de México / Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán, MÉXICO

<sup>1</sup>ORCID: 0000-0003-4908-0032 | marlenne.cruz@tesjo.edu.mx

<sup>3</sup>ORCID: 0000-0001-8178-9485 | 2018150480001@tesjo.edu.mx

<sup>4</sup>ORCID: 0000-0003-1970-9178 | 2018150480155@tesjo.edu.mx

<sup>5</sup>ORCID: 0000-0002-7488-3323 | jose.aparicio@tesjo.edu.mx

Universidad Autónoma de Barcelona, ESPAÑA

<sup>2</sup>ORCID: 0000-0002-7199-4474 | Jenaro.Nosedal@uab.cat

Recibido 24-08-2022, aceptado 14-12-2022.

### Resumen

Este trabajo se desarrolló para apoyar la toma de decisiones de una empresa de servicios. La empresa bajo estudio brinda el servicio de limpieza residencial y comercial y se ubica en San Diego CA, el inicio de sus operaciones data desde el año 2008. Actualmente la empresa no cuenta con herramientas cuantitativas para el análisis o la planificación de rutas en su operación, por lo tanto, tiene el potencial de ser optimizada para mejorar su eficiencia o ampliar su capacidad actual para atender los servicios demandados. Se propone como herramienta de mejora el desarrollo y solución de un modelo para resolver una instancia correspondiente a la aplicación del modelo Travelling Salesman Problem-Problema del agente viajero (TSP) que implica un nodo origen y  $n$  nodos destinos de procesamiento fijos de modo que haya una asignación de un servicio de limpieza para cada nodo y que cada nodo sea visitado solamente una vez a excepción del origen.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se pudo identificar un potencial de mejora en cuanto a los tiempos de ejecución de las actividades de la empresa ya que el porcentaje de reducción fue del 32%, resultado que evidencia el beneficio en cuanto a un mejor aprovechamiento de la capacidad actual de la empresa para atender los servicios demandados, y eventualmente dicha capacidad adicional (obtenida por la optimización) se podría asignar para atender los servicios no programados sin necesidad de incurrir en mayor contratación o bien aumentar la cobertura de demanda programada con los mismos recursos operativos (personal y vehículos).

**Palabras clave:** diseño de rutas de transporte, problema del vendedor viajero, optimización de procesos, dirección de operaciones.

### Abstract

This work is developed to support the decision-making of a service company. This company provides residential and commercial cleaning services. The company is located in San Diego CA. and the beginning of its operations was in 2008. Currently the company does not have a quantitative tool for the analysis or planning its routes, therefore it has the potential to optimized and improve its efficiency or expand its current capacity to respond the services demanded. The development and solution of a model proposed in this work is a solution to solve an instance corresponding to the application of the TSP model that implies a fixed origin and  $n$  processing destination nodes, there is a designed cleaning service for each node and that each node has to be visited only once except for the origin. According to the results, it was possible to identify a potential for improvement in terms of the execution times of the company's activities of 32% (percentage reduction), the result shows the benefit in terms of better use of current capacity of the company to meet the demanded services, and eventually additional capacity (obtained by optimization) could be assigned to meet non-scheduled services without the need to incur greater hiring or increase coverage of scheduled demand with the same operating resources (personal and vehicles).

**Index terms:** transport route design, traveling salesman problem, process optimization, operations management.

## I. INTRODUCCIÓN

El problema del vendedor viajero (TSP) trata de visitar  $n$  ciudades pasando una y sólo una vez, iniciando en un origen y regresando al mismo nodo de origen con la finalidad de que la visita sea de costo mínimo (Cij). A través de la minimización de la distancia total recorrida o en el menor tiempo total de recorrido. El TSP es uno de los problemas más famosos y estudiados en su área.

El TSP también es conocido como un problema de optimización combinatoria que a pesar de su facilidad de formulación pertenecerá a la clase de problemas de optimización combinatoria que son difíciles de resolver [1], este puede ser aplicado en diferentes situaciones como transporte y entrega, recolección de datos y conectividad en redes, búsqueda y rescate, logística humanitaria, manejo en la producción de cultivos en la agricultura, monitoreo y vigilancia, asignación y programación de tareas a Robots y aplicaciones militares en misiones cooperativas entre robots, vehículos y drones.

Algunas aplicaciones del TSP se describen a continuación:

En [2] se presentan técnicas heurísticas de optimización para la solución del problema del agente viajero (TSP), las técnicas contemplan: algoritmos genéticos, recocido simulado, colonia de hormigas, búsqueda Tabú y Grasp. Para el problema planteado que contempla 8 nodos se encuentra la solución óptima a través de todas las heurísticas planteadas. Los autores recomiendan que los algoritmos que ofrecen más ventajas son colonia de hormigas, recocido simulado y búsqueda Tabú debido al menor número de iteraciones realizadas y la facilidad de implementación.

En [3] se destaca la importancia de atender a la logística de recolección de residuos debido a los costos que se generan a la hora de la recolección y por el aumento en los volúmenes de residuos generados que impacta directamente al medio ambiente. En este trabajo se modela el problema del agente viajero (TSP) para obtener la ruta de recolección que toma en consideración la capacidad del vehículo, 208 nodos y 355 arcos, posteriormente se aplica el algoritmo de optimización por colonia de hormigas para la obtención de resultados y el logro del objetivo el cual es la minimización de la distancia total recorrida.

En [1] se reporta la programación de ruta óptima en la gestión de la construcción mediante el uso de la solución del problema del vendedor viajero, el modelo TSP desarrollado considera la visita de un supervisor a quince sitios de construcción, condicionando que cada sitio de construcción debe ser visitado dos veces a la semana, también un día hábil en la semana está dedicado a trabajos de oficina mientras que los cuatro restantes son dedicados a la supervisión de los sitios de construcción. La jornada laboral es de ocho horas y el tiempo considerado para cada visita de supervisión es de 30 minutos, además de que se reservan 30 minutos al día para comer.

En [4] se expone que la demanda de los clientes se atiende con un adecuado diseño de las redes de distribución ya que impacta directamente en la eficiencia y capacidad de la empresa para satisfacer las exigencias de los consumidores. En su trabajo aplica el modelo TSP para la optimización de una ruta de distribución a través de la minimización de la distancia entre el proveedor y los clientes en una empresa empaquera de especias. El estudio involucra el uso de un solo vehículo y la visita a 37 clientes en un mismo día desde el centro de distribución. El objetivo es que un agente visite a los clientes desde el centro de distribución y regrese al mismo para finalizar el recorrido de tal forma que lo haga con la menor distancia total recorrida.

Investigaciones más recientes, como la reportada en [5], ilustra el uso de un algoritmo genético para la obtención de la distancia mínima recorrida. En donde se considera que un algoritmo genético es una técnica de optimización que se adapta al proceso genético de organismos biológicos basado en la teoría de evolución de Charles Darwin.

En [6] se realizó un estudio para elegir la ruta más óptima y que aspectos interfieren para elegir el punto de partida, apoyados en el software O-Mopsi que combina la ubicación, el recorrido con la resolución de

problemas. Se analizaron 25 posibles puntos de inicio mediante el uso del método TSP para calcular el punto de partida que lograra cumplir todos los objetivos y que fuera el más corto.

A medida que se incrementa el número de nodos a la matriz del TSP este va teniendo innumerables formas para solucionar la ruta más óptima. En [7] se realizaron una serie de experimentos en donde concentraron sus objetivos en la relación entre el tiempo de solución del TSP al incluir matrices de entre 10 y 120 nodos.

En [8] incorporaron el modelo TSP para disminuir la problemática de los tiempos de servicio al momento de la entrega. Este estudio se realizó mediante la comparación del método manual y el TSP, en donde se evaluó el tiempo de duración del recorrido, la distancia y el total de nodos a visitar, se concluyó que al implementar el modelo TSP se reducía en un 20% la distancia total recorrida, así como los tiempos cuando se visitaban más de 6 nodos.

En [9] se menciona que los algoritmos que se pueden utilizar para resolver el problema TSP son muchos y muy variados, lo que en varias ocasiones dificulta saber cuál método tomar, por estas razones debemos de considerar el uso de redes neuronales para poder resolver el TSP de manera más rápida, eficiente, pero sobre todo autónoma, ya que no siempre se seguirá el mismo patrón de nodos, estos mismos pueden cambiar. Nos hace mención de diferentes métodos de aplicación los cuales son: aprendizaje profundo y combinarlo con el aprendizaje de refuerzo y otros algoritmos para resolver el TSP.

Finalmente, los autores citados en [10] analizan la literatura relevante sobre el TSP en términos de contenidos, clases y campos de aplicación, asimismo realizan una descripción de las publicaciones más citadas que abordan como eje central el TSP, complementariamente.

En este trabajo se propone desarrollar e implementar la modelación matemática del TSP adaptada al caso de estudio para la minimización de distancia total recorrida. La minimización del recorrido entre el punto de origen y los servicios demandados representará una oportunidad de ahorro en combustible y además incrementará la capacidad de respuesta de la empresa.

## II. DESARROLLO

El presente trabajo se desarrolla en tres etapas, en primer lugar, se describe el problema, se propone el modelo matemático y finalmente se describe la experiencia computacional.

### A. Descripción del problema

El área de mejora que se estudió en este trabajo se relaciona con la minimización de la distancia total recorrida al tiempo que se atiendan todos los servicios demandados por los clientes.

Actualmente se cuenta con información sobre la calendarización de servicios demandados de cinco días. La información disponible es sobre el orden en que se realiza el servicio y la hora agendada para realizar el servicio.

Una vez que se identifica la dirección en donde se realiza el servicio, con Google Maps se obtiene la distancia entre el nodo origen que siempre es A: 9921 Paseo Montril, San Diego, CA, 92129, Estados Unidos y cada uno de los destinos a visitar para realizar el servicio demandado en cada uno de los días, posteriormente se obtiene la matriz de distancia correspondiente, de ahí que se requiere determinar el orden de servicios a realizar que minimice la distancia total recorrida.

La Tabla 1, Tabla 2, Tabla 3, Tabla 4 y Tabla 5 muestran la calendarización de los servicios y también la matriz simétrica de distancias recorridas del nodo origen al nodo destino.

4

TABLA 1  
SERVICIOS AGENDADOS DÍA 1 Y MATRIZ DE DISTANCIAS

Día 1	Hora
B	09:00 a.m.
C	11:00 a.m.
D	01:00 p.m.
E	03:00 p.m.

DÍA 1 Matriz de distancias					
	A	B	C	D	E
A					
B	15.2				
C	4.6	12.6			
D	2.9	13.6	4.1		
E	18.2	22.9	23.5	20.6	

TABLA 2  
SERVICIOS AGENDADOS DÍA 2 Y MATRIZ DE DISTANCIAS

Día 2	Hora
B	08:30 a.m.
C	10:00 a.m.
D	11:30 a.m.
E	01:00 p.m.
F	03:30 p.m.

DÍA 2 Matriz de distancias						
	A	B	C	D	E	F
A						
B	3.6					
C	9.8	7.4				
D	18.6	20.6	27			
E	18.2	20.2	20.2	2		
F	16.9	14.6	9.5	12.9	14.1	

TABLA 3  
SERVICIOS AGENDADOS DÍA 3 Y MATRIZ DE DISTANCIAS

Día 3	Hora
B	07:00 a.m.
C	09:00 a.m.
D	11:00 a.m.
E	12:30 p.m.
F	02:30 p.m.
G	04:30 p.m.

DÍA 3 Matriz de distancias							
	A	B	C	D	E	F	G
A							
B	19.3						
C	17.7	10.6					
D	11.9	11	14.8				
E	14.4	13.7	17.5	3.1			
F	9.4	11.9	14.3	2.8	5.3		
G	5.5	23.5	22.4	14.6	18.1	12.9	

TABLA 4  
SERVICIOS AGENDADOS DÍA 4 Y MATRIZ DE DISTANCIAS

Día 4	Hora	DÍA 4 Matriz de distancias				
B	9:00 a.m.	A	B	C	D	E
C	11:00 a.m.	A				
D	12:30 a.m.	B	7.0			
E	03:00 p.m.	C	20.1	26.0		
		D	1.9	7.8	19.3	
		E	18.9	22.7	21.1	19.3

TABLA 5  
SERVICIOS AGENDADOS DÍA 5 Y MATRIZ DE DISTANCIAS

Día 5	Hora	DÍA 5 Matriz de distancias					
B	08:00 a.m.	A	B	C	D	E	F
C	10:00 a.m.	A					
D	11:30 a.m.	B	8.9				
E	01:00 p.m.	C	7.1	13.5			
F	03:30 p.m.	D	15.8	24	13		
		E	18.4	26.7	15.6	3	
		F	18.2	26.4	15.4	2.6	0.7

### B. Modelado Matemático

En este trabajo se hace uso de la formulación clásica del TSP presentado en Langevin, Soumis y Desrosiers (1990).

Los supuestos que se consideran en este modelo son los siguientes:

**Supuesto 1:** Se tiene información correspondiente a la calendarización de servicios de limpieza de cinco días.

**Supuesto 2:** Solo se cuenta con un vehículo para realizar los servicios.

**Supuesto 3:** Siempre se parte y se regresa al mismo origen (Punto A).

**Supuesto 4:** No hay paros por reabastecimiento de combustible.

El modelo matemático se formula en primer lugar como un problema de asignación a través de las ecuaciones (1), (2), (3) y (4), donde la función objetivo garantiza la minimización de la distancia total recorrida.

Las ecuaciones (2) y (3) aseguran que el nodo es visitado una sola vez.

La ecuación (5) garantiza que todas las variables  $x_{ij}$  sean estrictamente enteras.

Y la ecuación (6) se establece como una restricción de ruptura de subrecorridos.

### Parámetros:

$d_{ij}$  = Distancia recorrida entre el nodo  $i$  y el nodo  $j$

### Variables de decisión:

$x_{ij} = 1$ , si la ruta va a lo largo del arco  $(i, j)$

0, en otro caso

9 **Función objetivo:** Minimizar la distancia total recorrida (1).

$$\text{Min} \sum_i \sum_j d_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

La ecuación (2) utilizada para asegurar única llegada a cada nodo.

$$\sum_i x_{ij} = 1, \forall j = 1, \dots, n \quad (2)$$

La ecuación (3) utilizada para asegurar que cada vehículo sale de cada nodo solo una vez.

$$\sum_j x_{ij} = 1, \forall i = 1, \dots, n \quad (3)$$

La ecuación (4) designa que las variables tienen que ser mayores o iguales que 0 pero menores o iguales 1.

La ecuación (5) restringe a que la variable  $x_{ij}$  sea estrictamente entera.

$$0 \leq x_{ij} \leq 1 \quad \forall ij \quad (4)$$

$$x_{ij} \text{ enteras } \forall ij \quad (5)$$

La ecuación (6) se establece para asegurar que se forma un circuito. Esta ecuación garantiza que para cada subconjunto  $Q$  del conjunto  $V$  se elimine un subrecorrido.

$$\sum_{i \in Q, j \in Q} x_{ij} \geq 2 \quad Q \subset V / \{1\}, 2 \leq |Q| \leq n-2 \quad (6)$$

Para la solución del modelo y la instancia descrita en esta sección, se realizó la implementación y solución utilizando el software GAMS 25.1 y se empleó una computadora con procesador AMD Ryzen 5 y 12 Gb en RAM, los tiempos de solución observados en general son menores a 2 segundos dada la programación y la complejidad del modelo.

## III. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

En relación con el proceso logístico de la empresa y con base en la información compartida por la empresa, la Tabla 6 tiene el objetivo de mostrar información antes de la mejora acerca de la ruta, la distancia total recorrida, la cantidad de posibles subrecorridos y la figura que ilustra la ruta actual según el día de servicio (Fig. 1, Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4, y Fig. 5).

Como se aprecia en los días 1, 2, 3, 4 y 5, se recorren 70.7 millas, 71 millas, 71.5, 90.5 millas y 57.3 millas, respectivamente, de igual modo los posibles subrecorridos en 5, 6 y 7 nodos son 32, 64 y 128, respectivamente.

TABLA 6  
 INFORMACIÓN ANTES DE LA MEJORA DE LA RUTA, DISTANCIA TOTAL RECORRIDA, CANTIDAD DE SUBRECORRIDOS Y FIGURA.

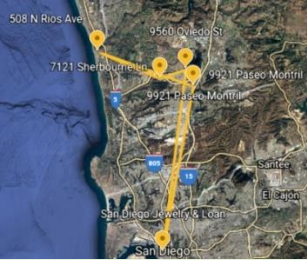
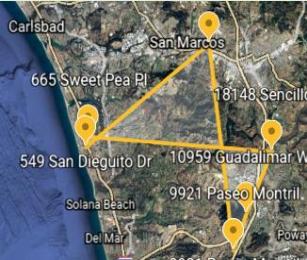

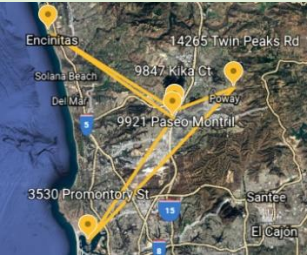
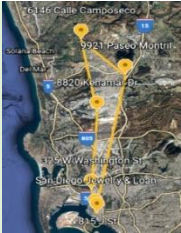
Ruta antes de la mejora	Distancia total recorrida (millas)	Cantidad de subrecorridos	Figura ilustrativa
A-B-C-D-E-A	70.7	32	 <p>Fig. 1. Ruta actual de servicios agendados día 1</p>
A-B-C-D-E-F-A	71	64	 <p>Fig. 2. Ruta actual de servicios agendados día 2</p>
A-B-C-D-E-F-G-A	71.5	128	 <p>Fig. 3. Ruta actual de servicios agendados día 3</p>
A-B-C-D-E-A	90.5	32	 <p>Fig. 4. Ruta actual de servicios agendados día 4</p>
A-B-C-D-E-F-A	57.3	64	



Fig. 5. Ruta actual de servicios agendados día 5

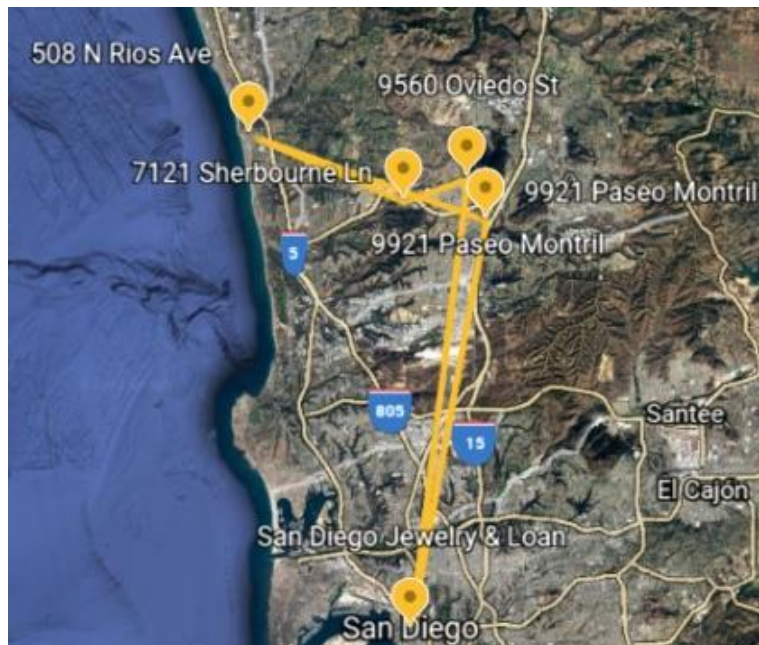


Fig. 1. Ruta actual de servicios agendados día 1.

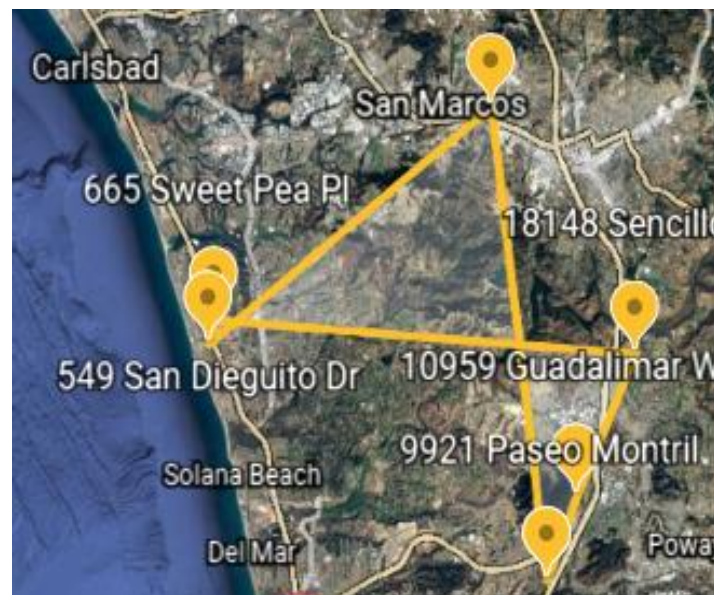


Fig. 2. Ruta actual de servicios agendados día 2.



9

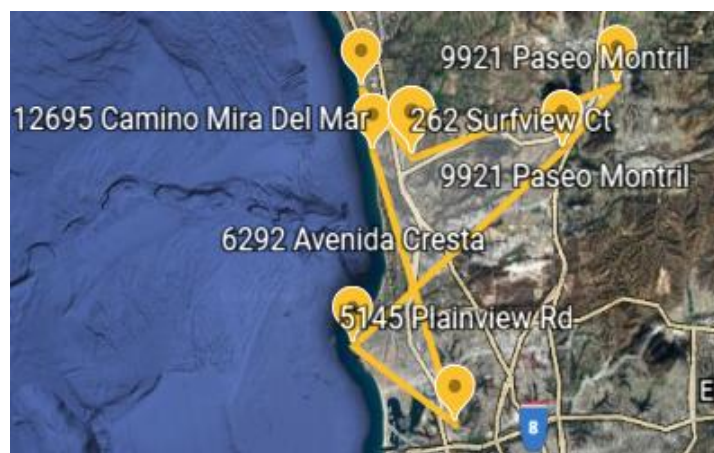


Fig. 3. Ruta actual de servicios agendados día 3.

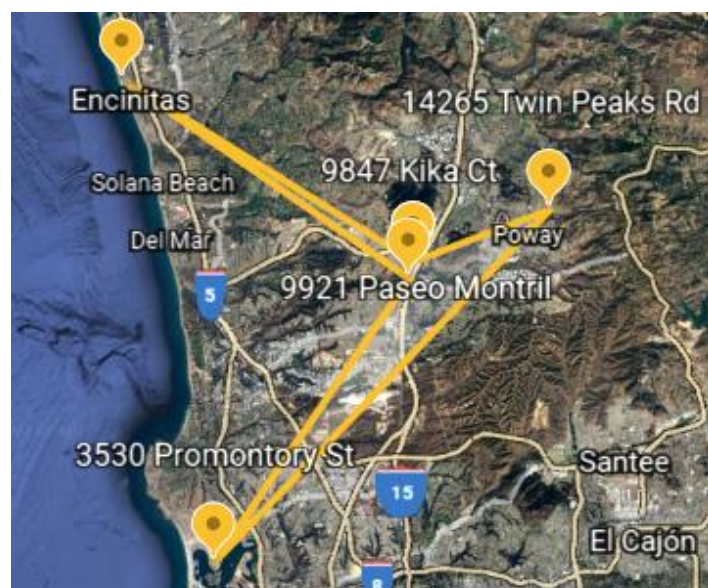
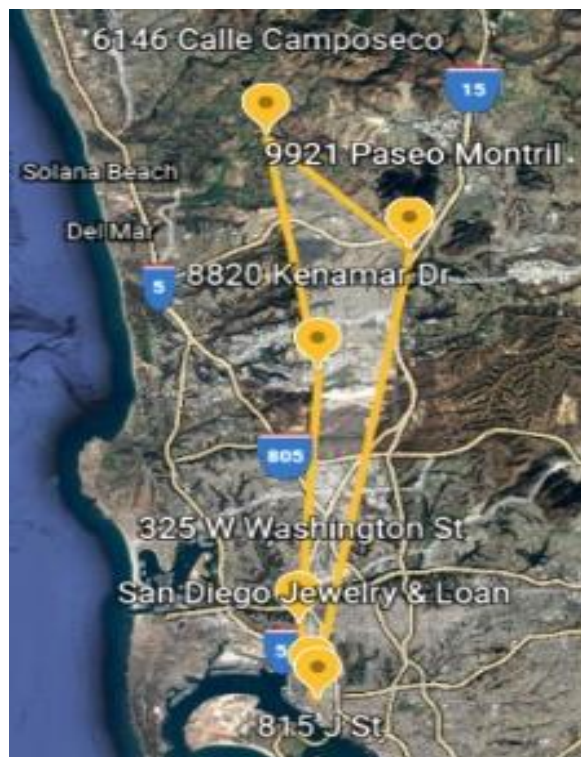

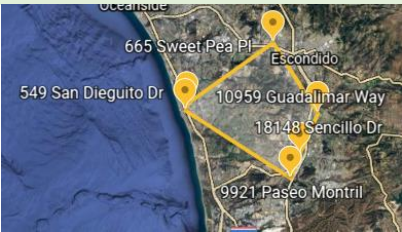
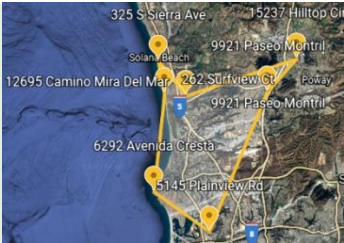
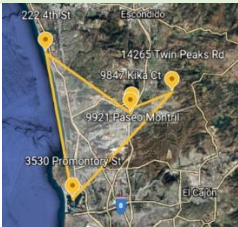



Fig. 4. Ruta actual de servicios agendados día 4.



**Fig. 6.** Ruta actual de servicios agendados día 5.

Una vez que se ha solucionado el modelo TSP de programación lineal de donde se obtiene la planificación óptima de rutas de servicios de limpieza para esta empresa, se determina que para el día 1 la ruta óptima sea A – D – C – B – E – A con un total de 60.7 millas recorridas, para el día 2 la ruta óptima sea A – B – C – F – D – E – A con un total de 53.6 millas recorridas, para el día 3 la ruta óptima sea A – C – B – D – E – F – G – A con un total de 66.1 millas recorridas, para el día 4 la ruta óptima sea A – B – C – E – D – A con un total de 65.3 millas recorridas y finalmente el día 5 la ruta óptima sea A – B – C – E – F – D – A (con un total de 57.10 millas recorridas). Como se puede observar, una vez obtenida la solución de las instancias modeladas se eliminan subrecorridos y se obtiene un circuito (véase Tabla 7, Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9 y Fig. 10).

TABLA 7		
INFORMACIÓN CON LA MEJORA DE LA RUTA, DISTANCIA TOTAL RECORRIDA, CANTIDAD DE SUBRECORRIDOS Y FIGURA.		
Ruta óptima	Distancia total recorrida (millas)	Figura ilustrativa
A-D-C-B-E-A	60.7	 Fig. 7. Ruta sugerida día 1
A-B-C-F-D-E-A	53.6	 Fig. 7. Ruta sugerida día 2
A-C-B-D-E-F-G-A	66.1	 Fig. 8. Ruta sugerida día 3
A-B-C-E-D-A	65.3	 Fig. 9. Ruta sugerida día 4
A-B-C-E-F-D-A	57.1	 Fig. 80. Ruta sugerida día 5



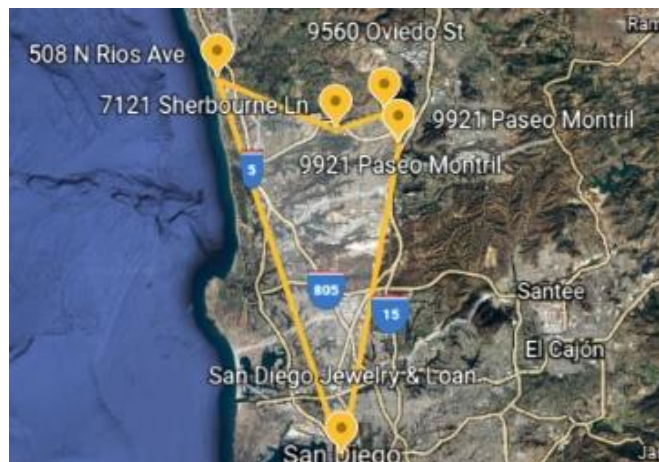


Fig. 6. Ruta sugerida día 1.

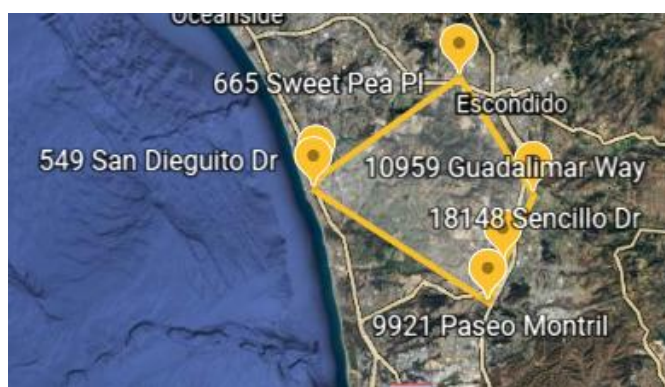


Fig. 7. Ruta sugerida día 2.

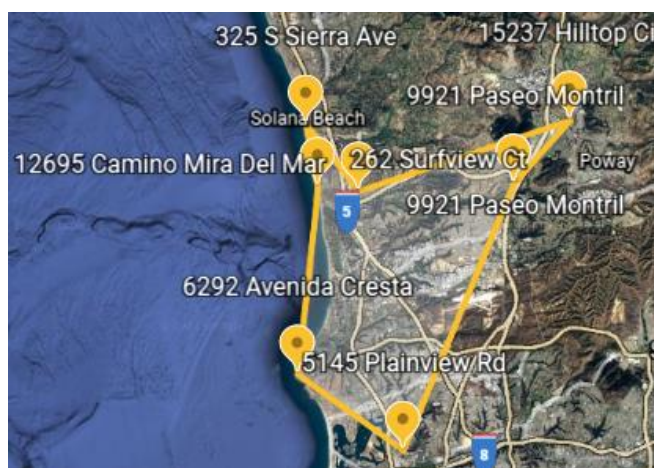


Fig. 9. Ruta sugerida día 3.

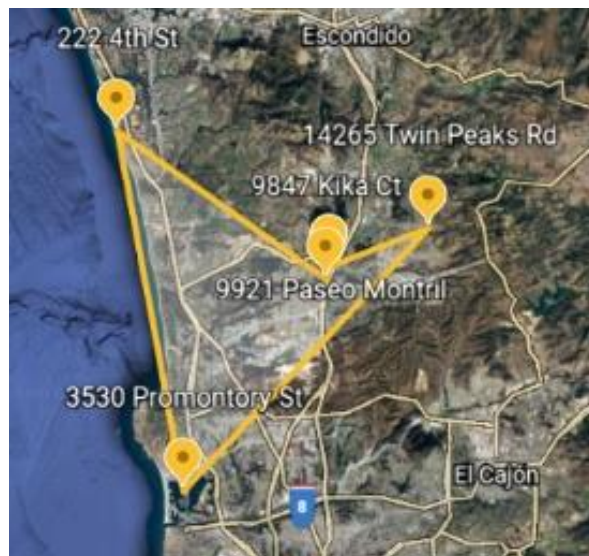


Fig. 10. Ruta sugerida día 4.



Fig. 11. Ruta sugerida día 5.

En efecto la distancia total recorrida entre la práctica actual y la que sugiere la solución óptima, esta última es menor en 58 millas. Se debe agregar que la relación existente entre millas y consumo de combustible del vehículo representa un ahorro de 2.3 galones de gasolina equivalente a \$9.5 dólares de ahorro para dicho recorrido.

#### IV. CONCLUSIONES

En este trabajo la formulación clásica del TSP mostrada en la sección II.B Modelado Matemático permitió la minimización de la distancia total recorrida y la asignación de los servicios de limpieza.

Aunque la naturaleza combinatoria del TSP es compleja el modelo clásico y la programación realizada en GAMS permite obtener el óptimo global considerando hasta 49 nodos destino.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se pudo identificar un potencial de mejora en cuanto a los tiempos de ejecución de las actividades de la empresa de 32%, resultado que evidencia el beneficio en cuanto a mejor aprovechamiento de la capacidad actual de la empresa para atender los servicios demandados, y eventualmente dicha capacidad adicional (obtenida por la optimización) se podría asignar para atender los servicios no programados sin necesidad de incurrir en mayor contratación o bien aumentar la cobertura de demanda programada con los mismos recursos operativos (personal y vehículos).

En lo que respecta a eficiencia operativa, la reducción del 16% en las distancias recorridas, impacta proporcionalmente los costos logísticos de la empresa (consumo de combustibles y desgaste de los vehículos), tomando en cuenta un costo medio de los combustibles de \$4.14 dólares, los ahorros potenciales semanales de la empresa podrían alcanzar los \$494 dólares anuales, sin considerar los gastos directos por mantenimiento que también se reducirían.

#### AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Tecnológico Nacional de México y a la División de Ingeniería Industrial del Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán (TESJo) por el apoyo para realizar el presente trabajo.

#### REFERENCIAS

- [1] U. Klanšek, "Using The Traveling Salesman Problem Solution for Optimal Route Scheduling in Construction Management," *Organ. Technol. Manag. Constr. An Int. J.*, vol. 3, no. 1, p. 7, 2011.
- [2] R. A. Hincapié et al., "Técnicas heurísticas aplicadas al problema del cartero viajante (TSP)," *Scientia Et Technica*, vol. 10, núm. 24, mayo, 2004, pp. 1-6.
- [3] E. S. Hornig, N. R. Fuentealba, "Modelo aco para la recolección de residuos por contenedores," *Ingeniare*, vol. 17, no. 2, pp. 236–243, 2009.
- [4] M. Monteón, "Aplicación del Modelo del Agente Viajero en la distribución de especias," *Lat. Am. J. Appl. Eng.*, vol. 3, no. 1, pp. 5–8, 2018.
- [5] P. M. Hariyadi, P. T. Nguyen, I. Iswanto, D. Sudrajat, "Traveling Salesman Problem Solution using Genetic Algorithm," *J. Crit. Rev.*, vol. 7, no. 1, pp. 56–61, 2020.
- [6] L. Sengupta, R. Mariescu-Istodor, P. Fränti, "Planning your route: where to start?," *Comput. Brain Behav.*, vol. 1, no. 3, pp. 252–265, 2018.
- [7] M. Dry, M. D. Lee, D. Vickers, P. Hughes, "Human performance on visually presented traveling salesperson problems with varying numbers of nodes," *J. Probl. Solving*, vol. 1, no. 1, p. 4, 2006.
- [8] D. Lagos, R. Mancilla, P. Leal, F. Fox, "Performance measurement of a solution for the travelling salesman problem for routing through the incorporation of service time variability," *Ing. e Investig.*, vol. 39, no. 3, pp. 44–49, 2019.
- [9] Y. Shi, Y. Zhang, "The neural network methods for solving Traveling Salesman Problem," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 199, pp. 681–686, 2022.
- [10] J. I. Pérez Rave, G. P. Jaramillo Álvarez, "Espacio literario relevante sobre el problema del vendedor viajero (TSP): contenido, clasificación, métodos y campos de inspiración," *Production*, vol. 23, no. 4, pp. 866–876, 2013.