

Análisis de rutas de recolección de residuos en la comunidad de Benemérito Juárez, Tuxtepec, Oaxaca, mediante matemáticas discretas

Hernández- Navarrete Miguel Ángel¹, Rojas-Carrasco Anahí², Méndez-Salinas Víctor Manuel², Kantún-Montiel Aura Lucina^{2*}

¹Licenciatura en Matemáticas Aplicadas, Universidad del Papaloapan.

²Instituto de Agroingeniería, Universidad del Papaloapan.

* email: alkantun@unpa.edu.mx

INTRODUCCIÓN

La gestión eficiente de la recolección de residuos sólidos es un problema crítico en muchas localidades, especialmente donde los servicios municipales son limitados o inexistentes [1]. En el poblado de Benemérito Juárez, perteneciente al municipio de Tuxtepec, Oaxaca, no existe actualmente un servicio regular de recolección de basura. Como consecuencia, los habitantes queman los desechos o pagan a particulares para trasladarlos al basurero, generando impactos ambientales y sociales negativos.

Con el objetivo de atender esta problemática, en el presente trabajo se aplicaron técnicas de matemáticas discretas para diseñar una ruta óptima de recolección de basura. Se seleccionaron estratégicamente diversos puntos de recolección a lo largo del poblado, representados como nodos en un grafo. Cada nodo fue identificado con un número que funciona únicamente como etiqueta para distinguir los puntos, sin representar un valor o jerarquía particular. Las aristas que los conectan corresponden a los caminos o calles que los unen, y a cada una se le asignó un peso proporcional al número de casas ubicadas en esa calle, de modo que se prioricen las rutas con mayor cobertura de viviendas.

A cada nodo se le asignó un peso equivalente a la suma de sus aristas incidentes, lo que refleja la cantidad total de viviendas accesibles desde ese punto y facilita la búsqueda de un recorrido que maximice la cobertura. En casos especiales, como el parque central, se otorgó un valor mayor que el número de casas, debido a la gran cantidad de residuos que se generan por ser punto de reunión, aunque nadie habite allí.

Este planteamiento combina el modelado con grafos y los algoritmos de optimización para determinar una ruta eficiente que recoja la mayor cantidad de basura posible, maximizando el impacto del servicio con recursos limitados. El uso de matemáticas discretas resulta especialmente adecuado, pues ofrece herramientas formales para analizar redes y optimizar recorridos en grafos ponderados [2].

MATERIALES Y MÉTODOS

Se aplicó un algoritmo de búsqueda en profundidad (DFS) con *backtracking* [3], guiado por una heurística que prioriza los nodos de mayor peso. Este algoritmo pertenece a la familia de métodos de búsqueda informada, donde la exploración del espacio de soluciones no es aleatoria ni exhaustiva, sino orientada por una regla que reduce el número de caminos a evaluar. En este caso, la heurística consiste en visitar primero los nodos más pesados, suponiendo que los recorridos que los incluyan tendrán mayor probabilidad de maximizar la suma total.

La estrategia general se basó en un recorrido en profundidad (*Depth-First Search*, DFS): desde el nodo inicial, el algoritmo explora un camino hasta donde sea posible antes de retroceder (*backtracking*) para probar alternativas. Durante la exploración se registran los nodos visitados y el peso total acumulado, evitando repeticiones. Cada vez que se alcanza el nodo final, el resultado se compara con el mejor valor obtenido hasta el momento; si es mayor, se actualiza el camino óptimo.

Para optimizar el proceso, se implementó *memoización*³, técnica que almacena resultados parciales de subcaminos ya evaluados, de modo que, si el algoritmo llega de nuevo al mismo punto con las mismas condiciones, reutiliza la información sin recalcular. Esto mejora la eficiencia, especialmente en grafos grandes o con ciclos.

El proceso inicia en el nodo 1, ubicado en la entrada del poblado, y concluye al llegar al nodo 5, el punto más cercano al basurero. El algoritmo compara los pesos acumulados en cada ruta posible y conserva solo el camino con la mayor suma total. Al finalizar, devuelve el recorrido óptimo junto con su valor total.

La restricción de camino simple en el DFS con *backtracking* generó un problema de baja cobertura: aunque el recorrido óptimo maximizó el peso total, dejó más de 20 nodos sin visitar. Esto ocurrió porque algunos puntos solo podían alcanzarse saliendo del camino principal y regresando, lo que implicaba visitar nodos ya contados. Dado que el objetivo también era maximizar la cobertura operativa, fue necesaria una segunda fase: la estrategia de rescate.

Para resolver este dilema, se implementó una post-optimización que flexibiliza la restricción de camino simple de forma controlada. Primero se identificaron los nodos “alejados”, definidos como aquellos no visitados cuya distancia mínima al camino óptimo era mayor o igual a 2. Así se atendieron solo los casos de cobertura más críticos.

El proceso de rescate insertó desvíos en el camino principal para alcanzar cada nodo alejado. Para cada nodo A, el algoritmo evaluó los pares de nodos consecutivos ($X \rightarrow X'$) del camino óptimo y calculó el desvío más eficiente ($X \rightarrow \dots \rightarrow A \rightarrow \dots \rightarrow X'$). Para mantener la eficiencia energética, se permitió una tolerancia máxima de repetición (≤ 2) de nodos dentro del desvío. De esta forma, se obtuvo un recorrido extendido que, aunque deja de ser estrictamente simple, ofrece una solución más útil al maximizar la cobertura sin un costo excesivo en repeticiones.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se implementó el algoritmo en Python. Al aplicarlo al grafo dirigido que representa los puntos de recolección y sus conexiones, se obtuvo en una primera etapa el camino simple que maximiza la suma de los pesos de los nodos, partiendo del nodo 1 (entrada al poblado) y finalizando en el nodo 5 (zona próxima al basurero).

El camino óptimo está dado por la sucesión de nodos: 1, 2, 12, 13, 8, 9, 3, 29, 30, 42, 44, 43, 32, 20, 19, 31, 33, 34, 41, 40, 46, 59, 53, 52, 62, 47, 48, 39, 38, 25, 26, 27, 28, 15, 16, 17, 21, 11, 10, 24, 5.

Este recorrido cubre 41 de los 62 nodos del grafo y alcanza una suma total de 3604 en los pesos de los nodos.

Para mejorar la cobertura, se aplicó una fase de rescate destinada a integrar los nodos que se encontraban a cierta distancia del camino inicial. En esta etapa se permitió la repetición controlada de algunos vértices, lo que generó desvíos adicionales y un aumento significativo en la cantidad de nodos visitados.

El camino extendido final incluyó 52 nodos únicos de los 62 posibles (dejando solo 10 sin visitar), con una longitud total de 65 pasos y una suma acumulada de pesos en los diferentes nodos de 4039.

El camino extendido final está dado por la siguiente sucesión de nodos: 1, 2, 12, 13, 8, 9, 3, 29, 30, 31, 19, 20, 32, 42, 44, 43, 33, 34, 41, 35, 36, 37, 49, 56, 49, 50, 49, 37, 36, 35, 41, 40, 46, 59, 58, 57, 58, 59, 53, 52, 62, 47, 48, 39, 38, 25, 26, 27, 28, 15, 16, 17, 21, 11, 10, 4, 6, 7, 6, 4, 10, 24, 5.

La inclusión de desvíos controlados permitió incorporar nodos de alto valor que no formaban parte del recorrido simple, obteniendo un trayecto más completo y funcional para la cobertura del área de recolección. Cabe señalar que los nodos no incluidos en el recorrido final se encuentran a distancia 1 del camino extendido, lo que garantiza que todas las zonas del grafo permanecen accesibles y no se dejan puntos de recolección sin atender.

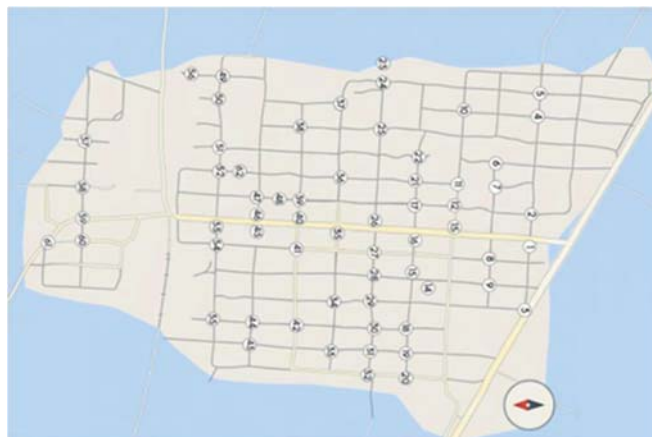


Figura 1. Distribución geográfica de los puntos de recolección.

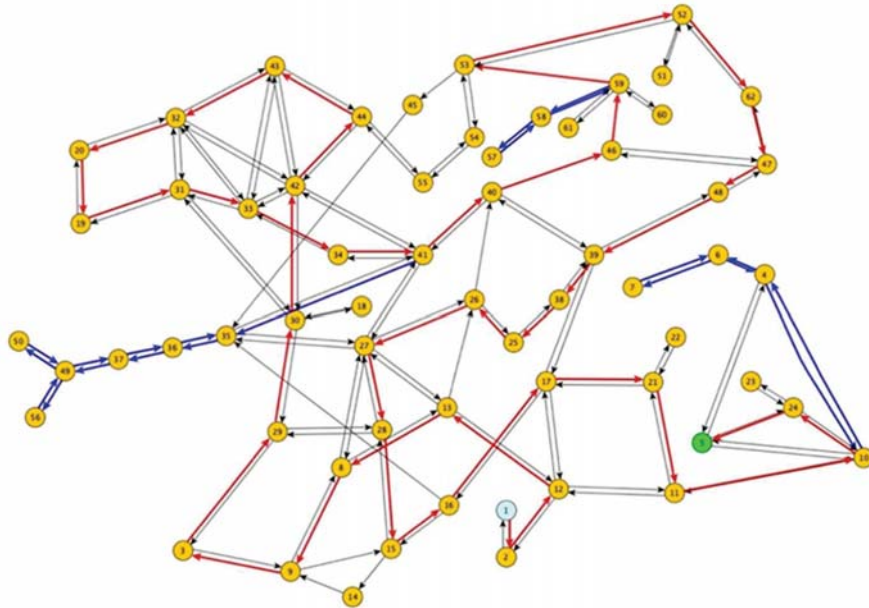


Figura 2. Grafo de puntos de recolección. En rojo se muestra el recorrido óptimo inicial y en azul los desvíos incorporados para mejorar la cobertura.

CONCLUSIÓN

Se implementó en Python un algoritmo de búsqueda en profundidad (DFS) con heurística informada para analizar el grafo de puntos de recolección de basura en Benemérito Juárez, Tuxtepec, Oaxaca. El modelo permitió identificar un recorrido óptimo entre el nodo 1 y el nodo 5 que maximiza la suma de los pesos asignados a los nodos, reflejando la eficiencia del recorrido en términos de cobertura de viviendas.

Posteriormente, la fase de rescate amplió la cobertura del servicio mediante la inserción controlada de desvíos, logrando incorporar la mayoría de los puntos del poblado sin un incremento significativo en la complejidad del recorrido. Este enfoque demostró que la combinación de heurísticas y técnicas de optimización basadas en grafos permite equilibrar eficiencia y cobertura, ofreciendo una solución viable para planificar rutas de recolección en contextos con recursos limitados.

REFERENCIAS

- [1] Aguilar Fernández, M.; Álvarez Sánchez, T.; Álvarez Cedillo, J. A. (2020). Gestión de residuos sólidos urbanos en Oaxaca, México, desde el enfoque sistemático. 6, 22 (51), 85-102.
<https://trayectorias.uanl.mx/public/anteriores/51/pdf/5.pdf>
- [2] Rosen, K.H. (2019). Discrete Mathematics and Its Applications (8th ed.). McGraw-Hill Education.
- [3] Cormen, T.H.; Leiserson, C.E.; Rivest, R L.; Stein, C. (2022). Introduction to algorithms (4th ed.). MIT Press.