

Herramientas de Optimización e Inteligencia Artificial para la recolección de residuos reciclables, la poda y reemplazo de árboles y el barrido urbano en el municipio argentino de General Alvarado

Camilo D'Aloisio¹[0009-0008-7903-8349], Ayelén Dinkel¹[0009-0005-5753-6468],
Guillermo Durán^{1,2,4,5}[0000-0002-8901-3734], Nazareno A. Faillace
Mullen¹[0000-0002-9007-7081], Daniela Laura
Parada^{1,4}[0000-0001-9950-7845], Pablo Picca^{3,4}[0009-0007-1558-6920], Pablo A.
Rey⁶[0000-0002-1337-4701], Luna Sanes Zalazar¹[0009-0007-3186-5401]

¹ Instituto de Cálculo. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.

² Departamento de Matemática, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.

³ Laboratorio de Sistemática y Biología Reproductivas de Plantas Vasculares. Instituto de Micología y Botánica. Departamento de Biodiversidad y Biología Experimental. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UBA. Buenos Aires, Argentina.

⁴ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Buenos Aires, Argentina.

⁵ Departamento de Ingeniería Industrial, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile

⁶ Departamento de Industria, Facultad de Ingeniería Univesidad Tecnológica Metropolitana, Santiago, Chile.

cdaloisio@ic.fcen.uba.ar, adinkel@dc.uba.ar, Gduran@dm.uba.ar,
nazareno.faillace@ic.fcen.uba.ar, daniela.parada@ic.fcen.uba.ar,
picca@bg.fcen.uba.ar, prey@utem.cl, lsanes@dc.uba.ar

Abstract. Este trabajo aborda la optimización de la recolección de residuos reciclables, la poda de árboles y el barrido de calles en el municipio argentino de General Alvarado. Para la recolección de residuos reciclables se propone una heurística iterativa para hallar rutas eficientes. Se presenta un enfoque basado en el *Covering Salesman Problem with Nodes and Segments* que minimiza la longitud del recorrido y la cantidad de giros, asegurando que la ruta pase a menos de una determinada distancia de cada esquina, así los vecinos no deben desplazarse demasiado para depositar sus residuos y el vehículo no necesite recorrer cada cuadra. Para la poda de árboles se realiza una detección de biomasa caducifolia mediante teledetección satelital multitemporal con imágenes de alta resolución y un censo virtual de plátanos urbanos utilizando redes neuronales convolucionales sobre imágenes de Google Street View. A partir de esta información se implementa un modelo de programación

matemática para organizar la poda y el reemplazo de los plátanos por especies menos invasivas. Para el barrido de calles se desarrolla un algoritmo greedy de zonificación y un modelo de Programación Lineal Entera para asignar barrenderas minimizando el personal requerido para ampliar el servicio, respetando la duración de la jornada laboral. Se presentan resultados preliminares y se los compara con la situación previa a la implementación de los modelos.

Keywords: investigación operativa, programación lineal entera, ruteo de vehículos, recolección de residuos, barrido urbano.

Optimization and Artificial Intelligence Tools for Recyclable Waste Collection, Tree Pruning and Replacement, and Street Sweeping in the Argentine Municipality of General Alvarado

Abstract. This work addresses the optimization of recyclable waste collection, tree pruning, and street sweeping in the Argentine municipality of General Alvarado. For recyclable waste collection, an iterative heuristic is proposed to find efficient routes. A solution approach based on the *Covering Salesman Problem with Nodes and Segments* is presented, minimizing route length and the number of turns while ensuring the route passes within a given distance of every street corner. Thus, residents do not need to travel far to dispose of their recyclables and the vehicle is not required to traverse every block. For tree pruning, deciduous biomass is detected through multitemporal satellite remote sensing with high-resolution imagery, and a virtual census of urban plane trees is built using convolutional neural networks applied to Google Street View images. Based on this information, a mathematical programming model is implemented to organize tree pruning and the replacement of plane trees with less invasive species. For street sweeping, a greedy zoning algorithm and an Integer Linear Programming model are developed to assign street sweepers while minimizing the staff required to expand the sweeping service and respecting working hours. Preliminary results are presented and compared with the situation prior to the implementation of the models.

Keywords: Operations Research, Integer Linear Programming, Vehicle Routing, Waste Collection, Street Sweeping.

1 Introducción

El municipio de General Alvarado, con cabecera en Miramar (provincia de Buenos Aires), enfrenta desafíos crecientes en la gestión de sus servicios urbanos. La recolección de residuos reciclables, el barrido de calles y el mantenimiento del arbolado urbano demandan una planificación logística eficiente en un contexto de recursos limitados: un único vehículo de recolección para todo el partido, equipos acotados de barrenderas y un arbolado urbano sin relevamiento actualizado. La disponibilidad de datos GPS del camión recolector, junto con datos del Censo Nacional 2022, imágenes satelitales e información de comercios obtenida de Google Maps, permite construir los insumos necesarios para los modelos de optimización. Este trabajo surge en el marco de un proyecto financiado por el CFI para diseñar un sistema integral que mejore la prestación de estos servicios mediante la combinación de relevamiento de datos, análisis geoespacial y optimización matemática. El proyecto se organiza en tres líneas paralelas que comparten fuentes de datos y se desarrolla en estrecha colaboración con el personal operativo del Municipio, cuyas observaciones orientaron el diseño de los modelos y garantizan la viabilidad de las soluciones propuestas.

2 Recolección de residuos reciclables

2.1 Situación actual

El servicio de recolección diferenciada en Miramar opera con un único vehículo y conductor para cubrir todo el partido. La ciudad se divide en seis zonas: San Martín, Las Lomas, Centro, Bristol, Las Flores y Balnearios; cada una recorrida en un día fijo de la semana. A estas se suman las localidades de Mechongué, Mar del Sur y General Nicanor Otamendi, que se recorren quincenalmente como zonas únicas. Las zonas de Miramar presentan perfiles muy distintos: algunas, como el Centro, se recorren con mayor frecuencia y concentran una participación vecinal más activa; otras, como Bristol, operan con recorridos fijos hacia puntos de generación previamente establecidos. La zonificación fue establecida históricamente y, con el crecimiento urbano registrado en los últimos años, algunas zonas acumularon significativamente más carga que otras, generando desequilibrios en los tiempos de trabajo y el desgaste del vehículo. A esto se suma que algunos sectores depositan sus residuos reciclables con regularidad, mientras que en otros la cultura del reciclaje es aún incipiente. Esta diferencia, señalada por el chofer del camión, condiciona tanto el diseño de las rutas como el criterio de cobertura que el modelo debe aplicar en cada zona.

2.2 Modelo de ruteo simultáneo

Para el diseño de rutas dentro de cada zona, se propone un modelo de programación lineal entera mixta basado en el Covering Salesman Problem with Nodes and Segments (Matsuura & Kimura, 2017). El problema se modela sobre

un dígrafo cuyos nodos son las intersecciones de calles. El modelo determina qué calles recorrer y en qué orden, minimizando la distancia total y la cantidad de giros. La cobertura territorial se formula como restricción: el recorrido debe garantizar que ningún vecino deba desplazarse más de m metros para depositar sus residuos reciclables. Dado el tamaño acotado de cada zona, las instancias resultan manejables para los solvers disponibles. A partir del trabajo conjunto con el equipo municipal, el modelo incorpora extensiones para distintos casos de uso: nodos y arcos evitables (calles o esquinas que no requieren cobertura) y obligatorios (calles o esquinas por las que el vehículo debe pasar para atender grandes generadores que no pueden trasladarse al recorrido estándar).

2.3 Algoritmo de rezonificación

Para abordar el desequilibrio entre zonas, se desarrolló una heurística iterativa de tipo steepest descent que redistribuye manzanas entre zonas adyacentes minimizando la disparidad en la carga operativa. Cada manzana se caracteriza mediante un indicador construido como combinación ponderada de variables del Censo 2022, longitud de cuerdas, puntos de interés y métricas geométricas. En cada paso se aplica la reasignación de mayor mejora, respetando la continuidad geográfica de cada zona. El algoritmo puede partir de la zonificación actual o construir una desde cero, e incorpora opcionalmente los resultados del modelo de ruteo para retroalimentar el criterio de equilibrio con distancias reales de recorrido.

3 Barrido y limpieza del área urbana

3.1 Situación actual

El servicio de barrido en Miramar se concentra en una zona acotada del área céntrica, organizada en dos turnos diarios. Las tareas se realizan en duplas utilizando escobillón, pala y carritos. Este proceso se lleva a cabo en cuerdas establecidas y se complementa con la atención de sectores de mayor demanda. En este contexto, el municipio plantea la necesidad de ampliar el área de cobertura manteniendo el personal existente, lo que requiere una asignación más eficiente del trabajo.

3.2 Construcción de datos: costo y frecuencia de barrido

Para cuantificar el esfuerzo requerido en cada cuerda se integran dos fuentes de información. Arbolado urbano: a partir de técnicas de teledetección e imágenes de Street View (descriptas en la Sección 4), se asigna a cada cuerda un score numérico y un nivel de prioridad según el potencial de generación de residuos por caída de hojas. Los puntos de interés (comercios, restaurantes): relevados mediante la API de Google Maps, a los que se asocia un peso y una frecuencia de limpieza. Con estas fuentes se construyen dos indicadores por cuerda, el costo de barrido, como combinación lineal ponderada del score de arbolado y la

suma de pesos de puntos de interés; y la frecuencia de barrido, como el máximo entre la prioridad del arbolado y la frecuencia de limpieza. Los parámetros de ponderación permiten calibrar el modelo según la época del año, priorizando el arbolado en otoño y la actividad comercial en verano.

3.3 Algoritmo de segmentación, selección y asignación

La planificación se estructura en tres etapas. En la etapa de creación, se genera un conjunto de segmentos candidatos (secuencias contiguas de cuadras con pocos giros) mediante una adaptación del algoritmo de camino mínimo de costo penalizado propuesto en (D'Aloisio et al., 2025). El costo de cada segmento considera tanto el costo de barrido de sus cuadras como el desplazamiento hacia sus extremos, favoreciendo trayectorias con pocos cambios de dirección, lo que simplifica la implementación y reduce tiempos de traslado. El costo de los segmentos creados es muy variable, desde segmentos de una cuadra hasta otros de varios kilómetros de longitud. Por esa razón, la etapa de selección de segmentos comienza con un filtro para reducir la cantidad de candidatos según su costo y cantidad de giros. Luego, un modelo de programación lineal entera mixta determina qué segmentos conformarán el esquema de barrido, minimizando la cantidad de equipos necesarios para cubrir todas las cuadras, respetando la duración de la jornada laboral y las frecuencias requeridas por cuadra. Una segunda resolución del modelo, fijando la cantidad de equipos, minimiza la variabilidad en el costo de los segmentos seleccionados para lograr una distribución más equitativa del esfuerzo. Finalmente, en la etapa de asignación, un segundo modelo de programación entera mixta distribuye los segmentos entre los equipos de barrenderas, minimizando la disparidad en la carga laboral semanal.

4 Poda y reemplazo de arbolado urbano

4.1 Contexto y motivación

Al inicio del proyecto, el servicio de poda en Miramar llevaba aproximadamente dos años sin realizarse por falta de maquinaria y personal, y no existía un relevamiento actualizado del arbolado urbano. El plátano (*Platanus × hispanica*), predominante en el alineado urbano de la ciudad, es el protagonista de un conflicto funcional con la infraestructura asfáltica y las veredas, entre otras, además de que la fenología de esta especie se caracteriza por una caída de hojas masiva y concentrada en el tiempo. Ante la ausencia de datos, se construyó una base de datos propia combinando teledetección satelital y visión por computadora.

4.2 Metodología

Para estimar la distribución de biomasa caducifolia, se procesaron imágenes satelitales multitemporales de alta resolución calculando el índice de vegetación NDVI y su variación entre temporadas. La diferencia entre el NDVI estival y

el otoñal permite identificar las zonas con mayor concentración de arbolado caduco, y un filtro estructural por altura de dosel descarta arbustos bajos y otros elementos vegetales no relevantes. Para identificar específicamente los plátanos, se entrenaron redes neuronales convolucionales sobre imágenes de Google Street View, realizando una inspección virtual cuadra a cuadra del ejido urbano. El modelo fue validado mediante verificación remota sobre una muestra de cuadras, logrando alta precisión en la detección de ejemplares. El resultado es un censo virtual con la presencia y densidad estimada de plátanos por cuadra, combinado con el mapa de biomasa caducifolia para producir una clasificación final de riesgo en cuatro niveles: crítico, alto, medio y bajo.

4.3 Uso en los modelos y proyecciones

La clasificación por cuadra alimenta directamente el indicador de costo de barrido descrito en la Sección 3, estableciendo un vínculo cuantitativo entre el estado del arbolado y la planificación del servicio de limpieza. Los datos del censo de plátanos sientan además las bases para la planificación de su reemplazo gradual por especies menos invasivas: menor daño en veredas y mayor compatibilidad con el espacio urbano. Esta línea de trabajo, actualmente en desarrollo, incorporará modelos de programación matemática para organizar temporalmente las tareas de poda y reemplazo optimizando el uso de los recursos disponibles.

5 Conclusiones y trabajo futuro

Se presentaron modelos de optimización matemática para tres servicios municipales en General Alvarado, desarrollados a partir de datos reales y en permanente diálogo con el equipo operativo del Municipio. En el caso de la recolección de residuos, se obtuvo una propuesta preliminar de rezonificación. Para el servicio de barrido, se generó una primera distribución del trabajo que permite cubrir la totalidad del área céntrica, organizada por días y turnos. En cuanto al arbolado urbano, el modelo de reemplazo se encuentra en desarrollo. Las próximas etapas incluyen la validación en campo de las soluciones propuestas, ajuste de parámetros y la implementación progresiva de los esquemas diseñados.

Acknowledgments. Este proyecto es financiado por el Consejo Federal de Inversiones (CFI).

References

- D'Aloisio, C., Durán, G., & Mullen, N. F. (2025). A solution approach to districting modification and route optimization in waste collection. *Procedia Computer Science*, 273, 169–176. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.10.295>
- Matsuura, T., & Kimura, T. (2017). Covering salesman problem with nodes and segments. *American Journal of Operations Research*, 7, 249–262. <https://doi.org/10.4236/ajor.2017.74017>