

## Logística inteligente para la recolección dinámica de residuos

D. Pandolfi, J. Rasjido, A. Villagra, S. Orozco, M. Lopez A. Cantella, A.M. Villagra, M. Bilbao, Pérez D.

[dpandolfi, jrasjido, avillagra, sorozco, mlopez, acantella, arivillagra, mbilbao, dperez}@uaco.unpa.edu.ar](mailto:{dpandolfi,jrasjido,avillagra,sorozco,mlopez,acantella,arivillagra,mbilbao,dperez}@uaco.unpa.edu.ar)

<sup>1</sup>Laboratorio de Tecnologías Emergentes (LabTEM)  
Instituto de Tecnología Aplicada (ITA) - Unidad Académica Caleta Olivia  
Universidad Nacional de la Patagonia Austral

### RESUMEN

Los procesos de recolección ineficientes y asignación no conveniente de vehículos conllevan a un aumento de las emisiones de gases contaminantes y de efecto invernadero, y mayores costos de proceso. Así entonces, la optimización de las rutas de la casa al vertedero para la recolección de residuos tecnológicos, producen beneficios tanto económicos como ambientales.

El problema de recolección de residuos tecnológicos es un problema derivado del Problema de Enrutamiento de Vehículos cuyo objetivo principal es la minimización de los kilómetros recorridos para los distintos escenarios dinámicos de recolección de residuos de manera resiliente, sustentable e inteligente. También, se analizará funciones derivadas para decidir el tipo de vehículo y cantidad de puntos de recolección. El coste vehicular, la emisión de gases efecto invernadero (CO<sub>2</sub>), horas trabajadas, y consumo de combustible (diésel).

Adicionalmente, se aplicará al desarrollo de prototipos de aplicaciones móviles para una demanda dinámica de recolección de residuos y gestión de contenedores inteligentes.

**Palabras clave:** Ciudades Inteligentes, Residuos Tecnológicos, Problema de enrutamiento de vehículos, Inteligencia Computacional.

### CONTEXTO

La línea de trabajo se lleva a cabo en el Laboratorio de Tecnologías Emergentes (LabTEM), Instituto de Tecnología Aplicada (ITA) de la Unidad Académica Caleta Olivia Universidad Nacional de la Patagonia Austral, en el marco del Proyecto de Investigación 29/B252 “Logística inteligente para la recolección dinámica de residuos”. Este proyecto se desarrolla en cooperación con el LIDIC de la UNSL, y el Grupo NEO de la UMA (España).

### 1. INTRODUCCIÓN

La logística verde (GL, *green logistics*) se ha convertido en una tendencia en la gestión de la distribución de bienes y la recolección de productos al final de su vida útil. Este enfoque tiene como objetivo maximizar el valor económico y ambiental mediante el reciclaje y el control de emisiones, GL contribuye al desarrollo sostenible y resiliente de la industria, pero también requiere un esquema de transporte más completo cuando se realizan servicios de logística (Lin et al. 2014 (a) (b)).

Los equipos eléctricos y electrónicos (EEE) son uno de los grupos más importantes de materiales que contienen residuos que son fáciles de reciclar. Sin embargo, contienen muchas sustancias que son tóxicas y potencialmente peligrosas para el medio ambiente y la salud humana (Oguchi et al., 2013). Los residuos electrónicos se conocen como WEEE (Residuos de

equipos eléctricos y electrónicos) o residuos electrónicos (e-Waste). La tasa de desechos electrónicos está creciendo en la actualidad, especialmente en los países desarrollados, donde los mercados están saturados con grandes cantidades de nuevos productos electrónicos (Oguchi et al., 2012). En 2013, el StEPI (Iniciativa para resolver el problema de los residuos electrónicos) informa que la generación global de residuos electrónicos se estimó en alrededor de 44,7 millones de toneladas en 2016, una cifra que se prevé que aumente alrededor de 50,7 millones de toneladas en 2020. Europa (incluida la Federación de Rusia) ha generado la segunda mayor cantidad de residuos electrónicos per cápita (16,6 kg por habitante) después de Oceanía (17 kg por habitante) en 2016 (Baldé et al., 2017).

Un método de recolección dinámica de e-Waste, propone un sistema de recolección a pedido o demanda (Nowakowski et al., 2017). Este método de recolección consiste en una notificación previa por parte de un residente o una compañía para recogida de equipos de desecho. Un sistema de soporte de recolección móvil puede ofrecer grandes posibilidades para la reducción de costos de la recolección con una secuencia de recogida de equipos adecuadamente preparada. Para respaldar tal método de recolección, se debe aplicar un algoritmo con capacidades de planificación inteligente y un sistema de información eficiente para la eliminación de desechos de los residentes urbanos. (Nowakowski et al., 2018, 2020).

El Problema de enrutamiento de vehículos (VRP) Dantzig y Ramsar (1959), es uno de los problemas más conocidos y desafiantes en la programación lineal entera y es parte de los problemas llamados NP-Hard (Lenstra y Kan, 1981), que son los problemas que no se pueden resolver en un tiempo polinomial. El tiempo y esfuerzo computacional requerido para resolver este problema aumenta exponencialmente respecto al tamaño del problema. Por esta razón se han ideado algoritmos que no garantizan optima-

lidad, pero que logran entregar buenas soluciones a estos problemas difíciles de resolver como lo son las heurísticas y metaheurísticas.

Con el objetivo de establecer formalmente el proceso de recolección seleccionado y el método de enrutamiento, puede considerarse lo propuesto por Dorigo et al. 1996 para el problema de ruteo de vehículos con capacidad limitada y el algoritmo de Optimización con colonias de hormigas (en inglés *Ant Colony Optimization*, ACO), tomando como base este estudio se propone un método para optimizar las rutas de recolección y operarlas dinámicamente. Las distintas estrategias de recolección de e-waste pueden asociarse al conocido problema de enrutamiento de vehículos. En general, VRP consiste en asignar una cantidad de vehículos homogéneos a varios clientes, donde cada cliente tiene una cierta ubicación y demanda de productos (homogéneos). El objetivo de la optimización es entregar los bienes demandados a todos los clientes al tiempo que minimiza la suma de los costos (longitudes) de las rutas de los vehículos.

La complejidad de muchos problemas optimización discreta del mundo real está asociada con grandes espacios de búsqueda, demandas de rendimiento de tiempo real y ambientes dinámicos que no pueden ser resueltos por métodos exactos en tiempo razonable. Esto ha promovido al desarrollo de nuevos enfoques conocidos como metaheurísticas. Estas, son métodos que integran de diversas maneras, procedimientos de mejora local y estrategias de alto nivel para crear un proceso capaz de escapar de óptimos locales y realizar una búsqueda robusta en el espacio del problema. En particular, las soluciones a problemas de planificación de rutas reales requieren enfoques específicos que puedan manejar tanto la complejidad intrínseca como la incertidumbre de configuración. Las metaheurísticas son técnicas algorítmicas cuyo propósito general es ofrecer una estrategia de búsqueda global para explorar un espacio de soluciones. Las principales ventajas de las metaheurísticas son su adaptabilidad a las características del problema y su conocimiento del

mismo problema para encontrar una solución. Los procedimientos de resolución de problemas son capaces de abordar problemas complejos de optimización, incluidos aquellos con información imprecisa, evaluar posibles alternativas y determinar de manera eficiente la solución preferida.

## 2. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

Esta línea de trabajo se enfoca en la generación de rutas recolección que permitan minimizar ciertos factores económicos y ambientales y maximizar los beneficios referidos a al reciclaje y tratamiento de WEEE. De los objetivos económicos podemos mencionar: minimizar el tiempo de recolección, kilómetros recorridos, maximizar el ahorro de combustible en los vehículos, minimizar la cantidad de vehículos, todo lo cual llevaría a obtener menores costos. Un objetivo económico adicional está dado por la valoración de la recuperación las materias primas tales como material ferroso, cobre, y metales preciosos, etc. De los beneficios ambientales podemos mencionar: la disminución en la emisión de gases efecto invernadero ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  y  $\text{N}_2\text{O}$ ) y los gases de contaminación ambiental ( $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{PM}$ ,  $\text{NO}_x$ ). Tanto los objetivos económicos como ambientales promueven una mejor calidad de servicio e imagen, para las empresas y los gobiernos locales.

## 3. RESULTADOS OBTENIDOS/ESPERADOS

El problema de recolección de e-waste estacionaria se lleva a cabo en puntos de recolección específicos. Dichos puntos, están ubicados en lugares populares o en puntos centroides donde se hace mínimo la distancia entre cada residencia y el punto limpio de recolección. La elección de la ubicación de dichos centros y la elección de un recorrido óptimo representa distintos problemas de decisión.

Para la recolección dinámica por demanda o en puntos móviles de recolección debe incluirse dos aspectos a desarrollar, aplicaciones móviles para transaccionar la demanda y contenedores inteligentes que indiquen ubicaciones y estado de llenado de estos.

El estudio desarrollado corresponde a la de recolección en puntos fijos de pequeños e-waste. Para la recolección estacionaria se establecieron cuatro escenarios distintos de 75, 105, 150 y 200 puntos de recolección de e-waste, ubicados en lugares con disponibilidad para su gestión. La elección de la ubicación de dichos centros fue establecida de forma aleatoria, en distintos centros educativos o gubernamentales de las localidades de Caleta Olivia y Comodoro Rivadavia.

Los contenedores son todos de igual tamaño con un volumen de 0,225 m<sup>3</sup>. Los vehículos de recolección poseen distintas capacidades y características. El primero de los vehículos soporta una carga de hasta 1,5 toneladas y cubicaje de 16 m<sup>3</sup>, el coste promedio por km recorrido es de 1,1526 euros, tiene un consumo de 0,30 litros de gasoil por km recorrido, tiene una capacidad de carga máxima de 71 contenedores y su carga y descarga es de tipo manual requiriendo 6 y 2 minutos respectivamente

Como objetivo general se espera modelar, resolver e implementar un amplio y variado conjunto de servicios inteligentes de la ciudad y producir un mayor impacto en Ciencia e Industria.

Como objetivos específicos se pretende:

- Contribuir a la disminución de la contaminación ambiental y el efecto invernadero a través de la aplicación de técnicas de inteligencia artificial para problemas de logística verde y minería inversa.
- Optimizar el proceso de recolección de residuos para escenarios dinámicos y estimar diferentes variables de decisión (costos, ambientales y recuperación de materiales).
- Construir prototipos de contenedores inteligentes para de determinación temprana de la oportunidad de recolección.
- Promover y contribuir el desarrollo de la economía circular a través de reparación, reciclaje y recuperación de

minerales. e) Promover la concientización sobre el cuidado del medioambiente y la deposición final responsable de la tecnología. f) En lo académico e institucional se espera profundizar la formación del equipo de investigadores participantes y becarios y alumnos participantes

Actualmente se han generado cuatro instancias de pruebas para para 75, 105, 150 y 210 locaciones de recogida de WEEE de cuatro localidades (Caleta Olivia, Comodoro Rivadavia, Trelew y Río Gallegos). Las instancias se han probado con dos algoritmos de inteligencia computacional (ACO y cGA) los resultados preliminares fueron publicados en Pandolfi et al. 2019 y Perez et al 2020.

Para elegir los vehículos más adecuados para la colección, analizamos las siguientes variables: total de km recorridos, Costo total de uso vehículo, Total de Combustible consumido, Total de CO2 emitido y Tiempo Total de horas de Trabajo.

En trabajos futuros analizaremos en distintas ciudades y se propondrán nuevas funciones de optimización teniendo en cuenta las variables consideradas en este estudio.

#### 4. FORMACIÓN DE RECURSOS HUMANOS

El equipo de trabajo se encuentra formado por cuatro investigadores con distintos niveles de posgrado, dos Doctores en Ciencias de la Computación, un Magister en Ciencias de la Computación, tres Ingenieros en Sistemas, tres estudiantes de la Carrera Ingeniería en Sistemas.

Esta línea de investigación proporcionará un marco propicio para la iniciación y/o finalización de estudios de posgrado de los integrantes docentes. De igual forma, será un ámbito adecuado para la realización de tesis de grado. En ese sentido, dos integrantes de este proyecto de investigación está desarrollando su Tesis de Maestría en temáticas afines. Además, se cuenta con dos becarios alumno de la carrera de Ingeniería en Sistemas.

BALDÉ C.P., FORTI V., GRAY V., KUEHR R., STEGMANN, P. (2017). The global e-waste monitor – 2017. Bonn, Geneva, Vienna: United Nations University, International Telecommunication Union, International Solid Waste Association.

CARBALLO L., VILLAGRA A., ERRECALDE M., Movilidad inteligente: reducción de emisión de gases. Revista de Informes Científicos y Técnicos de la Universidad Nacional de la Patagonia Austral. vol.11 n°2. Pág.53-69. ISSN 1852-4516 (2019).

DANTZIG G.B., RAMSER J., (1959). The truck dispatching problem, Manage. Sci. 6 (1) (1959) 80–91.

DORIGO M., MANIEZZO, COLORNI A., (1996). The ant system: optimization by a colony of cooperating agents, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part B26 29–41.

LENSTRA J.K., KAN A.R., (1981). The complexity of vehicle routing and scheduling problems, Networks 11 (1981) 221–227.

LIN C., CHOY K.L., HO G.T.S., Ng T.W. (a), A Genetic Algorithm-based optimization model for supporting greentransportation operations, Expert Systems with Applications, Volume 41, Issue 7, 2014, Pages 3284-3296, ISSN 0957-4174.

LIN C., CHOY K.L., HO G.T.S., CHUNG S.H., LAM H.Y. (b), Survey of Green Vehicle Routing Problem: Past and future trends, Expert Systems with Applications, Volume 41, Issue 4, Part 1, 2014, Pages 1118-1138, ISSN 0957-4174.

LOPEZ M., PANDOLFI D., VILLAGRA A.; Heurística y metaheurísticas en la recolección de residuos tecnológicos; Revista de Informes Científicos y Técnicos de la Universidad Nacional de la Patagonia Australn 2021.

#### BIBLIOGRAFÍA

NOWAKOWSKI P., KRÓL A., MRÓWCZNSKA B. (2017), Supporting mobile WEEE collection on demand: A method for multi-criteria vehicle routing, loading and cost optimisation, *Waste Management*, Volume 69, 2017, Pages 377-392, ISSN 0956-053X.

NOWAKOWSKI P., SZWARC K., BORYCZKA U., (2018) Vehicle route planning in e-waste mobile collection on demand supported by artificial intelligence algorithms, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Volume 63, 2018, Pages 1-22, ISSN 1361-9209.

NOWAKOWSKI, P., SZWARC, K., & BORYCZKA, U. (2020). Combining an artificial intelligence algorithm and a novel vehicle for sustainable e-waste collection. *Science of The Total Environment*, 730, 138726.

OGUCHI M., SAKANAKURA H., TERAZONO A. (2012). Toxic metals in WEEE: characterization and substance flow análisis in waste treatment processes. *Science of The Total Environment*, Volumes 463–464, 2013, Pages 1124-1132, ISSN 0048-9697.

OGUCHI M., SAKANAKURA H., TERAZONO A. (2012). Toxic metals in WEEE: characterization and substance flow análisis in waste treatment processes. *Science of The Total Environment*, Volumes 463–464, 2013, Pages 1124-1132, ISSN 0048-9697.

PEREZ D., PANDOLFI D., VILLAGRA A.; Recolección de Residuos Tecnológicos aplicando Metaheurísticas. *Revista de Informes Científicos y Técnicos de la Universidad Nacional de la Patagonia Austral*. Vol. 13 Núm. 1 (2021). Pag. 54-76.

PANDOLFI D., VILLAGRA A., RASJIDO J., LEGUIZAMON G. Following the green footprint of technological waste: A smart and sustainable collection. XVIII RPIC - Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y

Control. *Universidad Nacional del Sur*. Septiembre 2019. Pág. 287-292. ISBN 978-987-1648-44°-3

VALDEZ J., PANDOLFI D., VILLAGRA A. Red de sensores inteligentes para adquisición de datos de una planta de desalinización de agua. *Revista de Informes Científicos y Técnicos de la Universidad Nacional de la Patagonia Austral*. vol. 10 n°3. Pág. 83-95. ISSN 1852-4516 (2018).

VILLAGRA A., PANDOLFI D., RASJIDO J., MERCADO V. Hibridación de Metaheurísticas aplicadas al problema de ruteo de vehículos con capacidad uniforme. IX Seminario Euro Latinoamericano de Sistemas de Ingeniería. Venezuela. Noviembre 2013. ISBN: 978-980-7630-00-9.

VILLAGRA A., ALBA E., LUQUE G. A Better Understanding on Traffic Light Scheduling: New Cellular GAs and New In-depth Analysis of Solutions. *Journal of Computer Science*. 41 (2020) 101085. ISSN: 1877-7503 <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2020.101085>