

## Recorridos óptimos para la recolección de residuos tecnológicos Recuperación de metales y disminución en la emisión de gases

### Optimal routes for e-waste collection Recovery of metals and reduction of gas emissions

Diana Perez, Andrea Villagra, Daniel Pandolfi  
*dperez@uaco.unpa.edu.ar, avillagra@uaco.unpa.edu.ar, dpandolfi@uaco.unpa.edu.ar*

Laboratorio de Tecnologías Emergentes (LabTEm)  
Instituto de Tecnología Aplicada (ITA) - Unidad Académica Caleta Olivia  
Universidad Nacional de la Patagonia Austral - Santa Cruz - Argentina

*Recibido: 04/11/2021. Aceptado: 24/02/2022*

### RESUMEN

El aumento progresivo en la generación de residuos de equipos eléctricos y electrónicos es proporcional a la evolución de la tecnología, esto conlleva implicaciones ambientales negativas. Las actividades en la recolección de residuos se pueden agrupar en cinco etapas correspondientes al ciclo de vida de los residuos: generación, recolección y transporte, transformación, tratamiento y eliminación final. El costo de la recolección y transporte es un factor crítico en el gasto fiscal de los sistemas de gestión de residuos, por esta razón las mejoras en este campo representan un importante papel en el ahorro del gasto de las organizaciones encargadas de esta tarea. En este trabajo se aplican a instancias reales de las ciudades de Caleta Olivia y Comodoro Rivadavia el algoritmo de Optimización basado en colonia de hormigas (ACO), se lo compara con resultados obtenidos por expertos. Los resultados demuestran la bondad del algoritmo propuesto logrando una reducción en los kilómetros necesarios para realizar los recorridos. Además, se analiza la recuperación de metales utilizando las soluciones obtenidas por ACO y la reducción en la emisión de gases efecto invernadero.

**Palabras clave:** Recolección de residuos tecnológicos; Algoritmo de Optimización basado en colonia de hormigas; Recuperación de metales; Reducción de gases.

### ABSTRACT

The progressive increase in the generation of electrical and electronic equipment waste is proportional to the evolution of technology, which has negative environmental implications. Waste collection activities can be grouped into five stages corresponding to the waste life cycle: generation, collection and transport, transformation, treatment, and final disposal. The cost of collection and transport is a critical factor in the fiscal costs of waste management systems, which is why improvements in this field play an important role in cost savings for waste management organisations. In this work, the Ant Colony Optimisation (ACO) algorithm is applied to real instances in the cities of Caleta Olivia and Comodoro Rivadavia and compared with results obtained by experts. The results demonstrate the goodness of the



proposed algorithm achieving a reduction in the kilometres needed to make the routes. In addition, the recovery of metals using the solutions obtained by ACO and the reduction in greenhouse gas emissions are analysed.

**Key words:** E-waste Collection; Ant Colony-based Optimisation Algorithm; Metal Recovery; Gas Reduction.

## INTRODUCCIÓN

La creciente demanda en el uso las tecnologías de la información y comunicación (TIC) han revolucionado nuestra vida cotidiana, sin embargo, han contribuido a aumentar las preocupaciones ambientales y sociales. La aceleración de factores como el agotamiento y escasez de recursos, daños ambientales, uso de agua y energía y un incremento insostenible de desechos tecnológicos principalmente en zonas urbanas, se ha convertido en una preocupación para la industria y el gobierno. El sostenimiento del ritmo de consumo a mediano y largo plazo depende de estrategias que permitan el reciclaje de los desechos y el fortalecimiento de una economía circular que realice un cambio sistémico, en la investigación y la innovación, tanto tecnológica como logística. La recuperación de residuos tecnológicos requiere de estrategias inteligentes de recolección que minimicen los costos asociados, maximicen el reuso de materias primas y la reparabilidad de los bienes para la prolongación de su vida útil.

Los equipos eléctricos y electrónicos (EEE) se convierten en uno de los grupos más importantes de residuos que contienen materiales fáciles de reciclar. Los desechos electrónicos son conocidos como RAEE (en español, Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos), o e-waste, o bien WEEE (en inglés, *Waste Electrical and Electronic Equipment*). Los WEEE, contienen muchas sustancias que son tóxicas y potencialmente peligrosas para el medio ambiente y la salud humana (Oguchi et al., 2013). La reducción, reciclaje y eliminación de los desechos finales de los WEEE se ha convertido en uno de los principales objetivos para el desarrollo sostenible de la creciente industria tecnológica. La tasa de WEEE está creciendo a un ritmo alarmante, especialmente en los países desarrollados, donde los mercados están saturados con grandes cantidades de nuevos productos electrónicos (Widmer et al., 2005). En 2013, un informe de StEPI (Solving the e-waste Problem Initiative), una iniciativa financiada por Naciones Unidas alertó que la cifra de WEEE se había elevado hasta cerca de los 49 millones de toneladas, un promedio de 7 kilos por cada uno de los 7.000 millones de habitantes del planeta Tierra. A la luz de estos datos, no resulta muy difícil hacerse una idea de la importancia que adquiere el reciclaje de este tipo de residuos. Según el Observatorio Mundial de Residuos Electrónicos (2020), en Argentina se generan 465 mil toneladas de RAEE por año.

Las empresas de recolección de residuos aplican diversos métodos de recolección, y pueden dividirse en estacionarios y móviles (Baxter et al., 2016). El objetivo tradicional de la gestión de distribución o recolección de productos consiste en minimizar los costos de todo el sistema. *Green Logistics* (GL) 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. Con su enfoque en maximizar el valor económico y ambiental mediante el reciclaje y el control de emisiones, GL contribuye al desarrollo sostenible de la industria, pero también requiere un esquema de transporte más completo cuando se realizan servicios de logística (Lin et al. 2014 (a) (b)).

La recolección de residuos se refiere al uso de vehículos de recolección de residuos para cargar los residuos desde los puntos de recolección. El transporte de residuos se refiere a la

actividad de llevar los residuos recolectados al centro de eliminación. Se han propuesto diferentes técnicas para su resolución tanto exactas, heurísticas y metaheurísticas (Laporte et al. 2000, Asih et al. 2017).

En este trabajo analizamos como la optimización de las rutas de recolección reduce la emisión de gases producidos en el recorrido. ACO es algoritmo que se ha seleccionado para este estudio ya que ha demostrado obtener los mejores resultados (minimización de los km recorridos comprado con otros algoritmos de la literatura (Pérez et al., 2021). Ha reducido de forma importante los kilómetros necesarios para recorrer los diferentes escenarios comparado con los resultados obtenidos por expertos. Además, se muestra el valor oculto en los residuos tecnológicos, en particular en los celulares y la reducción en las emisiones de gases efecto invernadero que se logra con los recorridos obtenidos con ACO para las instancias utilizadas.

El artículo está organizado de la siguiente manera: la Sección 1 presenta una revisión de la literatura, la Sección 2 describe el problema de recolección de residuos tecnológicos y el algoritmo utilizado para resolver el problema. La Sección 3 describe el diseño de experimentos e instancias utilizadas, la Sección 4 muestra el análisis de resultados. Finalmente, la Sección 5 presenta las conclusiones.

## 1. REVISIÓN DE LA LITERATURA

Actualmente existen diferentes métodos posibles de recolección de residuos tecnológicos. Entre ellos se encuentran recolección fija de residuos realizadas en puntos de recolección ya definidos y recolección móvil de residuos que se llevan por ejemplo en la vereda o en puntos móviles situados en zonas frecuentadas. La recolección móvil puede ejecutarse también bajo demanda cuando un vecino llama a una empresa de recolección o utiliza una aplicación móvil para solicitar la recolección de RAEE (Gu et al., 2019; Nowakowski et al., 2018). Este método está teniendo cada vez más interés debido a la reducción de costos, comodidad para los vecinos y popularidad en muchos países (Cao et al., 2018).

Los residuos tecnológicos y en general los de menor tamaño (celulares) son almacenados en los hogares. La razón más frecuente para el almacenamiento es la suposición que "pueden ser utilizados en el futuro" (Nowakowski, 2019). El almacenamiento de estos residuos en los hogares es uno de los factores más importantes que perturban el enfoque de la economía circular y disminuye la cantidad de artículos de alto valor que pueden ser reciclados. También conlleva un destino desconocido para estos artículos.

Por otra parte, según las estadísticas de la Unión Europea (UE, *Europe Union*) existen riesgos al ambiente y a la salud pública al juntarlos con los demás desechos y llevarlos a los mismos vertederos o basurales, éstos son altamente contaminantes por el tipo de materiales con los que están hechos como plomo, arsénico, mercurio, cobre, cromo, etc. Estos desechos afectan a la salud del ser humano y al ambiente. Ejemplo de ello, las pantallas de plasma que usan un gas que es el trifluoruro de carbono son 17.000 veces más contaminante que el dióxido de carbono, que es el principal contaminante. Otro ejemplo son las computadoras, donde algunos de las componentes con que están hechas son: cromo, cadmio mercurio, berilio, níquel y zinc. Menikpura et al. (2014) realizaron un estudio para evaluar los beneficios del reciclaje de desechos electrónicos de lavadoras, heladeras, acondicionadores de aire y televisores en Japón con respecto a la reducción de Gases de Efecto Invernadero (GEI).

Los residuos tecnológicos, poseen una amplia gama de materiales de composición generalizada para todos los residuos. La mayoría de los estudios examinan cinco categorías de materiales reciclables: metales ferrosos, metales no ferrosos, vidrio, plásticos y otros materiales. El hierro y el acero son los materiales más comunes que se encuentran en EEE (en peso) y representan casi la mitad del peso total de los *e-waste*. Los plásticos son el segundo mayor componente en peso, representando, 21% de los *e-waste*. Los metales no ferrosos, incluidos los metales preciosos, representan aproximadamente el 13% del peso total de los *e-waste* (el cobre representa el 7%).

Según Widmer et al. (2005), la fracción que incluye hierro, cobre, aluminio, oro y otros metales en los desechos electrónicos supera el 60%, mientras que los contaminantes representan el 2.70%. Ikhlal (2018) valuó los impactos ambientales y los beneficios asociados con la recuperación de metales en *e-waste* de seis dispositivos electrónicos utilizando Jordania como un estudio de caso. Se diseñaron cinco escenarios de gestión de desechos electrónicos que representan sistemas de procesamiento de desechos electrónicos de última generación basados en el concepto de IWM (*Integrated Waste Management*), en el que se pueden emplear diversas tecnologías de tratamiento.

Existen diferentes iniciativas para la reutilización de *e-waste* y una de ellas muy interesante fue la del medallero de los Juegos Olímpicos de Tokio 2020 que fue construido con más de 6,21 millones de smartphones. Japón logró reciclar de los viejos dispositivos: 32 kg. de oro, 3500 kg de plata y 2200 kg. de bronce.

A pesar de la importancia de una recolección de residuos tecnológicos, el nivel de recolección de este tipo de residuos es relativamente bajo. En nuestro país no se cuenta con una normativa nacional que regule y unifique la gestión integral de este tipo de residuos. Según el Observatorio Mundial de Residuos Electrónicos en Argentina se generan 465 mil toneladas de RAEE por año y el 60% termina en basurales o rellenos sanitarios, mientras que el porcentaje de elementos que son recuperados o reciclados es sólo del 5%. El resto, por el contrario, se acumula y se convierte en un grave foco de contaminación, tomando en cuenta que este tipo de residuos contiene infinidad de sustancias tóxicas.

Otro factor importante para considerar es la emisión que producen los vehículos encargados de la recolección de *e-waste*. Calendarios ineficientes de recolección y asignación no convenientemente de vehículos conllevan a un aumento de las emisiones de gases contaminantes y de efecto invernadero (Salhofer et al., 2007). Así entonces, la optimización de las *rutas de la casa al vertedero* para la recolección de residuos tecnológicos, producen beneficios tanto económicos como ambientales.

## 2. PROBLEMA DE RECOLECCION DE RAEE Y ALGORITMO ACO

En esta sección se describe el problema de recolección de residuos tecnológicos y se presenta la metaheurística de colonia de hormigas para obtener las soluciones.

### 2.1. Descripción del problema

El problema de recolección de RAEE puede verse como un problema de ruteo de vehículos (en inglés, *Vehicle Routing Problem* – VRP). El VRP (Dantzig y Ramser, 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 optimalidad, pero que logran entregar buenas soluciones a estos problemas difíciles de resolver como lo son las metaheurísticas. En su forma más simple el VRP busca resolver la problemática de la distribución de productos y/o servicios, diseñando rutas que atienden la demanda de los clientes dispersos geográficamente desde un depósito utilizando una flota homogénea de vehículos.

Existen diferentes variantes del VRP, que incluyen restricciones adicionales y la incorporación de múltiples variables. En este trabajo se utiliza la restricción que cada vehículo tiene capacidad limitada (en inglés, *Capacited Vehicle Routing Problem* - CVRP). Se define el CVRP sobre un grafo no dirigido  $G = (V, E)$  donde  $V = \{v_0, v_1, \dots, v_n\}$  es un conjunto de vértices y  $E = \{(v_i, v_j) / v_i, v_j \in V, i < j\}$  es un conjunto de ejes.

El vértice  $v_0$  es el depósito, y es desde donde  $m$  vehículos de capacidad  $Q$  deben abastecer a todas las ciudades o clientes, representados por un conjunto de  $n$  vértices  $\{v_1, \dots, v_n\}$ .

Definimos en  $E$  una matriz  $C = (c_{ij})$  de costo, distancia o tiempo de viaje no negativos entre los clientes  $v_i$  y  $v_j$ . Cada cliente  $v_i$  tiene una demanda no negativa de artículos  $q_i$  y tiempos de entrega  $\delta_i$  (tiempo necesario para descargar todos los artículos). Siendo  $v_1, \dots, v_m$  una partición de  $V$ , una ruta  $R_i$  es una permutación de los clientes en  $V_i$  especificando el orden en el que se visitan, comenzando y terminando en el depósito  $v_0$ . El costo de una ruta dada  $R_i = \{v_0, v_1, \dots, v_{k+1}\}$ , donde  $v_j \in V$  y  $v_0 = v_{k+1} = 0$  (0 indican el depósito), viene dada por la ecuación (1):

$$Cost(R_i) = \sum_{j=0}^k c_{i,j+1} + \sum_{j=0}^k \delta_j \quad (1)$$

y el costo de la solución al problema ( $S$ ) es:

$$FCVRP(S) = \sum_{i=1}^m Cost(R_i) \quad (2)$$

El CVRP consiste en determinar un conjunto de  $m$  rutas (i) de costo total mínimo - como especifica la ecuación (2); (ii) empezando y terminando en el depósito  $v_0$ ; de forma que (iii) cada cliente es visitado una sola vez por un sólo vehículo, sujeto a las restricciones (iv) de que la demanda total de cualquier ruta no exceda  $Q (\sum_{v_j \in R_i} q_j \leq Q)$ ; y (v) la duración total de cualquier ruta no supera el límite preseleccionado  $D (Cost(R_i) \leq D)$ . Todos los vehículos tienen la misma capacidad y transportan el mismo tipo de artículo. El número de vehículos puede ser un valor de entrada o una variable de decisión. En este estudio, la longitud de las rutas se minimiza independientemente del número de vehículos utilizados.

## 2.2. Descripción del algoritmo ACO

El algoritmo ACO fue propuesto por Dorigo et al. (1996) como metaheurística inspirada en el comportamiento de una colonia de hormigas en el proceso de forrajeo y aplicado principalmente para resolver problemas de optimización combinatoria. Este enfoque fue propuesto inicialmente como método para resolver el clásico problema del viajante de comercio (*Traveling Salesman Problem*).

En general en ACO, hay una colonia de  $m$  hormigas (artificiales) que se mueven concurrente y asincrónicamente, a través de los estados adyacentes del problema. Se utiliza una regla de transición para realizar este movimiento, la que se basa en la información local disponible en los arcos del grafo que representa el problema (los nodos representan las ciudades y los arcos los caminos que unen las ciudades). Se utiliza una regla de transición para realizar este movimiento, la que se basa en la información local disponible en los arcos del grafo que representa el problema. Para guiar la búsqueda, esta información contiene tanto la información heurística ( $\eta_{ij}$ ) y los rastros de feromona ( $\tau_{ij}$ ) asociados a cada arco ( $i, j$ ). Las hormigas depositan feromona al transitar por un arco mientras construyen una solución (actualización en línea paso a paso de los rastros de feromona). Después que las  $m$  hormigas generan una solución, se deposita una cantidad de feromona en los arcos de la mejor solución conocida (actualización en línea a posteriori de los rastros de feromona), de esta forma se guía la búsqueda de soluciones en el siguiente ciclo.

El pseudocódigo de ACO se muestra en el Algoritmo 1. El primer paso consiste en la inicialización de los parámetros como los rastros de feromonas, factor de evaporación, número de hormigas y factores de información heurística (línea 1). Durante la construcción de la solución, cada hormiga debe decidir, a través de la regla de transición probabilística, ya sea para explorar nuevas conexiones o explotar las que ya han sido visitadas por otras hormigas (línea 4). Cada solución generada es una secuencia de nodos que ha sido visitado por una hormiga. Por tanto, las hormigas deben iniciar su recorrido desde algún nodo del grafo. Este nodo inicial se elige al azar para todas las hormigas en la colonia (línea 6). El camino de cada hormiga comienza desde un nodo aleatorio del grafo y termina cuando todos los nodos del grafo han sido visitados solo una vez. El orden de las visitas de los nodos en camino depende de las decisiones del algoritmo (líneas 7 y 8). Cuando todas las hormigas terminan su recorrido, se ejecuta una rutina global (fuera de línea), que se encarga de actualizar los rastros de feromonas de hormigas que el algoritmo considera las mejores soluciones. Esta actualización de la feromona se realiza primero evaporando los rastros de feromonas en todas las conexiones utilizadas por la mejor hormiga global y luego en la misma ruta que se depositaron las nuevas feromonas (líneas 11).

---

### Algoritmo 1 ACO

---

```

1: inicializacion_de_parametros ();
2:  mientras (criterio no satisfecho)
3:     mientras (población de hormigas)
4:         crear_soluciones ();
5:         para (cada solución)
6:             Preparar hormigas
7:             Inicializar los recorridos de las hormigas
8:             Evaluar solución
9:         fin para
10:    fin mientras (población de hormigas)
11:    actualizar_feromonas ();
12: fin mientras (criterio no satisfecho)

```

---

Cada solución generada por ACO representa una solución óptima del recorrido. Cada elemento de esta solución representa el orden secuencial en que serán visitadas cada uno de los puntos de recolección. El tamaño de la solución depende del número de puntos de recolección. En la Figura 1 se muestra el esquema de codificación. Podemos observar una

solución obtenida por ACO que representa la secuencia de recorrido de los puntos de recolección.



Figura 1. Esquema de codificación

La evaluación de la solución consiste en aplicar la Ecuación (2) a cada solución obtenida por ACO. Los parámetros utilizados para el algoritmo se definen en la sección de diseño de experimentos.

### 3. DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Se han generado dos instancias de problema correspondientes a dos ciudades distintas, en las que se realizará la recolección de residuos tecnológicos. La primera instancia corresponde a la ciudad de Caleta Olivia y la segunda instancia a la ciudad de Comodoro Rivadavia. En ambas ciudades se realizará una recolección de residuos estacionaria y se definen para Caleta Olivia tres escenarios distintos de 75, 105 y 150 puntos de recolección de residuos tecnológicos, ubicados en lugares con disponibilidad para su gestión y cuatro escenarios para la ciudad de Comodoro Rivadavia con 75, 105, 150 y 200 puntos de recolección. En ambos casos los lugares corresponden a centros educativos o gubernamentales de cada una de las ciudades.

Tabla 1: Vehículos de recolección de e-waste

Tipo de Vehículo	Peso de la carga	Cubicaje Máximo (m <sup>3</sup> )	Costo x Km (U\$S)	Consumo Medio (l/km)	Capacidad en Contenedores
VH1	Hasta 1,5 Toneladas	16 m <sup>3</sup>	1,38	0,30	71
VH2	Hasta 2,5 Toneladas	22 m <sup>3</sup>	1,48	0,38	97
VH3	Hasta 4.5 Toneladas	32 m <sup>3</sup>	2,67	0,48	142

En cada uno de los puntos de recolección existen contenedores de igual tamaño con un volumen de 0,225 m<sup>3</sup>. Los vehículos utilizados para la recolección poseen capacidades distintas y tienen diferentes características. El primer vehículo denominado VH1 soporta una carga de hasta 1,5 toneladas y cubicaje de 16 m<sup>3</sup>, el costo promedio por *km* recorrido es de 1,38 U\$S, tiene un consumo de 0,30 litros de gasoil por *km* recorrido, tiene una capacidad de carga máxima de 71 contenedores. De igual manera se detallan todos los vehículos en la Tabla 1.

La parametrización para la población para ACO se fijó en 50 hormigas y el máximo de iteraciones en 10.000, la evaporación global  $p(ro)$  en 0,1, la evaporación local ( $fi$ ) en 0,1 y el

valor inicial de feromona  $T$  ( $\tau$ ) 0,0335. Los valores utilizados se han establecido en base a experimentaciones realizadas y de trabajos anteriores donde se ha utilizado este algoritmo (Pérez et al., 2021). Se realizaron 30 ejecuciones independientes del algoritmo para cada instancia y cada escenario aplicado a resolver el problema de recolección de e-waste. El algoritmo ACO está implementado en Java y las ejecuciones se realizan con un procesador Intel i7 2.60 GHz, con 8GB de RAM sobre Windows 10. Se han comparado los resultados de ACO con los resultados generados por expertos. En este trabajo, los mejores valores están marcados en negrita. Para los análisis estadístico y gráficas se ha utilizado RStudio Versión 1.1.463.

#### 4. ANALISIS DE RESULTADOS

Como primer análisis se muestra una comparación se los resultados obtenidos por ACO en cuanto a la mediana de  $km$  recorridos y los resultados obtenidos por Expertos para cada uno de los escenarios. La

*Tabla 2* muestra la mediana de  $km$  recorridos obtenido por ACO y los  $km$  recorridos calculado por Expertos para las instancias de Caleta Olivia para cada uno de los escenarios. Por ejemplo, para ACO la fila 75 representa 75 puntos de recolección y la columna C16 la utilización de un vehículo con cubicaje máximo de  $16 m^3$ . La intersección de esa fila y columna representa la mediana en  $km$  necesarios para realizar el recorrido. Para la misma intersección, pero con respecto a Expertos representa el valor en  $km$  calculado por los expertos para ese escenario. La *Tabla 3* muestra información similar a la tabla anterior pero correspondiente los resultados obtenidos para la ciudad de Comodoro Rivadavia.

En la

*Tabla 2* se puede observar que para todos los escenarios ACO presenta los menores resultados, es decir obtiene la menor cantidad de  $km$  recorridos. En general ACO obtiene una reducción entre un 50 a 57% en los  $km$  recorridos comparado con los obtenidos por expertos.

En la *Tabla 3* se puede observar que ACO para todos los escenarios de la ciudad de Comodoro Rivadavia presenta los mejores resultados, comparado con los obtenidos por expertos. ACO logra una reducción de  $km$  entre el 50 y 60% menos que lo calculado por los expertos.

En la *Figura 2*,

*Tabla 2* se muestra la distribución de los resultados obtenidos por ACO en cuanto a  $km$  recorridos para cada una de las instancias en la ciudad de Caleta Olivia. En todos los escenarios los menores valores han sido los obtenidos por ACO. Podemos diferenciar claramente los resultados correspondientes a 75 puntos de recolección con los tres tipos de cubicaje, en el centro los resultados para 105 puntos de recolección y los tres últimos para 150 puntos de recolección. En todos los boxplot se observa que todos los resultados se encuentran en general alrededor de la mediana, si bien en algunas instancias se puede ver un círculo que

representan algunos valores atípicos. No obstante, el algoritmo ha demostrado robustez para el conjunto de instancias utilizado.

Tabla 2: Resultados en medianas de *km* recorridos de ACO y de Expertos para las instancias de Caleta Olivia

N	ACO			Experto		
	C16	C22	C32	C16	C22	C32
75	94,63	90,49	90,49	189,13	186,84	185,95
105	121,77	121,77	118,24	266,68	267,91	264,49
150	175,13	171,70	170,39	398,69	394,38	396,08
Prom	130,51	127,99	126,37	284,83	283,04	282,17

Tabla 3: Resultados en medianas de *km* recorridos de ACO y de Expertos para las instancias de Comodoro Rivadavia

N	ACO			Expertos		
	C16	C22	C32	C16	C22	C32
75	258,27	225,10	207,41	485,59	563,90	451,02
105	331,86	305,76	267,26	647,61	779,47	600,25
150	419,63	365,00	344,73	1012,01	1200,73	961,28
200	518,21	471,32	425,95	1315,15	1288,11	1276,22
Prom	381,99	341,79	311,34	865,09	958,05	822,19

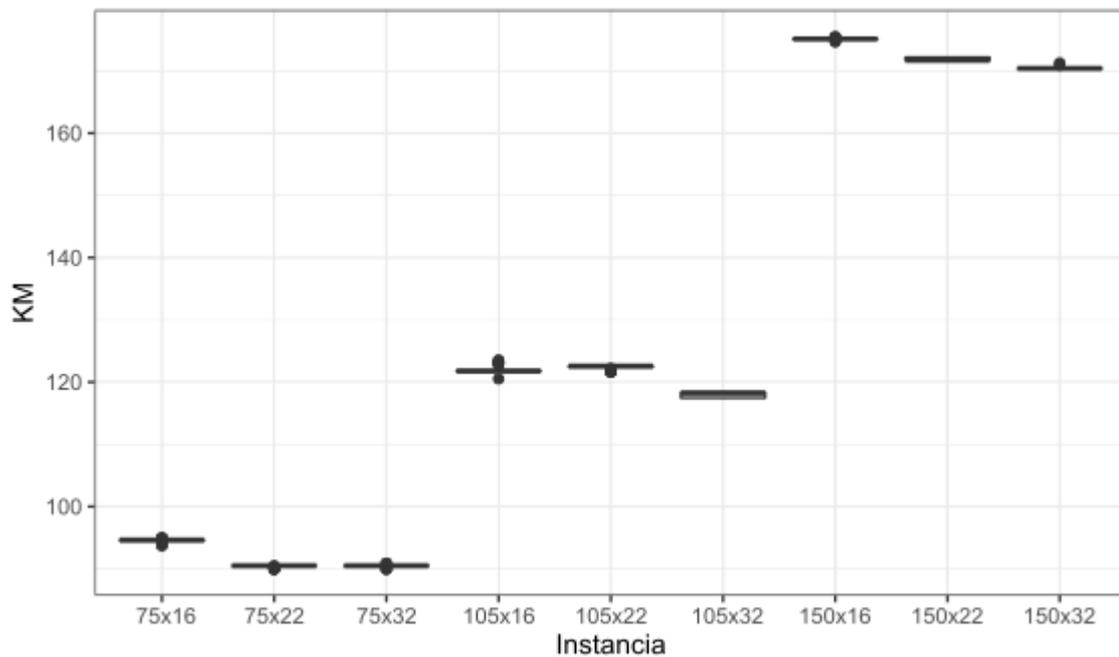


Figura 2. Boxplot de resultados obtenidos por ACO para la ciudad de Caleta Olivia

Es importante aclarar que si bien los menores valores en km recorridos corresponden a todas las instancias que contienen un contenedor con mayor cubicaje ( $32 m^3$ ), la decisión sobre el tamaño de los contenedores no depende solamente de los *km* recorridos tal como se analiza en (Pérez et al., 2021). Para estos experimentos solamente se ha considerado la variable *km* recorridos.

En la Figura 3 se muestra la distribución de los resultados obtenidos en cuanto a km recorridos por ACO para cada una de las instancias en la Ciudad de Comodoro Rivadavia.

En este caso los resultados también se encuentran en general alrededor de la mediana, salvo en la instancia de 150x16 donde podemos observar valores por debajo de la mediana, y en las instancias 75x32 y 150x22 algunos valores por encima de la mediana. Para la instancia 150x32 existen valores por encima y por debajo de la mediana. En seis de las doce instancias se muestran algunos valores atípicos. Nuevamente con esta gráfica se puede observar la robustez de ACO para las instancias de Comodoro Rivadavia.

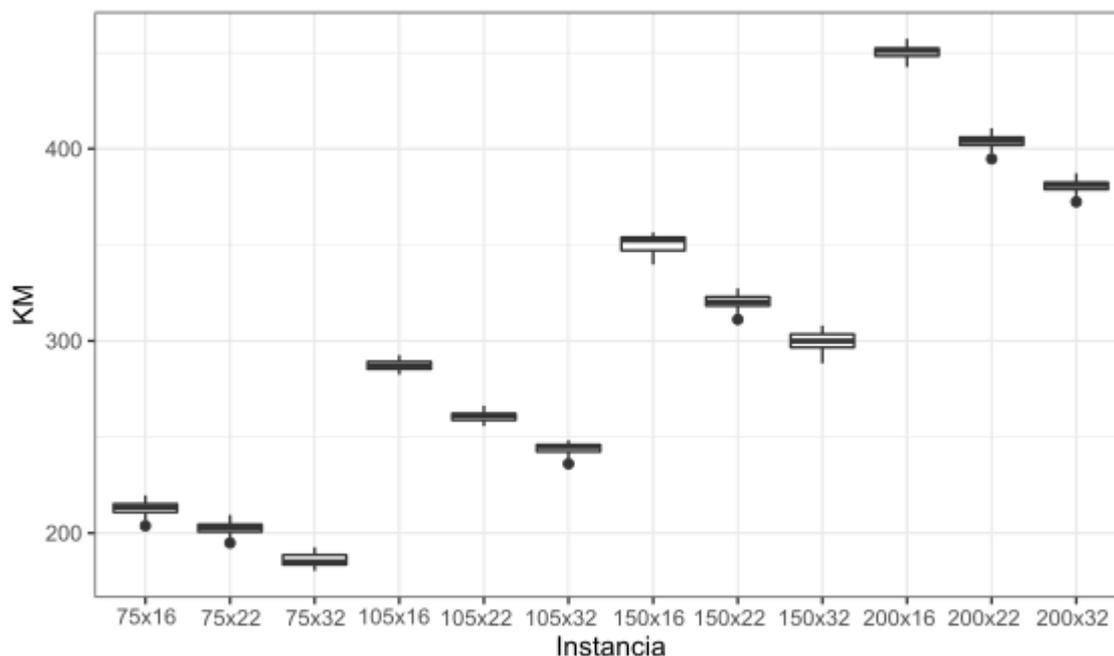


Figura 3. Boxplot de resultados obtenidos por ACO para la ciudad de Comodoro Rivadavia

Como segundo análisis se supone la realización de una campaña de recolección de dispositivos pequeños (en particular celulares) en ambas ciudades Comodoro Rivadavia y Caleta Olivia. Dado que la población de Comodoro es aproximadamente de 180.000 habitantes y la de Caleta Olivia de 75.000 habitantes y asumiendo un peso promedio de un celular en 0,18 kg se estima recolectar en una campaña 32,40 toneladas ( $t$ ) en Comodoro y 14,40 toneladas en Caleta Olivia, es decir 46,80  $t$  de celulares.

Para esta campaña es necesario 150 puntos de recolección en Comodoro Rivadavia (ya que con 105 puntos de recolección no son suficientes para la cantidad de celulares que se proyectan recolectar). Para Caleta Olivia 75 puntos de recolección son suficientes.

Se describe a continuación como se justifica esta cantidad de puntos de recolección. Con 150 puntos de recolección de  $0,225 m^3$  se logra una capacidad total de  $33,75 m^3$ . Asumiendo que en  $1 m^3$  caben aproximadamente 7.352 celulares con un peso promedio de 0,18kg se pueden contener aproximadamente 44,66  $t$  de celulares. Para Caleta Olivia realizando el mismo análisis, en este caso con 75 puntos de recolección de capacidad  $0,225 m^3$  se pueden contener 22,33  $t$  de celulares.

Se describe a continuación un ejemplo de valorización de algunos metales (cobre, aluminio, plata, oro y níquel) asumiendo la recolección lograda en ambas ciudades (sin tener en cuenta los costos de recuperación). Se toma como referencia los valores para los metales que se muestra en la Figura 4.

En la

Tabla 4 podemos ver la valorización en dólares de los metales seleccionados asumiendo una recolección de 46.800 kg de celulares.

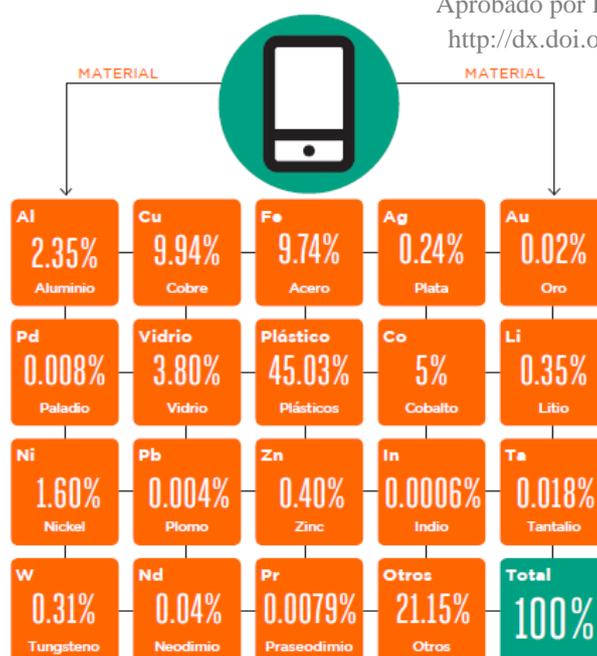


Figura 4. Composición simplificada de un celular en peso (imagen de Magalin et al., 2015)

Se muestran los kg aproximados de cada metal y el costo en dólares (US\$) que puede lograrse de su recuperación. En este ejemplo de campaña de lograría una recuperación de 681.778 US\$

Finalmente, como tercer análisis se hace foco los gases efecto invernadero (GEI). Cuando se habla de gases de efecto invernadero se hace referencia a CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2</sub> eq), que incluye los seis gases de efecto invernadero recogidos en el Protocolo de Kioto: dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido de nitrógeno (N<sub>2</sub>O), hidrofluorocarburos (HFC), perfluorocarburos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>).

El dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) se produce cuando se queman combustibles que contienen carbono. El carbono se combina durante esta operación con el oxígeno aspirado. El CO<sub>2</sub>, a pesar de ser un gas no tóxico, reduce el estrato de la atmósfera de la Tierra que generalmente sirve como protección contra la penetración de los rayos UV (la tierra se calienta), produce alteraciones de clima (efecto “invernadero”).

Tabla 4: Valorización de metales recuperados en una campaña de recolección para Caleta Olivia y Comodoro Rivadavia

Metal	Kg	US\$ x kg <sup>-1</sup>	Total US\$
<b>Cobre</b>	4.650	10,56	49.081
<b>Plata</b>	110	749,11	82.402
<b>Oro</b>	9,36	56818,37	531.745

<sup>1</sup> Cotizaciones realizadas en base a los precios al finalizar la semana del 15/10/2021, según los datos proporcionados por <https://panorama-minero.com/cotizacion-de-metales/>

<b>Níquel</b>	759	19,86	15.074
<b>Aluminio</b>	1099	3,16	3476
<b>Total</b>		<b>681.778</b>	

Una de las actividades que produce GEI es el consumo de combustibles fósiles para equipos o vehículos. Para calcular las emisiones producidas se debe aplicar el factor de emisiones que dependerá del tipo de combustible (gas, diésel, carbón, entre otros) y de la cantidad utilizada. En este trabajo se supone que todo el gasoil quemado por los vehículos de traslado de residuos se convertirá en CO<sub>2</sub>, dado que es el gas que se encuentra en mayor proporción de los nombrados anteriormente.

Tabla 5: Emisiones en Caleta Olivia en gr CO<sub>2</sub>/litro de gasoil

N	VH1		VH2		VH3	
	Experto	ACO	Experto	ACO	Experto	ACO
<b>75</b>	448	<b>224</b>	349	<b>169</b>	275	<b>134</b>
<b>105</b>	631	<b>288</b>	501	<b>228</b>	391	<b>175</b>
<b>150</b>	944	<b>415</b>	737	<b>321</b>	586	<b>252</b>

En base a los resultados obtenidos tanto por los expertos como con ACO hemos calculado las emisiones de CO<sub>2</sub> producidas por cada tipo de vehículo para cada una de las instancias de ambas ciudades. En la Tabla 5 se muestra la emisiones producidas<sup>2</sup> en gramos CO<sub>2</sub>/litros. Se puede observar que para todos los vehículos el recorrido generado por nuestro algoritmo ACO es el que produce menos emisiones. En la Figura 5 se puede ver más claramente la marcada diferencia y la reducción en la emisión de gases que se logra a través de la utilización de ACO para cualquiera de la instancias trabajas y para cualquier tipo de vehículo de los definidos.

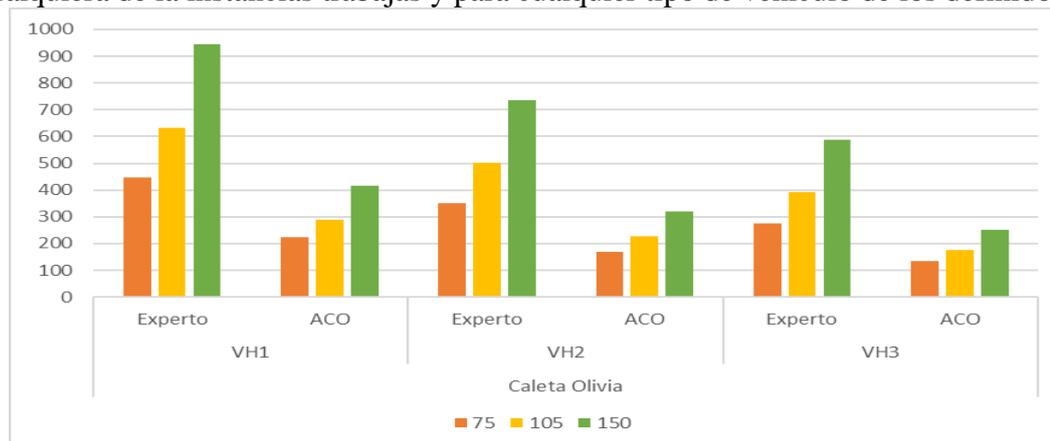


Figura 5. Comparación de emisiones por vehículos para Caleta Olivia

<sup>2</sup> Datos extraídos de <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/calculadora-de-equivalencias-de-gases-de-efecto-invernadero-calculos-y>

Una situación similar se puede observar con los resultados que se muestran en la Tabla 6 para las instancias de Comodoro Rivadavia donde nuevamente aquí las menores emisiones son las que se generan con los recorridos propuestos por ACO. En la

Figura 6 se muestra la comparación de la emisiones de gr CO<sub>2</sub>/litro gasoil y se puede observar aquí también la reducción de emisiones en CO<sub>2</sub>.

Tabla 6: Emisiones en Comodoro Rivadavia en gr CO<sub>2</sub>/litro de gasoil

N	VH1		VH2		VH3	
	Experto	ACO	Experto	ACO	Experto	ACO
75	1150	<b>611</b>	1054	<b>421</b>	667	<b>307</b>
105	1533	<b>786</b>	1457	<b>572</b>	888	<b>395</b>
150	2396	<b>994</b>	2245	<b>682</b>	1423	<b>510</b>
200	3114	<b>1227</b>	2408	<b>881</b>	1889	<b>630</b>

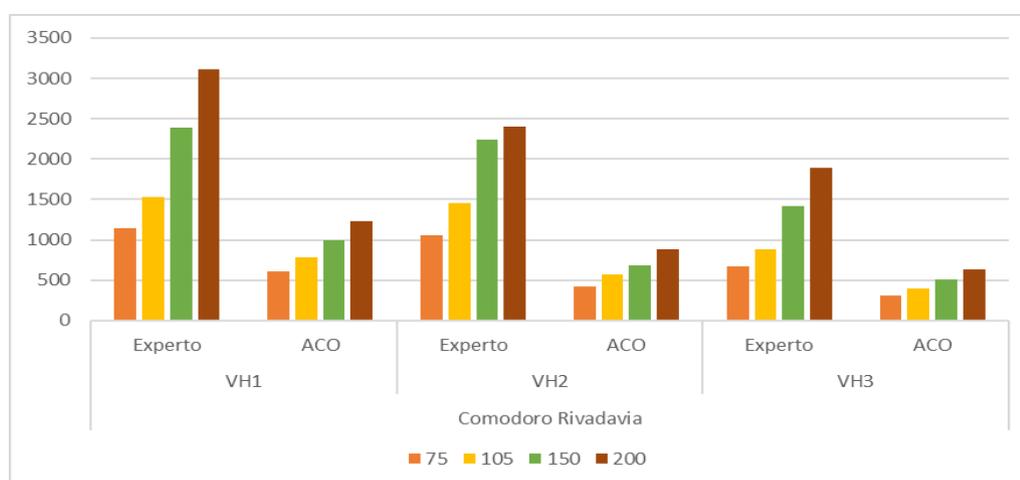


Figura 6. Comparación de emisiones por vehículos para Comodoro Rivadavia

## 5. CONCLUSIONES

El problema de recolección de residuos tecnológicos es un problema derivado del VRP cuyo objetivo principal es la minimización de los *km* recorridos para los distintos escenarios de recolección con locaciones predeterminadas y distintos tipos de vehículos. Se definieron escenarios reales de las ciudades de Caleta Olivia y de Comodoro Rivadavia.

Las metaheurísticas son técnicas algorítmicas cuyo propósito general es ofrecer una estrategia de búsqueda global para explorar un espacio de soluciones. En particular, se ha utilizado la metaheurística basada en el comportamiento exitoso de las colonias de hormigas conocida como ACO. Se realizaron 30 ejecuciones independientes de ACO sobre los escenarios propuestos y ha obtenido la mejor performance para la minimización de las cantidades de kilómetros recorridos respecto a los recorridos propuestos por expertos. Para las instancias analizadas ACO confirma su óptimo desempeño para problemas de VRP.

Se plantea una campaña de recolección de residuos tecnológicos pequeños (celulares) para ambas ciudades y se valoriza la recuperación de algunos metales (cobre, aluminio, plata, oro y níquel) estimando una recuperación de 681.778 U\$. Se analiza y compara la reducción de gases efecto invernadero que logra ACO comparado con los resultados por expertos y podemos observar una reducción de más del 50% en las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Trabajos futuros se centrarán en reducir el número de evaluaciones requeridas por ACO con el objetivo de reducir el esfuerzo computacional en términos de tiempo de procesamiento. Además, se realizará el estudio de diferentes funciones de fitness que involucren en su diseño a los gases efecto invernadero, con el fin de obtener una mayor reducción en las emisiones.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores, agradecen al equipo de trabajo del Laboratorio de Tecnologías Emergentes (LabTEm) del Instituto de Tecnología Aplicada (ITA) y a la Universidad Nacional de la Patagonia Austral (UNPA), por la colaboración y por todo el financiamiento realizado en el desarrollo de este trabajo.

## REFERENCIAS

- ASIH, A. M. S., SOPHA, B. M., & KRIPTANIADDEWA, G. (2017). Comparison study of metaheuristics: Empirical application of delivery problems. *International Journal of Engineering Business Management*, 9, 1847979017743603. <https://doi.org/10.1177/1847979017743603>
- BAXTER, J., LYNNG, K. A., ASKHAM, C., & HANSSEN, O. J. (2016). High-quality collection and disposal of WEEE: Environmental impacts and resultant issues. *Waste management*, 57, 17-26. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.02.005>
- CAO, J., XU, J., WANG, H., ZHANG, X., CHEN, X., ZHAO, Y., ... & SCHNOOR, J. L. (2018). Innovating collection modes for waste electrical and electronic equipment in China. *Sustainability*, 10(5), 1446. <https://doi.org/10.3390/su10051446>
- DANTZIG, G. B., Y RAMSER, J. H. (1959). The truck dispatching problem. *Management science*, 6(1), 80-91. <https://doi.org/10.1287/mnsc.6.1.80>
- DORIGO, M., MANIEZZO, V., & COLORNI, A. (1996). Ant system: optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 26(1), 29-41. <https://doi.org/10.1109/3477.484436>
- GU, F., ZHANG, W., GUO, J., & HALL, P. (2019). Exploring "Internet+ Recycling": Mass balance and life cycle assessment of a waste management system associated with a mobile application. *Science of the total environment*, 649, 172-185.

- <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.298>
- IKHLAYEL, M. (2018). Development of management systems for sustainable municipal solid waste in developing countries: a systematic life cycle thinking approach. *Journal of Cleaner Production*, 180, 571-586. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.057>
- LAPORTE, G., GENDREAU, M., POTVIN, J. Y., & SEMET, F. (2000). Classical and modern heuristics for the vehicle routing problem. *International transactions in operational research*, 7(4- 5), 285-300. <https://doi.org/10.1111/j.1475-3995.2000.tb00200.x>
- LENSTRA, J. K., & KAN, A. R. (1981). Complexity of vehicle routing and scheduling problems. *Networks*, 11(2), 221-227. <https://doi.org/10.1002/net.3230110211>
- LIN, C., CHOY, K. L., HO, G. T., & NG, T. W. (a) (2014). A genetic algorithm-based optimization model for supporting green transportation operations. *Expert systems with applications*, 41(7), 3284-3296. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.11.032>
- LIN, C., CHOY, K. L., HO, G. T., CHUNG, S. H., & LAM, H. Y. (b) (2014). Survey of green vehicle routing problem: past and future trends. *Expert systems with applications*, 41(4), 1118-1138. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.07.107>
- MAGALINI, F., KUEHR, R., & BALDÉ, C. P. (2015). *EWaste en América Latina. Análisis estadístico y recomendaciones de política pública*. United Nations University, Tokyo-Japan, 1-38.
- MENIKPURA, S. N., SANTO, A., & HOTTA, Y. (2014). Assessing the climate co-benefits from Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) recycling in Japan. *Journal of cleaner production*, 74, 183-190. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.040>
- 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*, 63, 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.04.007>
- NOWAKOWSKI, P. (2019). Investigating the reasons for storage of WEEE by residents-a potential for removal from households. *Waste Management*, 87, 192-203. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.02.008>
- OGUCHI, M., SAKANAKURA, H., & TERAZONO, A. (2013). Toxic metals in WEEE: Characterization and substance flow analysis in waste treatment processes. *Science of the total environment*, 463, 1124-1132. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.07.078>
- PÉREZ, D., PANDOLFI, D., & VILLAGRA, A. (2021). Recolección de Residuos Tecnológicos aplicando Metaheurísticas. *Informes Científicos Técnicos-UNPA*, 13(1), 54-76. <https://doi.org/10.22305/ict-unpa.v13.n1.789>
- SALHOFER, S., SCHNEIDER, F., & OBERSTEINER, G. (2007). The ecological relevance of transport in waste disposal systems in Western Europe. *Waste Management*, 27(8), S47-S57. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.02.025>
- WIDMER, R., OSWALD-KRAPF, H., SINHA-KHETRIWAL, D., SCHNELLMANN, M., & BÖNI, H. (2005). Global perspectives on e-waste. *Environmental impact assessment review*, 25(5), 436-458. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2005.04.001>