

COMPARACIÓN DE DISEÑOS DE RUTEO PARA LA RECOLECCIÓN DE ENVASES VACÍOS DE AGROQUÍMICOS EN EL SUDOESTE BONAERENSE

Antonela E. Sorichetti¹, Laura Mammini², Andrea A. Savoretti³ y José A. Bandoni⁴

1. Introducción

El aumento en la demanda de alimentos a nivel mundial ha generado una conducta fuertemente activa en los países productores de cereales, los que se han visto inducidos a buscar nuevos métodos para aumentar la productividad histórica de sus tierras. Esta situación, que ha ocasionado no sólo el aumento en el consumo de algunos agroquímicos utilizados, sino también la incorporación de nuevos y más eficientes productos, no se ha visto acompañada por la adopción de mejores prácticas agrícolas, que permitieran garantizar la sustentabilidad productiva y ambiental de sus recursos naturales, y proteger la salud de la población. Particularmente, la forma adecuada y sustentable del uso de los agroquímicos y de los residuos provenientes de los mismos, se presenta como un importante problema a resolver. En la República Argentina, con algo más de 36 millones de hectáreas cultivadas, se utilizan casi 230 millones de litros de herbicidas y cerca de 350 millones de litros de agroquímicos líquidos. Los envases necesarios para su comercialización generan unas 17.000 tn de PEAD cada año⁵.

De acuerdo a la Ley Nacional 24.051, los envases que almacenaron agroquímicos son residuos peligrosos, entendiéndose como peligroso a “todo residuo que pueda causar daño directa o indirectamente a seres vivos o contaminar el suelo, el agua, la atmósfera o el ambiente en general”, calificándolos en particular como Y4: desechos resultantes de la producción, preparación y utilización de biocidas y productos fitosanitarios. Estos envases contaminados se transforman no solo en un residuo de difícil eliminación, sino también en un elemento de alta peligrosidad pero su material es económicamente valioso y técnicamente reciclable. Argentina adoptó la técnica del triple lavado por la Norma IRAM N° 12.069 basada en una normativa de la EPA de los años setenta. En principio, entonces, el plástico de los bidones podría reutilizarse pero primero debe completar un proceso de descontaminación siguiendo el protocolo de

¹UNS, Centro de Emprendedorismo y Desarrollo Territorial Sostenible (CEDETS) - Universidad Provincial del Sudoeste (UPSO) - Comisión de Investigación Científicas de la Pcia. de Buenos Aires (CIC). antonelasorichetti@gmail.com.

²UNS, Centro de Emprendedorismo y Desarrollo Territorial Sostenible (CEDETS) - Universidad Provincial del Sudoeste (UPSO) - Comisión de Investigación Científicas de la Pcia. de Buenos Aires (CIC). laura.mammini@upso.edu.ar.

³UNS, Centro de Emprendedorismo y Desarrollo Territorial Sostenible (CEDETS) - Universidad Provincial del Sudoeste (UPSO) - Comisión de Investigación Científicas de la Pcia. de Buenos Aires (CIC). savoretti@upso.edu.ar.

⁴PLAPIQUI (UNS-CONICET), Centro de Emprendedorismo y Desarrollo Territorial Sostenible (CEDETS) - Universidad Provincial del Sudoeste (UPSO) - Comisión de Investigación Científicas de la Pcia. de Buenos Aires (CIC). abandoni@plapiqui.edu.ar.

⁵Acciones en gestión de envases de agroquímicos. Unidad de Investigación y Desarrollo Ambiental, Dirección Nacional de Articulación Institucional, Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. 2° Jornadas del Sur Bonaerense. Actualización en Seguridad Agroalimentaria: Agroquímicos y Toxicología.

triple lavado⁶, por parte de los aplicadores, y luego un procesamiento en plantas especializadas (que deben estar habilitadas como procesadores de residuos especiales) que implica el lavado y posterior tratamiento de los efluentes para eliminar los contaminantes. Una problemática aún no resuelta a nivel nacional, además del tipo de procesamiento que permite garantizar la trazabilidad del producto obtenido a partir de este proceso, es cómo llevar a cabo la logística para obtener la materia prima (residuo del acto de utilización de productos agroquímicos), minimizando así la presencia de un residuo contaminante en las áreas rurales y urbanas de la República Argentina.

El sudoeste bonaerense (SOB, Fig.1), que tiene como principal actividad económica la producción agropecuaria, genera permanente estos residuos peligrosos, siendo esta una problemática que sólo se ha tratado de manera aislada y poco eficiente en los distintos municipios.



Fig. 1. Localización del área de estudio (Sudoeste Bonaerense)

En el presente trabajo, se presenta una propuesta de un circuito que se denominará “abierto” para la recolección y acopio de envases vacíos, para su posterior procesamiento, la cual se propone como una alternativa para disponer de un modelo de sistema de gestión que pueda abastecer a una o más plantas de tratamiento de envases (a diseñar en base a tecnologías disponibles y/o a nuevas tecnologías actualmente en período de prueba). Luego, los resultados de dicha propuesta se compararán con los resultados obtenidos en otro trabajo que aborda la misma problemática a través de un diseño de recorrido diferente que se denominará “circuito cerrado”. Los resultados obtenidos podrían utilizarse para diseñar posteriormente una Experiencia Piloto de Gestión Ambiental Participativa de envases de agroquímicos en el SOB.

Los circuitos de recolección se desarrollaron con el software GAMS (General Algebraic Modeling System), que es un sistema de modelado de programación matemática. GAMS usa un lenguaje de modelización, en donde el usuario puede

⁶ Guía para el uso adecuado de plaguicidas y la correcta disposición de sus envases”. Ing. Agr. Fanny Martens, Boletín de divulgación N°41. ISSN 0328-3380. INTA-Agencia de Extensión Rural Tandil.

escribir en un editor la formulación del modelo matemático, y luego aplicar un solver para resolver completamente el modelo, brindando así un claro conocimiento de las condiciones de su modelo y de las consecuencias que tiene sobre él un cambio en el valor de cualquier variable.

2. Revisión bibliográfica

Varios trabajos han sido desarrollados con el fin de optimizar rutas de recolección. Agha S. R. (2006) optimiza el sistema de enrutamiento de Deir El Balah, Franja de Gaza, utilizando un modelo de programación mixta-entera. El modelo minimiza la distancia total recorrida por los vehículos de recolección. Komilis(2008) desarrolló dos modelos de optimización lineal mixto entero para optimizar la operación de recolección y transferencia de residuos sólidos urbanos antes de su traslado al relleno sanitario, para la ciudad de Atenas, Grecia. El modelo se basa en minimizar el tiempo (h/d), mientras que el segundo modelo se basa en minimizar el costo total (€/día). Laporte y Nobert(1981) consideraron el problema de localizar un único depósito entre n puntos. El objetivo es minimizar la suma de los costos operativos de los depósitos y los costos de enrutamiento. La mejor ubicación de depósito se encuentra mediante un algoritmo exacto que determina simultáneamente tanto la mejor ubicación de depósito como las rutas de entrega óptimas asociadas. El modelo se resuelve relajando la mayor parte de sus limitaciones e introduciéndolas sólo cuando son violadas. Vecchiet al. (2014) presentan un modelo de optimización para resolver el problema de la planificación de la recolección y transporte de residuos sólidos en las ciudades medianas. El modelo matemático desarrollado se formula como un problema de programación lineal con variables mixto-enteras y se transcribe en el Software GAMS. Samanlıoglu(2012) propone el desarrollo de un nuevo modelo de ubicación de ruta multiobjetivo implementado en la región de Mármara en Turquía. En el modelo matemático, considera tres criterios: minimizar el costo total, que incluye el costo total de transporte de materiales peligrosos y residuos de desecho y el costo fijo de establecer centros de tratamiento, eliminación y reciclaje; minimizar los riesgos del transporte total relacionado a la exposición de la población a lo largo de las rutas de transporte de materiales peligrosos y residuos de desecho; y minimizar el riesgo total de la población en torno a los centros de tratamiento y eliminación. Rhoma et al.(2009) desarrollan un modelo matemático de logística de RSU (residuos sólidos urbanos), capaz de estimar los costos de recolección y transporte, así como el impacto ambiental de los residuos sólidos municipales, utilizando como caso de estudio una de las ciudades más pobladas de Alemania.

3. Desarrollo

El objetivo es diseñar un recorrido óptimo para que un camión recolecte los envases vacíos ubicados en los centros de acopio transitorios (CAT) de cada distrito. El mismo estará adecuadamente equipado, con capacidad para triturar y almacenar los chips del plástico. Realizada la recolección, los chips se lavarán para luego ser reciclados. Para la ejecución del modelo se eligió que el punto final de todos los

recorridos sea el Partido de Saavedra, siendo la variable a optimizar el punto de partida de cada circuito.

Los datos del problema suministrados al modelo son la cantidad de envases vacíos generados por municipio por año (Tabla 1), la capacidad del camión recolector (9630 envases triturados en promedio) y las distancias entre los distritos. La Tabla 1 se construyó a partir de información primaria y para la estimación de las distancias se utilizó la página web www.ruta0.com, que calcula la distancia por ruta entre dos ciudades, tomándose como referencia la ciudad cabecera del mismo. Los datos que se le proveen al modelo permiten otorgar confiabilidad al resultado, para su posterior implementación en la práctica.

Se implementó un modelo del tipo problema de enrutamiento de vehículos (VRP) de programación lineal con variables enteras, para optimizar el recorrido del vehículo. Cada distrito del SOB representa un punto de recolección (P_i), y en cada punto P_i existe una determinada cantidad de envases vacíos de agroquímicos ($f(i)$) almacenados en un CAT que serán recolectados por el camión. Los datos requeridos para la implementación son: un set de nodos, $N(i) = \{1, 2, \dots, n\}$ donde cada nodo es un distrito del SOB, un parámetro asociado a la cantidad de residuos a recolectar en cada punto de recolección, $f(i)$; un parámetro c que es la capacidad de recolección del camión recolector, una tabla de distancias de orden $n \times n$, $d(i, j)$, que representa la distancia a recorrer desde el nodo i al nodo j y $x(i, j)$ que es una variable binaria que vale 1 si el vehículo transita desde el nodo i al j , 0 en el otro caso. Se considerarán para el modelo solo 21 distritos ya que según la información relevada Monte Hermoso no genera envases de agroquímicos debido a que no posee actividad agropecuaria.

Tabla 1. Demanda de envases en el Sudoeste Bonaerense. (Fuente: elaboración propia)

Distritos del Sudoeste Bonaerense	Cantidad de envases de veinte litros generados por año	Distritos del Sudoeste Bonaerense	Cantidad de envases de veinte litros generados por año
Tres Arroyos (1)	246540	General Lamadrid (12)	67860
Coronel Suárez (2)	176100	Pellegrini (13)	62400
Adolfo Alsina (3)	161160	Tornquist (14)	56880
Coronel Dorrego (4)	145080	Tres Lomas (15)	42960
Guaminí (5)	130500	Villarino (16)	39420
Adolfo GonzalezChavez (6)	114180	Salliqueló (17)	32340
Coronel Pringles (7)	96540	Carmen de Patagones (18)	29430
Daireaux (8)	85200	Laprida (19)	17340
Benito Juárez (9)	84960	Coronel Rosales (20)	13359
Saavedra (10)	82440	Bahia Blanca (21)	11040
Puán (11)	71520	Monte Hermoso (22)	0
		TOTAL	1.767.249

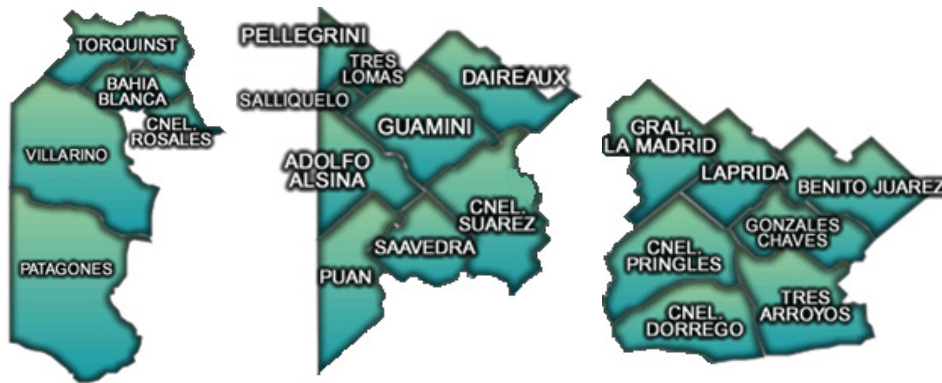


Fig. 2. Zona 1 Fig. 3.Zona 2Fig. 4. Zona 3

Dada la cantidad de envases a recolectar, la capacidad del camión recolector, y la gran extensión territorial del SOB, se optó por dividirlo en 3 zonas a fin de obtener un recorrido por cada división geográfica del SOB (Sur, Noroeste y Noreste), Figs. 2, 3 y 4, y optimizar un recorrido aplicando la formulación matemática a cada una. Así, en lugar de implementar el modelo en los 21 distritos con una alta probabilidad de que se formen subrutas en el recorrido (como indican Vecchi, et. al, 2014), se implementará el modelo en cada zona y cada recorrido óptimo concluirá en el mismo destino.

El camión inicia el recorrido en punto óptimo que se corresponde a algún distrito de cada zona y lo finaliza en el Partido de Saavedra, donde se instalaría el depósito para los chips de plástico y la planta que trate el agua de lavado.

3.1 Modelo matemático

Se utilizará el modelo matemático desarrollado por Dantzig, Fulkerson y Johnson que es capaz de optimizar un recorrido para hasta 49 ciudades. El modelo se compone de una función objetivo representada por la Ec. (1) mediante la cual se desea minimizar la distancia a recorrer por el vehículo.

$$\text{Min} \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{(i,j)} * x_{(i,j)} \right), \quad \forall i \neq j \quad (1)$$

La Ec. (2) es una restricción que considera la capacidad del camión.

$$\sum_{i=1}^n f_{(i)} \leq c \quad (2)$$

La Ec. (3) tiene como objetivo darle continuidad al circuito de recolección.

$$\sum_{i=1}^{n-1} x_{(i,t)} = \sum_{j=2}^n x_{(t,j)}, \quad t = 2, \dots, n-1; i \neq t; j \neq t \quad (3)$$

La Ec. (4) especifica que el distrito de Saavedra será el punto final del recorrido.

$$\sum_{i=1}^n x_{i,(Saavedra)} = 1 \quad (4)$$

La Ec. (5) especifica que del distrito de Saavedra no saldrá el vehículo ya que es el punto final del recorrido.

$$\sum_{j=1}^n x_{(Saavedra),j} = 0 \quad (5)$$

La Ec. (6) asegura que el mismo recorrido de i a j no sea realizado más de una vez por el camión.

$$x_{(i,j)} + x_{(j,i)} \leq 1, \quad i, j = 1, \dots, n \quad (6)$$

La Ec. (7) asegura que el camión salga una vez y solo una de cada nodo i , excepto en el nodo Saavedra que es el punto final del recorrido.

$$\sum_{j=1}^n x_{(i,j)} = 1, \quad i = 1, 2, \dots, n; i \neq j; i \neq Saavedra \quad (7)$$

La Ec. (8) asegura el camión llegue a lo sumo una vez a cada nodo j .

$$\sum_{i=1}^n x_{(i,j)} \leq 1, \quad j = 1, \dots, n; i \neq j \quad (8)$$

El modelo resultante de 88 ecuaciones y 65 variables se resolvió con el solver CPLEX.

Por otra parte, Cavallin et. al, (2017) abordan la misma problemática con un modelo del tipo CapacitatedVehicleRoutingProblem (CVRP), una variante de los problemas de ruteo de vehículos (VRP). El problema que plantean consiste en establecer distintas rutas para la recolección de residuos de productos agroquímicos. Se tiene un conjunto finito K de rutas de recolección, que deben transitar por las distintas localidades identificadas por nodos $i \in D$. Se definen los siguientes parámetros: C es la capacidad máxima del vehículo (se considera una flota homogénea), d_k que es la distancia total recorrida por el vehículo k como puede verse en la Ec. (2), m que es la cantidad de ciudades a visitar excluyendo el depósito, q_i es la cantidad de residuos a recolectar en el nodo i y d_{ij} es la distancia a recorrer desde el nodo i al nodo j . También se definen las siguientes variables: x_{ij}^k es una variable binaria que vale 1 si el vehículo k transita desde el nodo i al j , 0 en el otro caso, Q_k es la cantidad de envases recolectados por el vehículo k como puede verse en la Ec. (1) y u_i es una variable auxiliar continua para la eliminación de subtours.

$$Q_{min} = \min(Q^k) \quad (1)$$

$$d^k = \sum_{i,j \in D} x_{ij}^k \cdot d_{ij} \quad (2)$$

El objetivo a resolver es minimizar la distancia total recorrida en la recolección de los envases por todas las localidades establecidas (Ec.(3)). En las Ec. (4)- (12) se definen las restricciones del modelo.

$$\text{Min} \sum_{i,j \in D} x_{ij}^k \cdot d_{ij} \quad (3)$$

S.t.:

$$Q^k \leq C, \forall k \in K \quad (4)$$

$$\sum_{i \in D} x_{ij}^k = 1, \forall j \neq 0, k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{j \in D} x_{ij}^k = 1, \forall i \neq 0, k \in K \quad (6)$$

$$\sum_{j \in D} x_{0j}^k = 1, \forall k \in K \quad (7)$$

$$\sum_{i \in D} x_{i0}^k = 1, \forall k \in K \quad (8)$$

$$\sum_{i \in D} x_{ij}^k - \sum_{j \in D} x_{ij}^k = 0, \forall k \in K, \forall i, j \neq 0 \in D \quad (9)$$

$$u_i - u_j + m \cdot x_{i,j}^k \leq m - 1 \quad \forall i, j \neq 0 \in D, \forall k \in K \quad (10)$$

La Ec. (4) garantiza que la capacidad del vehículo no sea superada. Las Ec. (5) y (6) garantizan que cada ciudad sea visitada una única vez. Las Ec. (7) y (8) establecen el número de rutas a utilizar. La Ec. (9) refiere a la conservación del flujo en el recorrido mientras que la Ec. (10) impide la formación de subtours. La Ec. (11) establece la naturaleza binaria de las variables. La Ec. (12) indica que la variable u_i debe ser no negativa.

Las diferencias fundamentales entre dicho trabajo y el aquí desarrollado radican en que se plantea obtener cuatro rutas y que el nodo inicial y final de cada ruta es el depósito de partida del vehículo, el Partido de Saavedra. Dicho de otra manera, se obtienen cuatro circuitos cerrados en torno a un mismo nodo.

4. Resultados

De la implementación de los modelos para cada caso se obtuvieron los resultados presentados en las Tablas 4 y 5.

Dado que la capacidad del camión se ha estimado en 9630 envases, en ningún recorrido se llenará completamente, sino que se completará en un 60%, 85% y 77% respectivamente para cada zona. Esto permite disponer de cierto margen para las posibles variaciones estacionales ocasionadas en los distintos meses de preparación del suelo, según el cultivo.

Si se realiza el mismo análisis para los circuitos cerrados se observa también que en ningún recorrido se alcanza la capacidad máxima total, sino que se completará en un 78%, 92%, 73% y 93% respectivamente para las rutas 1, 2, 3 y 4.

La frecuencia de recolección surge de dividir la cantidad de envases a recolectar por zona por semana, por la cantidad de envases que se puede recolectar por

recorrido. En el caso de la zona 1 es de 2887 envases con lo cual el recorrido puede llevarse a cabo cada 15 días. En el caso de la zona dos y tres se generan 16243 y 14856 respectivamente por semana, con lo cual los recorridos deben realizarse dos veces por semana

Si se contabilizan los kilómetros mínimos necesarios para satisfacer la demanda de recolección mensualmente, el circuito abierto necesita recorrer 13.466 km. mientras que el circuito cerrado 10.416 km. En los circuitos abiertos, al añadir el tramo de recorrido desde el Partido de Saavedra a cada partido de origen, los kilómetros a recorrer ascienden a 17.692 km, pero en dicho recorrido se consideraría que los plásticos procesados y lavados retornan a los distritos donde se acopiaron los envases, para su posterior transformación en productos plásticos útiles para la producción agropecuaria. Esta iniciativa generaría múltiples fuentes de trabajo para la población y contribuiría a motivar a los productores del Sudoeste Bonaerense en el reciclaje de envases vacíos de agroquímicos.

Tabla 4. Resultados del modelo a circuito abierto

Ruta	Partidos	Recorrido (km.)	Envases recolectados	Frecuencia de recolección
1	(18) – (20) – (14) – (21) – (16) – (10)	665	5774	Quincenal
2	(8) – (3) – (11) – (2) – (5) – (15) – (13) – (17) – (10)	784	8120	Dos veces por semana
3	(6) – (9) – (19) – (12) – (7) – (4) – (1) – (10)	733	7428	

Tabla 5. Resultados del modelo a circuito cerrado

Ruta	Partidos	Recorrido (km.)	Envases recolectados	Frecuencia de recolección
1	(14) – (21) – (16) – (18) – (20) – (4) – (7)	1024	7534	Semanal
2	(1) – (6) – (9) – (19)	595	8904	
3	(5) – (3) – (11)	223	6984	
4	(2) – (12) – (8) – (13) – (17) – (15)	762	8978	

5. Conclusiones

Para el problema de ruteo de recolección de envases con residuos de agroquímicos del SOB, se han obtenido circuitos continuos para cada recorrido donde cada uno inicia en un distrito elegido por el modelo y finaliza en el distrito de Saavedra. A su vez, se minimiza la distancia recorrida y se cumple con la demanda de envases en cada distrito. En principio, se diseñó la división zonal para minimizar la distancia a recorrer por la cercanía entre los distritos que conforman una ruta de recolección. Sin embargo, se obtiene una menor distancia total aumentando el número de rutas y sin especificar los distritos que deben componer cada ruta.

Es necesario destacar que ambos modelos, son propuestas para una solución del problema centrada en la minimización de la distancia a recorrer. En trabajos futuros, deben tenerse en cuenta el efecto de otros factores intervinientes, como pueden ser los tiempos de realización de recorridos en base a la velocidad del vehículo, los requisitos de tiempos de la jornada de trabajo establecidos en los convenios laborales, la posibilidad de aumentar la cantidad de vehículos y/o el número de rutas. Además,

en ambos trabajos se tomó la decisión de elegir como nodo final de los recorridos al partido de Saavedra, por resultar un centro de la región con buena comunicación vial. Se prevé a futuro realizar el mismo análisis incluyendo algún otro nodo central, dentro de los principales distritos generadores de envases vacíos de agroquímicos. Esto permitirá comparar las distancias mínimas entre varios partidos y disponer de un elemento de análisis adicional a la hora de determinar el lugar más apropiado donde se podría instalar el/los depósito/s para los envases triturados y la planta de efluentes y reciclado.

Referencias

- Agha, S. R. (2006). Optimizing Routing of Municipal Solid Waste Collection Vehicles in Deir El-Balah-Gaza Strip. *The Islamic University Journal*, 75-89.
- Cavallin et al., (2017) Logística inversa de residuos agroquímicos en Argentina: resolución heurística y exacta.
- Komilis, D. (2008). Conceptual modeling to optimize the haul and transfer of municipal solid waste. *Waste Management* 28, 2355-2365.
- Laporte, G., y Nobert, Y. (1981). An exact algorithm for minimizing routing and operating costs in depot location. *European Journal of Operational Research*, Vol. 6, Issue 2, 224-226.
- Rhoma et al., (2009). Environmental & Economical Optimization for Municipal Solid Waste Collection Problems, A Modeling and Algorithmic Approach Case Study. ISBN: 978-960-474-188-5.
- Samanlioglu (2012). A multi-objective mathematical model for the industrial hazardous waste location-routing problem. *European Journal of Operational Research*, vol. 226, no. 2, pp. 332-340, 2013.
- Vecchi, et al.; (2014). Optimization of Planning Routes in Solid Waste Collection. *David Publishing Vol. 8*, 596-601.