

Gestión Óptima de Inventarios de Envases Vacíos de Fitosanitarios en Centros de Acopio Transitorio del Sudoeste Bonaerense

M. González Prieto^{1,2}[0000-0002-9123-5301], J. O. Gordillo Taglio¹[0009-0003-5214-3521], A. E. Sorichetti^{1,2}[0000-0002-2650-2207], A. M. Blanco³[0000-0003-2190-8619], A. A. Savoretti^{1,2}[0000-0001-5098-8641] y M. S. Moreno³[0000-0001-5744-5586]

¹ Departamento de Ingeniería Química, Universidad Nacional del Sur (UNS)

² Centro de Emprendedorismo y Desarrollo Territorial Sostenible -CEDETS (UPSO-CIC)

³ Planta Piloto de Ingeniería Química-PLAPIQUI (UNS - CONICET)

Bahía Blanca, 8000, Argentina

mariana.prieto@upso.edu.ar

Resumen. En este trabajo se proponen modelos de programación mixta entera lineal (MILP) para la gestión de inventarios de Envases Vacíos de Fitosanitarios (EVFs) en los Centros de Acopio Transitorio (CATs) instalados en el Sudoeste Bonaerense (SOB). Las formulaciones integran además decisiones de transporte hacia las Plantas de Reciclado de Plástico, definiendo circuitos de vaciado de los CATs en un horizonte de planificación multiperíodo. Dado que para estas operaciones se utiliza una flota heterogénea de vehículos que generan emisiones significativas, se consideran dos formulaciones: una orientada a minimizar los costos de transporte y otra enfocada en reducir las emisiones de CO₂. En ambos casos se evalúan dos restricciones de recolección: una que exige una carga mínima del vehículo al finalizar el circuito y otra que incorpora además una meta mínima de recolección total del sistema. En base a un perfil conocido de ingreso de EVFs, los modelos MILP propuestos permiten identificar alternativas logísticas que optimizan su retiro desde los CATs, definiendo circuitos y frecuencias de vaciado eficientes para el manejo óptimo de sus inventarios. Asimismo, seleccionan el tipo de vehículo a utilizar en cada circuito, entre los disponibles en la flota, con el fin de reducir tanto el costo como el impacto ambiental del proceso. Esta herramienta permite diseñar estrategias de gestión que minimicen costos y fomenten la recuperación de los EVFs dentro del circuito productivo, promoviendo así la transición hacia una economía circular en el sector agroindustrial del SOB.

Palabras clave: Gestión de Inventarios, Envases Vacíos de Fitosanitarios, Modelo MILP.

Inventory Routing Optimization for Empty Pesticide Container Collection in the Southwest of Buenos Aires Province

Abstract. This work proposes mixed-integer linear programming (MILP) models for the inventory management of Empty Pesticide Containers (EPCs) stored in Temporary Collection Centers (TCCs) located in the Southwest of Buenos Aires Province (SOB). The formulations also integrate routing decisions to Plastic Recycling Plants, determining collection routes for the TCCs over a multi-period planning horizon. Since these operations rely on a heterogeneous fleet of vehicles that produce significant emissions, two alternative formulations are considered: one aimed at minimizing transportation costs and the other focused on reducing CO₂ emissions. In both cases, two collection constraints are evaluated: one requiring a minimum vehicle load at the end of each route, and another that also imposes a minimum total collection target for the system. Based on a known EPCs input profile, the proposed MILP models identify logistics alternatives that optimize container removal from the TCCs, defining efficient collection routes and frequencies for optimal inventory management. Additionally, the models select the most suitable vehicle type for each route from the available fleet, in order to reduce both costs and environmental impact. This tool enables the design of management strategies that minimize costs and extend the lifecycle of EPC material within the production system, thus supporting the transition toward a circular economy in the SOB agro-industrial sector.

Keywords: Inventory Management, Empty Pesticide Containers, MILP Model.

1 Introducción

Debido a la importante actividad agropecuaria y agroindustrial de los municipios del Sudoeste Bonaerense (SOB) y al uso intensivo de fitosanitarios, los envases vacíos de estos productos constituyen un problema ambiental significativo en la región. Su gestión enfrenta desafíos económicos, ambientales y sociales, principalmente vinculados a la logística de recolección, agravados por las grandes distancias entre los generadores y los centros de acopio y procesamiento. En Argentina, los Envases Vacíos de Fitosanitarios (EVFs) son considerados residuos peligrosos debido a los riesgos que implican para la salud de las personas que los manipulan y para el medioambiente. Al mismo tiempo, el Polietileno de Alta Densidad (PEAD) utilizado en su fabricación es un material valioso y completamente reciclable.

Desde 2016, la legislación argentina establece la responsabilidad extendida y compartida del productor para los EVFs y los lineamientos básicos para su gestión. El SOB cuenta con una red de recolección y acopio de EVFs para su posterior reciclado. El abordaje de esta problemática engloba aspectos tales como la estimación de la tasa de generación de envases, el análisis de las actitudes de los actores de la cadena de manejo

de envases, la selección de tecnologías de procesamiento del plástico, la localización óptima de unidades de almacenamiento y tratamiento, y el ruteo de vehículos de transporte.

En la literatura, algunos autores (Garbounis & Komilis, 2021; Marnasidis et al., 2018) han estimado la cantidad de envases generados mediante el uso de encuestas o mapeos de los residuos plásticos provenientes de la agricultura, principalmente cubiertas de invernaderos. Estos estudios combinan Sistemas de Información Geográfica (SIG), imágenes satelitales y encuestas (Afxentiou et al., 2021; Parlato et al., 2020). Otros autores, utilizan los planteos técnicos y la superficie sembrada por cultivo para realizar las estimaciones (González Prieto et al., 2023).

Además, existen publicaciones que analizan las prácticas de manejo que realizan los productores (Contreras Castañeda et al., 2013; Patarasiriwong et al., 2012) así como estudios sobre su predisposición a adoptar herramientas o mecanismos financieros para mejorar los sistemas de gestión (Pazienza & De Lucia, 2020).

Otras contribuciones describen la implementación de sistemas de gestión de EVFs en países como Brasil, Colombia y Grecia, destacando los desafíos, beneficios y parámetros clave (Oliveira Leitão & Cardoso de Almeida, 2019; Silva & Contreras, 2015; Briassoulis et al., 2014).

Por otro lado, el problema de diseño de la red de recolección de EVFs ha sido abordado más recientemente. Algunos autores aplican la dinámica de sistemas (Braga Marsola et al., 2021) o la hipótesis dinámica (Lagarda-Leyva et al., 2019) para encontrar relaciones causales entre las variables de los modelos matemáticos que describen estos sistemas complejos y proponer estrategias para diseñar la red de recolección o mejorar la logística inversa. Sorichetti et al. (2024), Yossen & Henning (2021) y Rentizelas et al. (2018) aplican herramientas de programación matemática desarrollando modelos de tipo mixto-entero lineal (MILP) multiperíodo que involucran decisiones de localización de instalaciones/cobertura y selección de tecnología de reciclaje. En cuanto a los aspectos operativos, Sorichetti et al. (2024) desarrollan un modelo MILP orientado al diseño y operación de los recorridos correspondientes a las campañas de recolección itinerante de EVFs en la provincia de Buenos Aires. El modelo permite optimizar la cantidad y distribución de campañas necesarias, minimizando los costos asociados al transporte.

No se ha encontrado en la literatura, hasta la fecha, enfoques que aborden el modelado o la toma de decisión en torno a aspectos táctico-operativos que combinen decisiones de inventario y ruteo de forma simultánea para la recolección de EVFs. Entre las decisiones logísticas más críticas e importantes a nivel operativo se encuentran la gestión de inventarios, la planificación de las rutas de los vehículos de transporte de EVFs y la programación de retiros/vaciados en los CATs. Una gestión eficiente de las rutas de los vehículos de transporte de EVFs puede suponer un ahorro significativo tanto en términos de costo económico como de emisiones de gases de efecto de invernadero (GEI) (Alkaabneh et al., 2020).

En particular, en lo que respecta a la gestión de inventarios dentro de redes de logística inversa aplicadas a residuos, las contribuciones en la literatura son escasas. En la revisión realizada por Goulart Coelho et al. (2017) sobre herramientas de apoyo a la toma de decisiones en la gestión de residuos, los autores destacan que solo el 2% de los trabajos relevados abordan específicamente problemas vinculados al transporte y el

ruteo en procesos de recolección. La mayoría de los estudios que analizan el diseño de redes logísticas para la recolección de residuos se enfocan principalmente en residuos sólidos urbanos. En menor medida, se han explorado residuos del sistema de salud y residuos peligrosos, como señalan Li et al. (2025). En el caso particular de los residuos médicos infecciosos, pueden destacarse los trabajos de Nolz et al. (2014a, b), quienes incorporan elementos estocásticos vinculados a la variabilidad en la generación de residuos y el uso de tecnologías de trazabilidad como la identificación por radiofrecuencia (RFID). Su modelo permite identificar políticas óptimas de recolección que minimizan los costos operativos y, al mismo tiempo, reducen los riesgos asociados al almacenamiento prolongado de residuos infecciosos. Por su parte, Rahbari et al. (2022) proponen un modelo multiobjetivo de localización, inventario y ruteo basado en riesgo para materiales peligrosos e incluyen una función objetivo que minimiza las emisiones de CO₂ generadas por el transporte. Por último, también pueden destacarse los trabajos de Aksen et al. (2012) y Cárdenas-Barrón & Melo (2021) quienes proponen formulaciones MILP para integrar modelos de inventario y ruteo aplicados a sistemas de logística inversa para la recolección de aceites vegetales usados, orientados a su reutilización en la producción de biodiesel. Ambos enfoques abordan el problema desde una perspectiva selectiva y periódica, buscando minimizar los costos operativos de la red de recolección bajo distintas restricciones relacionadas con la política de vaciado en los nodos de recolección. Según nuestra revisión, el único trabajo identificado que aborda explícitamente residuos de origen agroindustrial es el de Tran et al. (2024) donde se propone un modelo combinado de localización, asignación y ruteo aplicado a la recolección de residuos orgánicos destinados a la producción de biofertilizantes. No obstante, se trata de un caso de estudio de escala reducida y sin consideración explícita de las emisiones de CO₂ generadas durante la recolección.

En síntesis, son escasos los trabajos que abordan la gestión de inventarios de residuos peligrosos como los EVFs en regiones rurales, caracterizadas por baja densidad poblacional y grandes distancias entre generadores y centros de acopio. Estas condiciones plantean desafíos logísticos particulares, donde los modelos integrados de inventario y ruteo pueden convertirse en herramientas clave para el diseño de políticas públicas sostenibles y adaptadas al territorio. En este trabajo se proponen modelos MILP para gestionar los inventarios de EVFs en los CATs del SOB, integrando además las decisiones de transporte hacia las Plantas de Reciclado de Plástico (PRPs) mediante el diseño de circuitos de vaciado en un horizonte multiperíodo. Dado que estas operaciones generan emisiones significativas por el uso de vehículos a combustibles fósiles, se consideran dos formulaciones alternativas: una orientada a minimizar los costos de transporte y otra enfocada en reducir las emisiones de CO₂. En ambos casos se evalúan dos escenarios: uno que contempla únicamente la capacidad de los vehículos, y otro que incorpora además una meta mínima de recolección total del sistema.

2 Descripción del problema

La Fig. 1 muestra un esquema de la red de logística inversa de EVFs estudiada en este trabajo. La red está compuesta por un conjunto $NC = \{1, \dots, |NC|\}$ de CATs y un

conjunto $NP = \{1, \dots, |NP|\}$ de plantas de reciclado de plástico, cuya unión $(NC \cup NP)$ forma el conjunto $N = \{1, \dots, |N|\}$ de nodos de la red. Esta puede verse como un grafo dirigido en el que todo par de nodos (i, j) está unido por un arco con una distancia asociada conocida dc_{ij} . Durante cada período $t \in \{1, \dots, |T|\}$ del horizonte de planificación HT , cada CAT i recibe un número conocido de EVFs reciclables de distintos tamaños $m \in \{1, \dots, |M|\}$. A su vez, en cada período t , es posible realizar trasladados de estos envases a las PRPs mediante una flota heterogénea de vehículos de recolección $h \in \{1, \dots, |H|\}$ de diferentes capacidades.

Se asume que cada tipo de vehículo h parte de una PRP j , visita uno o más CATs y entrega los EVFs a alguna de las plantas del sistema, definiendo así un circuito de recolección. Al finalizar dicho circuito, el vehículo h debe retornar a una planta j cumpliendo con un mínimo porcentaje de carga respecto de su capacidad máxima. Además, se analiza una restricción normativa que impone un porcentaje mínimo de recolección sobre el volumen total de envases ingresados al sistema. Cada CAT i puede ser visitado como máximo una vez por período y, en caso de serlo, el vehículo h debe recolectar un porcentaje mínimo de su capacidad total de carga.

Conociendo la capacidad de almacenamiento de cada nodo, las distancias entre ellos, las capacidades de carga de los vehículos y las restricciones de recolección, y mediante funciones objetivo alternativas, orientadas a minimizar los costos de transporte y las emisiones de CO₂, los modelos propuestos permiten identificar estrategias logísticas óptimas para el vaciado eficiente de los CATs. Estas estrategias incluyen la definición de rutas y frecuencias de recolección, selección del vehículo a utilizar en cada circuito, y el monitoreo del nivel de inventario en cada CAT del sistema.

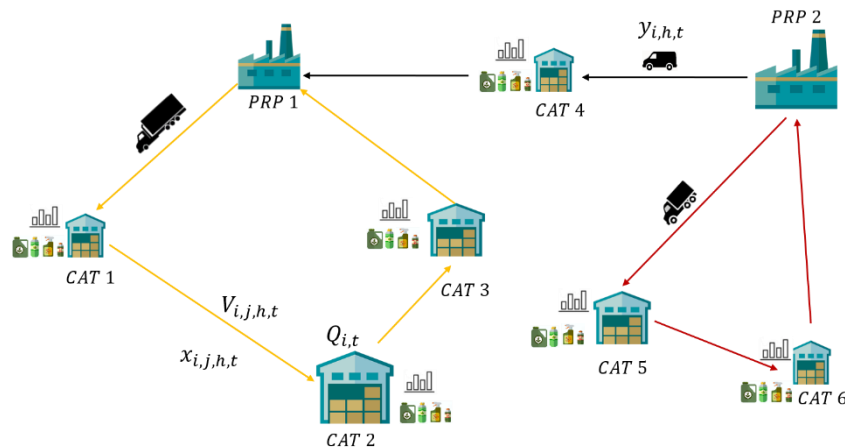


Fig. 1. Esquema de la red de logística inversa de EVFs tomada como referencia en este trabajo.

3 Formulación matemática

Las cuatro formulaciones propuestas en este trabajo para abordar el problema de gestión de inventarios de EVFs corresponden a modelos MILP. A continuación, se detallan las variables utilizadas.

Variables de decisión

| | |
|------------|---|
| y_{iht} | 1 si el vehículo h realiza un circuito saliendo de la planta i en el periodo t |
| x_{ijht} | 1 si el vehículo h visita el nodo j inmediatamente después del nodo i en el periodo t |
| D_{ht} | distancia total recorrida por el vehículo h en el periodo t |
| I_{mit} | inventario de envases m en el CAT i en el periodo t |
| IV_{mit} | volumen total de envases m en inventario en el CAT i en el periodo t |
| Q_{it} | volumen total de EVFs que se retiran del CAT i en el periodo t |
| S_{mit} | número de envases m que salen del CAT i en el periodo t |
| SV_{mit} | volumen total de envases m que salen del CAT i en el periodo t |
| V_{ijht} | volumen de EVFs transportados entre los nodos (i, j) por el vehículo h en el periodo t |
| TRC | costo total de transporte |
| EMT | emisiones totales de GEI |

3.1 Funciones objetivo

$$TRC = \sum_{t \in T} \sum_{h \in H} \left(\sum_{i \in NP} y_{iht} \cdot cav_h + D_{ht} \cdot coc_h \cdot ccd \right) \quad (1)$$

$$EMT = \sum_{t \in T} \sum_{h \in H} D_{ht} \cdot fe_h \quad (2)$$

Como se mencionó, se examinan dos funciones objetivo en este trabajo. La primera se presenta en la Ec. (1) y representa un criterio económico que minimiza los costos asociados al transporte de los EVFs (TRC) a lo largo del horizonte de planificación. El primer término representa los costos fijos por el alquiler de los vehículos requeridos para realizar cada circuito, donde cav_h representa el costo de alquiler en USD de cada tipo de vehículo. El segundo término contempla los costos variables asociados a la distancia recorrida por cada vehículo, donde los parámetros ccd y coc_h representan el costo en USD por L de combustible (diésel) y el consumo de combustible de cada vehículo en L por km, respectivamente. Por otro lado, la Ec. (2) calcula las emisiones de GEI totales generadas por el transporte de los EVFs al multiplicar la distancia recorrida en cada periodo D_{ht} por el factor de emisión específico para cada tipo de vehículo fe_h .

Los parámetros fe_h y coc_h se obtuvieron a partir del modelo *COmputer Programme to calculate Emissions from Road Transport* (COPERT) desarrollado por la Agencia Europea de Medio Ambiente. Se emplea este modelo debido a que presenta un adecuado equilibrio entre calidad de las estimaciones y cantidad de parámetros requeridos. Además, en el trabajo de Demir et al. (2011) presentó un muy buen desempeño para modelar datos experimentales, principalmente para vehículos pesados.

3.2 Ecuaciones vinculadas al inventario en los CATs:

$$I_{mit} = I_{mit-1} + E_{mit} - S_{mit} \quad \forall m \in M, i \in NC, t \in T \quad (3)$$

$$IV_{mit} = I_{mit} \cdot vol_m \quad \forall m \in M, i \in NC, t \in T \quad (4)$$

$$\sum_{m \in M} IV_{mit} \leq CVmax_i \quad \forall i \in NC, t \in T \quad (5)$$

$$SV_{mit} = S_{mit} \cdot vol_m \quad \forall m \in M, i \in NC, t \in T \quad (6)$$

$$\sum_{m \in M} SV_{mit} = Q_{it} \quad \forall i \in NC, t \in T \quad (7)$$

Como se observa en la Ec. (3) el número de EVFs m almacenado en cada CAT i al final del periodo t (I_{mit}) depende del inventario que queda del periodo previo, la cantidad de envases que ingresan (E_{mit}) y los que salen (S_{mit}) en el periodo. Se asume conocida la cantidad de inventario de cada envase m al inicio del horizonte de planificación (I_{mi0}). La Ec. (4) expresa la cantidad de EVFs almacenada en el CAT en unidades de volumen al multiplicar por el volumen de cada tipo de envase en L (vol_m) y la Ec. (5) establece que el volumen total almacenado en cada periodo t no exceda la capacidad máxima de almacenamiento disponible en el CAT ($CVmax_i$). Por otro lado, la Ec. (6) calcula el volumen total de cada tipo de envase m que se retira del CAT en cada periodo t (SV_{mit}). Finalmente, la Ec. (7) calcula el volumen total retirado del CAT i en el circuito que lo visita en el periodo t (Q_{it}).

3.3 Ecuaciones vinculadas al ruteo en los CATs:

$$\sum_{\substack{j \in N \\ j \neq i}} \sum_{h \in H} x_{ijht} \leq 1 \quad \forall i \in N, t \in T \quad (8)$$

$$\sum_{\substack{i \in N \\ i \neq j}} \sum_{h \in H} x_{ijht} - \sum_{\substack{i \in N \\ i \neq j}} \sum_{h \in H} x_{jih t} = 0 \quad \forall j \in N, h \in H, t \in T \quad (9)$$

$$\sum_{\substack{j \in N \\ j \neq i}} \sum_{h \in H} V_{jih t} + Q_{it} = \sum_{\substack{j \in N, h \in H \\ i \neq j}} V_{ijht} \quad \forall i \in NC, t \in T \quad (10)$$

$$x_{ijht} + x_{jih t} \leq 1 \quad \forall (i, j) \in NC, i \neq j, h \in H, t \in T \quad (11)$$

$$y_{iht} = \sum_{j \in NC} x_{ijht} \quad \forall i \in NP, h \in H, t \in T \quad (12)$$

$$Q_{it} = 0 \quad \forall i \in NP, t \in T \quad (13)$$

$$V_{ijht} = 0 \quad \forall i \in NP, j \in NC, h \in H, t \in T \quad (14)$$

La Ec. (8) garantiza que solo un vehículo h puede visitar cada nodo j por período. La Ec. (9) asegura la continuidad del recorrido, es decir, si un vehículo h ingresa a un nodo en el período t , también debe salir de él en el mismo período. La Ec. (10) define el balance de flujo para cada CAT i , indicando que el volumen total de residuos que sale del nodo es igual al volumen que ingresa, más el volumen Q_{it} que se retira del CAT i en el período t . La Ec. (11) impide la formación de un circuito cerrado entre dos CATs, mientras que la Ec. (12) establece el inicio de un circuito de recolección si el vehículo h que parte de la PRP i visita algún CAT j en el periodo t . Finalmente, las ecuaciones (13) y (14) prohíben que se retiren EVFs de las PRPs y que exista un volumen de EVFs de salida desde ellas, respectivamente.

3.4 Restricciones vinculas a los vehículos:

$$V_{ijht} \leq Qup_h \cdot x_{ijht} \quad \forall (i, j) \in N, i \neq j, h \in H, t \in T \quad (15)$$

$$V_{ijht} \geq Qlo_h \cdot x_{ijht} \quad \forall i \in NC, j \in NP, h \in H, t \in T \quad (16)$$

$$Q_{it} \geq Qmin_h \cdot x_{ijht} \quad \forall (i, j) \in N, i \neq j, h \in H, t \in T \quad (17)$$

$$D_{ht} = \sum_{\substack{(i,j) \in N \\ i \neq j}} x_{ijht} \cdot dc_{ij} \quad \forall h \in H, t \in T \quad (18)$$

Las Ecs. (15) y (16) restringen el volumen de carga transportado por cada vehículo h entre los nodos (i, j) en cada periodo, V_{ijht} . La Ec. (15) asegura que este volumen no supere la capacidad máxima del vehículo Qup_h si el mismo recorre el tramo entre los nodos (i, j) en el periodo t . Por su parte, la Ec. (16) establece un límite inferior sobre la carga transportada al finalizar el circuito, que se expresa como un porcentaje de la capacidad máxima del vehículo, representado por el parámetro Qlo_h , en caso de que el vehículo realice el recorrido. La Ec. (17) asegura que, si un vehículo h visita un CAT i , el volumen de envases que retira debe ser superior a un valor mínimo $Qmin_h$ expresado como porcentaje de su capacidad máxima de carga. Finalmente, la Ec. (18) calcula la distancia recorrida por cada vehículo h en cada periodo, D_{ht} , considerando la suma de las distancias dc_{ij} (en km) de todos los tramos recorridos en ese periodo.

3.5 Ecuaciones vinculadas a la recuperación de EVFs en las PRPs:

$$\sum_{\substack{j \in N \\ i \neq j}} \sum_{h \in H} V_{ijht} \leq CPmax_i \quad \forall i \in NP, t \in T \quad (19)$$

$$\sum_{i \in NC} \sum_{j \in NP} \sum_{h \in H} \sum_{t \in T} V_{ijht} \geq \sum_{i \in NC} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} E_{mit} \cdot vol_m \cdot pr \quad (20)$$

La Ec. (19) asegura que el volumen total de EVFs que llega a cada PRP i en el periodo t , a través de los vehículos h , no supere su capacidad máxima de recepción $CPmax_i$. Por su parte, la Ec. (20) establece que un porcentaje mínimo del volumen total de EVFs que ingresan al sistema a lo largo del horizonte de planificación debe ser efectivamente transportado a las PRPs. Esta restricción permite modelar y evaluar el impacto de metas de recupero impuestas vía regulaciones sobre el desempeño del sistema, en términos tanto operativos como ambientales.

Para evaluar la necesidad de un planteo multiobjetivo al emplear una flota heterogénea de vehículos, este trabajo analiza dos grupos de formulaciones. El primer grupo busca minimizar los costos de transporte mientras que el segundo se enfoca en reducir las emisiones de CO₂. En ambos casos, se consideran dos restricciones de recolección: (i) cumplir únicamente con el requerimiento mínimo de retorno de los camiones al final de cada circuito y (ii) combinarlo con la regulación que exige un porcentaje mínimo de recolección en el sistema. Estas combinaciones dan lugar a las siguientes formulaciones MILP: M1 y M2, que minimizan respectivamente TRC y EMT , sujetas a las restricciones (3) – (19), y M3 y M4, que incorporan la restricción (20) a los modelos M1 y M2.

4 Aplicación de las formulaciones al SOB

El caso de estudio se centra en el SOB, que abarca los municipios de la sexta sección electoral de la provincia de Buenos Aires. Prácticamente, todos estos municipios desarrollan actividades agropecuarias y agroindustriales, siendo la producción agropecuaria la principal actividad en la mayoría de ellos. Actualmente, existen $|NC| = 11$ CATs de diferente capacidad instalados en el SOB, aunque no se encuentran plantas de reciclado de plástico en operación. Para aplicar el modelo, se consideraron dos de las tres plantas existentes en la provincia ($|NP| = 2$), ubicadas en Lanús y Lincoln. Se supone que todos los CATs se encuentran vacíos al inicio del horizonte de planeamiento ($l_{mio} = 0$). Los EVFs reciclables corresponden a envases de PEAD de 20, 10, 5, 4, 3 y 1 L y su perfil de generación e ingreso a los CATs varía con el tiempo. El perfil de entrada de EVFs considerado en este caso de estudio se construyó a partir de datos reales proporcionados por una entidad vinculada a la gestión de estos residuos de nuestro país. En cuanto a la flota de vehículos, se consideraron tres tipos: clase 8b (semirremolque), clase 5 (camión furgón) y clase 2 (pickup o van) cuyas Qup_h son $h1=110.000$, $h2=42.000$ y $h3=12.000$ L, respectivamente. Los costos cav_h y fe_h para cada uno de estos vehículos son 4.170, 1.143 y 270 USD y 0,632, 0,453 y 0,16 kgCO_{2eq}/km. Se establece un $Qmin_h$ de un 15% de la Qup_h y un requerimiento mínimo de retorno a las plantas igual a un 85% de la Qup_h . Se impone un recupero mínimo global del 80% en todo el sistema ($pr = 0,8$) para evaluar las formulaciones M3 y M4. El horizonte de planeamiento es de 3 meses discretizado en 12 periodos semanales.

La formulación se implementó en el software GAMS 35.2.0 empleando el código CPLEX 20.1.0.1 para su resolución y se ejecutó en una PC Intel(R) Core (TM) i7-12700H, 2.3 GHz, 32 GB RAM. M3 y M4 involucran 19.120 ecuaciones, 16.201

variables continuas y 8.460 binarias. Se registraron las soluciones obtenidas luego de 1h de resolución.

4.1 Análisis de resultados

Los resultados de los criterios evaluados en las formulaciones estudiadas junto al GAP alcanzado se muestran en la Tabla 1. Como se observa, las funciones objetivo de minimizar costos y minimizar emisiones resultan contrapuestas. La diferencia entre las soluciones obtenidas bajo cada criterio es menor en el caso del modelo donde se impone la restricción de recuperar al menos el 80 % de los envases que ingresan al sistema (modelos M3 y M4). Esto es consistente con lo esperado, ya que, al aumentar el nivel de recuperación exigido, se reduce el espacio de soluciones factibles y se restringe la flexibilidad del modelo para optimizar cada objetivo por separado. También es interesante destacar que, en los modelos M1 y M2 la recuperación global del sistema se aproxima al 60%.

Los modelos M1 y M3 orientados a minimizar los costos de transporte tienden a utilizar una mayor diversidad de vehículos, mientras que en los que se minimizan las emisiones (M2 y M4), predomina el uso del vehículo de mayor tamaño (Fig. 2). Sin embargo, cuando se minimizan costos junto a la restricción global de recuperación (modelo M3), se observa un mayor porcentaje de utilización del vehículo de mayor capacidad (h1). Esto se debe a que, al aumentar la cantidad de envases a transportar, resulta más conveniente – incluso desde el punto de vista económico – emplear vehículos de mayor porte, que permiten reducir la cantidad de viajes necesarios y, por lo tanto, optimizar los costos logísticos (Fig. 2).

Independientemente de las restricciones impuestas al transporte, en los modelos orientados a minimizar las emisiones (M2 y M4), se observa una disminución en la cantidad de circuitos realizados (ver Fig. 3). Esto se debe a que se prioriza acortar la distancia total recorrida, y para lograrlo, se seleccionan vehículos de mayor capacidad. Como resultado, se retira un mayor volumen de envases en cada recolección, lo que lleva a visitar menos CATs por circuito y concentrar las operaciones logísticas. Este efecto es más marcado en el modelo M2, que no incluye la restricción de recuperación total del sistema. El volumen retirado en los CAT visitados por periodo para dicho escenario puede observarse en la Fig. 3, donde cada CAT se representa con un color distinto.

Tabla 1. Resultados de la implementación de cada modelo MILP al caso del SOB.

| Modelo | TRC [USD] | EMT [kg CO ₂ eq.] | pr [%] | GAP |
|-----------------------|--------------|---------------------------------|-----------|-------|
| M1 (<i>min TRC</i>) | 57.793 | 9.181 | 58* | 0,011 |
| M2 (<i>min EMT</i>) | 65.202 | 6.971 | 59* | 0,060 |
| M3 (<i>min TRC</i>) | 84.416 | 9.883 | 80 | 0,003 |
| M4 (<i>min EMT</i>) | 86.555 | 9.233 | 80 | 0,023 |

* valor calculado

En general, en todos los escenarios analizados, los EVFs se distribuyen hacia las dos plantas recicladoras en proporciones relativamente similares. La mayor diferencia observada se presenta en el modelo M4 que minimiza las emisiones con la restricción

global de recuperación del sistema, donde la asignación difiere en aproximadamente un 20 % entre ambas plantas. Este desbalance podría explicarse por la necesidad de reducir distancias recorridas y concentrar los envíos, priorizando la planta mejor ubicada respecto de los CATs con mayor volumen de acumulación.

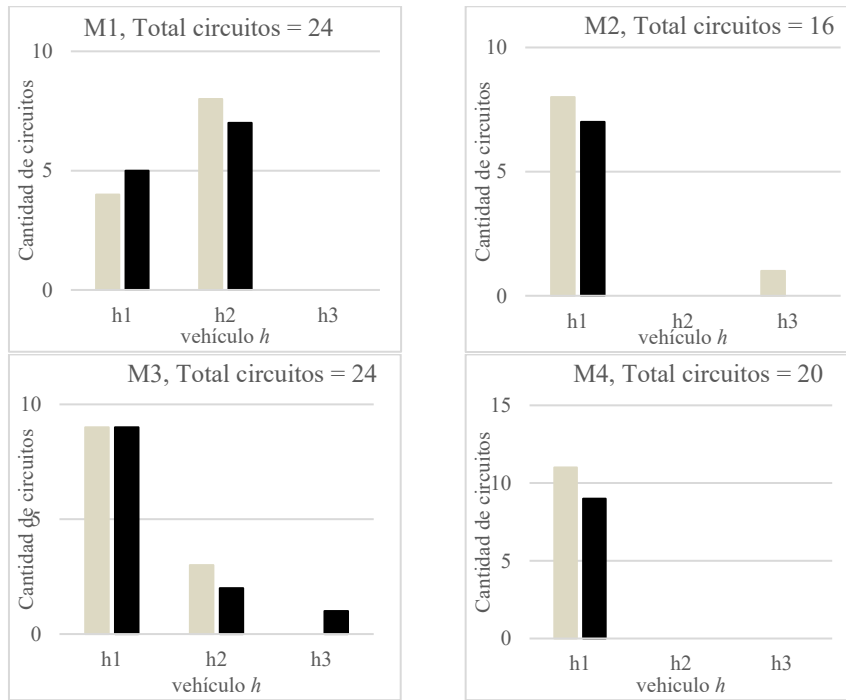


Fig. 2. Resultados de la aplicación de los modelos al SOB. Barras negras: PRP ubicada en Lanús, barras color beige: PRP ubicada en Lincoln.

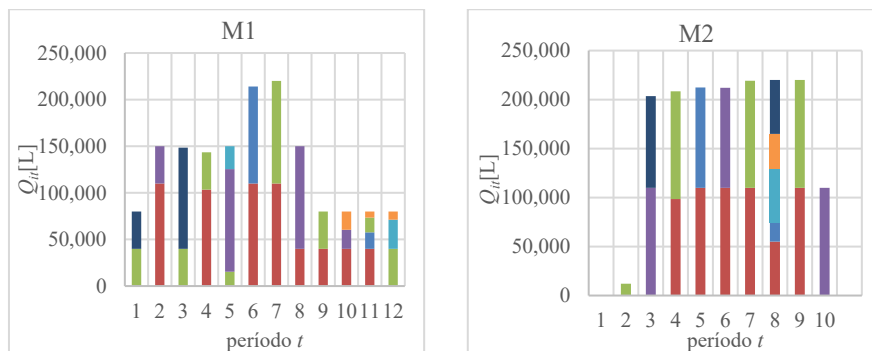


Fig. 3. Volumen de envases retirado de los CATs por periodo (Q_{it}).

En la Fig. 4 se muestra la evolución del volumen total del inventario IV_{it} de los CATs que registraron retiros durante el horizonte de planificación obtenidos con M1. Se

observa que, hacia el final del horizonte de planeamiento todos los CATs alcanzan niveles de inventario cercanos a su capacidad máxima. Los CATs 2 y 11 son los de mayor tamaño y los CATs 3, 5, 8, 9, y 10 medianos. Finalmente, se advierte que los retiros más significativos en los CATs de mayor tamaño ocurren principalmente en la primera mitad del horizonte, lo cual permite contener la acumulación temprana de inventario y aprovechar de manera más eficiente la capacidad de transporte disponible.

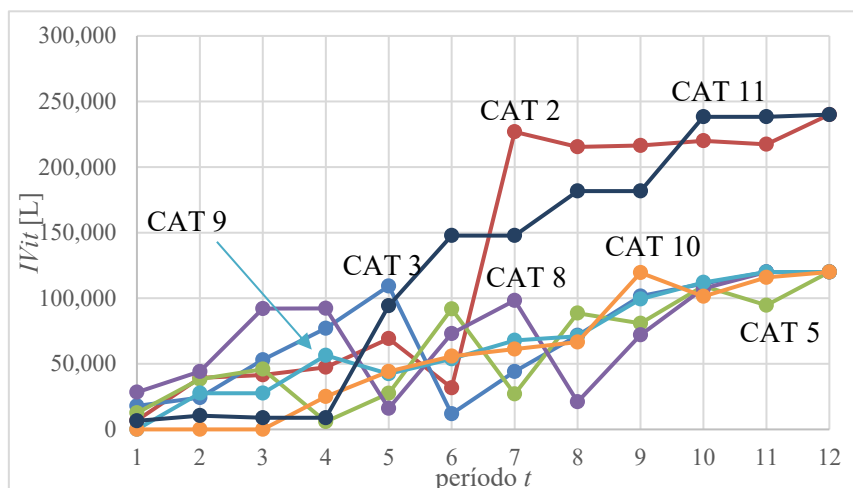


Fig. 4. Volumen total de EVFs en inventario en cada CAT (IV_{it}) a lo largo del horizonte de planeamiento obtenidos con el modelo M1.

5 Conclusiones

El trabajo presentado propone modelos MILP para la gestión de EVFs en el SOB, integrando decisiones de inventario y transporte en un marco multiperíodo. Los resultados obtenidos permiten identificar configuraciones eficientes de recolección que responden a diferentes objetivos: minimizar costos de transporte o reducir emisiones de GEI. Además, los modelos permiten evaluar escenarios alternativos de recuperación, brindando información clave para planificar rutas de recolección y seleccionar los vehículos para realizarlas para gestionar eficientemente los inventarios en los CATs del sistema.

Los resultados muestran que los enfoques de optimización orientados a minimizar costos y emisiones conducen a configuraciones logísticas diferenciadas, en términos de frecuencia de vaciado, uso de la flota y asignación a plantas recicladoras. La exigencia de una mayor recuperación del sistema reduce la flexibilidad del modelo, generando soluciones más homogéneas entre criterios. A pesar de estas diferencias, se identifican patrones comunes: la preferencia por vehículos de gran capacidad en escenarios con mayor volumen transportado y una distribución relativamente equilibrada de los envases entre las plantas recicladoras.

Estos hallazgos destacan la utilidad de los modelos propuestos como herramienta de apoyo para la toma de decisiones, permitiendo evaluar compromisos entre costos de

transporte y sostenibilidad ambiental. Su aplicación puede contribuir a la transición hacia una economía circular en el sector agroindustrial, fomentando la recuperación y el reciclaje de materiales valiosos como el polietileno de alta densidad. Como líneas futuras, se plantea avanzar hacia formulaciones multiobjetivo que integren de manera simultánea criterios económicos y ambientales, así como la incorporación de incertidumbre en el perfil de ingreso de EVFs al sistema.

Referencias

- Afxentiou, N., Georgali, P.-Z. M., Kylili, A., & Fokaides, P. A. (2021). Greenhouse agricultural plastic waste mapping database. *Data in Brief*, 34, 106622.
- Aksen, D., Kaya, O., Salman, F. S., & Akça, Y. (2012). Selective and periodic inventory routing problem for waste vegetable oil collection. *Optimization Letters*, 6(6), 1063–1080.
- Alkaabneh, F., Diabat, A., & Gao, H. O. (2020). Benders decomposition for the inventory vehicle routing problem with perishable products and environmental costs. *Computers & Operations Research*, 113, 104751.
- Braga Marsola, K., Leda Ramos de Oliveira, A., Filassi, M., Elias, A. A., & Andrade Rodrigues, F. (2021). Reverse logistics of empty pesticide containers: solution or a problem? *International Journal of Sustainable Engineering*, 14(6), 1451–1462.
- Briassoulis, D., Hiskakis, M., Karasali, H., & Briassoulis, C. (2014). Design of a European agrochemical plastic packaging waste management scheme—Pilot implementation in Greece. *Resources, Conservation and Recycling*, 87, 72–88.
- Cárdenas-Barrón, L. E., & Melo, R. A. (2021). A fast and effective MIP-based heuristic for a selective and periodic inventory routing problem in reverse logistics. *Omega*, 103, 102394.
- Contreras Castañeda, E. D., Fraile Benítez, A. M., & Silva Rodríguez, J. D. (2013). Diseño de un sistema de logística inversa para la recolección de envases y empaques vacíos de plaguicidas. *Ingeniería Industrial*, 12(2), 29–42.
- Demir, E., Bektaş, T., & Laporte, G. (2011). A comparative analysis of several vehicle emission models for road freight transportation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 16(5), 347–357.
- Garbounis, G., & Komilis, D. (2021). A modeling methodology to predict the generation of wasted plastic pesticide containers: An application to Greece. *Waste Management*, 131, 177–186.
- González Prieto, M., Sorichetti, A. E., Tucac, G., Moreno, S., Blanco, A., Bandoni, A., & Savoretti, A. A. (2023). Estimación de la generación de envases vacíos de fitosanitarios en la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Electronic Journal of Informatics and Operational Research*, 22(2), 22–44.
- Goulart Coelho, L. M., Lange, L. C., & Coelho, H. M. (2017). Multi-criteria decision making to support waste management: A critical review of current practices and methods. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 35(1), 3–28.
- Lagarda-Leyva, E. A., Morales-Mendoza, L. F., Ríos-Vázquez, N. J., Ayala-Espinoza, A., & Nieblas-Armenta, C. K. (2019). Managing plastic waste from agriculture through reverse logistics and dynamic modeling. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 21(7), 1415–1432.
- Li, W., Ng, T. F., Ibrahim, H., & Wang, S. L. (2025). A literature review of the state of the art of sustainable waste collection and vehicle routing problem. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 75(1), 3–26.

- Marnasidis, S., Stamatelatos, K., Verikouki, E., & Kazantzis, K. (2018). Assessment of the generation of empty pesticide containers in agricultural areas. *Journal of Environmental Management*, 224, 37–48.
- Nolz, P. C., Absi, N., & Feillet, D. (2014a). A Bi-objective Inventory Routing Problem for Sustainable Waste Management Under Uncertainty. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 21(5–6), 299–314.
- Nolz, P. C., Absi, N., & Feillet, D. (2014b). A stochastic inventory routing problem for infectious medical waste collection. *Networks*, 63(1), 82–95.
- Oliveira Leitão, F., & Cardoso de Almeida, U. (2019). The cost of reverse logistics of agricultural pesticide packaging: a multihull study with the links responsible for the return of empty containers. *Custos e Agronegócio*, 15(1), 170–205.
- Parlato, M. C. M., Valenti, F., & Porto, S. M. C. (2020). Covering plastic films in greenhouses system: A GIS-based model to improve post use sustainable management. *Journal of Environmental Management*, 263, 110389.
- Patarasiriwong, Vanvimol Wongpan, P., Korpraditskul, R., Kerdnoi, T., Ngampongsai, A., & Boonthai Iwai, C. (2012). Pesticide Distribution in Pesticide Packaging Waste Chain of Thailand. *International Conference on Chemical, Environmental Science and Engineering (ICEEBS'2012)*.
- Pazienza, P., & De Lucia, C. (2020). For a new plastics economy in agriculture: Policy reflections on the EU strategy from a local perspective. *Journal of Cleaner Production*, 253, 119844.
- Rahbari, M., Arshadi Khamseh, A., Sadati-Keneti, Y., & Jafari, M. J. (2022). A risk-based green location-inventory-routing problem for hazardous materials: NSGA II, MOSA, and multi-objective black widow optimization. *Environment, Development and Sustainability*, 24(2), 2804–2840.
- Rentizelas, A., Shpakova, A., & Mašek, O. (2018). Designing an optimised supply network for sustainable conversion of waste agricultural plastics into higher value products. *Journal of Cleaner Production*, 189, 683–700.
- Silva, J. D., & Contreras, E. D. (2015). Simulación de un proceso de logística inversa: recolección y acopio de envases y empaques vacíos de plaguicidas. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 9(18), 6–22.
- Sorichetti, A. E., González Prieto, M., Savoretti, A. A., Barbosa, S. E., & Bandoni, J. A. (2024). Reverse logistics for empty pesticide containers: optimal design for sustainable management over wide areas. *Environment, Development and Sustainability*.
- Sorichetti, A. E., González Prieto, M., Moreno, M. S., Blanco, A. M., Bandoni, J. A., & Savoretti, A. A. (2024). Aplicación de un modelo matemático de ruteo de vehículos para la recolección de envases vacíos de fitosanitarios en la provincia de Buenos Aires. *53JAIIO - SIIO 2024, Bahía Blanca, Argentina*.
- Stadlinger, N., Mmochi, A. J., Dobo, S., Gyllbäck, E., & Kumblad, L. (2011). Pesticide use among smallholder rice farmers in Tanzania. *Environment, Development and Sustainability*, 13(3), 641–656.
- Tran, T. H., Nguyen, T. B. T., Le, H. S. T., & Phung, D. C. (2024). Formulation and solution technique for agricultural waste collection and transport network design. *European Journal of Operational Research*, 313(3), 1152–1169.
- Yossen, G. N., & Henning, G. P. (2021). Optimal Reverse Supply Chain Design: The Case of Empty Agrochemical Containers. In G. Rossit, D.A., Tohmé, F., Mejía Delgadillo (Ed.), *International Conference on Production Research, ICPR Americas 2020, Special Session: Sustainable Production and Reverse Logistics* (pp. 3–18). Springer, Cham.