

Evaluación de Criterios Económicos y Ambientales para una Gestión Óptima de Inventarios de Envases Vacíos de Fitosanitarios en Centros de Acopio Transitorio

M. González Prieto^{1,2}[0000-0002-9123-5301], 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 Centros de Acopio Transitorio (CATs) que consideran diferentes criterios de optimización. 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 tres funciones objetivo: una orientada a minimizar los costos de transporte, otra enfocada en reducir las emisiones de CO₂ y una que integra las dos anteriores en un único criterio económico. 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. Como caso de estudio se analiza el sistema de recolección del Sudoeste Bonaerense.

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

Evaluation of Economic and Environmental Criteria for the Optimal Inventory Management of Empty Pesticide Containers in Temporary Collection Centers

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), considering different optimization criteria. 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, three objective functions are considered: one aimed at minimizing transportation costs, another focused on reducing CO₂ emissions, and a third that integrates both criteria into a single economic objective. 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 agro-industrial sector. As a case study, the collection system of the Southwestern Buenos Aires region is analyzed.

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

1 Introducción

La gestión de Envases Vacíos de Fitosanitarios (EVFs) constituye un desafío relevante dentro de los residuos de origen agrícola, lo que ha impulsado una atención creciente en la literatura internacional en los últimos años. El abordaje de esta problemática engloba diversos 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.

Algunos trabajos (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 asociados a 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, en cambio, 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).

El problema de diseño de la red de recolección de EVFs ha sido abordado más recientemente. Diversos autores aplican enfoques basados en dinámica de sistemas (Braga Marsola et al., 2021) o en 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. Por su parte, 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 o 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 costos económicos 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 sobre herramientas de apoyo a la toma de decisiones en la gestión de residuos realizada por Goulart Coelho et al. (2017), se destaca 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 sanitarios y 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.

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 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.

En este trabajo se proponen modelos MILP para gestionar los inventarios de EVFs en CATs distribuidos en una región determinada, 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 estudian formulaciones alternativas empleando diferentes funciones objetivo para evaluar la necesidad de plantear un problema multiobjetivo. En la primera se busca minimizar los costos de transporte, en la segunda se reducen las emisiones de CO₂ y en la tercera se integran estos dos criterios en única función económica a minimizar donde se establece un costo o impuesto asociado a la generación de emisiones de CO₂.

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 traslados 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 de tipo 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.

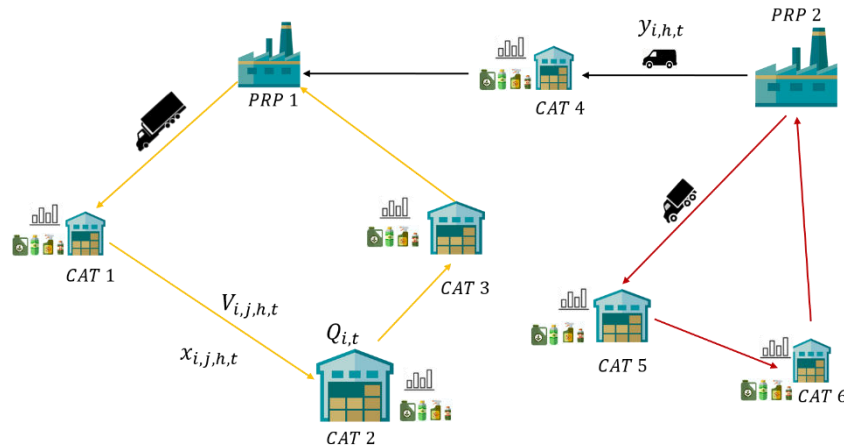


Fig. 1. Esquema de la red de logística inversa de EVFs tomada como referencia en este trabajo.

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, las emisiones de CO₂ y su combinación en términos económicos, 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.

3 Formulación matemática

Para abordar el problema de gestión de inventarios de EVFs, en este trabajo se proponen tres formulaciones MILP considerando diferentes criterios de optimización. 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
TC	costo total integrando transporte y emisiones de GEI

3.1 Funciones objetivo

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

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

$$TC = TRC + cem \cdot EMT \quad (3)$$

Como se mencionó, se examinan tres funciones objetivo en este trabajo. La Ec. (1) 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 para cada tipo de vehículo h [USD]. 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 [USD/L] y consumo de combustible de cada vehículo [L/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, Demir et al. (2011) reporta un muy buen desempeño de COPERT para modelar datos experimentales, principalmente para vehículos pesados.

Finalmente, la función objetivo definida en la Ec. (3) establece un único criterio económico que integra los costos de transporte con un valor monetario asociado a las emisiones de CO₂. Para ello se incorpora el parámetro cem , que establece un costo o penalidad por tonelada de dichas emisiones [USD/t CO₂]. En este trabajo se analiza cómo la variación de este parámetro influye en la solución óptima obtenida por el modelo.

3.2 Ecuaciones vinculadas al inventario en los CATs:

$$I_{mit} = I_{mit-1} + E_{mit} - S_{mit} \quad \forall m \in M, i \in NC, t \in T \quad (4)$$

$$IV_{mit} = I_{mit} \cdot vol_m \quad \forall m \in M, i \in NC, t \in T \quad (5)$$

$$\sum_{m \in M} IV_{mit} \leq (1 - \beta) \cdot CVmax_i \quad \forall i \in NC, t \in T \quad (6)$$

$$SV_{mit} = S_{mit} \cdot vol_m \quad \forall m \in M, i \in NC, t \in T \quad (7)$$

$$\sum_{m \in M} SV_{mit} = Q_{it} \quad \forall i \in NC, t \in T \quad (8)$$

Como se observa en la Ec. (4) 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. (5) expresa la cantidad de EVFs almacenada en el CAT en unidades de volumen al multiplicar por el volumen de cada tipo de envase (vol_m) y la Ec. (6) establece que el volumen total almacenado en cada periodo t no exceda la capacidad máxima de almacenamiento disponible en el CAT ($CVmax_i$). Esta capacidad efectiva se reduce mediante el parámetro β , que representa el porcentaje de volumen que debe permanecer libre dentro del CAT para garantizar su operación adecuada y permitir la recepción continua de envases. Por otro lado, la Ec. (7) calcula el volumen total de cada tipo de envase m que se retira del CAT en cada periodo t (SV_{mit}). Finalmente, la Ec. (8) 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:

$$\sum_{\substack{j \in N \\ j \neq i}} \sum_{h \in H} x_{ijht} \leq 1 \quad \forall i \in N, t \in T \quad (9)$$

$$\sum_{\substack{i \in N \\ i \neq j}} \sum_{h \in H} x_{ijht} - \sum_{\substack{i \in N \\ i \neq j}} \sum_{h \in H} x_{jih t} = 0 \quad \forall j \in N, h \in H, t \in T \quad (10)$$

$$\sum_{\substack{j \in N \\ j \neq i}} \sum_{h \in H} V_{jih t} + Q_{it} = \sum_{\substack{j \in N, h \in H \\ i \neq j}} V_{ijht} \quad \forall i \in NC, t \in T \quad (11)$$

$$x_{ijht} + x_{jih t} \leq 1 \quad \forall (i, j) \in NC, i \neq j, h \in H, t \in T \quad (12)$$

$$y_{iht} = \sum_{j \in NC} x_{ijht} \quad \forall i \in NP, h \in H, t \in T \quad (13)$$

$$Q_{it} = 0 \quad \forall i \in NP, t \in T \quad (14)$$

$$V_{ijht} = 0 \quad \forall i \in NP, j \in NC, h \in H, t \in T \quad (15)$$

La Ec. (9) garantiza que solo un vehículo h puede visitar cada nodo j por período. La Ec. (10) 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. (11) 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. (12) impide la formación de un circuito cerrado entre dos CATs, mientras que la Ec. (13) 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 (14) y (15) 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:

$$V_{ijht} \leq Q_{up_h} \cdot x_{ijht} \quad \forall (i, j) \in N, i \neq j, h \in H, t \in T \quad (16)$$

$$V_{ijht} \geq Q_{lo_h} \cdot x_{ijht} \quad \forall i \in NC, j \in NP, h \in H, t \in T \quad (17)$$

$$Q_{it} \geq Q_{min_h} \cdot x_{jih t} \quad \forall (i, j) \in N, i \neq j, h \in H, t \in T \quad (18)$$

$$D_{ht} = \sum_{\substack{(i, j) \in N \\ i \neq j}} x_{ijht} \cdot dc_{ij} \quad \forall h \in H, t \in T \quad (19)$$

Las Ecs. (16) y (17) restringen el volumen de carga transportado por cada vehículo h entre los nodos (i, j) en cada periodo, V_{ijht} . La Ec. (16) 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. (17) 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. (18) 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. (19) calcula la distancia recorrida por cada vehículo h en cada periodo, D_{ht} , considerando la suma de las distancias dc_{ij} [km] de todos los tramos recorridos en ese período.

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

$$\sum_{\substack{j \in N \\ i \neq j}} \sum_{h \in H} V_{ijht} \leq CPmax_i \quad \forall i \in NP, t \in T \quad (20)$$

$$\sum_{i \in NC} \sum_{j \in NP} \sum_{h \in H} \sum_{t \in T} V_{ijht} \geq \sum_{i \in NC} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} E_{mit} \cdot vol_m \cdot pr \quad (21)$$

La Ec. (20) 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. (21) 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 pertinencia de un enfoque multiobjetivo al utilizar una flota heterogénea de vehículos, este trabajo analiza tres formulaciones MILP con diferentes criterios de optimización. La primera (M1) minimiza los costos de transporte TRC en Ec. (1), la segunda (M2) busca reducir las emisiones de CO_2 EMT en Ec. (2) y la última (M3) que reduce un único criterio monetario TC en Ec. (3) donde se combinan los costos de transporte con los costos asociados a las emisiones de CO_2 .

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 en este territorio. Para aplicar el modelo, se consideraron las tres plantas existentes en la provincia ($|NP| = 3$), ubicadas en Lanús, Lincoln y

Brandsen. Se supone que todos los CATs se encuentran vacíos al inicio del horizonte de planeamiento ($I_{mio} = 0$) y que es necesario mantener libre un 15% de su capacidad ($\beta = 0,15$) para garantizar que el CAT pueda recibir envases en cualquier momento cuando los productores se acerquen a realizar devoluciones. 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 kg CO_{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 . El horizonte de planeamiento es de 3 meses discretizado en 12 períodos semanales.

Se realizan estudios de escenario variando parámetros en los modelos propuestos. Primero, en M1 y M2 se analiza el impacto del parámetro de recupero asociado con la meta mínima de procesamiento de plástico (pr) imponiendo un valor bajo del 50% y uno alto del 80%.

Luego, en M3 se evalúa el efecto del costo de la tonelada de CO₂ emitida (cem). La literatura muestra una amplia variedad de enfoques para asignar este costo y, por lo tanto, distintos rangos de valores posibles.

Una primera alternativa es utilizar como referencia el precio del mercado de carbono, por ejemplo, proporcionado por el Sistema de Comercio de Emisiones de la Unión Europea (EU-ETS, por sus siglas en inglés). Este precio refleja la oferta y la demanda de permisos para emitir dentro de los límites establecidos por las políticas vigentes. En los últimos años, el valor del EU-ETS ha oscilado en torno a 100 USD/t CO₂, aunque con variaciones temporales significativas¹.

Una segunda alternativa es emplear los costos marginales de abatimiento publicados por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés). Estos valores dependen de los costos de mitigar emisiones mediante diversas tecnologías (captura, eficiencia energética, energías renovables, cambios en procesos industriales, entre otras). En informes recientes (IPCC, 2023), se reportan costos de mitigación que van desde los -45 a 100 USD/t CO₂ para ciertas medidas y sectores.

En el ámbito académico, especialmente en trabajos que modelan problemas de inventario, ruteo y logística mediante programación matemática, los costos de emisiones incluidos en la función objetivo presentan una notable heterogeneidad. Algunos estudios emplean valores relativamente bajos, cercanos a 50 USD/t CO₂ (Reddy et al., 2020; Bektaş & Laporte, 2011), mientras que otros adoptan valores superiores a 100 USD/t CO₂ (Alkaabneh et al., 2020) o incluso del orden de 300 USD/t CO₂ (Cheng et al., 2017).

¹ <https://tradingeconomics.com/commodity/carbon>, <https://es.investing.com/commodities/carbon-emissions>

Finalmente, otra alternativa es utilizar el Costo Social del Carbono (SCC, por sus siglas en inglés), que busca cuantificar en términos monetarios los daños climáticos futuros asociados a una tonelada adicional de CO₂ emitida hoy. Estos valores presentan una dispersión aún mayor, dado que dependen de la metodología empleada para su estimación, del conjunto de impactos considerados (salud, agricultura, infraestructura, pérdida de biodiversidad, etc.) y, especialmente, de la tasa de descuento, que determina cuánto peso se asigna a los daños climáticos futuros.

Como referencia, un informe reciente de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, 2023) estima que una tonelada emitida en 2030 genera daños equivalentes a 120 a 380 USD. Rennert y col. (2022), en un extenso análisis comparativo de metodologías, concluyen que un valor de 185 USD/t CO₂ representa una de las estimaciones más consistentes. Con base en estos antecedentes, los escenarios analizados en M3 consideran valores de 100 y 400 [USD/t CO₂] para *cem* en la función objetivo integrada (3) imponiendo un parámetro de recupero mínimo del 80%.

Las formulaciones se implementaron 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. Cada modelo involucra 20.426 ecuaciones, 8.713 variables continuas y 9.432 binarias. Se registraron las soluciones obtenidas luego de 1h de cómputo. Si bien las soluciones obtenidas con ese periodo de procesamiento no son globalmente óptimas, el GAP de optimalidad es pequeño lo que permite generar conclusiones de interés práctico.

4.1 Análisis de resultados

Los resultados de los criterios evaluados en los modelos M1 y M2 junto al GAP alcanzado al imponer diferentes valores de *pr* se muestran en la Tabla 1. Las soluciones obtenidas con ambos modelos son más parecidas en el caso en que se impone la restricción de recuperar en las PRPs al menos el 80 % de los envases que ingresan al sistema (escenarios E3 y E4). 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 escenarios E1 y E2 la recuperación global del sistema supera el valor mínimo impuesto y se aproxima al 70%.

Tabla 1. Resultados para el caso del SOB imponiendo diferentes *pr* en M1 y M2.

<i>pr</i> [%]	Modelo	Escenario	<i>TRC</i> [USD]	<i>EMT</i> [t CO _{2eq.}]	<i>pr</i> calculado [%]	GAP
50	M1	E1	76.121	13,87	68	0,012
	M2	E2	86.582	9,31	69	0,054
80	M1	E3	91.405	14,28	80	0,0004
	M2	E4	99.555	10.67	80	0,019

Como se observa, las funciones objetivo de minimizar costos y minimizar emisiones resultan contrapuestas. Los escenarios E1 y E3 orientados a minimizar los costos de transporte tienden a utilizar una mayor diversidad de vehículos, mientras que en los que

se minimizan las emisiones (E2 y E4), predomina el uso del vehículo de mayor tamaño (Fig. 2).

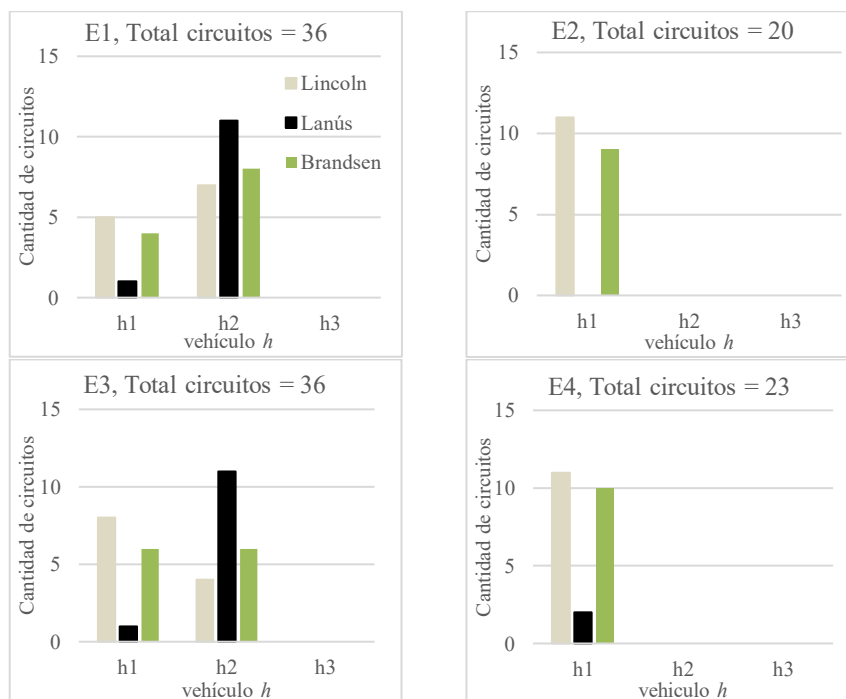


Fig. 2. Resultados de la aplicación de los modelos M1 y M2 al SOB para distintos *pr*.

Sin embargo, cuando se minimizan costos imponiendo una recuperación elevada (escenario E3), 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). Se observa además que, en los escenarios orientados a minimizar emisiones (E2 y E4), el modelo asigna una baja cantidad de EVFs a la planta de Lanús (menos del 8%), concentrando los retiros en las plantas más cercanas al SOB, Lincoln y Brandsen. En general, en todos los escenarios analizados, los EVFs se distribuyen de forma pareja entre estas dos plantas de procesamiento de plástico.

Independientemente del porcentaje de EVFs que llega a procesarse en las PRPs, en los escenarios orientados a minimizar las emisiones (E2 y E4), se observa una disminución en la cantidad de circuitos realizados. 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 (ver Fig. 3). Este efecto es más marcado en el escenario E2, donde el porcentaje de recuperación total del sistema es menor. 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.

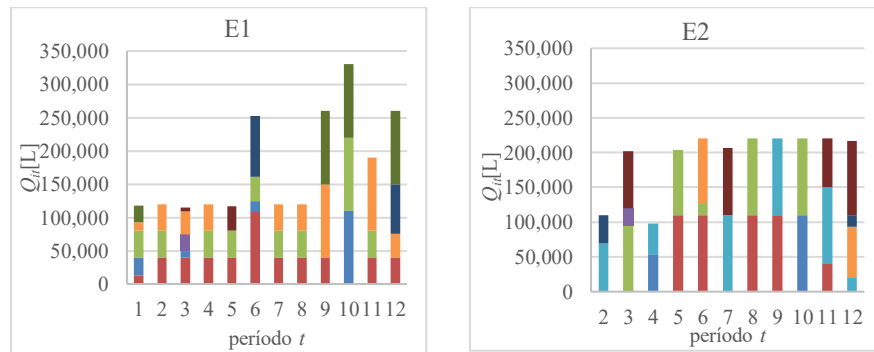


Fig. 3. Volumen de envases retirado de los CATs por período (Q_{it}) para los escenarios E1 y E2.

En las Figs. 4(a) y 4(b) se muestra la evolución del volumen total del inventario IV_{it} de los CATs que registraron retiros durante el horizonte de planificación obtenidos en el primer escenario con M1. El SOB cuenta con CATs de 3 tamaños: 2 grandes, 7 medianos y 2 chicos. Hacia el final del horizonte de planificación, ambos CATs grandes, 5 de los medianos y 1 de los chicos alcanzan niveles de inventario cercanos a su capacidad máxima. Queda capacidad disponible de almacenamiento de EVFs en un CAT mediano y en uno chico. 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.

Para analizar con mayor claridad la distribución espacial de los circuitos de recolección, se presentan los resultados correspondientes a los escenarios que muestran mayor recuperación de envases en las PRPs (E3 y E4). A fin de evitar la superposición excesiva de información, se seleccionaron tres períodos representativos que permiten visualizar distintos tipos de recorridos.

En los mapas de las Figs. 5(a) y 5(b), la intensidad de los tonos verde en cada partido representa el nivel de generación de EVFs. Los triángulos representan las plantas de reciclado mecánico de plástico, mientras que los círculos corresponden a los CATs. El tamaño de cada forma geométrica refleja, respectivamente, la capacidad de procesamiento o almacenamiento. También se indica en las figuras el tipo de vehículo empleado en cada circuito.

En el caso de Laprida —un partido de baja generación de envases— en ambos escenarios se programa el retiro en el período 4, aunque los circuitos difieren. En el modelo M1 orientado a minimizar costos de transporte (E3), Laprida envía sus envases a la planta de Lanús mediante un vehículo h2 (Fig. 5 a). En cambio, en el modelo M2 que minimiza emisiones, Laprida se integra en un circuito de mayor volumen que recoge también los envases de Coronel Suárez utilizando un vehículo h1; en este caso, el envío se realiza hacia la planta de Brandsen, más cercana a ambas localidades (Fig. 5 b).

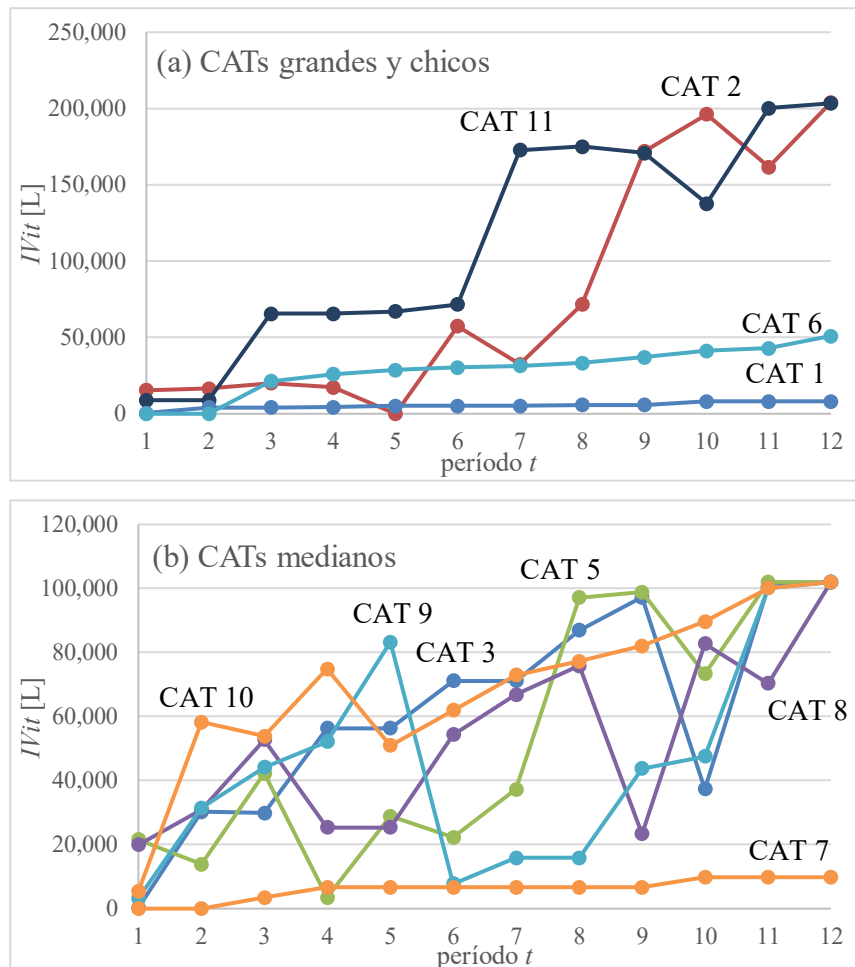


Fig. 4. Volumen total de EVFs en inventario en cada CAT (IV_{it}) a lo largo del horizonte de planeamiento obtenido en E1. (a) CATs grandes y chicos, (b) CATs medianos.

Para la gestión del CAT de Daireaux —de tamaño mediano— el modelo M1 en el escenario E3 adopta una estrategia similar: traslada los EVFs mediante un vehículo h2 hacia la planta de Lanús (Fig. 5 a). En el E4, el modelo M2, en cambio, utiliza un vehículo h1 para transportar los envases hacia la planta más próxima, ubicada en Lincoln (Fig. 5 b). En términos generales, en el E3 se gestionan los EVFs de Daireaux mediante 9 viajes con vehículos h2 y 1 viaje con h1, mientras que en E4 el CAT es visitado 6 veces con un vehículo h1.

Respecto de los partidos con mayor generación de EVFs como es el caso de Benito Juárez y Tres Arroyos, se observa que los circuitos de vaciado tienden a ser directos, sin visitas a CATs intermedios. En el escenario E3, al priorizar la reducción de costos, se realizan más visitas, utilizando vehículos de menor capacidad (Fig. 5 a).

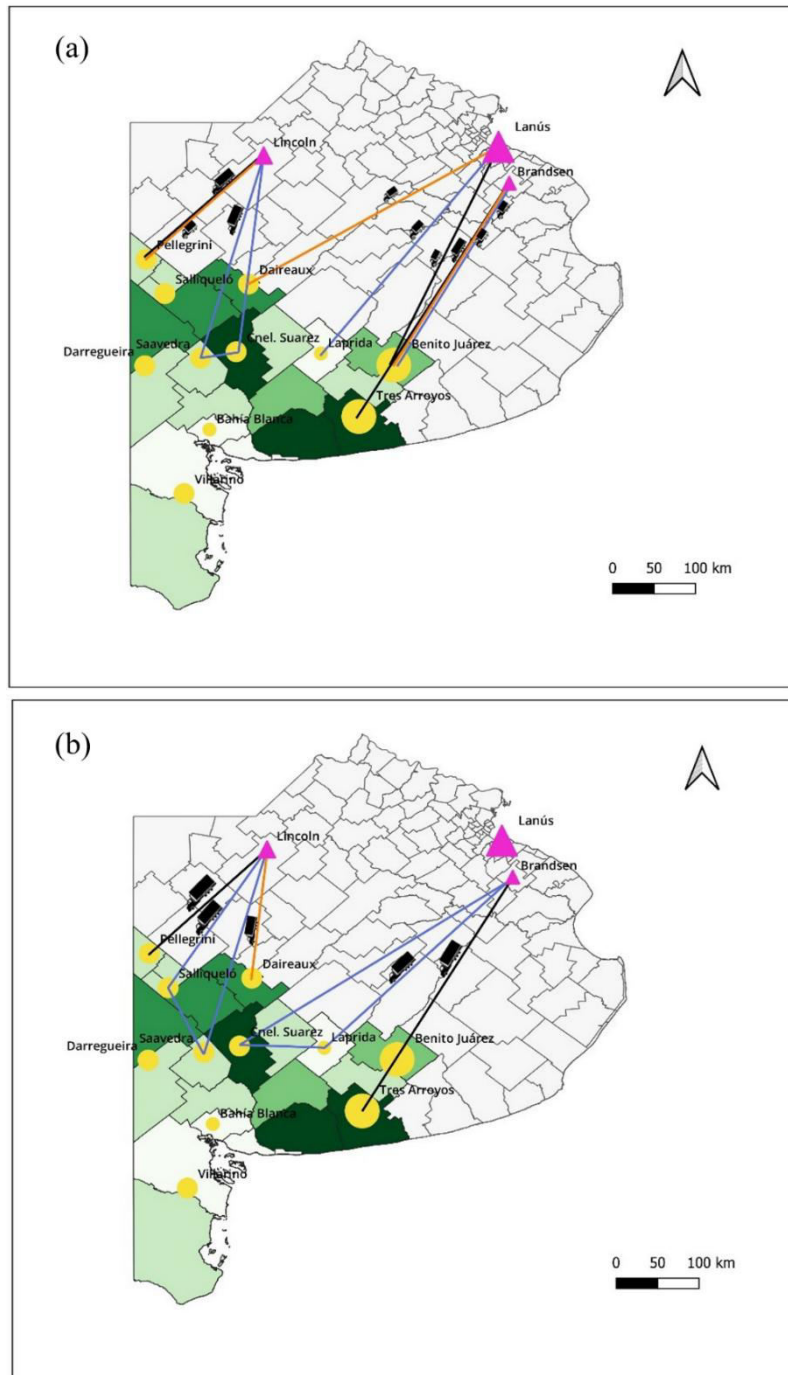


Fig. 5 Circuitos de recolección de EVFs de los CATs del SOB a las PRPs, naranja=t2, azul=t4, negro=t9. (a) Resultados del escenario E3, (b) Resultados del escenario E4.

Por último, se analiza la alternativa de monetizar las emisiones de CO₂ mediante el parámetro *cem* y optimizar los circuitos de recolección minimizando simultáneamente los costos de transporte y los costos asociados a dichas emisiones. Se estudian dos escenarios adicionales que incluyen dos valores del parámetro de costo por tonelada de CO₂ emitida, uno que se ubica en el rango superior de los valores reportados en la literatura manteniendo un mínimo porcentaje de recuperación del 80% ($pr = 0,8$).

Como se observa en la Tabla 2, para cualquier valor asignado al costo por tonelada de CO₂ emitida, el modelo M3 conduce a la misma solución que el modelo M1 (Tabla 1 – E3), el cual minimiza exclusivamente los costos de transporte. Resultados similares se han reportado en la literatura, donde incluso incrementos muy elevados en los costos de emisiones no conducen a soluciones con mejoras ambientales significativas (Cheng et al., 2017; Bektaş & Laporte, 2011).

Tabla 2 Resultados del modelo M3 para el caso del SOB usando diferentes valores de *cem*.

Escenario	<i>cem</i> [USD/tCO ₂]	<i>TC</i> [USD]	<i>TRC</i> [USD]	<i>EMT</i> [t CO _{2eq.}]	GAP
E5	100	92.823	91.398	14,26	0,0004
E6	400	97.117	91.405	14,28	0,0006

5 Conclusiones

El trabajo presentado propone modelos MILP para la gestión de EVFs, integrando decisiones de inventario y transporte en un marco multiperíodo. Los resultados obtenidos para el sistema de CATs del SOB permiten identificar configuraciones eficientes de recolección bajo distintos objetivos: minimizar costos de transporte o reducir emisiones de GEI. Además, los modelos permiten la evaluación de escenarios alternativos de recuperación, brindando información clave para planificar rutas de recolección, la selección de vehículos para realizarlas y la gestión eficiente de 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 más cercanas al SOB.

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.

Por último, en este trabajo se analizó la alternativa de traducir las emisiones de CO₂ a términos monetarios e integrar ambos criterios en una única función objetivo. Sin

embargo, aun considerando valores del costo por tonelada de CO₂ emitida dentro del rango superior reportado en la literatura, el modelo no logra generar soluciones óptimas que reflejen un equilibrio entre los aspectos económicos y ambientales. Por ello, como línea futura se propone avanzar hacia formulaciones multiobjetivo que permitan evaluar simultáneamente ambos criterios de manera más adecuada, así como incorporar la incertidumbre asociada al perfil de ingreso de EVFs al sistema. Adicionalmente se prevé incluir un inventario en las plantas de reciclado y restricciones de abastecimiento mínimo para las mismas de manera de garantizar su operación sostenida.

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.
- Bektaş, T., & Laporte, G. (2011). The Pollution-Routing Problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(8), 1232–1250. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2011.02.004>
- 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.
- Cheng, C., Yang, P., Qi, M., & Rousseau, L.-M. (2017). Modeling a green inventory routing problem with a heterogeneous fleet. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 97, 97–112. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2016.11.001>
- 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., Tucut, G., Moreno, S., Blanco, A., Bandoni, A., & Savoret, 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.
- Reddy, K. N., Kumar, A., Sarkis, J., & Tiwari, M. K. (2020). Computers & Industrial Engineering Effect of carbon tax on reverse logistics network design. *Computers & Industrial Engineering*, 139(September 2019), 106184. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106184>
- Rennert, K., Errickson, F., Prest, B. C., Rennels, L., Newell, R. G., Pizer, W., Kingdon, C., Wingenroth, J., Cooke, R., Parthum, B., Smith, D., Cromar, K., Diaz, D., Moore, F. C., Müller, U. K., Plevin, R. J., Raftery, A. E., Ševčíková, H., Sheets, H., & Stock, J. H. (2022). Comprehensive evidence implies a higher social cost of CO₂. *Nature*, 610(27), 687–700. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05224-9>
- 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.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2023, noviembre). Report on the Social Cost of Greenhouse Gases: Estimates Incorporating Recent Scientific Advances. Washington, DC: U.S. EPA
- 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.