

Potenciales mejoras en el sistema de gestión integral de residuos sólidos urbanos para la reducción del impacto ambiental, en Córdoba, Argentina.

Sebastián E. Antonini¹, M. Analía Rodríguez¹ y Noelia P. Alasino¹

¹Universidad Nacional de Córdoba – IPQA (CONICET-UNC), Av. Vélez Sarsfield 1611 - X5016GCA Córdoba - Argentina

Fecha de recepción del manuscrito: 21/09/2021

Fecha de aceptación del manuscrito: 26/10/2021

Fecha de publicación: 31/10/2021

Resumen— La gestión de residuos sólidos urbanos es un desafío en países en desarrollo por el aumento en la tasa de generación, los elevados costos y la falta de visión sistémica. Este trabajo presenta un modelo matemático de un sistema de gestión integral de residuos sólidos urbanos para la ciudad de Córdoba, Argentina, desde la generación hasta la disposición final, y pretende aportar al proceso de diseño de políticas públicas orientadas a la reducción de su impacto ambiental. Con el análisis de los procesos actuales y los proyectos a implementar, se crearon tres escenarios en base a la variación de parámetros operativos, la capacidad de tratamiento de putrescibles y el nivel de recuperación de reciclables. Se planteó una superestructura correspondiente a una cadena de suministro inversa que contempla los nodos de generación, compostaje domiciliario, plantas de selección y acondicionamiento, planta de transferencia, plantas de reciclaje y operaciones de selección mecánica, digestión anaeróbica de putrescibles para la generación de biogás y su transformación en energía eléctrica, bioestabilización del digestato y enterramiento sanitario. Para la estimación del impacto ambiental, se aplicó la metodología del análisis de ciclo de vida usando el software SimaPro 9.1. El modelo fue implementado en el utilitario matemático GAMS el cual minimiza el impacto a la salud humana como indicador de punto final en los tres escenarios, que fueron comparados con el escenario actual. La aplicación del modelo logra configurar los flujos óptimos, de cada categoría, procesados en cada nodo. La implementación de las estrategias de separación en origen y recolección diferenciada, el fomento del compostaje domiciliario y el tratamiento de la fracción fina, rica en putrescibles, surgen como las principales acciones para reducir el impacto ambiental.

Palabras clave— Análisis de ciclo de vida, gestión integral de residuos sólidos urbanos, modelado y optimización.

Abstract— Municipal solid waste management is a challenge in developing countries due to the increase in the generation rate, high costs and lack of a systemic vision. This paper presents a mathematical model of an integrated solid urban waste management system for the city of Córdoba, Argentina, from generation to final disposal, and aims to contribute to the design process of public policies focused on reducing its environmental impact. From the analysis of the current processes and the projects to be implemented, three scenarios were created based on the variation of operational parameters, the organic fraction treatment capacity and the recyclables recovery level. A superstructure was proposed corresponding to a reverse supply chain that includes generation nodes, home composting, sorting and conditioning plants, transfer plants, mechanical sorting and recycling plants, organic fraction anaerobic digestion for biogas generation and its transformation into electrical energy, digestate biostabilization and sanitary landfill. For the estimation of the environmental impact, the life cycle analysis methodology was applied using SimaPro 9.1 software. The model was implemented in the mathematical utility GAMS, minimizing the impact on human health as an endpoint indicator in the three scenarios, which were compared with the current scenario. The application of the model is able to set up the optimal flows for each category, processed at every node. The implementation of source separation and differentiated collection strategies, the promotion of home composting and the treatment of the fine flow, rich in organic fraction, emerge as the main actions to reduce the environmental impact.

Keywords— Life Cycle Assessment, Integrated Solid Waste Management, Modelling and Optimization.

INTRODUCCIÓN

La gestión de residuos sólidos urbanos (RSU) es un desafío en las ciudades de países en desarrollo debido principalmente al constante aumento en la tasa de generación, la carga que representa para el presupuesto municipal como resultado de los altos costos asociados a su gestión, la falta de comprensión sobre la diversidad de

factores que afectan las diferentes etapas de la gestión de residuos y los vínculos necesarios, entre los múltiples actores, para permitir el funcionamiento integrado de todo el sistema (Guerrero et al., 2013).

En base al volumen de RSU generados, su composición y cómo estos son gestionados, se estima que su tratamiento y disposición final, representa aproximadamente el 5 por ciento de las emisiones globales de gases de efecto invernadero a nivel mundial. En América Latina en particular, se prevé que las emisiones relacionadas con los residuos sólidos aumenten un 40% para 2050 si no se realizan mejoras en el sector (Kaza et al., 2018).

En la actualidad, la ciudad de Córdoba destina a enterramiento sanitario, sin captura de biogás, unas 770.000

Dirección de contacto:

Sebastián Antonini, Avenida Vélez Sarsfield 1611 Ciudad Universitaria, X5016 CGA. Tel: 5353800 interno 29783, Sebastian.antonini@unc.edu.ar

compostado en el domicilio. El material no compostado en G, se puede dirigir a las plantas de selección y acondicionamiento PSA (a través de la recolección diferenciada), a la planta de transferencia PT, a los puntos de aporte PA, a la planta de separación mecánica PS o a disposición final en enterramiento sanitario DF. El material de cada PSA, que puede ser recuperado, se procesa y dirige a las plantas de reciclaje PR y el rechazo se deriva a DF. Desde la PT, los residuos pueden ser trasladados a DF o a PS. En PS la fracción gruesa, rica en materiales reciclables, se dirige a la planta de selección y acondicionamiento que se encuentra dentro del complejo ambiental PSAF y la fracción fina, constituida mayoritariamente por putrescibles se dirige al proceso de biogásificación BG. Lo que ingresa a PSAF puede direccionarse a PR o a DF de forma análoga a las PSA. Desde BG sale la corriente de biogás que va al proceso de purificación PB y luego al nodo de generación de energía eléctrica GS, mientras que el digestato remanente se dirige al proceso de bioestabilización en BE y posteriormente a DF.

El material que se dirige de un nodo a otro requiere de un transporte T que depende de los nodos involucrados. Para los traslados entre los nodos G y los nodos DF, PT o PSA se consideran camiones de recolección con capacidad de 7 toneladas mientras que para el transporte desde el nodo PT a PS, se consideran camiones de 16 toneladas de capacidad.

La superestructura planteada se utilizó para determinar los flujos de materiales que minimicen la sumatoria de los impactos ambientales de los nodos de tratamiento y los transportes asociados.

MODELADO MATEMÁTICO

1 Balances de masa

Las variables que representan los flujos de materiales y los totales procesados en cada nodo, se muestran en la Figura 1. La ec. (1) determina $G_{0i,c}$, que representa la masa anual de RSU de cada categoría c generada en cada centro de generación i. Esta se calcula como el producto de Gt, generación total de residuos, $FRSU$, fracción de residuos considerados como residuos sólidos urbanos, $RSUG_i$, fracción correspondiente a cada centro de generación i, y $comp_{i,c}$ fracción de composición de cada categoría c en cada nodo i.

$$G_{0i,c} = Gt * FRSU * RSUG_i * comp_{i,c} \quad \forall i, c \quad (1)$$

La ec. (2) calcula $CD_{dom,i,c}$ que representa masa que se composta, como el producto de $G_{0i,c}$, vh la fracción de viviendas que son hogares, $tacd$ la tasa de adhesión al compostaje domiciliario y $factorcomp_{i,c}$ la fracción de putrescible que son aptos para compostar, que es igual a cero para todas las categorías a excepción de la categoría c1 (putrescibles).

$$CD_{dom,i,c} = G_{0i,c} * vh * tacd * factorcomp_{i,c} \quad \forall i, c \quad (2)$$

La ec. (3) determina $G_{i,c}$, que es cantidad neta de cada categoría de RSU c a recolectar en cada centro de generación i.

$$G_{i,c} = G_{0i,c} - CD_{dom,i,c} \quad \forall i, c \quad (3)$$

La ec. (4) corresponde al balance de masa del nodo generación:

$$G_{i,c} = \sum_j T1_{i,j,c} + \sum_m T2_{i,m,c} + \sum_k T3_{i,k,c} + \sum_l T4_{i,l,c} + \sum_d T5_{i,d,c} \quad \forall i, c \quad (4)$$

donde $T1_{i,j,c}$ corresponde al material recolectado de forma diferenciada y destinado a las PSA, $T2_{i,m,c}$ representa el material que se direcciona a los puntos de aporte, $T3_{i,k,c}$ es lo derivado a la planta de transferencia, $T4_{i,l,c}$ lo enviado a la planta de separación mecánica y $T5_{i,d,c}$ lo dispuesto directamente a enterramiento sanitario. Para cada uno de los nodos, se incorporan los correspondientes balances de masa, y por cuestiones de espacio no se describen.

$$\sum_j T1_{i,j,c} \leq G_{i,c} * trd * cap_c \quad \forall i, c \quad (5)$$

La ec. 5 limita la cantidad de RSU aportados por la recolección diferenciada a las PSA en función de los parámetros de tasa de recolección diferenciada trd y la tasa de captura de cada categoría cap_c .

$$\sum_n T7_{i,n,c} = PSA_{j,c} * Frec_c \quad \forall j, n, \text{ con } n = c \quad (6)$$

La ec. (6) calcula el material recuperado en cada PSA, para luego ser derivado a la planta de reciclaje n que corresponde a cada material c. $PSA_{j,c}$ es la masa anual de cada tipo de residuo c que es procesado en cada planta $PSA_{j,i}$, y $Frec_c$ la fracción de cada categoría que se encuentra en condiciones de ser recuperada.

$$PR_{n,c} = \sum_j T7_{j,n,c} + \sum_o T12_{o,n,c} \quad \forall n, \text{ con } n = c \quad (7)$$

La ec. (7) es el balance de masa las plantas de reciclaje con la particularidad de que cada categoría se direcciona a su respectiva planta de reciclaje.

$$\sum_n T11_{l,o,c} = PS_{l,c} * CompG_c \quad \forall c, l \quad (8)$$

La ec. (8) determina $T11_{l,o,c}$, el flujo de gruesos generados por el proceso de separación mecánica y destinado al nodo $PSAF$, como el producto de la masa tratada de cada categoría c, $PS_{l,c}$ y $CompG_c$ que representa la fracción de cada categoría que no pasa el trommel de 80 mm.

De similar forma que con el nodo PSA, la ec. (9) determina la fracción de recupero para el envío de materiales desde la PSAF a las PR.

$$\sum_n T12_{o,n,c} = PSAF_{o,c} * Frec_c \quad \forall o, n, \text{ con } n = c \quad (9)$$

El material que pasa el trommel y constituye la fracción fina se destina a la Planta de Biogásificación BG_p .

La ec. (10) calcula la masa de biogás generada en base a la masa procesada, $BG_{p,c}$ y al rendimiento de gasificación de la categoría c1 (putrescibles), Rgb_c .

$$BG_{p,c} * Rgb_c = \sum_r T17_{p,r,c} \quad \forall p, c=1 \quad (10)$$

Para la purificación del biogás en el nodo PB , la ec. (11) las impurezas que se eliminan, $PMPB$ en base al rendimiento del proceso RPB y por diferencia establece la corriente de gas purificado que se destina a la cogeneración por T18.

$$PMPB_{r,c} = PB_{r,c} * (1 - RPB) \quad \forall r, c \quad (11)$$

De forma análoga, ecuaciones (12) a (14) establecen el balance de masa correspondiente al nodo BE. El término $PMBE_{q,c}$ representa la pérdida de masa según el factor de reducción debido al proceso de bioestabilización $RedBE_c$.

$$BE_{q,c} = \sum_p T17_{p,q,c} \quad \forall q, c \quad (12)$$

$$BE_{q,c} = \sum_d T16_{q,d,c} + PMBE_{q,c} \quad \forall q, c \quad (13)$$

$$PMBE_{q,c} = \sum_p T15_{p,q,c} * RedBE_c \quad \forall q, c \quad (14)$$

2 Impactos ambientales

Los impactos ambientales correspondientes a cada nodo de la cadena de suministro inversa, recolección, compostaje, tratamientos, transportes, reutilización y disposición final, fueron evaluados con la metodología de Análisis de Ciclo de Vida.

Según las ISO 14040-44 (Bovea *et al.*, 2010) el proceso puede dividirse en cuatro fases, definición de objetivos y alcance, análisis del inventario, evaluación del impacto y, por último, la interpretación.

Con el objetivo de evaluar distintos escenarios, se determinó como alcance del estudio todas las actividades comprendidas en la superestructura mostrada en la Figura 1, para el tratamiento de la masa de RSU generada anualmente.

Para la estimación de los inventarios se consideraron procesos disponibles en la base de datos Ecoinvent 3 (Wernet *et al.*, 2016).

La evaluación de impactos se realizó con los softwares Simapro (PRé Consultans, 2018) y IWM-2, basados en la metodología ReCiPe (Huijbregts *et al.*, 2016). No se consideraron los impactos de la fabricación de equipos ni los de la construcción de infraestructura relacionados con cada configuración de los distintos escenarios.

De esta forma se determinó la contribución a los Indicadores de Punto Final (EP o endpoint) de cada actividad de la cadena de suministro.

Impactos de los procesamientos

Asociado a cada nodo G_i se considera el impacto del compostaje domiciliario.

El impacto ambiental asociado a los nodos $PSA_{j,c}$, PT_k , $PSAF$ y PS se basa en el consumo energético de los equipos involucrados: rompedor de bolsas (cuyo objetivo es desagregar y desmembrar los materiales para facilitar su posterior selección), trommel de 80 mm, cinta transportadora (donde operarios seleccionan y clasifican los materiales), compactadora y moladora de vidrio (para disminuir el volumen a transportar).

En los nodos PR_n se tomaron los inventarios y los indicadores de punto final generados por el proceso requerido por cada material y el efecto del ahorro de recursos naturales, ya que se considera el consumo evitado de nuevos materiales.

Los inventarios e indicadores de punto final, derivados del consumo eléctrico en Argentina y de los proceso de reciclaje fueron tomados de la base de datos Ecoinvent 3 (Wernet *et al.*, 2016) y calculados con SimaPro (PRé Consultans, 2018).

En la ec. (15) se muestra el cálculo del indicador de punto final correspondiente a los nodos $PSA_{j,c}$ donde $EPCE_a$ es el impacto unitario del kWh en Argentina (Wernet *et al.*, 2016), y Rrb , Rct , $Rcomp_c$ y Rmv corresponden a los consumos por tonelada procesada del rompedor de bolsas, cinta transportadora, prensa y moladora de vidrio, respectivamente.

$$IPSAep_a = EPCE_a * \sum_j \sum_c PSA_{j,c} * (Rrb + Rct) + EPCE_a * \sum_j \sum_c PSA_{j,c} * Frec_c * Rcomp_c + EPCE_a * \sum_j PSA_{j,c6} * Rmv \quad \forall a \quad (15)$$

Impactos de la recolección y los transportes

A lo largo del sistema se pueden encontrar diversas tecnologías de transporte con sus respectivos impactos ambientales.

La primera distinción es el transporte aplicado a los flujos $T1i,j,c$, $T3i,k,c$, $T4i,l,c$, $T5i,d,c$. En los mismos se considera la recolección en cada nodo i y el transporte a distintos destinos posibles para su tratamiento. El tipo de camiones analizado son equipos de recogida y compresión hidráulica de residuos, con depósito de 14 m³ en los que se logran transportar una carga neta de 7 toneladas con una densidad media de compactación de 500 kg/m³.

Para los transportes considerados de largas distancias ($T6j,d,c$, $T7j,n,c$, $T8m,j,c$, $T9k,d,c$, $T10k,l,c$, $T12o,n,c$, $T13o,d,c$ y $T16q,d,c$) se considera el uso de equipos roll off a brazo para 16 toneladas de carga neta con caja roll off.

El impacto asociado a transporte mediante camiones está determinado por las toneladas transportadas y kilómetros totales realizados según cada tipo de camión (Wernet *et al.*, 2016).

La movilización de la fracción fina desde la planta de separación mecánica hasta los siguiente nodos se consideró como un transporte de corta distancia a través de una pala mecánica, por lo cual, el impacto de $T14_{lp,c}$ y $T15_{p,q,c}$ se estimó en función al volumen trasladado (Wernet *et al.*, 2016).

Por último, el impacto del transporte de biogás a través de tuberías, $T17_{p,r,c}$ y $T18_{r,s,c}$ se consideró despreciable debido a su bajo consumo energético en relación a los demás transportes considerados en la superestructura.

La ec. (16) representa la estimación del impacto ambiental como punto final a de la recolección.

$$IRecep_a = EPRT_a * \sum_{i,c} G_{i,c} * fdr * DR \quad \forall a \quad (16)$$

Donde $EPRT_a$ es el impacto unitario, fdr es la frecuencia de recolección y DR son los kilómetros recorridos por cada ruta para cubrir el área asignada.

3 Función objetivo

La función objetivo que se muestra en la ec. (17), representa el impacto total de todas las actividades de la cadena de suministro inversa y se minimizaron los tres indicadores de punto final: (a1) daño a la salud humana, (a2) daño a los ecosistemas y (a3) daño a la disponibilidad de recursos, para los distintos escenarios planteados.

$$\min IA_a = ICDep_a + IPSAep_a + IPTep_a + IPRep_a + IPCep_a + IPSAFep_a + IBGep_a + IBEep_a + IDFep_a + IRep_a + IT1ep_a + IT2ep_a + IT3ep_a + IT4ep_a + IT5ep_a + IT6ep_a + IT7ep_a \quad (17)$$

$$IT8ep_a + IT9ep_a + IT10ep_a + IT12ep_a + IT13ep_a + IT14ep_a + IT15ep_a + IT16ep_a, \forall a$$

CASO DE ESTUDIO

El modelo propuesto se aplicó al caso de la ciudad de Córdoba. La generación total de residuos, G_t es de 760.000 toneladas por año y la fracción de estos que corresponde a RSU, $FRSU$ es de 0.54 (CORMECOR S.A., 2020)

La fracción de RSU correspondiente a cada nodo de generación, fue determinada en base a la proporción de población, $RSUG_i$ es igual a (i1) 0.440, (i2) 0.074 e (i3) 0.486 (INDEC, 2010). Los centros de generación i se corresponden a las 3 zonas correspondientes a cada concesión realizada por la municipalidad para la recolección de residuos. Para las mediciones de distancias entre la generación y los demás nodos de tratamiento, se definió el centro de centro de gravedad cada área en base a la densidad poblacional tal como se indica en la Figura 2.



Fig. 2: Ubicación de los tres centros de generación (centro, norte y sur)

La fracción de población que puede compostar es aquella que vive en casas, determinada por vh , que para la ciudad de Córdoba tiene un valor de 0.75, lo que representa un millón de vecinos de la ciudad (INDEC, 2010).

La tasa de adhesión al compostaje domiciliario, $tacd$, fue estimada para cada escenario en base a encuestas de intención y al seguimiento de la implementación luego de un período de formación a los vecinos involucrados (INTI, 2019).

Respecto a las categorías de RSU, sólo una fracción de la categoría $c1$, que corresponde a putrescibles, se puede compostar con un $factorcomp$ de 0.8, dado que un 20% de esta categoría corresponde a putrescibles no compostables (restos de comida elaborada). El factor fue determinado mediante estudio de caracterización de la categoría (Antonini y Pettigiani, 2018). Para el resto de las categorías el $factorcomp$ es nulo.

La frecuencia de recolección fdr es la informada por las empresas prestadoras del servicio: 6 veces por semana para la fracción húmeda y 1 vez por semana para la fracción seca, potencialmente reciclable.

Según lo informado por la Municipalidad de Córdoba la tasa de captura para el escenario actual cap_c es del 3% para todas las categorías excepto putrescibles y textil sanitario ($c1$ y $c2$) que se considera nula. Para el resto de escenarios se consideraron los objetivos del programa municipal Recuperando Valor (Municipalidad de Córdoba, 2021).

Las PSA son las correspondientes a los centros verdes en funcionamiento bajo la gestión mixta entre la Municipalidad de Córdoba y Cooperativas de Trabajo.

Las PR presentan mayor dispersión geográfica dado que algunas se encuentran en la provincia de Córdoba (Cartón) mientras que otras implican traslados a Buenos Aires (PET) y San Juan (Vidrio).

El rendimiento de la biodigestión de los putrescibles, $c1$, Rgb_{c1} es de 0.2975 toneladas de biogás por tonelada de $c1$, mientras que para el resto de categorías es nulo. El rendimiento del proceso de purificación del biogás RPB es de 0.6 tonelada de metano por tonelada de biogás. Ambos parámetros son los informados en un Análisis de Ciclo de Vida local de la tecnología (Morero et al, 2015).

La reducción de masa en el proceso de bioestabilización corresponde a la estimada en pruebas pilotos de compostaje y corresponde a un factor $RedBE$ de 0.55 para $c1$ mientras que es nula para el resto de categorías (Antonini y Pettigiani, 2018).

La Tabla 1 muestra la fracción en peso de cada categoría, $Comp_{i,c}$, que fue estimada a partir de estudios de caracterización de los RSU de la ciudad de Córdoba (González et al., 2015) (Antonini y Pettigiani, 2018), la fracción de cada categoría que puede ser recuperada en las PSA, $Frec_c$, que fue determinada en base a medias de plantas de separación de reciclable con tecnología manual (Szaky, 2019) y la fracción de cada categoría que no pasa el tommel y se mantiene en la fracción gruesa, $CompG_c$, definida en base a la caracterización granulométrica de los RSU (Antonini y Pettigiani, 2018)

TABLA 1: PARÁMETROS POR CATEGORÍA DE RSU

Categoría	Comp _{i,c}	Frec _c	CompG _c
C1	0.37	0.00	0.1
C2	0.09	0.00	0.0
C3	0.09	0.60	0.5
C4	0.07	0.60	0.2
C5	0.07	0.60	0.6
C6	0.06	0.80	0.9
C7	0.05	0.80	0.7
C8	0.04	0.60	0.5
C9	0.04	0.80	0.5
C10	0.03	0.60	0.5
C11	0.02	0.80	0.8
C12	0.01	0.80	0.9
C13	0.02	0.80	0.9
C14	0.01	0.60	0.5
C15	0.01	0.80	0.9
C16	0.02	0.80	0.5

En la Tabla 2 se detallan los parámetros relativos al comportamiento ciudadano y a la capacidad de procesamiento de putrescibles correspondientes al escenario actual y los tres escenarios optimizados.

TABLA 2: VALORES DE PARAMETROS SEGÚN CADA ESCENARIO

Parámetro	Esc. Actual	Esc. Opt. 1	Esc. Opt. 2	Esc. Opt. 3
<i>tacd</i>	0,05	0,20	0,35	0,5
<i>cap_c</i>	0,03	0,45	0,68	0,9
<i>CapSM</i>	0%	33%	67%	100%

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El modelo resuelve cada escenario minimizando uno de los tres indicadores de punto final al asignar los flujos de cada categoría a cada nodo, según las restricciones definidas.

Se observó que las soluciones obtenidas para las optimizaciones en base a2 y a3, no diferían sustancialmente, por lo que se presentan sólo las soluciones en las que se optimiza según a1.

El modelo fue implementado en GAMS 24.8.3 y se usó CPLEX como algoritmo de resolución. El modelo requiere 1.466 ecuaciones y 3.648 variables continuas, y el tiempo aproximado de resolución fue de 1 segundo para cada caso de estudio.

La Tabla 3 detalla los flujos de masa en cada nodo según cada escenario.

TABLA 3: MASA DE RSU DESTINADA A CADA NODO SEGÚN ESCENARIO

Destino (miles de toneladas anuales)	Esc. Actual	Esc. Opt. 1	Esc. Opt. 2	Esc. Opt. 3
Compostaje domiciliario	5	18	32	46
Reciclaje	5	67	107	129
Bioestabilización		42	42	37
Generación Eléctrica		34	34	27
Enterramiento Sanitario	400	251	196	170

En la Fig. 3 se puede observar la reducción de la masa derivada a Enterramiento Sanitario por el aumento de la recuperación de materiales para reciclaje, el compostaje domiciliario y el tratamiento de la fracción putrescible para la generación de energía eléctrica.

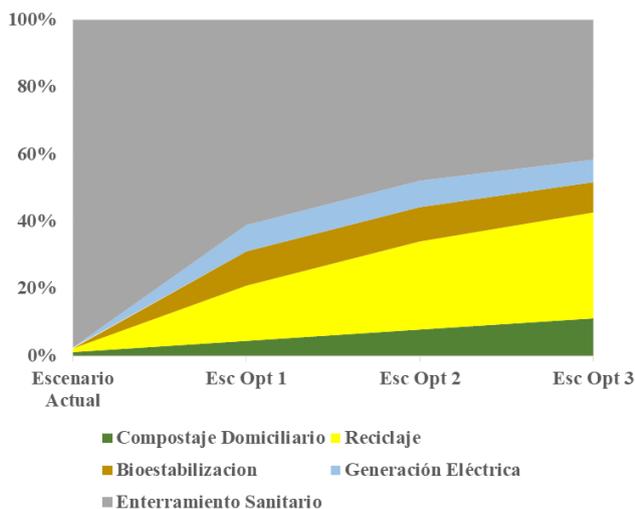


Fig. 3: % de los RSU destinados a cada nodo para cada escenario

La Tabla 4 muestra los indicadores de punto final de cada escenario minimizando la función objetivo para el impacto en la salud humana.

TABLA 4: INDICADORES DE PUNTO FINAL PARA CADA ESCENARIO

Indicador de punto final	Esc. Actual	Esc. Opt. 1	Esc. Opt. 2	Esc. Opt. 3
a1: Impacto en la salud humana (DALY)	657	22	-145	-254
a2: Impacto en el ecosistema (especies/año)	1.8	0.4	0.1	-0.1
a3: Uso de recursos naturales (Millones de USD 2013)	5	-5	-10	-12

Se puede observar que el indicador de punto final a1 mejora en cada escenario respecto al actual. El escenario con menor impacto ambiental implica lograr que se destinen a compostaje domiciliario 45.550 toneladas anuales, lo que correspondería al 11 % de los RSU y un 30% de la fracción putrescible, reciclar 129.110 toneladas anuales, lo que representaría una tasa media de recuperación del 50% y, biogasificar 100.860 toneladas anuales del material fino, rico en putrescibles, salientes de planta de separación mecánica.

Esta solución también arroja una reducción de los otros dos indicadores, reduciendo 1.9 especies/año del indicador a2- daño a la diversidad de los ecosistemas y un valor de -17 millones de USD del 2013 del indicador a3- daño a los recursos.

La Fig. 4 muestra los impactos diferenciados por nodos en cada escenario. Se puede apreciar que la principal contribución positiva se debe a la disposición final en Enterramiento Sanitario, la cual se va viendo contrarrestada en cada escenario por los productos nuevos evitados por el reciclaje. Se observa también el importante aporte de procesos de biogasificación de la fracción fina y purificación del biogás para la generación de energía eléctrica.

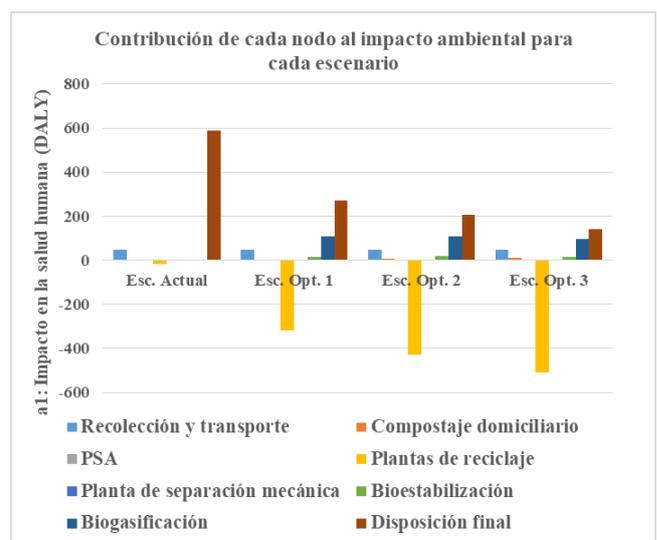


Fig. 4: Contribución de cada nodo al impacto ambiental como indicador de punto final a1

Disgregando la contribución del reciclaje por cada material, en la Fig. 5 se observa que: los celulósicos, si bien representan más de una 30% de la masa reciclada, su contribución al impacto no llega al 5%, que los metales

(ferrosos y no ferrosos) con menos del 15% de la masa, representan cerca de un 25% del impacto y que los plásticos aportan la mitad de la masa reciclada y dos tercios del impacto. Si bien el reciclaje de celulósicos y metales está incentivado por sus precios de mercado y su facilidad para transportarlos, debido a su densidad, los plásticos en general representa un desafío logístico a causa de su baja densidad.

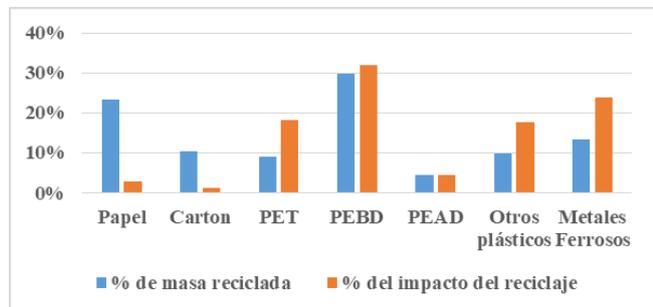


Fig. 5: Contribución de material al impacto ambiental como indicador de punto final a1 del reciclaje

CONCLUSIONES

La optimización del modelo de GIRSU propuesto para la ciudad de Córdoba, demuestra que distintas mejoras en la gestión operativa del sistema, reflejadas en la variación de los flujos de cada categoría a los nodos utilizados, pueden generar significativas disminuciones en el impacto ambiental generado por el sistema. Las soluciones encontradas suponen importantes cambios en el comportamiento ciudadano, que permitirían aumentar considerablemente los hogares que destinen los putrescibles a compostaje domiciliario e incorporen prácticas adecuadas de separación en origen de materiales reciclables.

En lo que respecta a la gestión del servicio de recolección y tratamiento de RSU se presentan importantes desafíos en la determinación de frecuencias de recolección de cada categoría y su efectiva comunicación a los vecinos.

Dada la importancia del reciclaje y la biogasificación para la disminución del impacto global, como trabajo futuro se propone complementar el análisis con una perspectiva económica que valore las inversiones requeridas y los costos operativos del sistema propuesto.

El presente trabajo y las soluciones encontradas pretenden servir de herramienta para la toma de decisiones y la determinación de políticas y normativas a implementar para lograr una gestión eficiente buscando reducir el daño ambiental provocado.

NOMENCLATURA

ACV Análisis de Ciclo de vida
 RSU Residuos Sólidos Urbanos
 GIRSU Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos
 IA impacto ambiental
 IPF indicadores de punto final
 G generación
 PSA plantas de selección y acondicionamiento
 PR plantas de reciclaje
 PA puntos de aporte
 PT planta de transferencia

PS planta de separación mecánica con un trommel
 PSAF planta de selección y acondicionamiento de materiales reciclables
 DF sitio de disposición final
 BA bioestabilización del digestato
 PB purificación del biogás
 GS cogeneración eléctrica

CONJUNTOS

aEIPF Indicadores de punto final
 c Categorías de residuos
 iEG Centros de generación
 mEPA Puntos de aporte
 jEPSA Plantas de selección y acondicionamiento
 kEPT Planta de transferencia
 nEPR Plantas de reciclaje
 lEPC Separación por tamaño con trommel
 oEPSAF Planta de selección y acondicionamiento en complejo ambiental
 pEBG Biogasificación
 rEPB Purificación de biogás
 sEGS Cogeneración de energía
 qEBE Bioestabilización
 dEDF Enterramiento sanitario

PARÁMETROS

Gt generación total de residuo (ton-año)
 FRSU fracción de residuos considerados como residuos sólidos urbanos,
 RSUG_i fracción correspondiente a cada centro de generación i
 Comp_{i,c} fracción de composición de cada categoría c en cada nodo i
 Vh Fracción de hogares que son casas
 Tacd Tasa de adhesión al compostaje domiciliario
 Trd tasa de recolección diferenciada
 cap_c tasa de captura de cada categoría
 Frec_c Fracción de recuperación de cada categoría de reciclables
 Tapa Tasa de adhesión a los puntos de aporte
 CompG_c Fracción de cada categoría que no pasa el trommel
 Rgb_c Rendimiento de biogasificación (toneladas de biogás por tonelada de cada categoría c)
 Dgas Densidad del biogás
 RPB Masa de gas restante luego del proceso de purificación de biogás
 RedBE_c Reducción de masa durante el proceso bioestabilización de cada categoría c

VARIABLES CONTINUAS

Las variables que representan los totales de material procesados en cada nodo, poseen dos subíndices

correspondientes al nodo en cuestión y a la categoría de residuo de la que se trate. Las variables que representan los flujos de materiales, poseen tres subíndices correspondientes al nodo de origen, nodo de destino y la categoría de residuo transportada.

Ejemplos de variables continuas positivas que representan los flujos entre nodos:

$T_{i,j,c}$ son las cantidades transportadas desde cada centro de generación i , de cada categoría de RSU c , a cada planta de separación y acondicionamiento (PSA) j en [t/año]

$T_{18,q,d,c}$ son las cantidades de material bioestabilizado transportado de la planta de bioestabilización q , de cada categoría de RSU c , al enterramiento sanitario d en [t/año]

Ejemplos de variables continuas positivas que representan la masa procesada en los diferentes nodos de la cadena:

$G_{i,c}$ Cantidad neta de cada categoría de RSU c a recolectar en cada centro de generación i

$CD_{dom,i,c}$ fracción que se compostan de cada categoría c en cada nodo i

$CD_{i,c1}$ son las cantidades de la categoría $c1$ de RSU compostada de forma domiciliaria en cada centro de generación i , en [t/año]

$PSA_{j,c}$ son las cantidades de cada categoría de RSU c procesada en cada PSA j , en [t/año]

$BG_{p,c}$ son las cantidades de cada categoría de RSU c procesada en la planta de Biogasificación p , en [t/año]

$DF_{d,c}$ son las cantidades de cada categoría de RSU c dispuesta en el enterramiento sanitario d , en [t/año]

$PSA_{j,c}$ plantas de selección y acondicionamiento j

$PT_{k,c}$ plantas de transferencia k

$DF_{d,c}$ disposición final en enterramiento sanitario d

$PS_{l,c}$ planta de separación mecánica l

REFERENCIAS

[1] Antonini S. y Pettigiani E., (2018), "Potencial de la digestión anaeróbica extra seca de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos generados en la ciudad de Córdoba, Argentina", en *Riteq*, Córdoba.

[2] Bovea, M.D., Ibáñez-Forés, V., Gallardo, A. y Colomer-Mendoza, F.J., (2010), "Environmental assessment of alternative municipal solid waste management strategies. A Spanish case study", *Waste Management*, vol. 30, no. 11, pp. 2383-2395.

[3] CORMECOR S.A., (2020), "Estudio de impacto ambiental. Proyecto de ampliación del predio de tratamiento y disposición final de residuos sólidos urbanos de Piedras Blancas", tomado de, <https://secretariadeambiente.cba.gov.ar/proyectosingresados/estudio-impacto-ambiental-ampliacion-del-predio-tratamiento-disposicion-final-residuos-solidos-urbanos-piedras-blancas/>. (23/12/20)

[4] González, L., Naquin, P. y Méhu, J., (2015), "Estudio de caracterización de los Residuos Sólidos Municipales de la ciudad de Córdoba", Plateforme D'innovation Technologique Rhône-Alpes, pp. 1-39.

[5] Guerrero, L. A., Maas, G. y Hogland, W., (2013), 'Solid waste management challenges for cities in developing countries', *Waste Management*, vol 33, no. 1, pp. 220-232.

[6] Huijbregts M.A.J. et al. (2017), "ReCiPe 2016 A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level Report I: Characterization", tomado de, <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2016-0104.pdf>. (26/6/20).

[7] INDEC, (2010), "Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010", tomado de, <https://www.indec.gov.ar/indec/web/Nivel4-Tema-2-41-135>. (1/9/20)

[8] INTI, (2019), "Encuesta sobre hábitos e intereses en relación a los residuos sólidos urbanos". Córdoba.

[9] Kaza L., Yao, L., Bhada-Tata P y Van Woerden F., (2018), "What a Waste 2.0 A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050", tomado de, <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/2174>. (20/6/21).

[10] Morero, B., Groppelli, E. y Campanella, E.A., (2015), "Life cycle assessment of biomethane use in Argentina", *Bioresource technology*, vol. 182, pp. 208-216.

[11] Municipalidad de Córdoba, (2021), "Programa Recuperando Valor", tomado de, <https://recuperandovalor.cordoba.gov.ar/>. (20/5/21).

[12] Municipalidad de Córdoba, (2019), "Plan de metas 2020-2023", tomado de, <https://gobiernoabierto.cordoba.gov.ar/data/datos-abiertos/categoria/plan-de-metas/informe-de-plan-de-metas/49>. (2/5/21)

[13] PRÉ Consultants, (2018), "SimaPro® 8.5", tomado de, <https://pre-sustainability.com/solutions/tools/simapro/>. (15/9/19).

[14] Santibañez-Aguilar, J.E., Ponce-Ortega, J.M., Betzabe González-Campos, J., Serna-González, M. y El-Halwagi, M.M., (2013), "Optimal planning for the sustainable utilization of municipal solid waste", *Waste Management*, vol. 33, no. 12, pp. 2607-2622.

[15] Szaky, T., (2019), *The Future of Packaging: From Linear to Circular*, Berrett-Koehler, Estados Unidos.

[16] Van Engeland, J., Beliën, J., De Boeck, L. y De Jaeger, S., (2020), "Literature review: Strategic network optimization models in waste reverse supply chains", *Omega*, vol. 91.

[17] Wernet, G. et al., (2016), "The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology", *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 21, no 9, pp 1218 - 1230