

Modelo de gestión de residuos mediante Dinámica de Sistemas orientado al reciclaje para Oberá, Misiones, Argentina

Waste management model using Systems Dynamics for recycling in Oberá, Misiones, Argentina

Sonia Romina Niezwida, Juan Carlos Michalus, Graciela Beatriz Gavazzo

Palabras clave: dinámica de sistemas, gestión de residuos, modelos de simulación

Key words: system dynamics, Waste management, Simulation models

RESUMEN

Este trabajo presenta un modelo de Dinámica de Sistemas para analizar la gestión de los Residuos Sólidos Domiciliarios en la ciudad de Oberá, ubicada en la provincia de Misiones, Argentina. La investigación se enmarca en un contexto del crecimiento poblacional, incremento en la generación de residuos y la necesidad de adoptar estrategias sostenibles a nivel municipal. El modelo ha sido construido utilizando información provista por el programa Oberá Sustentable y otros sectores de la municipalidad durante los años 2023-2024. Con los datos recolectados, se elaboró un diagrama de Forrester en el software Vensim PLE v.10.3.2 y se simuló escenarios, como parte de una línea de investigación relacionada con la toma de decisiones en organizaciones. El modelo incluye variables clave como generación, recolección, aprovechamiento, reciclaje y disposición final, y permite simular escenarios vinculados al reciclaje hasta el año 2030. Los resultados muestran que la implementación de estrategias orientadas al reciclaje podría reducir significativamente el volumen de residuos enviados al relleno sanitario, contribuyendo así a bajar costos, disminuir la huella de carbono y mejorar la sostenibilidad.

ABSTRACT

This study presents a System Dynamics model to analyze the management of Municipal Solid Waste in the city of Oberá, located in the province of Misiones, Argentina. The research is framed within the context of population growth, increasing waste generation, and the need to adopt sustainable strategies at the municipal level. The model was developed using data provided by the "Oberá Sustentable" program and other municipal departments during the years 2023–2024. Based on this information, a Forrester diagram was created using Vensim PLE v.10.3.2 software, and scenario simulations were conducted as part of a research initiative focused on decision-making processes in organizations. The model incorporates key variables such as generation, collection, recovery, recycling, and final disposal, and allows for the simulation of scenarios related to recycling through the year 2030. The results show that the implementation of recycling-oriented strategies could significantly reduce the volume of waste sent to the landfill, thereby contributing to cost savings, a lower carbon footprint, and improved sustainability.

INTRODUCCIÓN

La gestión de residuos es un desafío creciente para las localidades de todo el mundo debido al incremento de la generación de los desechos y la necesidad de adoptar prácticas sostenibles, consecuencia directa de la globalización y del comportamiento de los pobladores. En este contexto, es primordial contar con herramientas que permitan identificar y optimizar la gestión de residuos en un municipio a largo plazo (Niezwida et al., 2023).

Desde sus inicios, la simulación se ha convertido en una herramienta valiosa para los responsables de toma de decisiones, ya que permite proyectar escenarios futuros y evaluar el impacto de diferentes estrategias de gestión, pudiendo determinar las influencias entre variables mediante técnicas como la Dinámica de Sistemas (DS) (Forrester, 1981).

Este trabajo presenta un modelo de DS sobre la gestión de los residuos sólidos

domiciliarios, desarrollado para una localidad específica ubicada en la zona centro de la provincia de Misiones de Argentina. Las influencias de variables integran diversos aspectos críticos de la gestión de residuos, conformando una dinámica del sistema, que incluye la tasa de reciclaje, la generación de residuos y el crecimiento de la población, dado que la ciudad analizada es la segunda más grande de la provincia de Misiones, Argentina y posee una tasa de crecimiento poblacional positiva.

Relacionar las variables y establecer las influencias en materia de gestión de residuos en una localidad para un determinado tiempo, permite a los gestores municipales evaluar el impacto de posibles políticas y estrategias planeadas, para contribuir a la toma de decisiones hacia la gestión de residuos sostenible de dicho distrito.

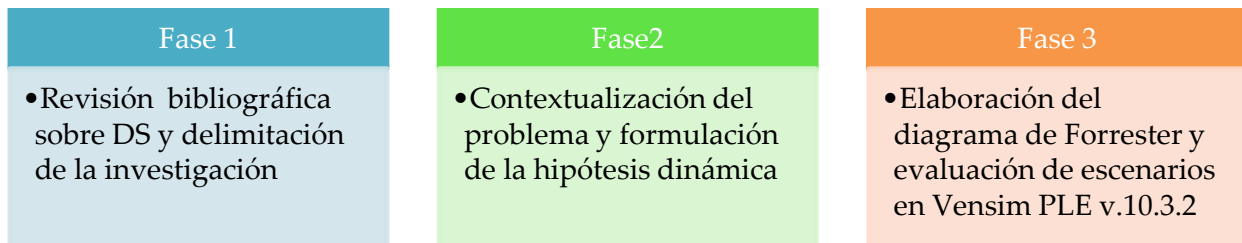
METODOLOGÍA

La metodología adoptada para llevar adelante la presente investigación se resume en la Figura 1. La investigación desarrollada posee un enfoque exploratorio-analítico que busca indagar y comprender fenómenos relacionados a la toma de decisiones, en este caso en particular vinculado con la gestión de los Residuos Sólidos Domiciliarios (RSD), así como establecer relaciones entre variables desde el punto de vista sistémico. Para ello,

en primer lugar, se realizó una revisión bibliográfica sobre DS y se delimitó el objeto de estudio: RSD. Luego, se contextualizó el problema y se formuló una hipótesis dinámica que permitió identificar relaciones causales clave. Finalmente, se construyó un modelo *ad hoc* de dinámica de sistemas para la localidad de Oberá, provincia de Misiones, de Argentina como estudio de caso para evaluar su sistema y escenarios futuros. Con datos recabados, se

elaboró un diagrama de Forrester y se implementó el modelo en el software Vensim PLE v.10.3.2, que permitieron simular los escenarios.

Figura 1. Exposición de la metodología para la elaboración de la investigación



RESULTADOS

En esta sección, se describen los resultados obtenidos.

Fase 1: Revisión bibliográfica sobre DS

En este apartado se indagó acerca del método de DS mediante la revisión de libros reconocidos y artículos científicos con el objetivo de comprender el surgimiento, su concepto, alcance y objetivo del método. Seguidamente se describen los principales aportes identificados en la revisión realizada.

La DS tiene su origen en los años 30, cuando se desarrolló la teoría de los servomecanismos, es decir, cuando surgen los instrumentos en los que existe una retroalimentación desde la salida a la entrada (García, 2004). Luego, en la década de los años 50, aprovechando los iniciales avances de la informática, Jay Forrester desarrolla en el MIT (Massachusetts Institute of Technology) la Dinámica Industrial, publicando en 1961 su obra "Industrial Dynamics" y es considerado el padre del método. Estudió las características de realimentación de la

información en la actividad industrial con el fin de demostrar como la estructura organizativa, la construcción (de políticas) y la demoras (en las decisiones y acciones) interactúan e influyen en el éxito de la empresa (Forrester, 1981).

La DS es un método en el cual se combinan el análisis y la síntesis, suministrando un ejemplo concreto de la metodología sistémica. Provee un lenguaje que permite "expresar las relaciones que se producen en el seno de un sistema y explicar cómo se genera su comportamiento" (Aracil y Gordillo, 1997). Asimismo, usa conceptos relacionados al campo del control realimentado para organizar información en un modelo de simulación por ordenador. Un ordenador ejecuta los papeles de los individuos en el mundo real, tal que la simulación resultante revela implicaciones del comportamiento del sistema representado por el modelo (Forrester, 1998).

Un sistema en sí mismo es intrínsecamente "dinámico", dado que mantiene una

armonía flexible a lo largo del tiempo. Además, es "complejo" porque está formado por una cierta cantidad de elementos, cada uno de los cuales interacciona con sus inmediatos y a veces es difícil estimar lo que pasará en un corto horizonte temporal (Muriello, 2016).

La DS se utiliza en las áreas de economía, medio ambiente, salud, ingeniería, educación y otras, en general para demostrar las políticas públicas, mejorar las organizaciones y sus capacidades, planteando modelos con un horizonte temporal determinado (Arroyo López et al., 2014; Ibarra & Redondo, 2015; Sukholthaman & Sharp, 2016; Jerez Pérez & Abreo Serrano, 2018; Andrade & Vega, 2019; Sanchez Muñoz et al., 2023) mediante la simulación a través de software tales como Simulink, AnyLogic, Stella, Vensim. En general en la simulación de DS se plantean Escenarios (E), es decir se planifican y alteran las variables del modelo y se determina el comportamiento del sistema. El objetivo de simular escenarios es mostrar implicancias, por ejemplo como en las siguientes investigaciones: "Simulación de un sistema de gestión sostenible de residuos sólidos en la ciudad de Khulna" (Islam et al., 2019), "Un enfoque de dinámica de sistemas para medidas políticas decisivas para la gestión sostenible de residuos sólidos urbanos en la ciudad de Khulna, Bangladesh" (Rafew et al., 2022); "Planificación de la producción de energía a partir de residuos sólidos urbanos: una combinación óptima de tecnologías mediante un enfoque híbrido de optimización de la dinámica de sistemas

de circuito cerrado" (Hosseinalizadeh et al., 2022), "Evaluación de la fragilidad del sector de residuos municipales en Serbia mediante modelos de dinámica de sistemas" (Jovičić et al., 2022), "Educación continua para la gestión del desperdicio de alimentos: una simulación de dinámica de sistemas " (De Oliveira et al., 2023), "Predicción del tratamiento y la disposición de residuos sólidos urbanos en zonas de gran altitud y bajas temperaturas basada en la dinámica de sistemas: un estudio de caso de Lhasa" (Liu et al., 2023), "Pronóstico y control de residuos sólidos urbanos (RSU) en la ciudad de Kaohsiung, Taiwán, mediante modelado de dinámica de sistemas" Yang, et al., 2024), "Explorando la evolución de la huella de carbono digital de China: una simulación basada en un enfoque de dinámica de sistemas", (Xu et al., 2024), "Combinando la dinámica de sistemas con el análisis energético para alcanzar los objetivos de ciudad cero residuos de China: Una perspectiva metabólica" (Zhao et al., 2025), "Evaluación del impacto de las políticas de la UE en la cadena de suministro de reciclaje: una perspectiva de dinámica de sistemas para el avance de la capacidad de reciclaje de envases" (Nguyen, et al., 2025). Los trabajos explorados, en su mayoría, simularon políticas y con ello los escenarios para determinar el comportamiento de las variables propuestas en el sistema.

Para el caso presentado en este artículo, se analiza y enfatiza en reducir los residuos potencialmente reciclables, los cuales conforman aproximadamente el 30% de los residuos del municipio (llamados también

Residuos Sólidos Urbanos) en cuestión. Por lo tanto, el reciclaje representa una oportunidad económica para los recolectores urbanos y es una posibilidad para disminuir los costos asociados al transporte y la disposición final de materiales reciclables en el relleno sanitario.

Fase 2: Contextualización del problema y formulación de la hipótesis dinámica

Tras completar la fase 1, se procedió a definir las variables involucradas en el modelo para la simulación de gestión de los residuos del municipio (estudio de caso). Para ello, se recabó información relevante y útil hacia la concreción de la investigación, que permitió determinar la relación de las variables (influencias) y con ello el objetivo del modelo.

El objetivo del modelo es simular la gestión de los residuos domiciliarios en la ciudad, específicamente los de tipo sólidos, también llamados RSU (Residuos Sólidos Urbanos) considerando las tasas actuales de aprovechamiento, reciclaje, recolección y disposición final. El enfoque principal de la simulación radica en representar variaciones en el aprovechamiento de materiales residuales potencialmente reciclables, así como su relación con el crecimiento poblacional proyectado para el período comprendido entre los años 2023 y 2030. Por lo tanto, la hipótesis dinámica del modelo desarrollado plantea que un aumento poblacional conlleva a un incremento en la generación de RSU. En consecuencia, si las tasas de reciclaje y reaprovechamiento no alcanzan niveles adecuados, la disposición final de residuos

en el relleno sanitario se incrementará según el crecimiento de la población.

Fase 3: Elaboración del Diagrama Causal y evaluación de escenarios

La identificación variable permitió elaborar el diagrama de influencias también conocido como causal, que es “el conjunto de relaciones entre las variables de un sistema” o estructura del sistema (Aracil, 2008).

En el diagrama de influencias, se incluye las relaciones de variabilidad mediante los denominados “bucles de alimentación” y es el primer paso para establecer relación de variables mediante dichos bucles, que pueden ser positivos (si aumenta la variable a medida que la otra se incrementa) o de alimentación negativa (si aumenta la variable la otra disminuye). Por ello, en el planteamiento del modelo, es importante considerar las variables que pueden ser cuantificadas con nombres representativos ó verbos, sin incluir variables redundantes (para no incurrir en ciclos iguales y sin sentido). También es necesario modelar con niveles de agregación justos y con dinámica (que varían en el tiempo), para ello se utilizó el software Vensim PLE v.10.3.2 en su versión libre y cuyo uso de variables (de nivel, de flujo y auxiliar) se explica a continuación.

Las variables de nivel del modelo, son las que representan cantidades acumuladas o almacenadas en el sistema, tales como los “depósitos” que se llenan o vacían con los flujos, por ejemplo, la Población, los RSU de un municipio, mientras que las variables de flujo describen la tasa de cambio o

transferencia entre los niveles (recolección, aprovechamiento).

Los flujos que entran o salen de los depósitos (variable de nivel) y hacen variar el nivel son "variables de flujo". También, en la representación de un modelo, se tienen las "variables auxiliares", aquellas que aportan información a las variables de flujo y hacen que éstas sean más comprensibles y colaboran con la estructura del modelo tales como tasa de crecimiento, tasa de reciclaje, tasa de aprovechamiento (Forrester, 1998; Sterman, 2000; Aracil, 2008).

El modelo de DS, implícitamente está formado por políticas, que son un conjunto

de reglas, que guían al responsable o modelador, según las cuales selecciona informaciones y genera decisiones (Schaffernicht, 2009).

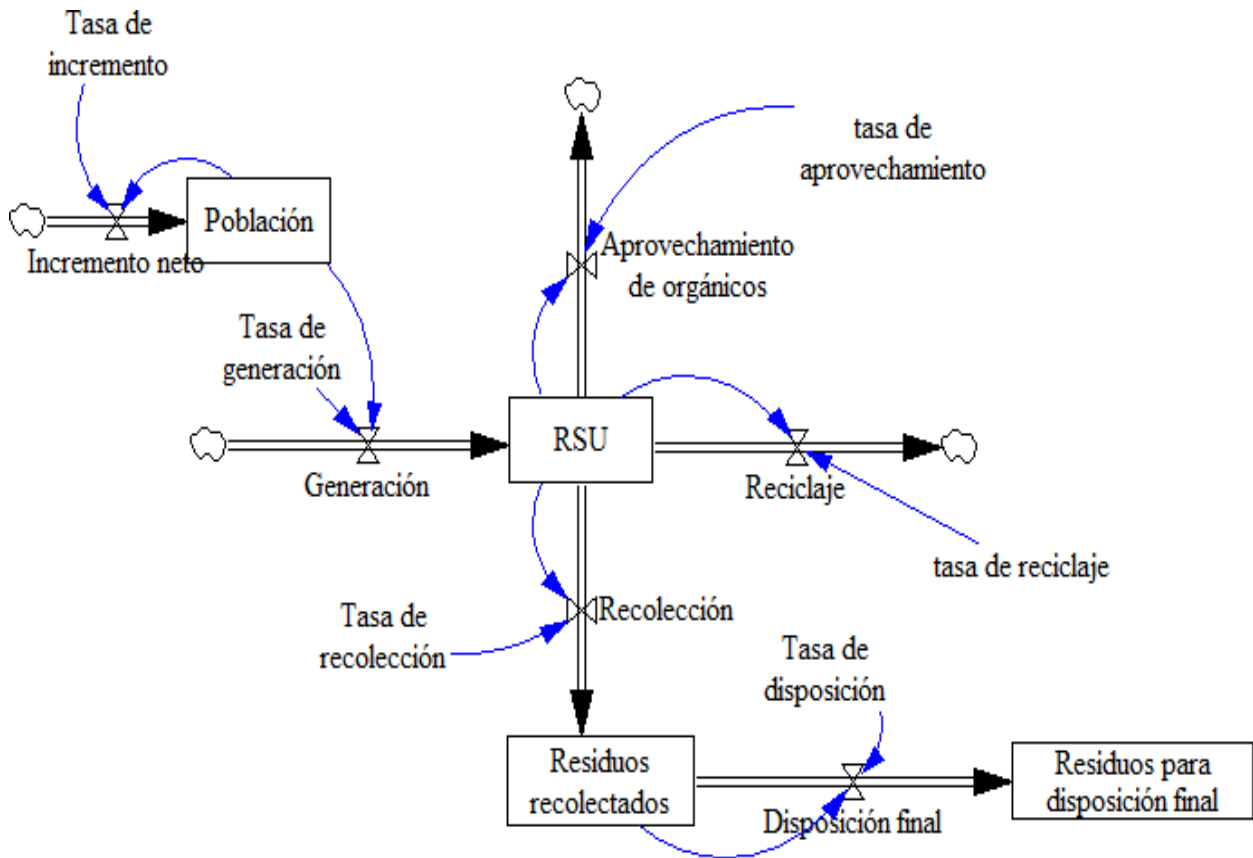
Parte de los datos para elaborar el modelo fueron recabados mediante trabajos de caracterización de los residuos que ha sido realizado el equipo de investigación con agentes de la municipalidad de la ciudad en el año 2023. Para el caso de estudio "gestión de residuos en un municipio" se tuvo en cuenta un conjunto de variables y su relación, las cuales se exponen en la Tabla 1. En la Figura 2 se visualiza el diagrama de Forrester que muestra la relación entre las variables descritas.

Tabla 1. Variables del modelo para el municipio de Oberá, Misiones, Argentina

Variable (V)	Denominación y unidades	Expresión de cálculo	Tipo de variable
RSU	Residuos sólidos urbanos (domiciliarios de municipio en ton/año)	$=\sum[G-AO-RECO-RECICL]$	V nivel
Residuos recolectados	Por empresa o el camión recolector municipal (ton/año)	$=\sum[RECOL-RDP]$	V nivel
Residuos para disposición final	Los que terminan en basurales o rellenos sanitarios (ton/año)	$RDF=\sum DF$	V nivel
Población	P (hab/año)	$=\sum IN$	V nivel
Disposición final	DF		V flujo
Aprovechamiento de orgánicos	AO (ton/año)	$=RSU*ta$	V flujo
Reciclaje	RECICL (ton/año)	$=RSU*tr$	V flujo
Recolección	RECO (ton/año)	$=RSU*trcc$	V flujo
Incremento neto	IN (hab/año)	$=P*ti$	V flujo
Generación	G (ton/año)	$G=tg*P$	V flujo
Tasa de generación	tg [ton/(hab*año)]	constante	V auxiliar
Tasa de aprovechamiento	ta (% /año)	constante	V auxiliar
Tasa de reciclaje	tr (% /año)	constante	V auxiliar
Tasa de recolección	trcc (% /año)	constante	V auxiliar
Tasa de disposición	td (% /año)	constante	V auxiliar
Tasa de incremento	ti (% /año)	constante	V auxiliar

Nota: elaborado con base en Ciplak et al., 2012; Simonetto et al., 2013; Ding et al., 2016; Wang, 2018; Sancheta et al., 2021.

Figura 2. Diagrama de Forrester



Nota: elaborado con Vensim PLE v.10.3.2 a partir de Rodríguez Andrade & Ibarra Vega (2019)

Como se observa en la Figura 2, los bucles de alimentación y relación de variables están dados por los arcos orientados. Por ejemplo, a mayor población, mayor generación de residuos (positivo); el flujo de RSU disminuye si el aprovechamiento de orgánicos aumenta (negativo).

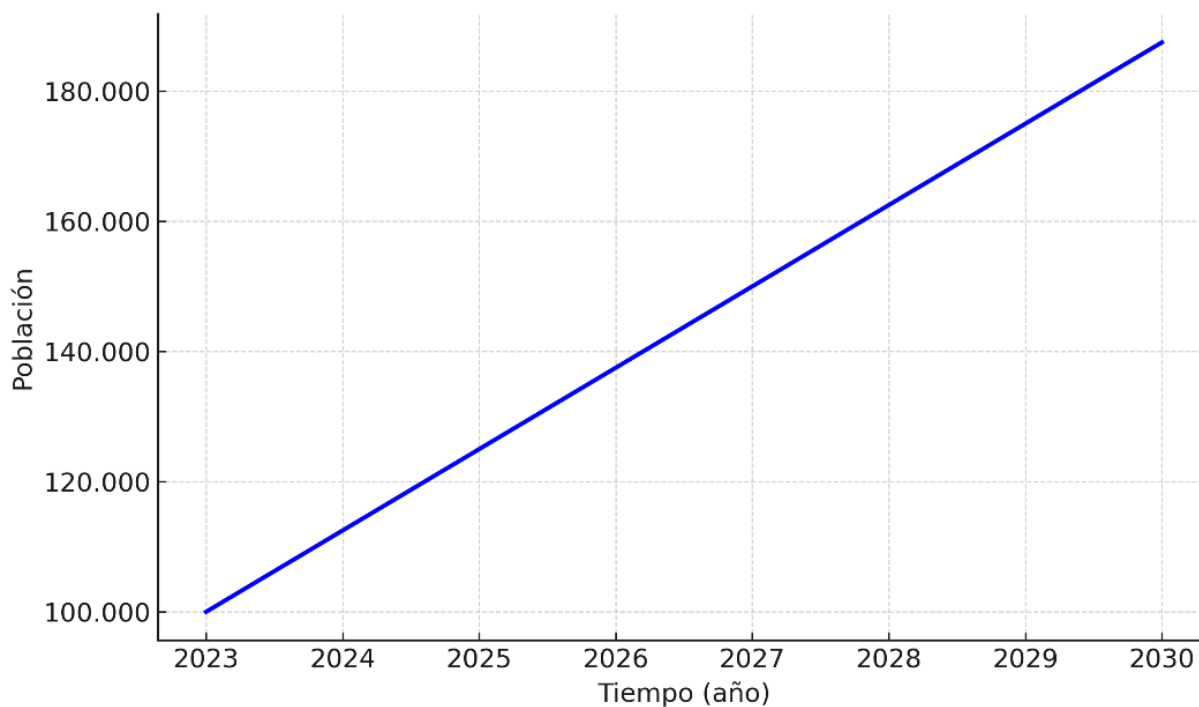
Si la población se incrementa y no se toman medidas para disminuir la cantidad de RSU a disponer en el relleno sanitario, habrá cada vez más RSU: definidos en el modelo como aquellos resultantes después de los procesos de aprovechamiento, para ser recogidos y destinados a disposición final (Figura 2).

El modelo elaborado permite evaluar políticas para la toma de decisiones (Forrester, 1998). Por lo tanto, los RSU pueden variar, por ejemplo, aumentando la separación en la fuente, lo que permitirá dos acciones: la primera, separación y aprovechamiento de reciclables y, por lo tanto, menos RSU (primer bucle de balance, del que se genera otro entre los residuos y el reciclaje); la segunda, más aprovechamiento de material orgánico y menos RSU (tercer bucle de balance, del que se desprende otro entre los residuos y el aprovechamiento).

Los RSU dependen de la generación y comportamiento de patrones de consumo, que a su vez depende de la cantidad de población y su condición socio-económica. En el municipio estudiado gran parte de los RSU generados son recogidos por vehículos recolectores. De esta forma, se crea el quinto bucle de balance, pues entre más residuos acumulados, habrá más recolección, los cuales deben ser llevados a RS. Es así como a mayor cantidad de residuos recolectados, más disposición final debe hacerse, ello permitió formular el sexto bucle del modelo (Figura 2).

Finalmente, si se genera más residuos y el reciclaje es bajo, aumenta la disposición final y habrá mayor cantidad de residuos en el relleno sanitario cada año, dado que la población aumenta, lo que hará que la capacidad del RS colapse en menos tiempo. A partir de los datos (tasa de incremento poblacional) en la Figura 3 se aprecia la evolución de la población en función del tiempo para el periodo simulado (2023-2030) que permite proyectar un incremento de población de aproximadamente 70 %.

Figura 3. Evolución de la población a través del tiempo (2023-2030)



Nota: elaboración propia adaptada de Vensim PLE v.10.3.2

Sin duda, disminuir el volumen de basura que hoy va al relleno sanitario, es un tema urgente.

En el municipio, estudio de caso, se recolecta aproximadamente el 90% de los residuos que se generan, pero, todavía una parte de ellos son abandonados o

depositados en basurales y caminos
vecinales (Figura 4).

Figura 4. Microbasural de la región, donde vecinos depositan residuos sólidos domiciliarios de manera intencional



Nota: fuente El territorio.com

Según el Informe de economía circular de Misiones, en el 2023 la localidad manejaba una tasa de aprovechamiento de orgánicos (1%) mientras que los materiales potencialmente reciclables presentaban una tasa de reciclaje mayor, con estimaciones de crecimiento (por arriba del 7%), dado que desde la provincia y el municipio se desarrollan estrategias para aprovechar los residuos mediante

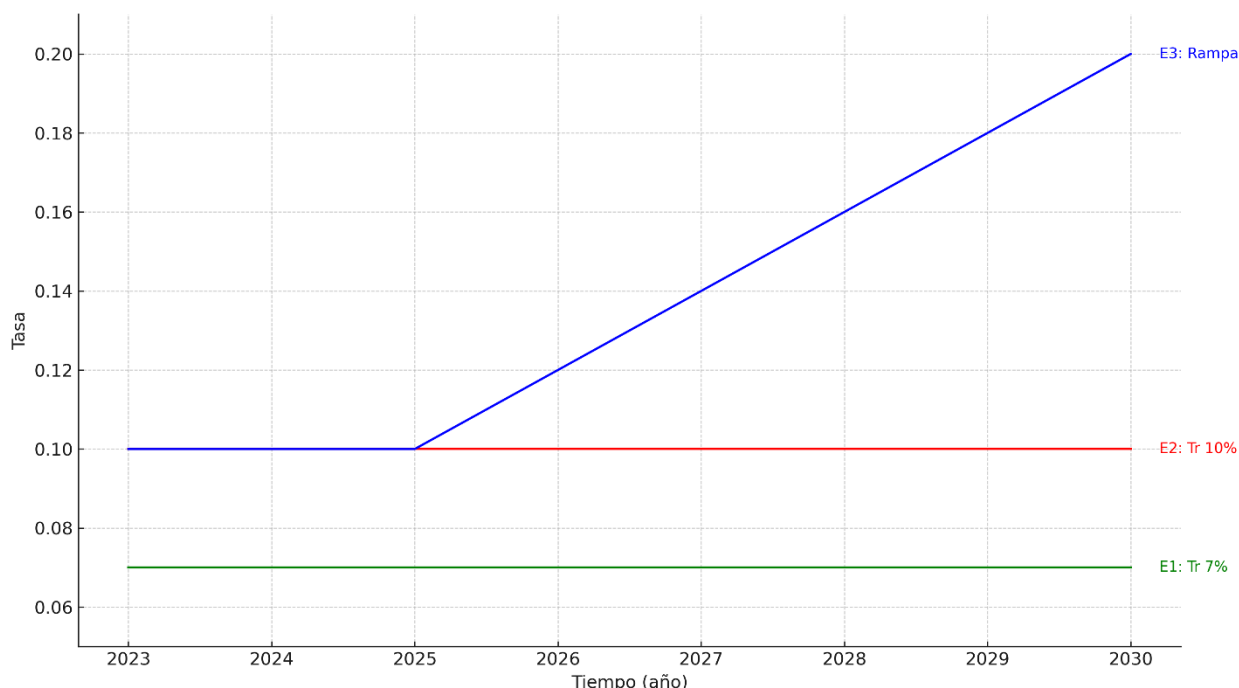
actividades de economía circular (Niezwida & Santacruz, 2024). En éste contexto, la provincia de Misiones posee solamente 2 rellenos sanitarios, uno que atiende a municipios de la zona sur y otra a la zona norte. Claramente ambos rellenos poseen un límite, sin embargo, hoy los mismos se expanden para poder disponer la basura de los municipios a los que atienden, la inquietud está en qué se hará

más adelante con estos miles de toneladas de basura que se están acumulando y ocupando el suelo misionero.

Con base en los datos y supuestos de implementar actividades de economía circular en el municipio, se simularon escenarios con variaciones en la tasa de reciclaje. En el escenario 1 (E1) se considera una tasa de reciclaje constante del 7 % para

todo el periodo simulado; en el escenario 2 (E2) un incremento al 10 %; y en el escenario 3 (E3) se incorpora una función rampa que mantiene una tasa de reciclaje del 10% hasta el 2025 y luego simula un aumento gradual del reciclaje desde el año 2025 y hasta el 2030. Dichas curvas se observan en la Figura 5.

Figura 5. Variación de la tasa de reciclaje



Nota: elaboración propia adaptada de Vensim PLE v.10.3.2

Tal como se observa en las Figura 5, el modelo permitió simular las variaciones en las tasas de reciclaje (tr) a partir de 3 escenarios (E1, E2 Y E3) y con ello se determinó la cantidad de residuos acumulados para el 2030.

Si el municipio mantiene en vigencia las estrategias de recuperación de reciclables,

se logrará la disminución significativa de residuos para disposición final en el Relleno Sanitario (RS) en 20230 y también un ahorro en transporte y a su vez la disminución de la Huella de Carbono (HC), teniendo en cuenta que se generan 2.68 kg CO₂/l diesel consumido. Aproximando que un camión transportador de residuos

consume 0.25l diesel/km recorrido y tomando las toneladas acumuladas para el 2030 según los escenarios planteados se

concretaron cálculos de costo de transporte y HC, los cuales se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2. Toneladas de residuos acumuladas en 2030 para diferentes tr. Fuente: Elaboración propia mediante datos de la simulación

Time (año)	2030	Costo de transporte	HC por transporte
Residuos para disposición final	t acumuladas (x1000)	USD (x1000)	[ton de CO ₂ eq]
E1: Reciclaje 7%	103.581	229.949	256.777
E2: Reciclaje 10%	100.889	223.974	250.105
E3: RAMPA (10% de reciclaje hasta 2025, luego se incrementa 2% por año)	99.649	221.221	247.030

Nota: elaborada a partir de datos de la simulación, considerando que un camión lleva 20 ton por carga y debe recorrer 74 km desde la Estación de Transferencia hasta el RS. Valor de KgCO₂ eq con base en IPPC (2019)

Cada tonelada de residuo depositada en un relleno sanitario emite entre 600 -1500 kg CO₂eq según su composición.

Teniendo en cuenta que la localidad estudiada está incorporando eco puntos y puntos limpios, si las estrategias persisten, permitirán disminuir el volumen de residuos a disposición final y con ello la HC. Sin embargo, para obtener este valor de HC total generada, es necesario conocer la composición de los RSD a disponer y la mitigación del entorno para determinar las cifras exactas de KgCO₂eq minimizadas (Manfredi et al., 2009, Araujo et al., 2022).

Discusión

El modelo, basado en datos de 2023-2024 de la municipalidad analizada, evidencia la problemática y sugiere que incentivar el reciclaje puede reducir el volumen de

residuos a disponer y con ello los costos financieros y ambientales.

La simulación indicó que para el año 2030 la población se incrementará en aproximadamente un 70 %. En este contexto, si se logra aumentar la tasa de reciclaje, se tendrá una disminución significativa en la cantidad de residuos que deben ser dispuestos en el relleno sanitario. Asimismo, la incorporación de la función rampa a partir del 2025 que significa un aumento en el reciclaje de forma incremental impacta favorablemente en la reducción de los residuos y con ello el costo de transporte y la HC generada.

El modelo de simulación se verificó a través de la revisión de las unidades por cada variable (una a una) y se comprobó la sintaxis mediante la herramienta propia del software. La verificación permitió

demostrar que el modelo representaba lo que se deseó construir.

La validación del modelo busca que el mismo cumpla con el objetivo para el que fué creado. Por lo tanto, el modelo se validó mediante la comparación con datos históricos del municipio a través de la consulta con expertos (Alonso y Álvarez, 2000).

En la validación del modelo, los expertos consultados expusieron sus ideas sobre la gestión y refirieron al actor "Estado" como ente facilitador de la gestión de los residuos del municipio, aunque se subraya la necesidad crítica de interacción entre actores clave —ciudadanos, empresas de recolección, organizaciones civiles y gestores municipales— para una gestión efectiva y sostenible. También destacaron la necesidad de contar con recursos para actividades de economía circular, de crear infraestructura y normativas, donde el Estado debe promover políticas de tipo "quien contamina paga" para internalizar

costos ambientales y reducir residuos en la fuente.

La simulación realizada para el año 2030 proyecta un crecimiento de la población de Oberá, lo que ejerce presión sobre la capacidad de disposición final. Los resultados demuestran que incrementar la tasa de reciclaje es una estrategia viable y urgente para mitigar esta acumulación de los RSU, reduciendo el volumen a disponer en el relleno sanitario. La presencia de microbasurales en la región, también resalta la necesidad de mayor concientización y fiscalización. A pesar de ciertas simplificaciones hechas en el trabajo, la investigación sugiere futuras líneas de trabajo para aprovechar capacidades regionales, tales como modelar un sistema de gestión colaborativa entre municipios con operaciones de compostaje, redes de venta de reciclables, subsidios a barrios sustentables, lo que podría optimizar el desarrollo sostenible regional.

CONCLUSIONES

La dinámica de sistemas es una metodología con gran potencial para simular sistemas complejos, dado que permitió simular la gestión de residuos de un municipio.

En vista al cambio climático, es urgente la incorporación de actividades de economía circular, dado que la cantidad de residuos a disponer dependen directamente de estas actividades. Además, dar un fin adecuado a la basura no solo permite disminuir la

contaminación, sino que previene enfermedades para los pobladores y minimiza costos de recolección y transporte, que hoy es recurso del Estado asignado para tal fin.

El modelo desarrollado resultó ser una herramienta útil al analizar diferentes escenarios y anticipar resultados para toma de decisiones. Se determinó las toneladas acumuladas de RSU según escenarios de reciclaje, donde se evidenció mejoría en la

gestión de residuos al reciclar y disminuir la cantidad de residuos para disposición final, costo y la HC. Por lo tanto, si se logran arraigar estrategias para aumentar el reciclaje en la ciudad estudio de caso, cada año se podrá recuperar más materiales y enviar menos residuos al relleno, lo que es beneficioso para el ambiente y la ciudad.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Oberá Sustentable de la municipalidad de la ciudad de Oberá, de la provincia de Misiones, Argentina por los datos brindados para llevar a cabo el presente artículo, a la estudiante Macarena

La investigación tiene como línea futura utilizar los datos y ecuaciones elaboradas para modelar un sistema de gestión colaborativa más amplio, vinculando municipios de la región de Misiones, Argentina con el objetivo de mostrar que la unión de capacidades puede contribuir al desarrollo local sostenible de las micro-regiones.

Chiara Villalba Auras por la adscripción a la investigación y al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas de Argentina (CONICET) por financiar parte de la investigación.

REFERENCIAS

Alonso, M. & Álvarez, Y. (2000). *El proceso de validación de los modelos socio-económicos dinámicos* [Documento de trabajo, Universidad de Oviedo]. Repositorio institucional de la Universidad de Oviedo. <http://hdl.handle.net/10651/45735>

Andrade, J. R., & Vega, D. I. (2019). Modelo para la evaluación dinámica de la gestión de residuos ordinarios de la ciudad de Bogotá y su influencia en el índice de calidad ambiental urbana. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 10(2), 143-162. <https://doi.org/10.22490/21456453.2411>

Aracil, J. & Gordillo, F. (1997). *Dinámica de sistemas*. Alianza Editorial.

Aracil, J. (2008). *Dinámica de sistemas*. Editorial ISDEFE.

Araujo, M. C., Medeiros, D. L., & Cohim, E. (2022). Desempenho energético e pegada de carbono de um sistema de esgotamento sanitário centralizado no Nordeste brasileiro.

Engenharia Sanitária e Ambiental, 27(1), 205–221. <https://doi.org/10.1590/s1413-415220200325>

Arroyo López, P.; Villanueva Bringas, M; Gaytán Iniestra, J. & García Vargas, M. (2014). Simulación de la tasa de reciclaje de productos electrónicos Un modelo de dinámica de sistemas para la red de logística. *Contaduría y Administración*, 59(1), 9-41. [https://dx.doi.org/10.1016/S0186-1042\(14\)71242-2](https://dx.doi.org/10.1016/S0186-1042(14)71242-2)

Bertalanffy, L.W. (1968). *Teoría general de los sistemas*. Fondo de Cultura.

Ciplak, N. & Barton, J.R. (2012). A system dynamics approach for healthcare waste management: a case study in Istanbul Metropolitan City, Turkey. *Waste Management & Research*, 30(6), 576-586. <https://doi.org/10.1177/0734242X12443405>

Wang, C. (2018). System dynamics simulation on municipal solid waste in Hong Kong. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers -*

- Municipal Engineer*, 171 (4), 185-195. <https://doi.org/10.1680/jmuen.16.00044>
- De Oliveira, C.T.; Bonfante, M.C.; Maldonado, M.U. & Soares, S.R. (2023). Continuing education to food waste management: a system dynamics simulation: a system dynamics simulation. *Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional*, 19(2), 484-506. <https://doi.org/10.54399/rbgdr.v19i2.6739>
- Ding, Z., Yi, G., Tam, V.W.Y. & Huang, T. A. (2016). A system dynamics-based environmental performance simulation of construction waste reduction management in China. *Waste Management*, 51 (1), 130-141. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.001>
- El Territorio. (2011, 5 de diciembre). *Preocupa la proliferación de microbasurales en los barrios de Misiones*. <https://www.territorioidigital.com.ar/notaimpresa>
- Forrester, J. W. (1981). *Dinámica industrial*. Editorial Ateneo.
- Forrester, J. W. (1998). System dynamics and the lessons of 35 years (Documento D-4808). MIT Sloan School of Management. Recuperado de <ftp://sysdyn.mit.edu/ftp/sdep/papers/D-4808.pdf>
- García, J. M. (2004). *Dinámica de sistemas: Modelado y simulación de procesos complejos*. Barcelona, España: Sysware.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación, 6ta edición*. McGraw-Hill.
- Hosseinalizadeh, R., Shakouri, H. & Izadbakhsh, H. (2022). Planning for energy production from municipal solid waste: An optimal technology mix via a hybrid closed-loop system dynamics-optimization approach. *Expert Systems with Applications*, 199, 116929. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.116929>
- Ibarra, D. W., & Redondo, J. M. (2015). Dinámica de sistemas, una herramienta para la educación ambiental en ingeniería. *Revista Luna Azul*, 41, 152-164. <https://doi.org/10.17151/10.17151/luaz.2015.41.9>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos. (n.d.). <https://www.indec.gob.ar/>
- Islam, MS, & Moniruzzaman, SM. (2019). Simulation of sustainable solid waste management system in Khulna city. *Sustainable Environment Research*, 29, 14. <https://doi.org/10.1186/s42834-019-0013-8>
- Jović, M., Bošković, G.B., Jović, N., Savković, M., Mačužić, I., Stefanović, M. & Klochkov, Y. (2022). Assessment of the Fragility of the Municipal Waste Sector in Serbia Using System Dynamics Modelling. *Sustainability*, 14 (2), 862. <https://doi.org/10.3390/su14020862>
- Jerez Pérez, F. S., & Abreo Serrano, A. F. (2018). *Modelo de simulación del impacto ambiental por desechos en Bucaramanga y su área metropolitana* [Trabajo de grado, Universidad Autónoma de Bucaramanga], Repositorio UNAB. <http://hdl.handle.net/20.500.12749/6970>
- Kammerer David, M. I., & Murgas Téllez, B. (2024). La innovación tecnológica desde un enfoque de dinámica de sistema. *Región Científica*, 3(1), 2024217. <https://doi.org/10.58763/rc2024217>
- Liu, Z., Zhang, Q. & Liu, H. (2023). Prediction of municipal solid waste treatment and disposal in high cold and high altitude area based on system dynamics: a case study of Lhasa. *Environmental Research Communications*, 5 (12), 125006. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ad1164>
- Manfredi S, Tonini D, Christensen TH, Scharff H. (2009). Landfilling of waste: accounting of greenhouse gases and global warming contributions. *Waste Management & Research*, 27(8), 825-836. <https://doi.org/10.1177/0734242X09348529>

- Martínez, S. y Requema, A. (1988). *Simulación dinámica por ordenador*. Alianza Editorial.
- Medina, H. R. B. (2016). Análisis del Balance Energético del Ecuador a través de Dinámica de Sistemas. *Compendium: Cuadernos de Economía y Administración*, 2(4), 61-78. <http://www.revistas.espol.edu.ec/index.php/compendium/article/view/76>
- Moriello, S. (2015). *Inteligencia natural y sintética*. Editorial Nueva librería.
- Moriello, S. (2016). *Dinámica de los sistemas complejos*. <https://biblioteca.umem.mx/books>
- Nguyen, T., Van Nguyen, T., Zhou, L., Duong, Q. H. & Ieromonachou, P. (2025). Assessing the impact of EU policies on recycling supply chain: a system dynamics perspective on advancing packaging recycling capacity. *Annals of Operations Research*, 1-53. <https://doi.org/10.1007/s10479-024-06438-y>
- Niezwidz, S.R. & Santacruz, F. (2024). *Primer informe de economía circular de la provincia de Misiones*. <https://cambioclimatico.misiones.gob.ar/wp-content/uploads/2024/09/Misiones-Informe-Economia-Circular-2024.pdf>
- Niezwidz, S. R., Juszczyszyn, J. C. M., & Gavazzo, G. B. (2023). Revisión bibliográfica sobre los residuos sólidos urbanos. *InGenio Journal: La revista de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería de la UTEQ*, 6(2), 30-39. <https://doi.org/10.18779/ingenio.v6i2.678>
- Osorio Hoyos, C. O. B. (2024). *Evaluando el efecto de las intervenciones basadas en modelos pequeños de dinámica de sistemas en modelos mentales de tomadores de decisión* [Trabajo de grado de Maestría, Universidad de Los Andes]. Repositorio Institucional Séneca. <https://hdl.handle.net/1992/74437>
- Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC). (2019). *Resumen para responsables de políticas: Informe de síntesis del Sexto Informe de Evaluación*. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
- Rafew, S.M. & Rafizul, I.M. (2022). A System Dynamics Approach of Decisive Policy Measures for Sustainable Municipal Solid Waste Management in Khulna City of Bangladesh. En: Hossain, S., Hossain, MS, Kaiser, MS, Majumder, SP, Ray, K. (eds.) *Proceedings of International Conference on Fourth Industrial Revolution and Beyond 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 437. Springer, Singapur. https://doi.org/10.1007/978-981-19-2445-3_11
- Rodríguez Andrade, J., & Ibarra Vega, D. (2019). Modelo para la evaluación dinámica de la gestión de residuos ordinarios de la ciudad de Bogotá y su influencia en el índice de calidad ambiental urbana. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 10(2), 143-162. <https://doi.org/10.22490/21456453.2411>
- Sancheta, L. N., Chaves, G. L. D., & Siman, R. R. (2021). The use of system dynamics on urban solid waste management: a literature analysis. *Gestão & Produção*, 28(3), e5336. <https://doi.org/10.1590/1806-9649-2021v28e5336>
- Sánchez-Muñoz, M. D. P., Uribe, J. J. G., & Agudelo, H. H. R. (2023). Sustentabilidad en las organizaciones del mercado de los residuos sólidos domiciliarios aprovechables en Neiva (Colombia): un análisis desde la Dinámica de Sistemas. *Criterio Libre*, 21(38), e2610682-e2610682. <https://doi.org/10.18041/1900-0642/criteriolibre.2023v21n38.10682>
- Schaffernicht, M. (2009). *Indagación de situaciones dinámicas mediante la dinámica de sistemas*. Universidad de Talca.
- Sterman, J.D. (2000). *Dinámica empresarial: Pensamiento sistémico y modelado para un mundo complejo*. Irwin/McGraw-Hill.
- Senge, P. (1998). *La quinta disciplina en la práctica*. Ediciones Granica.

- Simonetto, E. de O., Modro, NR & Dalmolin, LC (2013). Assessment of Energy Saving in Waste Recycling using System Dynamics. *Revista De Administração Da UFSM*, 6(2), 319–332. <https://doi.org/10.5902/198346597166>
- Sukholthaman, P., & Sharp, A. (2016). A system dynamics model to evaluate effects of source separation of municipal solid waste management: A case of Bangkok, Thailand. *Waste Management*, 52(1), 50-61. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.026>
- Vensim PLE (Edición de aprendizaje personal). <https://vensim.com/free-downloads/>
- Xu, R., Ji, K., Yuan, Z., Wang, C. & Xia, Y. (2024). Exploring the Evolution Trend of China's Digital Carbon Footprint: A Simulation Based on System Dynamics Approach. *Sustainability*, 10(10), 4230. <https://doi.org/10.3390/su16104230>
- Yang, H.T., Chao, H.R. & Cheng, Y.F. (2024). Forecasting and controlling of municipal solid waste (MSW) in the Kaohsiung City, Taiwan, by using system dynamics modeling. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(8), 9571-9579. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02897-0>
- Zhao, Y., Zhang, J., Zhao, K., Li, S. & Duan, X. (2025). Coupling system dynamics with emergy analysis to achieve China's zero-waste city goals: A metabolic perspective. *Journal of Cleaner Production*, 497, 145-178. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145178>

Autores

Sonia Romina Niezwida. Facultad de Ingeniería Oberá (UNaM). Departamento de Ingeniería Industrial, Oberá, Misiones, Argentina. Becaria CONICET.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7700-6834>

Email: sonia.niezwida@fio.unam.edu.ar

Juan Carlos Michalus. Facultad de Ingeniería Oberá (UNaM). Departamento de Ingeniería Industrial, Oberá, Misiones, Argentina.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4182-3380>

Email: michalus@fio.unam.edu.ar

Graciela Beatriz Gavazzo. Instituto de Materiales de Misiones (IMAM). Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales (UNaM), Posadas, Misiones, Argentina.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-5542-8684>

Email: graciela@fceqyn.unam.edu.ar

Recibido: 19-03-2025

Aceptado: 19-06-2025