

Artículo

# Modelado de emisiones de CO<sub>2</sub>-eq en escenarios de gestión de residuos: caso de estudio en una zona rural de Ecuador

## CO<sub>2</sub>-eq emissions modeling in waste management scenarios: a case study in a rural area of Ecuador

Karla Pérez-Anchundia <sup>1</sup>, Dolores Montesdeoca-Zambrano <sup>2</sup>, Emilio Vivas-Urdánigo <sup>3</sup>, Ángel Yépez-Rosado <sup>4</sup> y Juan Urdánigo-Zambrano <sup>5,\*</sup>

- <sup>1</sup> Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Ecuador, Quevedo; <https://orcid.org/0000-0002-2982-4535> , [karla.perez2017@uteq.edu.ec](mailto:karla.perez2017@uteq.edu.ec)
- <sup>2</sup> Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Ecuador, Quevedo; <https://orcid.org/0009-0009-5829-6944> , [dolores.montesdeoca2016@uteq.edu.ec](mailto:dolores.montesdeoca2016@uteq.edu.ec)
- <sup>3</sup> Universidad Estatal de Milagro, Ecuador, Milagro; <https://orcid.org/0000-0003-3562-1504> , [evivasu@unemi.edu.ec](mailto:evivasu@unemi.edu.ec)
- <sup>4</sup> Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Ecuador, Quevedo; <https://orcid.org/0000-0001-8660-8102> , [ayepez@uteq.edu.ec](mailto:ayepez@uteq.edu.ec)
- <sup>5</sup> Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Ecuador, Quevedo; Orcid <https://orcid.org/0000-0002-8972-0279> , [jurdanigo@uteq.edu.ec](mailto:jurdanigo@uteq.edu.ec)

\* Correspondencia: [jurdanigo@uteq.edu.ec](mailto:jurdanigo@uteq.edu.ec)

 <https://doi.org/10.70881/mcj/v3/n2/51>

**Cita:** Pérez-Anchundia, K., Montesdeoca-Zambrano, D., Vivas-Urdánigo, E., Yépez-Rosado, Ángel, & Urdánigo-Zambrano, J. (2025). Modelado de emisiones de CO<sub>2</sub>-eq en escenarios de gestión de residuos: caso de estudio en una zona rural de Ecuador. *Multidisciplinary Collaborative Journal*, 3(2), 25-42. <https://doi.org/10.70881/mcj/v3/n2/51>

**Recibido:** 27/03/2025  
**Revisado:** 20/04/2025  
**Aceptado:** 22/04/2025  
**Publicado:** 24/04/2025



**Copyright:** © 2025 por los autores. Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la [Licencia Creative Commons, Atribución-NoComercial 4.0 Internacional. \(CC BY-NC\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

[\(https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

**Resumen:** La gestión ineficiente de residuos sólidos urbanos (RSU) representa una fuente creciente de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), especialmente en entornos rurales con escasa infraestructura formal. Este estudio tuvo como objetivo caracterizar los RSU generados en la parroquia El Paraíso La 14, cantón El Carmen (Ecuador), evaluar la percepción ciudadana respecto a su manejo y estimar las emisiones de CO<sub>2</sub>-eq asociadas a distintos escenarios de disposición y reciclaje. Se aplicaron encuestas estructuradas, análisis multivariado de componentes principales, árboles de decisión y un modelo de balance de GEI basado en créditos y débitos. Los resultados mostraron una alta generación de residuos orgánicos y de jardinería, junto con una baja tasa de reciclaje formal (23%), suplida parcialmente por el sector informal. Las variables predictoras más relevantes fueron la frecuencia de limpieza y la disposición a separar residuos en el hogar. En cuanto a emisiones, el escenario actual presenta un balance neto positivo, mientras que escenarios de reciclaje optimizado reducen significativamente las emisiones de CO<sub>2</sub>-eq. Se concluye que la implementación de estrategias integradas de educación ambiental, separación en origen y mejora de la recolección diferenciada podría transformar el sistema local de gestión de RSU en una herramienta efectiva de mitigación climática.

**Palabras clave:** Gestión de residuos sólidos; emisiones de gases de efecto invernadero; sostenibilidad rural.

**Abstract:** Inefficient municipal solid waste (MSW) management is a growing source of greenhouse gas (GHG) emissions, especially in rural areas with limited formal infrastructure. This study aimed to characterize MSW generated in the parish of El Paraíso La 14, El Carmen (Ecuador), assess public perception of waste handling, and estimate CO<sub>2</sub>-equivalent emissions under different recycling and disposal scenarios. Structured surveys,

principal component analysis, decision trees, and a credit-debit based GHG estimation model were applied. Results revealed a high prevalence of organic and garden waste, with a low formal recycling rate (23%) partially offset by informal sector recovery. The most significant predictors of waste management behavior were cleaning frequency and willingness to separate waste at the household level. Regarding emissions, the current scenario resulted in a positive net CO<sub>2</sub>-eq balance, while optimized recycling scenarios significantly reduced GHG emissions. The findings suggest that implementing integrated strategies—environmental education, source separation, and improved differentiated collection—could shift local MSW systems toward becoming effective tools for climate mitigation.

**Keywords:** Solid waste management; greenhouse gas emissions; rural sustainability

## 1. Introducción

Las emisiones excesivas de gases de efecto invernadero son una problemática ambiental que enfrenta la humanidad, principalmente el Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), aportando directamente con el calentamiento global (Zhang et al., 2024). El mundo aún se encuentra lejos de mantener una relación equitativa con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, especialmente con el objetivo trece de acción por el clima, esto debido al rápido crecimiento de la población que contribuye a los desafíos más graves como el cambio climático y la sostenibilidad (Sanchez et al., 2024).

A nivel mundial se generan 2.010 millones de toneladas métricas de residuos sólidos urbanos con promedio de 0,74 kg de residuos por persona al día, donde el 33% no son gestionados de manera eficiente ni segura para el medio ambiente, y una gran parte son destinados a rellenos sanitarios (Tihin et al., 2023). La eliminación de residuos en estos vertederos a menudo termina en la acumulación y descomposición de estos, provocando la liberación de gases a la atmósfera (Un, 2023). Por lo tanto, durante este proceso de degradación se producen cantidades significativas de CO<sub>2</sub>, indicando que las emisiones producidas por vertederos son aún mayores que las generadas por métodos de procesamiento como la digestión anaeróbica o el compostaje (Yasmin et al., 2022).

La creciente demanda de soluciones ambientales para la gestión de residuos ha impulsado nuevas tecnologías que contribuyen a la reducción del dióxido de carbono, como el sistema de biogás que procesa los residuos sólidos urbanos convirtiéndolos en combustible, siendo además una fuente de energía renovable (Piboon et al., 2022). Sin embargo, en aquellos países de bajos y medianos ingresos económicos es difícil garantizar la calidad adecuada de los residuos, teniendo como factor crítico de éxito su poder calorífico y contenido de humedad, lo que incide en la viabilidad y eficiencia de este tipo de sistemas (Jaisue et al., 2024).

El Dióxido de Carbono es el contaminante que más contribuye al efecto invernadero en el mundo, su continua acumulación en la atmósfera ha provocado un aumento persistente de las temperaturas globales en las últimas décadas, teniendo consecuencias en la vida social y económica de los seres humanos (Chen et al., 2022). Los residuos sólidos urbanos son desechos provenientes de las actividades humanas, presentando desafíos sociales, económicos y ambientales que aportan a la crisis climática y disminución de los recursos (Gutberlet & Bramryd, 2025). Por lo tanto, la herramienta MRS-GEI es utilizada para el cálculo de las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes en el manejo de los residuos sólidos urbanos, basándose en una hoja de cálculo Excel

para cuantificar las emisiones totales de gases de efecto invernadero en toneladas anuales de CO<sub>2</sub>-eq (Salmerón-Gallardo et al., 2017).

En América Latina y el Caribe se genera aproximadamente el 10% de los residuos urbanos a nivel global (541.000 t/día), donde unas 145.000 toneladas al día son destinadas a basurales a cielo abierto (ONU, 2018). Por este motivo, en México al Sur de Tamaulipas se aplica la herramienta MRS-GEI con modelación de tres escenarios en una industria petroquímica, en el 2016 se generan 60t/a/CO<sub>2</sub>-eq, mientras que en el 2018 se asume la mayor cantidad de residuos sólidos no peligrosos con 799t/a/CO<sub>2</sub>-eq, especialmente por el reciclaje de metal ferroso, esto contribuye a la problemática de incremento de los residuos en el sector industrial (Castilleja et al., 2023).

En Ecuador, se producen cerca de 12,57 millones de toneladas métricas de residuos sólidos domiciliarios, así como 39,79 toneladas métricas de CO<sub>2</sub> per cápita. Los desechos generados en los hogares contribuyen a la emisión de gases de efecto invernadero, los cuales tienen un impacto negativo en el medio ambiente debido a su capacidad contaminante (Guajala et al., 2024). El CO<sub>2</sub> es responsable del 81,2% de las emisiones de gases de efecto invernadero, donde el 78% corresponde a la energía, un 10,1% a la agricultura, 8,7% a los procesos industriales y procesos industriales, y la gestión de residuos un 3,7% (Poma et al., 2024). En el país el manejo de residuos o desperdicios no son aprovechados en su totalidad por las personas y las empresas públicas o privadas; cantones como El Carmen tienen falencias en el manejo de residuos, y destinan un gran porcentaje a rellenos de quebradas naturales, vertientes y humedales (Solórzano Velásquez et al., 2024).

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo evaluar los escenarios de gestión de residuos sólidos urbanos domiciliarios y su impacto en la emisión de CO<sub>2</sub> equivalente en la parroquia El Paraíso La 14, cantón El Carmen. La acumulación recurrente de residuos durante los fines de semana, coincidiendo con días de feria, ha intensificado la proliferación de vectores, afectando la salud pública y generando externalidades ecológicas como la pérdida de biodiversidad y la contaminación de la cadena alimentaria. Esta situación se ve agravada por la existencia de un vertedero a cielo abierto sin mecanismos de separación ni tratamiento, lo que incrementa significativamente la carga ambiental y las emisiones de gases de efecto invernadero. El estudio propone una evaluación técnica y prospectiva de distintos escenarios de gestión, con el propósito de generar información primaria que contribuya al diseño de estrategias sostenibles y resilientes para la gestión de residuos sólidos en contextos rurales.

## 2. Materiales y Métodos

### 2.1. Sitio de estudio

La investigación se desarrolló en la parroquia El Paraíso La 14, ubicada en el cantón El Carmen, provincia de Manabí, Ecuador. Las muestras de residuos y encuestas fueron tomadas desde noviembre 2023 y enero 2024. El asentamiento rural se caracteriza por una infraestructura limitada para el manejo de residuos sólidos urbanos (RSU), con recolección intermitente, ausencia de separación en origen, y prácticas de disposición final inadecuadas, tales como vertido a cielo abierto y quema.

2.2. Percepción ciudadana de la gestión de residuos sólidos urbanos

Se aplicaron 350 encuestas estructuradas a residentes de la parroquia, seleccionados mediante muestreo aleatorio simple. El instrumento fue diseñado para evaluar la satisfacción ciudadana con el servicio de recolección, prácticas domésticas de limpieza, disposición final de residuos y predisposición a la separación en origen (Tabla 1). Los datos fueron analizados mediante estadística descriptiva e inferencial, empleando pruebas de independencia ( $\chi^2$ ) (Althuwaynee et al., 2014) y modelos de árbol de decisión (tipo CHAID) para identificar predictores relevantes de la percepción (Milanović & Stamenković, 2016).

**Tabla 1**

*Cuestionario de preguntas sobre percepción de gestión de residuos sólidos urbanos*

Pregunta	Opciones de respuesta
Nivel de estudio	0=Analfabeto; 1=Primaria; 2=Secundaria; 3=Profesional
Ocupación económica	0=Desempleado; 1=Empleado; 2=Finca; 3=Negocio
Ingreso económico	0=Menor sueldo; 1=Sueldo; 2=Mayor sueldo
Tipo de vivienda	0=Caña; 1=Bloque; 2=Villa
Su sueldo es invertido mayormente en	1=Alimento; 2=Educación; 3=Medicina
¿Cuántas veces realiza compras?	1=Diario; 2=Cada 8 días; 3=Cada 15 días; 4=1 vez al mes
¿Cuántas veces realiza limpieza en su hogar?	1=Cada 8 días; 2=Cada 15 días; 3=1 vez al mes
¿Cada cuánto realiza reuniones de amigos o familiares?	1=Cada año; 2=2 veces al año; 3=3 veces al año; 4=Siempre
¿Qué es lo primero que toma en cuenta al comprar productos?	1=Fecha de caducidad; 2=Precio
¿Compraría productos con certificación ambiental?	1=Sí; 2=No
¿Qué es lo que más vota al tacho de basura?	1=Fundas; 2=Restos de comida; 3=Pañal; 4=Botellas plásticas
¿En cuántos días se llena el tacho de basura?	1=2 días; 2=3 días; 3=5 días; 4=8 días
¿Recibe el servicio de recolección municipal?	1=Sí; 2=No
¿Cada cuánto se recolectan los residuos?	1=Sí; 2=No
¿Está satisfecho con el servicio de recolección?	1=Sí; 2=No
¿Estaría dispuesto a pagar más por un mejor servicio de recolección?	1=Sí; 2=No
¿Ha recibido charlas sobre manejo de residuos?	1=Sí; 2=No
¿Conoce sobre el valor agregado de los residuos?	1=Sí; 2=No
¿Ha aprovechado restos de comida?	1=Sí; 2=No
¿Estaría dispuesto a separar residuos en su hogar?	1=Sí; 2=No

¿Al comprar un producto toma en cuenta que sea reutilizable, reciclable o recargable?	1=Reutilizable; 2=Reciclable; 3=Recargable
---	--

### 2.3. Caracterización de residuos sólidos urbanos

La caracterización se realizó mediante el análisis físico de 600 muestras de residuos domiciliarios, recolectadas de forma aleatoria durante jornadas consecutivas en distintos sectores de la parroquia. Se empleó el método del cuarteo propuesta en la Norma Mexicana NOM-AA-015, esta técnica de muestreo consiste en extender el total de residuos sobre una superficie plana, dividirlos en cuatro partes iguales, eliminar dos diagonales opuestas y reunir las dos restantes para formar una muestra representativa. Este procedimiento se repitió sucesivamente hasta obtener un volumen manejable que mantuviera la representatividad.

### 2.4. Generación de gases de efecto invernadero de CO<sub>2</sub>-eq en escenarios de gestión de residuos sólidos urbanos

Se modelaron cuatro escenarios de gestión (*Status Quo*, mejora parcial, reciclaje optimizado y eficiencia máxima) para estimar las emisiones anuales de gases de efecto invernadero (GEI), expresadas en toneladas equivalentes de dióxido de carbono por año (ton/a CO<sub>2</sub>-eq). Para el cálculo de estas emisiones se utilizó la herramienta MRS-GEI, desarrollada en 2009 con el apoyo del Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo de Alemania (Pehnt et al., 2009). Esta herramienta, implementada en formato de hoja de cálculo Excel, permite cuantificar de forma estandarizada las emisiones totales de GEI asociadas al manejo de residuos sólidos urbanos. El modelo empleado se basa en un enfoque de balance de carbono tipo crédito-débito, considerando tanto las emisiones generadas por los métodos de disposición final como aquellas evitadas mediante actividades de reciclaje (Salmeron Gallardo et al., 2017).

### 2.5. Análisis de datos

Los datos cuantitativos fueron procesados mediante el software estadístico IBM SPSS (versión 22). Para validar la consistencia interna de las variables utilizadas en el análisis multivariado, se aplicaron el coeficiente Alfa de Cronbach ( $\geq 0,7$ ) (Lara Severino et al., 2019), la prueba de esfericidad de Bartlett (Loewen & Gonulal, 2015) y el índice de adecuación muestral de Kaiser-Meyer-Olkin ( $KMO \geq 0,7$ ;  $p < 0,05$ ) (Sarmiento & Costa, 2019). Posteriormente, se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP) sobre los datos de generación de residuos con el fin de reducir la dimensionalidad y agrupar variables altamente correlacionadas. Adicionalmente, se implementaron modelos de clasificación mediante árboles de decisión para predecir respuestas categóricas. Los modelos fueron validados a través de partición en conjuntos de entrenamiento y prueba (Han et al., 2019), evaluando métricas de precisión, error de clasificación y estabilidad (Alsagheer et al., 2017). Todas las pruebas estadísticas se interpretaron considerando un nivel de significancia de  $p < 0,05$ .

## 3. Resultados

### 3.1. Percepción ciudadana de la gestión de residuos sólidos urbanos

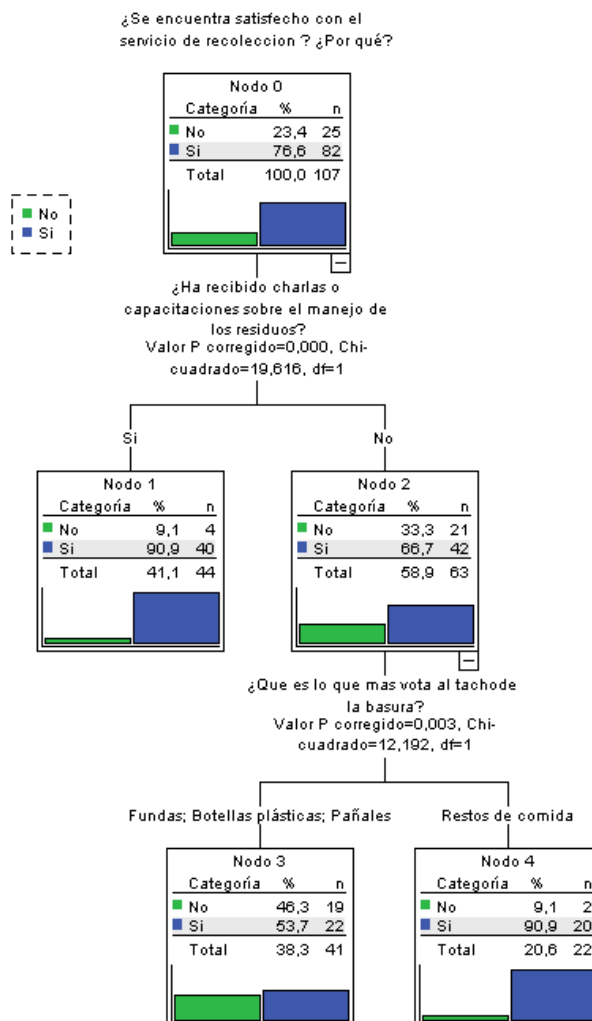
#### 3.1.1. Percepción ciudadana sobre el servicio de recolección de residuos

El análisis estadístico del modelo de árbol de decisión, basado en la percepción ciudadana sobre el servicio de recolección de residuos urbanos (RSU) en la parroquia El Paraíso La 14, mostró una alta proporción de satisfacción del servicio. En este sentido, el 76,6% de los encuestados indicó estar satisfecho, mientras que el 23,4% manifestó insatisfacción. El desempeño del modelo de clasificación mostró una capacidad predictiva global del 76,6%, con un 100% de acierto en la predicción de los individuos satisfechos y 0%. La estimación del riesgo de clasificación fue aceptable con un 0,234 con un error estándar de 0,041.

Respecto a los factores que influyen en la percepción, se observó que la variable más determinante fue la participación en capacitaciones sobre el manejo de residuos, con una asociación estadísticamente significativa ( $\chi^2 = 19,616$ ;  $p < 0,001$ ). El 58,9% de los encuestados no ha recibido capacitación, mientras que el 41,1% sí ha participado en actividades formativas. Aquellos que han recibido formación presentaron una tasa de satisfacción del 90,9%, en comparación con el 66,7% no capacitados. Adicionalmente, el análisis del tipo de residuos más comunes mostró que un 38,3% de los participantes deposita principalmente fundas, pañales y botellas plásticas, mientras que un 20,6% coloca residuos orgánicos como restos de comida ( $\chi^2 = 12,192$ ;  $p = 0,003$ ).

**Figura 1**

*Satisfacción por el servicio de recolección de residuos sólidos urbanos*



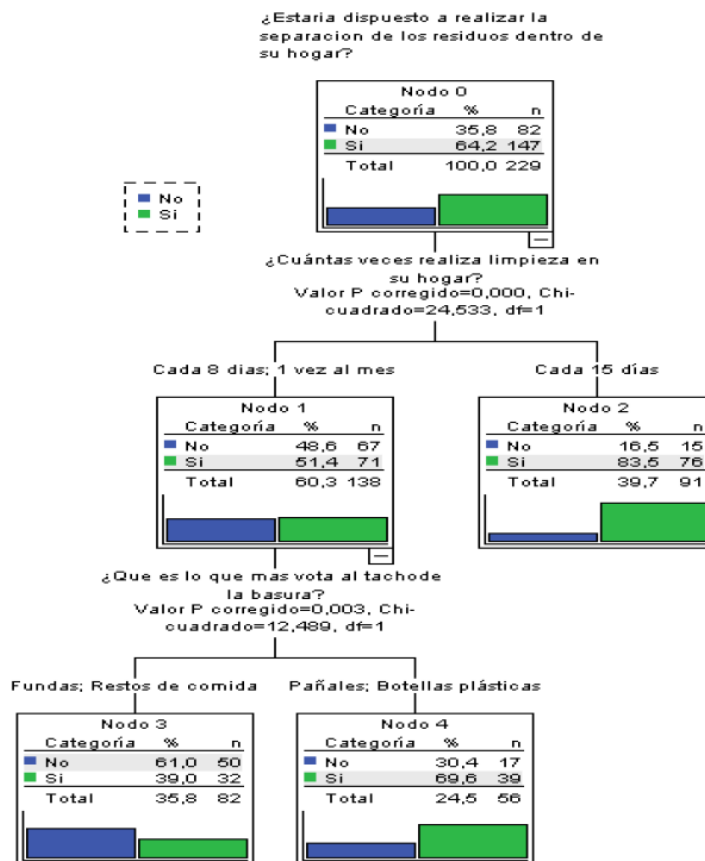
3.1.2. Disposición ciudadana a la separación de residuos en el hogar

El análisis de disposición ciudadana hacia la separación de residuos sólidos urbanos (RSU) dentro del hogar reveló que el 64,2% de los encuestados estaría dispuesto a realizar esta práctica, frente al 35,8% que no lo haría. Esta variable mostró una fuerte relación con la frecuencia de limpieza doméstica ( $\chi^2 = 24,533$ ,  $p < 0,001$ ), así como con el tipo de residuos más comúnmente generados ( $\chi^2 = 12,489$ ,  $p = 0,003$ ) (Figura 2). Además, los individuos que limpian sus hogares cada 15 días mostraron una mayor predisposición a separar residuos (83,5%), en comparación con aquellos que lo hacen cada 8 días o una vez al mes (51,4%).

En cuanto al tipo de residuos, se observó que quienes generan mayoritariamente pañales y botellas plásticas presentaron una disposición más alta a separar (69,0%) que aquellos cuyos residuos predominantes son fundas y restos de comida (38,9%). El modelo de clasificación construido para predecir la predisposición a separar residuos mostró un buen rendimiento general, con una precisión del 72,1% en la etapa de entrenamiento y del 70,2% en la prueba de validación. En la fase de entrenamiento, se obtuvo una tasa de acierto del 78,2% para los individuos predispuestos a separar y del 61,0% para los que no lo harían. En la fase de prueba, estas tasas fueron del 79,1% y 48,6%, respectivamente. El modelo presentó una buena estabilidad, la estimación del error fue de 0,279 (entrenamiento) y 0,298 (prueba), con errores estándar de 0,030 y 0,042.

Figura 2

Disposición ciudadana hacia la separación de residuos sólidos urbanos



3.2. Caracterización de residuos sólidos urbanos

3.2.1 Caracterización física de residuos sólidos urbanos

La caracterización física y cuantitativa de los residuos sólidos urbanos generados en la parroquia El Paraíso La 14 reveló una alta variabilidad de volumen y frecuencia de generación entre las distintas fracciones (Tabla 2). Los residuos orgánicos representaron la fracción predominante, con una media de 497,8 kg, seguidos por los residuos alimenticios con 422,4 kg y los residuos de jardinería con 211,1 kg. Entre los residuos inorgánicos, predominaron los residuos de construcción con un promedio de 129,7 kg, los envases de agroquímicos (96,6 kg) y los platos, cucharas y vasos desechables (89,1 kg).

Los pañales desechables (78,6 kg), envases de medicamentos (69,4 kg) y latas (81,8 kg) también mostraron valores altos. De la misma manera, se observó una producción media de 103,3 kg de botellas de vidrio y 30,6 kg de botellas plásticas, con una alta desviación estándar (97,7 kg y 39,4 kg respectivamente). En contraste, los residuos con menor generación promedio fueron los focos (6,5 kg), pilas (11,1 kg) y aceites usados (8,9 kg).

**Tabla 2**

*Generación total de residuos sólidos urbanos*

Residuos	Máximo (kg)	Media (kg)	Desviación estándar (kg)
Cartón	324,00	30,94	45,35
Botellas plásticas	194,40	30,62	39,39
Residuos orgánicos	1490,40	497,80	311,42
Pilas	130,02	11,11	25,21
Pañales desechables	388,80	78,60	84,43
Platos cucharas y vasos desechables	388,80	89,05	85,83
Residuos de alimentos	1684,80	422,43	277,25
Latas	324,00	81,83	73,62
Fundas plásticas	194,40	22,53	35,12
Envases de agroquímico	388,80	96,60	93,38
Envases de medicamentos	324,00	69,43	77,93
Papel	453,60	23,18	45,21
Focos	129,6	6,46	19,79
Residuos de jardinería	1296,00	211,11	254,17
Botellas de vidrios	972,00	103,29	97,66
Residuos de construcción	1620,00	129,70	202,59
Aceites usados	194,40	8,94	25,85

### 3.2.2 Análisis de componentes principales de caracterización de residuos urbanos

Se aplicó un Análisis de Componentes Principales (PCA) precedido por una prueba de fiabilidad mediante el coeficiente Alfa de Cronbach, registrando un valor de 0,736, lo cual indica una consistencia interna moderada. Esta prueba permitió reducir el número inicial de 17 a 9 variables, eliminando tipos de residuo con bajo nivel de homogeneidad, tales como cartón, botellas plásticas, pilas, fundas plásticas, papel, focos, botellas de vidrio y aceite usado. Posteriormente, se procedió a verificar la adecuación muestral y la factibilidad del análisis factorial mediante la prueba de esfericidad de Bartlett y el índice Kaiser-Meyer-Olkin (KMO), arrojando un valor de 0,77 y una significancia estadística de  $p = 0,001$ , lo que validó la aplicabilidad del modelo.

Posteriormente, utilizando un criterio de comunalidad  $\geq 0,7$ , se depuraron otras variables (latas, pañales y utensilios desechables), quedando finalmente tres componentes que explican el 80% de la varianza total en la caracterización de los residuos sólidos domiciliarios. El primer componente fue el más explicativo, con un 28,7% de la varianza, seguido del segundo y tercer componente, ambos con una contribución del 25,5% y 25,8%, respectivamente.

La matriz de componentes rotados presentada en la Tabla 3 muestra la agrupación de los residuos sólidos urbanos en tres dimensiones principales tras la aplicación del Análisis de Componentes Principales (ACP). El Componente 1 está fuertemente cargado por residuos de alimentos (0,918) y residuos orgánicos (0,879), asociados a residuos biodegradables de origen doméstico. El Componente 2 agrupa predominantemente los residuos de construcción (0,915) y los residuos de jardinería (0,814), señalando una dimensión relacionada con residuos inorgánicos de gran volumen provenientes del entorno habitacional y agrícola. Finalmente, el Componente 3 está caracterizado por cargas elevadas en envases de agroquímicos (0,855) y envases de medicamentos (0,848), lo cual indica una dimensión de residuos peligrosos asociados tanto a la actividad agrícola como al consumo médico

**Tabla 3**

*Matriz de componente rotado de residuos sólidos urbanos*

	Componente		
	1	2	3
Residuos orgánicos	0,879	0,177	0,190
Residuos de alimentos	0,918	0,148	0,030
Envases de agroquímicos	0,087	0,020	0,855
Envases de medicamentos	0,101	0,083	0,848
Residuos de jardinería	0,291	0,814	0,156
Residuos de construcción	0,064	0,915	0,025

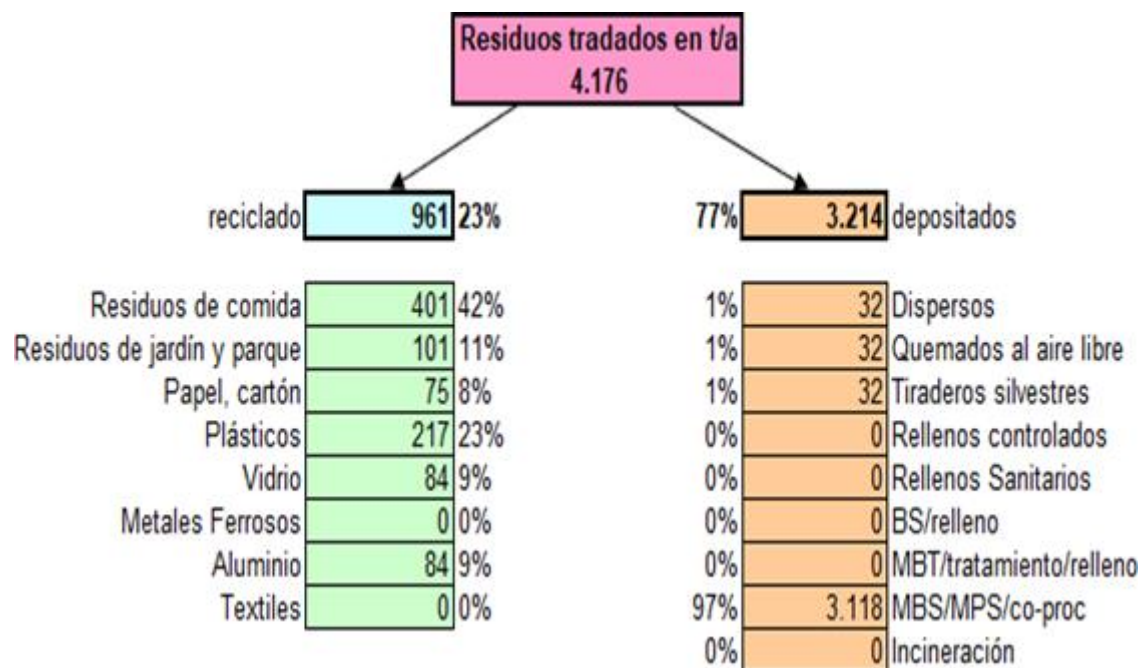
### 3.3. Disposición final de residuos y generación de gases de efecto invernadero

La generación anual estimada de residuos sólidos urbanos (RSU) en la parroquia El Paraíso La 14 alcanza un total de 4.176 toneladas, de las cuales únicamente el 23%

(961 ton/a) es reciclado, principalmente por el sector informal. Las fracciones recicladas en mayor proporción corresponden a residuos de comida (42%), residuos de jardinería (11%), plásticos (23%), papel y cartón (8%), vidrio (9%) y aluminio (9%) (Figura 3). Este porcentaje de recuperación resulta insuficiente frente al 77% restante (3.214 ton/a) que es sometido a disposición inadecuada o poco eficiente, con el 97% (3.118 ton/a) destinado a prácticas como relleno controlado y coprocesamiento (MBS/MPS/co-proc), y un 1% (32 ton/a) arrojado a tiraderos dispersos, quema al aire libre o sitios silvestres.

**Figura 3**

*Reciclaje y disposición anual final de los RSU*

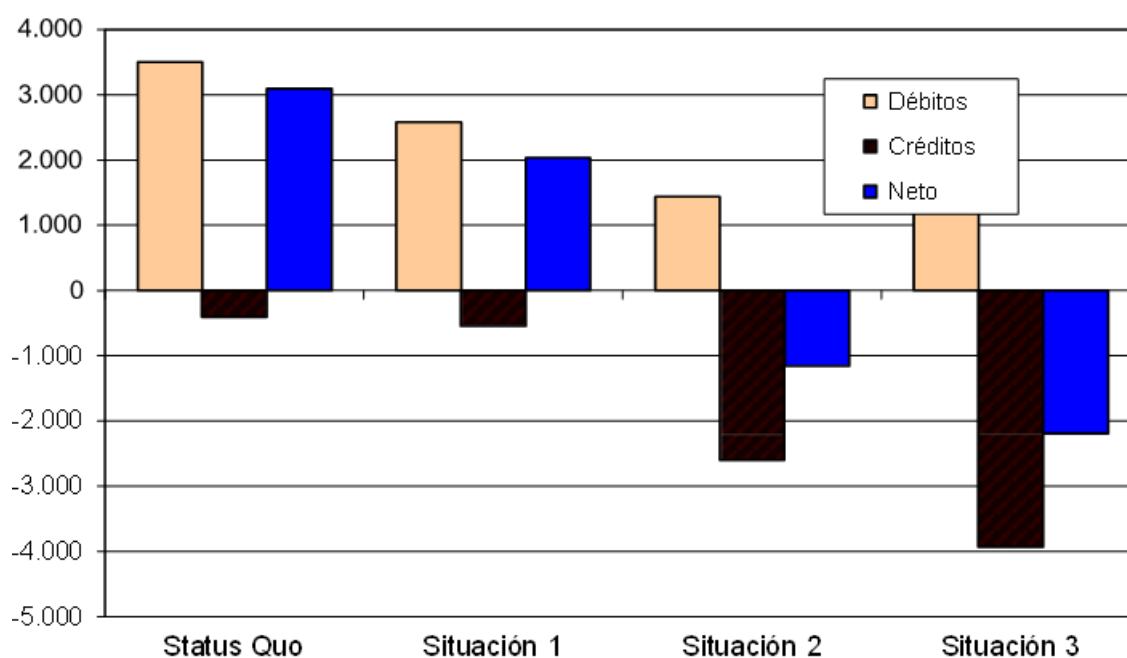


La estimación de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas al manejo de residuos sólidos urbanos en la parroquia El Paraíso La 14 fue realizada considerando débito (emisiones generadas), crédito (emisiones evitadas) y el balance neto resultante. Estas estimaciones fueron expresadas en toneladas equivalentes de dióxido de carbono por año (ton/a CO<sub>2</sub>-eq), incluyendo tanto las actividades de disposición final como las de reciclaje.

En el escenario actual (*Status Quo*), el débito generado por el manejo de residuos reciclables y no reciclables oscila entre 3.497 y 1.437 ton/a CO<sub>2</sub>-eq, dependiendo de la eficiencia de recolección y disposición. Por su parte, los créditos derivados de la recuperación de materiales reciclables por el sector informal que representan emisiones evitadas se estimaron entre -3.933 y -405 ton/a CO<sub>2</sub>-eq. Esto implica un resultado neto que varía entre 3.092 y -2.186 ton/a CO<sub>2</sub>-eq, según el escenario de manejo adoptado (Figura 4).

**Figura 4**

*Estimación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) bajo distintos escenarios de gestión de residuos sólidos urbanos*



*Nota:* Status Quo: gestión actual con débitos elevados y créditos bajos, resultando en un balance neto positivo de emisiones y una alta huella climática. Situación 1: mejora parcial del reciclaje, con reducción de débitos sin revertir el balance neto. Situación 2: reciclaje optimizado y reducción de disposición inadecuada; se alcanzan créditos mayores que los débitos, generando un balance neto negativo. Situación 3: máxima eficiencia en la gestión integral; se obtiene el mejor desempeño climático, con un balance neto fuertemente negativo, contribuyendo a la mitigación efectiva de GEI.

#### 4. Discusión

Este estudio evaluó distintos escenarios de gestión de residuos sólidos urbanos (RSU) y su impacto en las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente en una zona rural del Ecuador. A partir de los resultados obtenidos, se propone un análisis de los factores determinantes que condicionan la gestión local, sus implicaciones ambientales y las oportunidades de mejora. En particular, la percepción ciudadana mostró una relación directa con los hábitos domésticos, como la frecuencia de limpieza y la disposición a separar residuos, lo que tiene implicaciones significativas para la gobernanza ambiental local. En este contexto, la educación ambiental emerge como una estrategia más efectiva para promover cambios sostenibles en el comportamiento de los residentes, en comparación con incentivos económicos o medidas coercitivas (Tong et al., 2020; Zhang et al., 2019). La persistencia de un sistema de gestión ineficiente puede derivar en consecuencias críticas, incluyendo un aumento en los riesgos para la salud pública, especialmente en entornos vulnerables como escuelas, hospitales y espacios comunitarios en zonas empobrecidas (da Paz et al., 2020).

El 76,6% de los encuestados manifestó estar satisfecho con el servicio de recolección de residuos; sin embargo, esta percepción estuvo significativamente influenciada por factores como la participación en capacitaciones sobre gestión adecuada de residuos

Peng et al., 2021) y la frecuencia de limpieza en el hogar. Específicamente, los residentes que habían asistido a charlas ambientales sobre el valor económico y ecológico de los residuos mostraron una mayor disposición a realizar la separación en origen, en línea con lo reportado por Liao & Li, (2019). La aplicación de árboles de decisión permitió identificar perfiles poblacionales con mayor potencial de cambio, lo que refuerza la viabilidad de implementar estrategias educativas focalizadas. En este contexto, los hallazgos respaldan la necesidad de que las políticas públicas prioricen componentes de formación y comunicación social como parte estructural de los sistemas de gestión de residuos, complementando las mejoras operativas o infraestructurales (Zeng et al., 2016).

El análisis de la composición física de los residuos sólidos urbanos generados en la parroquia El Paraíso La 14 revela una predominancia de fracciones orgánicas, que en conjunto superan el 70% del total caracterizado. Este resultado coincide con lo reportado por Chamorro et al., (2023), quienes identificaron un 66% de residuos orgánicos en zonas rurales de la Amazonía ecuatoriana. De manera más amplia, esta tendencia es coherente con lo observado en entornos rurales y periurbanos de América Latina, donde el nivel socioeconómico y los patrones de consumo doméstico favorecen la generación de residuos biodegradables (Hettiarachchi et al., 2018). Estos hallazgos destacan el alto potencial de aprovechamiento de la fracción orgánica mediante tecnologías de valorización como el compostaje comunitario o la digestión anaeróbica a pequeña escala (Taboada-González et al., 2013). No obstante, se identificó también una presencia significativa de residuos peligrosos, como envases de agroquímicos (96,6 kg) y medicamentos (69,4 kg), cuya disposición sin mecanismos de segregación ni tratamiento especializado representa un riesgo considerable para la salud humana y el medio ambiente (Sooriyaarachchi et al., 2019).

El análisis multivariado mediante ACP permitió clasificar los residuos en tres dimensiones funcionales: biodegradables, voluminosos inorgánicos y peligrosos, lo cual aporta una base técnica para diseñar identificar tendencias en composición física de los residuos (Hatik & Gatina, 2017), rutas diferenciadas de recolección y tratamiento (Noori et al., 2009). En áreas rurales, la ausencia de separación en origen y el uso de un vertedero a cielo abierto sin control agravan la carga ambiental del sistema, contaminando fuentes de agua superficiales y subterráneas (Weldeyohanis et al., 2022), suelo, plantas y animales (Vaverková et al., 2018). Además, los vertederos a cielo abierto impactan negativamente la calidad del aire por la generación de malos olores, polvo, materia orgánica e incremento de vectores como roedores (Ilankoon et al., 2018), así como también, han sido identificados como avenidas que contribuyen a la emisión de gases de efecto invernadero (Siddiqua et al., 2022).

El análisis multivariado mediante componentes principales (ACP) permitió clasificar los residuos sólidos urbanos en tres dimensiones funcionales: biodegradables, inorgánicos voluminosos y peligrosos. Esta categorización ofrece una base técnica para identificar tendencias en la composición física de los residuos (Hatik & Gatina, 2017) y para diseñar rutas diferenciadas de recolección y tratamiento (Noori et al., 2009). En zonas rurales, la ausencia de separación en origen y el uso de vertederos a cielo abierto sin control aumentan significativamente la carga ambiental del sistema, generando contaminación en fuentes de agua superficiales y subterráneas (Weldeyohanis et al., 2022), así como en suelos, vegetación y fauna local (Vaverková et al., 2018). Además, este tipo de

disposición genera impactos negativos sobre la calidad del aire debido a la emisión de olores ofensivos, partículas de polvo, descomposición de materia orgánica y proliferación de vectores como roedores e insectos (Ilankoon et al., 2018). Asimismo, los vertederos a cielo abierto han sido identificados como una fuente significativa de emisión de gases de efecto invernadero (Siddiqua et al., 2022).

La estimación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) permitió cuantificar con precisión el impacto climático asociado a los distintos escenarios de gestión de residuos sólidos urbanos evaluados. En el escenario actual (Status Quo), caracterizado por la disposición dominante en vertederos sin tratamiento y un reciclaje informal limitado, se registró un balance neto de hasta +3.092 toneladas anuales de CO<sub>2</sub>-eq, reflejando una huella climática considerable. Este patrón coincide con lo reportado por Salmeron Gallardo et al. (2015), quienes señalan que el 94% de los residuos generados en el estado de Guerrero, México, son depositados en botaderos a cielo abierto. Frente a este panorama, la implementación progresiva de medidas como el aumento del reciclaje, la reducción de prácticas de disposición inadecuada y la adopción de estrategias de valorización de residuos sólidos urbanos demuestran un potencial mitigador significativo, tal como lo sugieren estudios recientes (Ambaye et al., 2023).

En particular, el escenario de máxima eficiencia (Situación 3) permitió revertir el saldo neto de emisiones, alcanzando hasta -2.186 toneladas anuales de CO<sub>2</sub>-eq, lo que posiciona al sistema como un potencial sumidero de carbono en términos operativos. Este resultado se alinea con modelos conceptuales de transición hacia la economía circular, los cuales enfatizan la necesidad de mejorar la eficiencia en el uso de recursos y fortalecer la resiliencia urbana mediante estrategias como la separación en origen y el reciclaje, considerados pilares en la descarbonización del sector residuos (Sesay & Fang, 2025). Asimismo, la aplicación de la herramienta MRS-GEI resultó eficaz para modelar impactos ambientales en contextos rurales con limitaciones de información primaria, demostrando su utilidad como instrumento de planificación y toma de decisiones (Carmen-Niño et al., 2019).

Si bien los resultados de este estudio ofrecen una base sólida para comprender la dinámica de los residuos sólidos urbanos y sus implicaciones climáticas en contextos rurales, existen algunas limitaciones que deben ser reconocidas. En primer lugar, la estimación de emisiones de CO<sub>2</sub>-eq se basó en parámetros estándar integrados en la herramienta MRS-GEI, lo cual, aunque metodológicamente válido, no incluye mediciones directas de gases ni factores de emisión específicos del territorio. En segundo lugar, la caracterización de residuos y la percepción ciudadana se construyeron sobre muestras puntuales, lo que puede limitar la generalización de los hallazgos a otras zonas rurales con realidades diferentes. Adicionalmente, el análisis económico y la factibilidad técnica de los escenarios propuestos no fueron abordados en profundidad. Por lo tanto, futuras investigaciones deberían incluir mediciones empíricas de emisiones, modelos de evaluación económica de ciclo de vida, y estudios longitudinales que permitan observar la evolución de la gestión bajo condiciones operativas reales. Asimismo, la replicación de este enfoque metodológico en otras localidades permitiría validar su aplicabilidad y generar recomendaciones más robustas para el diseño de políticas públicas integrales en materia de residuos y cambio climático.

## 5. Conclusiones

La gestión de residuos sólidos urbanos en contextos rurales, como en la parroquia El Paraíso La 14, se encuentra condicionada por una estructura operativa limitada, una alta proporción de residuos orgánicos (más del 70% del total caracterizado) y una escasa participación en el reciclaje formal, restringido al 23% y ejecutado mayoritariamente por el sector informal. A través del uso combinado de análisis multivariado, árboles de decisión y componentes principales, se identificó que variables como la recepción de capacitaciones ambientales, la frecuencia de limpieza doméstica y el tipo de residuo generado influyen significativamente tanto en la disposición a separar residuos ( $\chi^2 = 24,533$ ,  $p < 0,001$ ) como en la percepción del servicio de recolección (satisfacción del 76,6%). Particularmente, la educación ambiental se demostró como un factor transformador, incrementando en más de 24 puntos porcentuales la predisposición al cambio conductual en comparación con quienes no han recibido formación.

Desde una perspectiva climática, los escenarios evaluados evidencian que es posible transformar un sistema con un saldo neto positivo de hasta +3.092 ton/a CO<sub>2</sub>-eq en uno con balance negativo de hasta -2.186 ton/a CO<sub>2</sub>-eq mediante la implementación de estrategias de reciclaje optimizado, reducción de disposición inadecuada y valorización de residuos. Estos resultados consolidan un marco técnico replicable en territorios con restricciones institucionales, y reafirman el papel de la gestión de residuos como herramienta clave para la mitigación del cambio climático en áreas rurales. En conjunto, este estudio aporta evidencia científica que articula dimensiones sociales, técnicas y ambientales, ofreciendo directrices concretas para el diseño de políticas públicas orientadas a la sostenibilidad territorial, la resiliencia climática y la transición hacia esquemas de economía circular inclusivos.

**Contribución de los autores:** Conceptualización, DM-Z y KP-A; metodología, JU-Z; software, JU-Z; validación, DM-Z; análisis formal, AY-R; investigación, DM-Z y KP-A; recursos, EV-U y DM-Z; conservación de datos, JU-Z; redacción del borrador original, KP-A y DM-Z; redacción, revisión y edición, JU-Z y AY-R; visualización, EV-U; supervisión, JU-Z; administración del proyecto, JU-Z; obtención de financiación, JU-Z. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

**Financiamiento:** Esta investigación no ha recibido financiación externa.

**Agradecimientos:** A la Universidad Técnica Estatal de Quevedo (UTEQ), Facultad de Ingeniería y Facultad de Ciencias Pecuarias y Biológicas.

**Declaración de disponibilidad de datos:** Los datos están disponibles previa solicitud los autores de correspondencia: [jurdanigo@uteq.edu.ec](mailto:jurdanigo@uteq.edu.ec)

**Conflicto de interés:** Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

## Referencias Bibliográficas

- Alsagheer, R. H., Alharan, A. F. H., & Al-Haboobi, A. S. (2017). Popular decision tree algorithms of data mining techniques: a review. *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*, 6(6), 133–142.
- Althuwaynee, O. F., Pradhan, B., Park, H.-J., & Lee, J. H. (2014). A novel ensemble decision tree-based CHI-squared Automatic Interaction Detection (CHAID) and multivariate logistic regression models in landslide susceptibility mapping. *Landslides*, 11, 1063–1078.
- Ambaye, T. G., Djellabi, R., Vaccari, M., Prasad, S., Aminabhavi, T. M., & Rtimi, S. (2023). Emerging technologies and sustainable strategies for municipal solid waste valorization: challenges of circular economy implementation. *Journal of Cleaner Production*, 423, 138708.
- Carmen-Niño, V. Del, Rodríguez Herrera, A. L., Juárez-López, A. L., Sampedro-Rosas, M. L., Reyes-Umaña, M., & Silva-Gómez, S. E. (2019). The importance of participation and corresponsibility in the management of solid urban waste. *Acta Universitaria*, 29.
- Castilleja, R. V., Aguilar, J. C. R., & Jasso, J. S. H. (2023). Impacto ambiental por residuos no peligrosos en una industria petroquímica del Sur de Tamaulipas, México. *Nova Scientia*, 15(31), 7. <https://doi.org/https://doi.org/10.21640/ns.v15i31.3203>
- Chamorro, W. P., Sarduy-Pereira, L. B., Decker, M., & Diéguez-Santana, K. (2023). Gestión de los residuos sólidos en áreas rurales, un análisis de una parroquia de la amazonia ecuatoriana. *Revista de I+ D Tecnológico*, 19(1), 1–11.
- Chen, J., Dai, L., Mataya, D., Cobb, K., Chen, P., & Ruan, R. (2022). Enhanced sustainable integration of CO2 utilization and wastewater treatment using microalgae in circular economy concept. *Bioresource Technology*, 366, 128188. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128188>
- da Paz, D. H. F., Lafayette, K. P. V., Holanda, M. J. de O., Sobral, M. do C. M., & Costa, L. A. R. de C. (2020). Assessment of environmental impact risks arising from the illegal dumping of construction waste in Brazil. *Environment, Development and Sustainability*, 22, 2289–2304.
- Guajala, M. E. R., Álvarez, E., Abril, C. M., & Vaca, W. (2024). El consumo de los hogares y la contaminación en el Ecuador. *Revista Ciencia UNEMI*, 17(44), 79–90. <https://doi.org/https://doi.org/10.29076>
- Gutberlet, J., & Bramryd, T. (2025). Reimagining urban waste management: Addressing social, climate, and resource challenges in modern cities. *Cities*, 156, 105553. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cities.2024.105553>
- Han, J., Fang, M., Ye, S., Chen, C., Wan, Q., & Qian, X. (2019). Using decision tree to predict response rates of consumer satisfaction, attitude, and loyalty surveys. *Sustainability*, 11(8), 2306.
- Hatik, C., & Gatina, J.-C. (2017). Waste production classification and analysis: a PCA-induced methodology. *Energy Procedia*, 136, 488–494.
- Hettiarachchi, H., Ryu, S., Caucci, S., & Silva, R. (2018). Municipal solid waste management in Latin America and the Caribbean: Issues and potential solutions from the governance perspective. *Recycling*, 3(2), 19.

- Ilankoon, I., Ghorbani, Y., Chong, M. N., Herath, G., Moyo, T., & Petersen, J. (2018). E-waste in the international context—A review of trade flows, regulations, hazards, waste management strategies and technologies for value recovery. *Waste Management*, *82*, 258–275.
- Jaisue, N., Ketjoy, N., Kaewpanha, M., & Thanarak, P. (2024). A comparison on the critical success factors of MSW and RDF power plant development in Thailand: Using an interpretive structural modelling and cross-impact matrix multiplication applied to classification analysis. *Heliyon*, *10*(15).  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35395>
- Lara Severino, R. del C., Garcia Orri, J. J., Parra Perez, J. J., Zuniga Juarez, M., Rejon Lorenzo, G. G., & Benitez Gomez, A. A. (2019). *Internal consistency and factorial structure of the dietary disinhibition survey through the contributions of Exploratory Factor Analysis with Varimax rotation, the Pearson correlation coefficient and Cronbach alpha coefficient*.
- Liao, C., & Li, H. (2019). Environmental education, knowledge, and high school students' intention toward separation of solid waste on campus. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *16*(9), 1659.
- Loewen, S., & Gonulal, T. (2015). Exploratory factor analysis and principal components analysis. *Advancing Quantitative Methods in Second Language Research*, 182–212.
- Milanović, M., & Stamenković, M. (2016). CHAID decision tree: Methodological frame and application. *Economic Themes*, *54*(4), 563–586.
- Noori, R., Abdoli, M. A., Ghasrodashti, A. A., & Jalili Ghazizade, M. (2009). Prediction of municipal solid waste generation with combination of support vector machine and principal component analysis: A case study of Mashhad. *Environmental Progress & Sustainable Energy: An Official Publication of the American Institute of Chemical Engineers*, *28*(2), 249–258.
- ONU. (2018). *Perspectiva de la Gestión de Residuos en América Latina y el Caribe. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Oficina para América Latina y el Caribe*.
- Pehnt, M., Höpfner, U., & Heidelberg, I. (2009). *Wasserstoff-und Stromspeicher in einem Energiesystem mit hohen Anteilen erneuerbarer Energien: Analyse der kurz- und mittelfristigen Perspektive: Kurzgutachten; im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). ifeu-Inst. für Energie-und Umweltforschung*.
- Piboon, P., Damrongsak, D., Wongsapai, W., & Yodchumpoo, P. (2022). Greenhouse gas emission reduction in refuse derived fuel production from municipal solid waste. *AIP Conference Proceedings*, *2681*(1), 20031.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1063/5.0115998>
- Poma, M. R., Vaca, M. Z., Basantes, K. Á., & Cáceres, M. G. (2024). Desarrollo financiero y emisiones de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) en Ecuador. Período 1971-2020. *HOLOPRAXIS*, *8*(2), 144–164.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.61154/holopraxis.v8i2.3674>
- Salmeron Gallardo, Y. A., Cabrera Cruz, R. B. E., Sampedro Rosas, M. L., Rosas Acevedo, J. L., Rolon Aguilar, J. C., & Juarez Lopez, A. L. (2017). Emisiones de Gases de Efecto

Invernadero en Vertederos de Residuos Sólidos Urbanos Huella de Carbono en Acapulco, México. *Revista Iberoamericana de Ciencias*.  
<http://ri.uagro.mx/handle/uagro/1063>

Salmeron Gallardo, Y. A., Juarez Lopez, A. L., Ruíz Ayala, S., Tapia Tintos, H., & Arellano Wences, H. J. (2015). *Determinación de emisiones de Gases de Efecto Invernadero, por Residuos Sólidos Urbanos en Guerrero*.

Salmerón-Gallardo, Y. A., Cabrera-Cruz, R. B. E., Juárez-López, A. L., Sampedro-Rosas, M. L., Rosas-Acevedo, J. L., & Rolón-Aguilar, J. C. (2017). Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en Vertederos de Residuos Sólidos Urbanos. *Revista Iberoamericana de Ciencias*.

Sanchez, D., Cerqueus, A., Habibi, K., & Dolgui, A. (2024). Bi-objective Sustainable Crowdfunding with Multi Types of Occasional Drivers. *IFAC-PapersOnLine*, 58(19), 498–503. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.09.261>

Sarmiento, R. P., & Costa, V. (2019). Confirmatory factor analysis--a case study. *ArXiv Preprint ArXiv:1905.05598*.

Sesay, R. E. V., & Fang, P. (2025). Circular Economy in Municipal Solid Waste Management: Innovations and Challenges for Urban Sustainability. *Journal of Environmental Protection*, 16(2), 35–65.

Siddiqua, A., Hahladakis, J. N., & Al-Attiya, W. A. K. A. (2022). An overview of the environmental pollution and health effects associated with waste landfilling and open dumping. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(39), 58514–58536.

Solórzano Velásquez, B. B., Pinargote Pinargote, H. M., Villarreal Cobena, Á. W., & Gallardo Dueñas, D. P. (2024). Reutilización de residuos de construcción en las empresas constructoras del Ecuador. *Revista Científica Multidisciplinar G-Nerando*, 5(2), ág-236. <https://doi.org/https://doi.org/10.60100/rcmq.v5i2.266>

Sooriyaarachchi, P., Abeywickrama, L. M., & Sandika, A. L. (2019). Identifying Farmers' Practices on Disposal of Empty Agrochemical Containers: A Case Study on Container Management Program of Croplife Sri Lanka-2017. *Journal of Agricultural Extension*, 3(2), 101–105.

Tihin, G. L., Mo, K. H., Onn, C. C., Ong, H. C., Taufiq-Yap, Y. H., & Lee, H. V. (2023). Overview of municipal solid wastes-derived refuse-derived fuels for cement co-processing. *Alexandria Engineering Journal*, 84, 153–174.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.10.043>

Tong, Y., Liu, J., & Liu, S. (2020). China is implementing “Garbage Classification” action. *Environmental Pollution*, 259, 113707.

Un, C. (2023). A Sustainable Approach to the Conversion of Waste into Energy: Landfill Gas-to-Fuel Technology. *Sustainability 2023, Vol. 15, Page 14782*, 15(20), 14782.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su152014782>

Vaverková, M. D., Adamcová, D., Zloch, J., Radziemska, M., Boas Berg, A., Voběrková, S., & Maxianová, A. (2018). Impact of municipal solid waste landfill on environment—a case study. *Journal of Ecological Engineering*, 19(4), 55–68.

- Weldeyohanis, Y. H., Aneseyee, A. B., & Sodango, T. H. (2022). Evaluation of current solid waste disposal site based on socio-economic and geospatial data: a case study of Wolkite town, Ethiopia. *GeoJournal*, 87(2), 585–601.
- Yasmin, N., Jamuda, M., Panda, A. K., Samal, K., & Nayak, J. K. (2022). Emission of greenhouse gases (GHGs) during composting and vermicomposting: Measurement, mitigation, and perspectives. *Energy Nexus*, 7, 100092.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100092>
- Zhang, B., Lai, K., Wang, B., & Wang, Z. (2019). From intention to action: How do personal attitudes, facilities accessibility, and government stimulus matter for household waste sorting? *Journal of Environmental Management*, 233, 447–458.
- Zhang, B., Zhang, Y., Yang, Y., & Wang, Z. (2024). Aluminum saving and CO2 emission reduction from waste recycling of China's rooftop photovoltaics under carbon neutrality strategy. *IScience*, 27(10), 110669.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.isci.2024.110669>