TECNOLOGÍA QUÍMICA
UNIVERSIDAD DE ORIENTE
Vol.46 (2026)
ISSN: 2224-6185

Gestión integral de residuos sólidos urbanos bajo el concepto de economía circular: municipio Sancti Spíritus

Integrated Management of Urban Solid Waste within the concept of circular economy: municipality of Sancti Spíritus

Julio Pedraza-Garciga[1]* https://orcid.org/0000-0003-1780-5297
Iriana Thalía Fernández-Echemendía[3] https://orcid.org/0009-0009-4649-4783
Leidy Aquino-Pérez[2] https://orcid.org/0009-0005-0065-7445
Ronaldo Francisco Santos-Herrero[3] https://orcid.org/0000-0002-5009-2084
Teresa Margarita Cárdenas-Ferrer[3] https://orcid.org/0000-0003-2054-3136

[1] Unidad de Desarrollo e Innovación - Centro de Estudios de Energía y Procesos Industriales (UDI – CEEPI), Universidad de Sancti Spíritus "José Martí Pérez" (UNISS), Sancti Spíritus, Cuba
[2] Subdelegación de Medio Ambiente, Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA), Sancti Spíritus, Cuba
[3]Departamento de Ingeniería Química, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas (UCLV), Las Villas, Cuba
*Autor para la correspondencia. Correo electrónico: juliopedrazadayana@gmail.com

RESUMEN

La gestión inadecuada de los residuos sólidos urbanos (RSU) constituye un problema ambiental crítico en el municipio de Sancti Spíritus, Cuba, donde el vertedero municipal se encuentra colapsado y opera sin sistemas de control de lixiviados ni aprovechamiento de biogás. La investigación tuvo como objetivo evaluar dos alternativas tecnológicas para la gestión integral de los RSU mediante la caracterización de su composición y el análisis técnico económico de las dos propuestas. Se aplicó el método de cuarteo en tres zonas del municipio, determinándose una generación anual de 29 762 t, con una composición promedio de 48,7 % de materia orgánica, 17,4 % de plástico, 8,6 % de textiles y 6,9 % de papel y cartón. La Alternativa 1 propone la recogida selectiva en el origen, con compostaje de la fracción orgánica, mientras que la

Alternativa 2 propone una planta de selección mecánica combinada con digestión anaerobia para producción de biogás, electricidad y abono orgánico. Ambas alternativas resultaron técnica y económicamente viables. La Alternativa 1 mostró mayor rentabilidad (VAN = 34 813 673 USD, TIR = 965 %, PRD = 6,5 años), pero depende de la separación en el origen por parte de la población. La Alternativa 2 (VAN = 26 144 692 USD, TIR = 101 %, PRD = 6,5 años) elimina esta incertidumbre al procesar residuos mezclados en una planta de tratamiento y ofrece el beneficio adicional de generar energía renovable. Se recomienda la implementación de la Alternativa 2 como solución más robusta para las condiciones específicas de Sancti Spíritus.

Palabras clave: residuos sólidos urbanos; economía circular; digestión anaerobia; compostaje; gestión integral.

ABSTRACT

Inadequate management of municipal solid waste (MSW) constitutes a critical environmental problem in the municipality of Sancti Spíritus, Cuba, where the municipal landfill is overflowing and operates without leachate control systems or biogas utilization. This research evaluated two technological alternatives for the integrated management of MSW through characterization of its composition and techno-economic analysis of both proposals. The quartering method (NMX-AA-15-1985) was applied in three areas of the municipality, determining an annual generation of 29,762 tons, with an average composition of 48,7 % organic matter, 17,4 % plastic, 8,6 % textiles, and 6,9 % paper and cardboard. Alternative 1 proposed source-separated collection with composting of the organic fraction, while Alternative 2 proposed a mechanical sorting plant combined with anaerobic digestion for biogas, electricity, and organic fertilizer production. Both alternatives proved technically and economically viable. Alternative 1 showed higher profitability (NPV = USD 34,813,673, IRR = 965 %, PB = 6,5 years) but depends on source separation by the population. Alternative 2 (NPV = USD 26,144,692, IRR = 101%, PB = 6,5 years) eliminates this uncertainty by processing mixed waste and offers the additional benefit of generating renewable energy. Implementation of Alternative 2 is recommended as a more robust solution for the specific conditions of Sancti Spíritus.

Keywords: municipal solid waste, circular economy; anaerobic digestion; composting; integrated management.

Recibido: 14/04/2026
Aceptado: 04/08/2026

Introducción

La gestión de los residuos sólidos urbanos (RSU) se ha convertido en uno de los desafíos ambientales más apremiantes a nivel global. La producción anual mundial de RSU supera actualmente los dos mil millones de toneladas, con proyecciones que indican un crecimiento continuo en las próximas décadas si no se implementan cambios sustanciales en los patrones de producción y consumo. Según estimaciones del Banco Mundial, para el año 2050 la generación global de residuos podría alcanzar los 3,8 mil millones de toneladas anuales, lo que representa un incremento del 70 % respecto a los niveles actuales. [(1)]

América Latina y el Caribe constituyen la región más urbanizada del mundo, donde más del 80 % de la población vive en ciudades. La gestión de los residuos sólidos municipales plantea grandes desafíos para los países de la región, donde se prevé que la generación de residuos aumente de las 541 000 toneladas/día en el 2014 a 670 000 toneladas/día para el año 2050. [(2)] Según el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), aproximadamente el 45 % de todos los residuos en la región acaban en basurales a cielo abierto, ocasionando graves impactos sobre la salud y el medio ambiente, y apenas se recupera un 10 % de lo que se genera. [(3)]

Cuba no presenta una situación diferente. La gestión de los RSU constituye un problema aún no resuelto, agravado por las limitaciones económicas propias del país y por la obsolescencia del parque técnico destinado a la recolección y transporte. A pesar de que Cuba se encuentra entre los cinco países de la región de América Latina y el Caribe que menos residuos sólidos urbanos generan por habitante (0,81 kg/hab/día), la disposición final en vertederos a cielo abierto, sin los sistemas de control adecuados continúa siendo la práctica predominante. [(4, 5)]

En la provincia de Sancti Spíritus, la Empresa de Servicios Comunales (actualmente transformada en Unidad Empresarial de Base Comunales) es la entidad encargada de brindar los servicios de recolección, transporte, tratamiento y disposición de residuos sólidos. En el caso específico del municipio de Sancti

Spíritus, los RSU son depositados en un vertedero municipal ubicado al suroeste de la ciudad, donde son dispuestos a cielo abierto sin tratamiento previo, con serias deficiencias operacionales, higiénico sanitario y ambiental. Este vertedero, que inició sus operaciones en 1986 con un área de 13,42 hectáreas, ha visto reducida su superficie a solo 8,4 hectáreas debido a invasiones ilegales de viviendas familiares, encontrándose actualmente con su vida útil agotada. [6, 7]

La disposición inadecuada de los residuos genera contaminación del suelo y las aguas superficiales y subterráneas a través de los lixiviados, emisiones de gases de efecto invernadero, proliferación de vectores de enfermedades y afectaciones a la calidad de vida de la población cercana. [8, 9] La fracción orgánica, que representa la mayor proporción de los RSU en contextos latinoamericanos, constituye tanto un desafío como una oportunidad: si no se trata adecuadamente genera impactos ambientales negativos, pero puede ser valorizada mediante tecnologías biológicas como el compostaje o la digestión anaerobia para producir compost y biogás. [10, 11]

El gobierno cubano ha mostrado una alta preocupación por la gestión de residuos sólidos urbanos, evidenciada en la aprobación de la Estrategia para la transición hacia la economía circular en 2023. [12] Esta estrategia permitirá concatenar los desechos de los procesos productivos con soluciones innovadoras y obtener una transformación positiva de las realidades existentes en la gestión integral de los RSU. Sin embargo, la falta de una caracterización actualizada de los RSU del municipio de Sancti Spíritus y de un análisis técnico económico de alternativas para el tratamiento de su fracción orgánica limita la toma de decisiones para mejorar la gestión integral de estos residuos en el territorio.

El objetivo de esta investigación fue evaluar alternativas tecnológicas para la gestión integral de los RSU del municipio de Sancti Spíritus, mediante la determinación de su composición y el análisis técnico económico del compostaje y la digestión anaerobia como vías de valorización de la fracción orgánica.

Materiales y Métodos

Caracterización del sistema de gestión actual

Se realizó un diagnóstico del sistema de gestión de RSU en el municipio de Sancti Spíritus mediante revisión documental, entrevistas a directivos de la Unidad Empresarial de Base (UEB) Comunales y observación directa en campo. Se

recopilaron datos sobre almacenamiento, recolección, transporte y disposición final, incluyendo el parque vehicular, frecuencia de recolección, cobertura del servicio y condiciones operativas del vertedero municipal. Se consultaron fuentes periodísticas locales y se analizaron las normativas cubanas aplicables. [13, 14, 15]

Caracterización de los RSU mediante el método de cuarteo

Se aplicó el método de cuarteo descrito en la normativa NMX-AA-15-1985 [16] para determinar la composición de los RSU generados en el municipio. Se realizaron tres muestreos independientes en diferentes puntos de recogida (supiaderos), correspondientes a las zonas sur, norte y centro de la ciudad, con el objetivo de obtener una caracterización representativa de la totalidad de los residuos generados en el territorio.

El procedimiento del método de cuarteo se desarrolló en las siguientes etapas:

· Formación del montón inicial: los residuos se vaciaron formando un montón sobre un área plana horizontal.

· Homogeneización: el montón se traspaleó con pala hasta homogeneizarlos.

· Cuarteo: se dividió el montón en cuatro partes aproximadamente iguales (A, B, C, D) y se eliminaron las partes opuestas (A y C o B y D).

· Repetición: se repitió esta operación hasta dejar un mínimo de 50 kilogramos de residuos sólidos para la selección de subproductos.

· Clasificación y pesaje: la muestra final se extendió sobre la superficie y se separaron manualmente los residuos en categorías predefinidas: materia orgánica, plástico, papel y cartón, vidrio, metales ferrosos, aluminio, textiles, madera y otros materiales.

Cada categoría fue pesada en una balanza digital con precisión de 0,01 kg y se calculó su porcentaje en peso respecto al total de la muestra. A partir de los tres muestreos, se calculó la composición promedio general de los RSU en el municipio. La masa anual total de residuos se determinó a partir de los datos de población e índice de generación per cápita proporcionada por la UEB Comunales del municipio, utilizando la siguiente ecuación:

$$G = P \times IPC \times 365 \quad (1)$$

Donde:

G = generación anual de RSU (kg/año)

P = población servida (habitantes)

IPC = índice de generación per cápita (kg/hab/día)

Diseño de alternativas de tratamiento

Se diseñaron y evaluaron técnica y económicamente dos alternativas para la valorización de la fracción orgánica de los RSU del municipio:

Alternativa 1: recogida selectiva en el origen y compostaje de la fracción orgánica. La población clasifica sus residuos en el origen en contenedores diferenciados por colores. Los materiales reciclables se comercializan a través de la Unión de Empresas de Recuperación de Materias Primas (UERMP). La fracción orgánica (14 494 t/año) se procesa en una planta de compostaje con reactor rotatorio horizontal in-vessel de 50 t/d de capacidad, con control automatizado de temperatura (55 - 65 °C), humedad (50 – 60 %) y aireación.

Alternativa 2: planta de selección mecánica y digestión anaerobia de la fracción orgánica. Los residuos se recolectan de forma mezclada y se procesan en una planta de selección con capacidad de 100 t/día, que incluye: clasificador, separador magnético, separador de corrientes de Foucault y cabinas de selección manual. La fracción orgánica separada (14 494 t/a) se somete a digestión anaerobia en un reactor de acero al carbono de 4200 m^3, operando en condiciones mesofílicas (37 °C). El biogás producido se utiliza en motores de cogeneración para generar electricidad, y el digestato se comercializa como abono orgánico.

Evaluación económica

La evaluación económica de las alternativas se realizó mediante el cálculo de los siguientes indicadores dinámicos: Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y Período de Recuperación al Descontado (PRD), considerando una vida útil de 10 años y una tasa de descuento del 12 %. Los costos de inversión y operativos se estimaron a partir de cotizaciones de proveedores internacionales y costos referenciales de proyectos similares en América Latina, actualizados al año 2025.

El capital total invertido se calculó según la metodología de Peter y Timmerhaus [17], considerando costos directos y costos indirectos. Los costos de producción incluyeron materias primas, utilidades, mano de obra, supervisiones, mantenimiento y reparación, suministros, laboratorios, seguros e impuestos, depreciación y costos indirectos.

Los ingresos se estimaron a partir de los precios de venta de materiales reciclables (UERMP), compost (50 USD/t) y electricidad (0,20 USD/kWh), considerando los precios del mercado cubano para cada producto.

Resultados y Discusión

Diagnóstico del sistema de gestión de RSU en Sancti Spíritus

El diagnóstico realizado permitió identificar la situación crítica del sistema de gestión de RSU en el municipio de Sancti Spíritus. La población del municipio es de 123 545 habitantes, con una densidad poblacional de 459,8 hab/km² [5]. El índice de generación per cápita determinado fue de 0,66 kg/hab/día, valor consistente con los reportados para otras ciudades cubanas (0,70 kg/hab/día en La Habana) y para países en desarrollo de la región (rango de 0,5 a 1,0 kg/hab/día). [18, 19]

Tabla 1 - Composición promedio de los RSU en el municipio de Sancti Spíritus

Componente	Porcentaje (%)	Masa anual (t/año)
Materia orgánica	48,7	14 494
Plástico	17,4	5179
Textiles	8,6	2560
Papel y cartón	6,9	2054
Metales ferrosos	6,3	1875
Metales no ferrosos	0,7	208
Vidrio	5,0	1488
Madera	1,7	506
Otros	4,7	1 399
TOTAL	**100,0**	**29 763**

La composición de los RSU (tabla 1) muestra un predominio de la fracción orgánica (48,7 %), seguida por plásticos (17,4 %), textiles (8,6 %) y papel y cartón (6,9 %). Esta distribución es similar a la reportada para otros contextos latinoamericanos, donde la materia orgánica constituye el componente mayoritario, superando en muchos casos el 50% del total. [2, 20] Esta particularidad condiciona fuertemente la

selección de tecnologías de tratamiento, orientando las estrategias hacia rutas biológicas de valorización como el compostaje y la digestión anaerobia, en lugar de tecnologías térmicas como la incineración, que requieren residuos con alto poder calorífico y bajo contenido de humedad. (21)

El vertedero municipal recibe la totalidad de los residuos recolectados (435 000 m³ en 2025), con un área actual de solo 8,4 hectáreas. El vertedero carece de sistemas de impermeabilización de base, captación y tratamiento de lixiviados, y captación de biogás. La compactación no se realiza de manera sistemática por falta de maquinaria pesada, y se realizan quemas a cielo abierto de los residuos, práctica ambientalmente negativa. La presencia de recicladores informales ("buzos") que recuperan materiales en condiciones insalubres representa tanto un problema social como una oportunidad para la formalización del reciclaje. (22)

El parque vehicular para la recolección y transporte consta de 48 medios (25 tractores y 23 camiones), la mayoría en estado regular o malo, lo que afecta la frecuencia de recolección que en la práctica se reduce a 3 - 4 veces por semana frente a las seis veces teóricas establecidas en la normativa. El costo anual del sistema de gestión actual asciende a 11 115 000 CUP (aproximadamente 463 125 USD a una tasa de cambio de 24 CUP/USD), con un costo por tonelada gestionada de 373 CUP/t (15,5 USD/t) y un costo por habitante de 90 CUP/hab/año (3,75 USD/hab/año).

Evaluación de alternativas de tratamiento

Alternativa 1: Recogida selectiva en origen y compostaje:

La Alternativa 1 requiere la implementación de un sistema de recogida selectiva con 464 contenedores de 0,66 m³ (para materiales reciclables) y 100 contenedores de 1,0 m³ (para materia orgánica), así como bolsas de nylon para la separación en las viviendas. La inversión estimada para la adquisición de equipamiento fue de 501 500 USD (tabla 2), con un costo de producción anual de 233 000 USD y un Costo Total de la Inversión de 722 453 USD.

Tabla 2 - Inversión requerida para la Alternativa 1 en adquisición de equipamiento

Equipo	Cantidad	Costo de Adquisición (USD)
Planta de compostaje	1	291 500
Camiones especializados	10	210 000
Total		**501 500**

Fuente: [23]

La planta de compostaje propuesta, con tecnología de reactor rotatorio horizontal, permitirá procesar las 14 494 t/año de materia orgánica, produciendo 11 595 t/año de compost (considerando una pérdida de masa por degradación del 20%). El compost se comercializará a un precio de 50 USD/t, generando ingresos anuales por 579 750 USD.

Los materiales reciclables recuperados (tabla 3) generarán ingresos anuales por 7 489 182 USD, con el plástico como el material de mayor valor (4 288 212 USD/año), seguido por el vidrio (1 807 920 USD/año) y el papel y cartón (903 760 USD/año).

Tabla 3 - Ingresos anuales por venta de materiales reciclables

Material	Masa anual (t/año)	Precio (USD/t)	Ingreso anual (USD)
Papel y cartón	2054	440	903 760
Plástico	5179	828	4 288 212
Vidrio	1488	1215	1 807 920
Metales ferrosos	1875	30	56 250
Metales ferrosos (Aluminio)	208	1000	208 000
Textiles	2560	80	204 800
Madera	506	40	20 240
Total de ingresos			**7 489 182**

Fuente: [23]

Los indicadores económicos de la Alternativa 1 son muy favorables: VAN = 34 813 673 USD, TIR = 965 %, PRD = 6,5 años. Estos valores se justifican por los altos precios de venta de los materiales reciclables en el mercado internacional y el alto precio del compost (50 USD/t).

Sin embargo, la Alternativa 1 presenta una limitación fundamental: depende completamente de la participación activa de la población en la separación de los residuos. La experiencia internacional muestra que la implementación exitosa de sistemas de recogida selectiva requiere campañas intensivas de educación ambiental, un período prolongado de adaptación y mecanismos de control y sanción para garantizar el cumplimiento. [24] En el contexto cubano actual, donde no existe una cultura arraigada de reciclaje, esta dependencia representa un riesgo significativo para la eficacia del sistema. Además, esta alternativa no aprovecha el potencial energético de la fracción orgánica, que podría producir energía renovable mediante digestión anaerobia.

Alternativa 2: planta de selección y digestión anaerobia

La Alternativa 2 mantiene el sistema de recogida mezclada actual, eliminando la dependencia de la separación en el origen. La planta de selección (100 t/d) y la planta de digestión anaerobia (50 t/d) requieren una inversión para la adquisición del equipamiento de 2 452 000 USD (tabla 4), significativamente mayor que la Alternativa 1 debido a la complejidad tecnológica y la escala de los equipos, con un Costo Total de la Inversión de 5 734 555 USD.

Tabla 4 - Inversión requerida para la Alternativa 2 en adquisición de equipamiento

Concepto	Costo (USD)
Planta de clasificación	795 000
Planta de biogás (digestor, agitación, gasómetro, control)	1 402 000
Componentes auxiliares (pretratamiento, calefacción, desulfuración, separador, tuberías, almacenamiento)	255 000
Total	**2 452 000**

El reactor de digestión anaerobia, con capacidad volumétrica de 4200 m^3, procesará las 14 494 t/año de fracción orgánica, produciendo biogás que alimentará motores de cogeneración para generar electricidad. La producción estimada es de 4150 m^3/día de biogás, que generan 9255 kWh/día de electricidad. Descontando el autoconsumo de la planta (25% de la generación), la electricidad neta vendida será de 2 165 670 kWh/año, generando ingresos anuales por 433 134 USD (a 0,20 USD/kWh).

El digestato producido (56 025 t/año) se comercializará como abono orgánico a 2,08 USD/t, generando ingresos anuales por 116 700 USD. Los materiales

reciclables generarán los mismos ingresos que en la Alternativa 1 (7 489 182 USD/año), ya que la recuperación de materiales es similar. El valor total de la producción asciende a 8 039 016 USD/año.

Tabla 5 - Resumen de ingresos de la Alternativa 2

Concepto	Ingreso anual (USD)
Venta de materiales reciclables	7 489 182
Venta de electricidad	433 134
Venta de abono orgánico (digestato)	116 700
Valor total de la producción	8 039 016

Los indicadores económicos de la Alternativa 2 son también muy favorables: VAN = 26 144 692 USD, TIR = 101%, PR = 6,5 años. Aunque el VAN y la TIR son inferiores a los de la Alternativa 1, siguen siendo indicadores excelentes que demuestran la viabilidad económica del proyecto.

La principal ventaja de la Alternativa 2 es que no requiere la separación en origen por parte de la población, eliminando la incertidumbre asociada al factor humano y garantizando la eficacia del sistema desde el inicio de su operación. Además, aprovecha el potencial energético de la fracción orgánica, contribuyendo a la matriz energética del municipio y alineándose con la Estrategia de transición energética del país hacia las energías renovables. [25] La digestión anaerobia también reduce las emisiones de metano (un potente gas de efecto invernadero) que se generarían si los residuos orgánicos se dispusieran en el vertedero, contribuyendo a la mitigación del cambio climático. [26]

Análisis comparativo y selección de la alternativa óptima

Tabla 6 - Comparación de indicadores económicos de las alternativas.

Indicador	Alternativa 1	Alternativa 2
Inversión total (USD)	722 453	5 734 555
Valor de la producción (USD/año)	8 068 932	8 039 016
Costo total de producción (USD/año)	233 000	1 538 219
VAN (USD)	34 813 673	26 144 692
TIR (%)	965	101
Período de recuperación (años)	6,5	6,5

Ambas alternativas presentan indicadores económicos muy favorables (tabla 6), con VAN positivos muy superiores a la inversión inicial y TIR muy superiores a la tasa de descuento del 12 %. El período de recuperación de 6,5 años es el mismo para ambas alternativas, coincidiendo con el tiempo de retorno estimado de la inversión.

La Alternativa 1 muestra una mayor rentabilidad económica (VAN superior en 8,7 millones USD y TIR del 965 % frente al 101 % de la Alternativa 2), pero su implementación enfrenta la limitación de depender de la separación en origen por parte de la población. [27]

La Alternativa 2, aunque requiere una inversión inicial casi ocho veces mayor (5,7 millones USD frente a 0,72 millones USD), elimina completamente la incertidumbre al procesar residuos mezclados. El sistema es técnicamente más robusto y menos sensible a factores externos. Adicionalmente, ofrece el beneficio de generar energía renovable (433 134 USD/año en electricidad), contribuyendo a la matriz energética del municipio y diversificando las fuentes de ingreso.

Desde la perspectiva de la economía circular, la Alternativa 2 es más coherente con los principios de valorización integral de los residuos, ya que no solo recupera materiales reciclables, sino que también aprovecha el contenido energético de la fracción orgánica para generar electricidad, y el digestato resultante se utiliza como abono orgánico, cerrando el ciclo de nutrientes. [28] Esta aproximación se alinea con la Estrategia para la transición hacia la economía circular aprobada por el Comité Ejecutivo del Consejo de Ministros de la República de Cuba en 2023.

Implicaciones para la gestión de RSU en Cuba

Los resultados de esta investigación tienen implicaciones importantes para la gestión de RSU en Cuba y en otros contextos similares de países en desarrollo. La alta proporción de materia orgánica en los RSU confirma que las estrategias de gestión deben priorizar tecnologías biológicas como el compostaje y la digestión anaerobia, en lugar de tecnologías térmicas como la incineración, que requieren residuos con alto poder calorífico y bajo contenido de humedad.

La implementación de sistemas de digestión anaerobia para el tratamiento de la fracción orgánica de los RSU en municipios cubanos podría contribuir significativamente a los objetivos de la Estrategia Nacional para la Transición Energética, que busca aumentar la participación de fuentes renovables en la matriz

energética del país, limpiar nuestras ciudades, contribuir significativamente al cuidado del medio ambiente y aprovechar un recurso valioso que actualmente se desecha. Además, la producción de compost y abono orgánico a partir de residuos contribuye a la agricultura sostenible, reduciendo la dependencia de fertilizantes químicos importados.

Conclusiones

1. El diagnóstico del sistema de gestión de residuos sólidos urbanos en el municipio de Sancti Spíritus demuestra la necesidad imperiosa de implementar nuevas alternativas de tratamiento, lo que evidencia la urgencia de soluciones tecnológicas sostenibles para la gestión integral de los RSU en el territorio cubano.
2. La caracterización de los RSU mediante el método de cuarteo permite determinar una composición promedio de 48,7 % de materia orgánica, 17,4 % de plástico, 8,6 % de textiles y 6,9 % de papel y cartón. El índice de generación per cápita de 0,66 kg/hab/día es consistente con otros estudios realizados en Cuba y en la región de América Latina y el Caribe, y confirma el predominio de la fracción orgánica, lo que condiciona la selección de tecnologías de tratamiento biológico.
3. Si bien ambas alternativas estudiadas son viables técnica y económicamente, se selecciona la Alternativa 2 como la solución tecnológica más adecuada para el municipio de Sancti Spíritus porque garantiza el funcionamiento del sistema desde el inicio de su operación, aprovecha el potencial energético de la fracción orgánica contribuyendo a la matriz energética del municipio, se alinea con la Estrategia de transición energética del país hacia las energías renovables y con los principios de la economía circular en el uso de los residuos.

Referencias bibliográficas

1. World Bank. *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050.* Washington, DC. 2018. [Consultado 19 febrero 2026] DOI: 10.1596/978-1-4648-1329-0. Disponible en: https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/2174.

2. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). *Perspectiva de la Gestión de Residuos en América Latina y el Caribe* [en línea]. Oficina del PNUMA para América Latina y el Caribe. 2018. [Consultado 17 de febrero del 2026]. Disponible en: https://globaldrsplatform.net.es/document/perspectiva-de-la-gestión-de-residuos-en-america-latina-y-el-caribe/

3. United Nations Environment Programme (PNUMA). *Global Waste Management Outlook: Beyond an Age of Waste - Turning Rubbish into a Resource* [en línea]. Nairobi. 2024. [Consultado 17 de febrero del 2026]. DOI: https://doi.org/10/59117/20.500.11822/44939. Disponible en: https://www.unep.org/resources/global-wastemanagement-outlook-2024

4. Alonso Pérez, T. La gestión integral de los residuos sólidos urbanos y la economía circular, un desafío para el desarrollo local en Cienfuegos. *Revista Cubana de Ciencias Económicas "Ekotemas"* [en línea]. 2024, enero – junio, 10(1). [Consultado 14 de abril del 2026]. ISSN: 2414-4681. Disponible en: http://www.ekotemas.cu

5. Oficina Nacional de Estadísticas e Información. Anuario Demográfico de Cuba 2024 [en línea]. La Habana, Cuba. Edición, julio 2025. Disponible en: http://www.onei.gob.cu

6. UEB Comunales. Datos de recolección, transporte y disposición final de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU). Sancti Spíritus, Cuba. 2025. Informe interno.

7. Periódico Escambray. *Sancti Spíritus en el laberinto de su basura* [en línea]. *Sancti Spíritus*, Cuba. 23 de agosto del 2025. [Consultado 13 de abril del 2026]. Disponible en: https://www.escambray.cu/wp-content/uploads/2025/08/Escambray-23-agosto-2.pdf

8. Pérez Guelmes, V. *Gestión de residuos sólidos urbanos en Sancti Spíritus* Tesis de Maestría Inédita. Sancti Spíritus. Universidad de Sancti Spíritus "José Martí Pérez", 2016.

9. Periódico Escambray. *El punto rojo de la higiene comunal* [en línea]. Sancti Spíritus, Cuba; 27 septiembre 2025. [Consultado 21 de enero del 2026]. Disponible en: https://www.escambray.cu/wp-content/uploads/2025/09/Escambray-27-septiembre-5.pdf

10. Tchobanoglous, G., Kreith, F. *Handbook of solid waste management* [en línea]. Nueva York. McGraw-Hill Professional. 2002. [Consultado 20 enero 2026]. ISBN:

0071500340, 9780071500340. Disponible en: https://books.google.com.cu/about/Handbook_of_solid_waste_management.html?id=y10XiaaXeuYC&redir_esc=y

11. Espinosa Lloréns, M. C., López Torres. M., Díaz Aguirre, S., Isaac Godínez; C. L., McBean, E. y Ramírez R., N. Generación, composición y reciclaje de Residuos Sólidos Urbanos en La Habana, Cuba. *Revista Centro Azúcar* [en línea]. 2019, Vol. 46, Edición Especial, IV Simposio Internacional de Química. [Consultado 14 mayo 2026]., ISSN: 2223-4861. Disponible en: http://centroazucar.uclv.edu.cu.

12. Consejo de ministros. *Estrategia para la transición hacia la economía circular.* La Habana, Cuba. 2023.

13. Oficina Nacional de Normalización. NC-133 (2002). *Residuos sólidos urbanos. Almacenamiento, recolección y transportación. Requisitos higiénico-sanitarios y ambientales.* La Habana, 2002.

14. Oficina Nacional de Normalización. NC-134 (2002). *Residuos sólidos urbanos. Tratamiento. Requisitos higiénico-sanitarios y ambientales.* La Habana, 2002.

15. Oficina Nacional de Normalización. NC-135 (2002). *Residuos sólidos urbanos. Disposición final. Requisitos higiénico-sanitarios y ambientales.* La Habana, 2002.

16. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. NMX-AA-15-1985. *Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Muestreo - Método de cuarteo.* Ciudad de México, 1985. Disponible en: https://biblioteca.semarnat.gob.mx/

17. Peter, M. S. y Timmerhaus, K. D. *Plant Design and Economics for Chemical Engineers (4ª ed.).* New York: McGraw-Hill.1991. ISBN-13:978-007-1008716, ISBN-10: 0071008713.

18. Chamizo-Checa, S., Otazo-Sánchez, E. M., Gordillo Martínez, A. J., Acevedo-Sandoval, O. A. y Román-Gutiérrez, A. D. Estimación de la generación y composición de residuos sólidos en Papalotla, Tlaxcala. *Revista Ciencia Latina* [en línea]. 2022, **6**(6) pp. 1-15. [Consultado 24 febrero 2026] DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i6.4058. Disponible en: https://ciencialatina.org/index.php/cienciala/article/view/4058

19. Falcón Gallardo, S. D. y Vivanco, C. E. A. *Caracterización de residuos sólidos domiciliarios para la elaboración de un sistema integral de gestión en la parroquia "La Victoria", Cantón Pujilí, provincia de Cotopaxi, período 2024* [en línea]. Cotopaxi, Ecuador. Universidad Técnica de Cotopaxi. 2024. [Consultado 9 marzo 2026] Disponible en: https//repositorio.utc.edu.ec/handle/123456789/12367

20. Szantó Narea, M. Escenario actual y prospectivo de la gestión de los residuos sólidos urbanos en la región de América Latina y el Caribe. *Revista Estado y Políticas Públicas* [en línea]. octubre de 2021 - abril de 2022, Nº 17, pp. 85-101. [Consultado 24 febrero 2026]. ISSN 2310-550X, Disponible en: https://www.flacsoandes.edu.cu.ec/buscador/Record/rflacsoSI-10469-21479/Description?sid=118631973#tabnav

21. Benítez Viera, L. *Análisis de alternativas para la gestión integral de los residuos sólidos urbanos en la ciudad de Santa Clara.* Trabajo de Diploma Inédito. Santa Clara. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. 2009.

22. Radio Sancti Spíritus. *Sector no estatal en Sancti Spíritus se incorpora a recuperación de materias primas* [en línea]*.* Sancti Spíritus, 2025. [Consultado 17 junio 2026]. Disponible en: https://radiosanctispiritus.cu/

23. Fernández Echemendía, I. T. *Gestión integral de los Residuos Sólidos Urbanos en el municipio de Sancti Spíritus, en el concepto de Economía Circular.* Trabajo de Diploma Inédito. Santa Clara. Departamento de Ingeniería Química, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas (UCLV). 2026.

24. Sáez, A., Urdaneta, G. A., Joheni, A. Manejo de residuos sólidos en América Latina y el Caribe. *Omnia* [en línea]. 2014, septiembre-diciembre **20**(3), pp. 121-135. [Consultado 11 febrero 2026]. Disponible en: http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=73737091009

25. Ministerio de Energía y Minas. *Estrategia Nacional para la Transición Energética en Cuba.* La Habana, 2025.

26. López González, L. M., Zayas González, M., Morgado León, F. J. Pedraza Garciga, J. Cinética de la producción de metano a partir de residuos agroindustriales en Sancti Spíritus. *Revista Centro Azúcar* [en línea]. 2022, **49**, 23-34. [Consultado 10 febrero 2026]. e-ISSN: 2223-4861 | p-ISSN: 0253-5777 Disponible en: http://centroazucar.uclv.edu,cu/cu/index.php/centro_azucar/article/view/694

27. Cárdenas-Ferrer, T. M., Santos-Herrero, R. F., Contreras-Moya, A. M., Rosa-Dominguez, E., y Domínguez-Núñez, J. Propuesta Metodológica para el Sistema de Gestión de los Residuos Sólidos Urbanos en Villa Clara. *Revista Tecnología Química* [en línea]*.* 2019, **39**(2), 463-483. [Consultado 13 febrero 2026]. https://doi.org/10.1590/2224-6185.2019.2.%x

28. Lorenzo Acosta, Y., Obaya Abreu M. C. La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. *ICIDCA Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar* [en línea]. 2005, **39**(1), 2005, 35-48. [Consultado 17 marzo 2026]. Disponible en: www.redalyc.org/articulo.oa?id=2231120659006

Conflictos de interés

Los autores declaran que no hay conflictos de intereses en el manuscrito presentado.

Contribución de los autores

Julio Pedraza Garciga: realizó la conceptualización, redacción del borrador original y la redacción-revisión y edición final del artículo.

Iriana Thalía Fernández-Echemendía: realizó la toma de muestras, el análisis formal, metodología y la investigación.

Leidy Aquino-Pérez: realizó las tomas de muestras, el análisis formal, la metodología y la investigación.

Ronaldo Francisco Santos-Herrero: realizó la conceptualización, redacción del borrador original y la supervisión.

Teresa Margarita Cárdenas-Ferrer: colaboró con la escritura y la redacción-revisión y edición del artículo.