Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), septiembre-octubre 2026,
Volumen 10, Número 5.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i5

VALORIZACIÓN DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN EN LA CIUDAD DE MÉXICO: ANÁLISIS TÉCNICO-AMBIENTAL DE ESCENARIOS Y EVIDENCIA ECONÓMICA

RECYCLING OF CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE IN MEXICO CITY: A TECHNICAL AND ENVIRONMENTAL ANALYSIS OF SCENARIOS AND ECONOMIC EVIDENCE

Emily Concepción López Alvarez
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México

Jose Armando Paz Juarez
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México

Luis Daimir López León
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i5.26748

Valorización de Residuos de Construcción y Demolición en la Ciudad de México: Análisis Técnico-Ambiental de Escenarios y Evidencia Económica

Emily Concepción López Alvarez[1]
lo446174@uaeh.edu.mx
https://orcid.org/0009-0001-5411-0980
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
México

Jose Armando Paz Juarez
pa499231@uaeh.edu.mx
https://orcid.org/0009-0005-9531-5076
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
México

Luis Daimir López León
luis_lope@uaeh.edu.mx
https://orcid.org/0000-0001-5871-7707
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
México

RESUMEN

La gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) requiere comparar la recuperación material con las cargas del procesamiento y la disposición. Este estudio evaluó tres escenarios para una tonelada de RCD predominantemente mineral generada en la Ciudad de México: manejo convencional (E0), valorización parcial (E1) y valorización intensiva (E2). Se integraron datos secundarios trazables sobre recuperación, energía, potencial de calentamiento global (GWP) y costos. Los indicadores técnico-ambientales se normalizaron mediante balances de masa y un análisis de sensibilidad, mientras que los costos publicados se interpretaron comparativamente. E1 y E2 recuperaron 561 y 711 kg/t, respectivamente. Frente a E0, E1 redujo 40.5 % la demanda energética y 22.7 % el GWP parcial; E2 alcanzó reducciones de 45.0 y 23.0 %. La diferencia ambiental entre E1 y E2 fue pequeña porque la mayor carga del procesamiento intensivo compensó parcialmente la reducción del rechazo. La evidencia económica indicó que las configuraciones híbridas pueden equilibrar recuperación, transporte y utilización de capacidad. E2 presentó el mejor desempeño técnico-ambiental, aunque su conveniencia económica depende de distancias, costos locales y demanda del agregado reciclado. Los resultados constituyen escenarios de gabinete y deberán validarse con datos operativos de la Ciudad de México.

Palabras clave: agregados reciclados; análisis de escenarios; economía circular; ingeniería industrial; residuos de construcción y demolición

[1] Autor principal.
Correspondencia: pa499231@uaeh.edu.mx

Recycling of Construction and Demolition Waste in Mexico City: a Technical and Environmental Analysis of Scenarios and Economic Evidence

ABSTRACT

Construction and demolition waste (CDW) management requires balancing material recovery against the burdens of processing and disposal. This study evaluated three scenarios for managing one tonne of predominantly mineral CDW generated in Mexico City: conventional management (E0), partial recovery (E1), and intensive recovery (E2). Traceable secondary data on recovery, energy demand, global warming potential (GWP), and costs were integrated. Technical and environmental indicators were normalized through mass balances and sensitivity analysis, whereas published costs were interpreted comparatively. E1 and E2 recovered 561 and 711 kg/t, respectively. Compared with E0, E1 reduced energy demand by 40.5 % and partial GWP by 22.7 %, whereas E2 achieved reductions of 45.0 % and 23.0 %. The environmental difference between E1 and E2 was small because the additional burden of intensive processing partly offset the benefit of lower rejection. The economic evidence indicated that hybrid configurations may balance recovery, transport, and capacity utilization. E2 provided the best technical and partial environmental performance; however, its economic suitability depends on transport distances, local costs, and demand for recycled aggregate. These findings represent desk-based scenarios and require validation with operating data from Mexico City.

Keywords: circular economy; construction and demolition waste; industrial engineering; recycled aggregates; scenario analysis.

Artículo recibido 20 agosto 2026
Aceptado para publicación: 20 setiembre 2026

INTRODUCCIÓN

La industria de la construcción constituye una actividad estratégica para el desarrollo económico y social por su contribución a la infraestructura, la vivienda, el empleo y los encadenamientos productivos. Sin embargo, también demanda cantidades considerables de materias primas y energía durante las etapas de extracción, fabricación, construcción, mantenimiento y demolición. El sector de los edificios y la construcción consume aproximadamente el 32% de la energía mundial y genera cerca del 34% de las emisiones globales de dióxido de carbono relacionadas con la energía y los procesos industriales; además, la fabricación de cemento y acero representa una proporción relevante de estas emisiones (United Nations Environment Programme [UNEP], 2025). Este panorama evidencia la necesidad de reducir tanto el consumo de recursos naturales como los impactos derivados de la producción y disposición de materiales.

Uno de los principales problemas vinculados con esta industria es la generación de residuos de construcción y demolición (RCD), procedentes de obras nuevas, remodelaciones, reparaciones, excavaciones, mantenimiento de infraestructura y demolición de edificaciones. Esta corriente puede contener concreto, mortero, ladrillos, cerámicos, suelos, mezclas asfálticas, metales, madera, vidrio, yeso y plásticos. Su composición depende del tipo y antigüedad de la obra, los sistemas constructivos y el grado de separación en el origen (Silva et al., 2014; Cardoso et al., 2016).

La magnitud de los RCD ha convertido su manejo en una prioridad dentro de las políticas de gestión de residuos. En la Unión Europea, las actividades de construcción generan más de una tercera parte del total de residuos, por lo que representan una de las corrientes residuales más importantes en términos de volumen (European Commission, s. f.). Aunque esta proporción no puede trasladarse directamente al contexto mexicano, permite reconocer la presión que la expansión urbana y la renovación de infraestructura ejercen sobre los sistemas de recolección, transporte, tratamiento y disposición final.

Cuando los RCD no se separan y manejan adecuadamente, pueden reducir la vida útil de los sitios de disposición, ocupar suelo, dispersar partículas, obstruir cauces y sistemas de drenaje, deteriorar el paisaje y favorecer la aparición de tiraderos clandestinos. La mezcla de fracciones minerales con madera, yeso, plásticos o materiales contaminados también reduce la calidad del producto recuperable y dificulta su reincorporación en otros procesos.

En consecuencia, una gestión basada exclusivamente en la recolección y disposición final desaprovecha materiales que todavía conservan valor técnico y económico.

Las fracciones de concreto, mortero, mampostería y materiales pétreos pueden someterse a separación, trituración, cribado y clasificación para obtener agregados reciclados. Según su calidad y las especificaciones aplicables, estos productos pueden emplearse en rellenos, bases y subbases, aplicaciones geotécnicas y determinados elementos no estructurales (Silva et al., 2014; Cardoso et al., 2016). Su aprovechamiento puede reducir la disposición final y sustituir parcialmente agregados naturales, aunque requiere transporte, energía, maquinaria y manejo de rechazos.

La valorización de los RCD se relaciona con la economía circular, orientada a conservar el valor de los materiales y reducir la dependencia de recursos vírgenes. En construcción, este enfoque comprende prevención, reutilización, demolición selectiva, separación en el origen, reciclaje y reincorporación de materiales secundarios. Sin embargo, una tasa elevada de recuperación no garantiza por sí misma circularidad, porque el destino del material puede corresponder a aplicaciones de menor valor. Por ello deben considerarse la calidad del producto, su uso final y sus efectos económicos y ambientales (Di Maria et al., 2018; Zhang et al., 2020; Caro et al., 2024).

Desde una perspectiva operativa, un sistema de valorización puede integrar generación, separación, almacenamiento, recolección, transporte, recepción, inspección, trituración, cribado y comercialización; la separación selectiva y el control de calidad son prácticas determinantes para mejorar la recuperación (Gálvez-Martos et al., 2018). Su desempeño depende de la distancia, el consumo de combustible, la capacidad, el volumen procesado, la eficiencia de recuperación, los rechazos y la demanda. La viabilidad económica también está condicionada por la inversión, los costos operativos, las tarifas de disposición y el valor de los productos recuperados. Coelho y de Brito (2013a) identificaron la ubicación, la disponibilidad de residuos, la tecnología y la capacidad como factores determinantes; por ello, el análisis debe comprender la cadena logística y productiva completa.

La dimensión ambiental presenta una complejidad semejante. Aunque el reciclaje puede evitar disposición y extracción de recursos, también ocasiona impactos asociados con transporte y procesamiento.

El análisis de ciclo de vida ofrece un marco para identificar entradas, salidas e impactos potenciales; las normas ISO 14040 e ISO 14044 establecen sus principios y requisitos generales (International Organization for Standardization [ISO], 2006a, 2006b). En los RCD, la literatura recomienda explicitar la unidad funcional, los límites, las cargas evitadas y la calidad de los datos para asegurar comparaciones interpretables (Mercante et al., 2012; Mesa et al., 2021; Bayram & Greiff, 2023).

La aplicación de este enfoque a los RCD permite comparar alternativas mediante una unidad funcional común. Los resultados dependen de las características del material, los procesos incluidos, las distancias y el producto primario sustituido (Butera et al., 2015; Rosado et al., 2019). Asimismo, la sostenibilidad exige integrar indicadores ambientales y socioeconómicos y reconocer que las rutas de recuperación producen resultados distintos según la tecnología y el destino del material (Iodice et al., 2021; Caro et al., 2024). Por tanto, el reciclaje no debe asumirse automáticamente como la alternativa más favorable sin evaluar las condiciones específicas del sistema.

El análisis de escenarios permite representar configuraciones alternativas y compararlas mediante límites, supuestos e indicadores comunes. En este estudio se consideró un escenario convencional, basado en la disposición final; uno de valorización parcial, con separación y recuperación de las principales fracciones minerales; y uno de valorización intensiva, caracterizado por mayores tasas de clasificación y procesamiento. La comparación permitió examinar el balance de materiales, la demanda energética, el GWP parcial y los condicionantes económicos de la implementación.

En México, los RCD están comprendidos dentro de los residuos de manejo especial y pueden estar sujetos a planes de manejo. La NOM-161-SEMARNAT-2011 establece los criterios para clasificarlos y los elementos para formular dichos instrumentos (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2013). En el ámbito local, la Norma Ambiental NACDMX-007-RNAT-2019 regula su manejo integral en la Ciudad de México y promueve la separación en el sitio de generación, el reciclaje, el reúso, la entrega en instalaciones autorizadas y la reducción de la disposición inadecuada (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México [SEDEMA], 2021).

La concentración de población, infraestructura y actividad constructiva convierte a la Ciudad de México en un territorio pertinente para evaluar alternativas de valorización.

La localización de los sitios generadores, las restricciones de movilidad, las distancias de transporte, la capacidad de las instalaciones y la demanda de productos reciclados pueden modificar significativamente el desempeño del sistema. Por esta razón, los resultados obtenidos en otras regiones no deben trasladarse directamente sin considerar las condiciones territoriales, regulatorias y económicas locales.

A pesar de los avances normativos, todavía se requiere integrar información técnica, económica y ambiental para seleccionar alternativas de manejo. Las evaluaciones centradas únicamente en la cantidad recolectada o en el porcentaje de reciclaje no permiten establecer si la valorización resulta conveniente cuando se incorporan los costos logísticos, el consumo energético, la disposición de rechazos y los beneficios derivados de sustituir agregados naturales. Desde la ingeniería industrial, esta problemática puede abordarse mediante el mapeo de procesos, los balances de materiales, el análisis de capacidades y costos, la evaluación logística y la construcción de indicadores de desempeño.

Por lo anterior, el objetivo del presente estudio fue comparar el desempeño técnico y ambiental de tres escenarios de gestión de RCD minerales para la Ciudad de México y examinar la evidencia económica necesaria para su implementación. Se analizaron los balances de materiales, la demanda energética, el potencial de calentamiento global y la sensibilidad a la recuperación y a la intensidad del procesamiento. La dimensión económica se abordó mediante valores publicados, conservados en su moneda y año originales, con el propósito de identificar condicionantes operativos sin presentar estimaciones locales no sustentadas.

METODOLOGÍA

Enfoque y diseño de la investigación

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, aplicado y no experimental. Fue cuantitativa porque la comparación se sustentó en variables técnicas, económicas y ambientales expresadas mediante indicadores numéricos; aplicada, porque buscó generar información para apoyar decisiones sobre el manejo de RCD; y no experimental, debido a que no se manipularon físicamente los materiales ni se modificaron las condiciones de una instalación existente. En su lugar, se emplearon datos documentales, información geográfica, parámetros técnicos, precios unitarios y factores de emisión para modelar alternativas de gestión (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018).

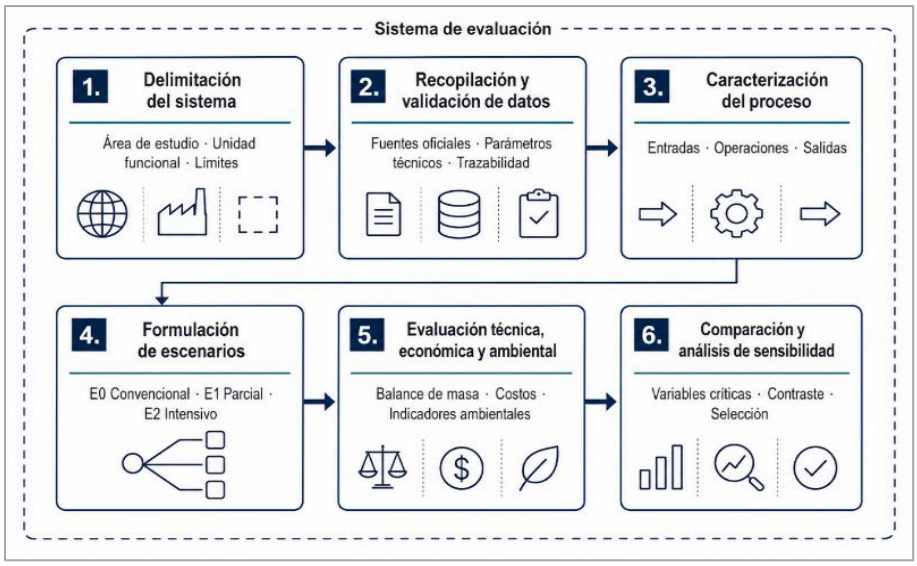
El estudio tuvo un alcance descriptivo y comparativo. La fase descriptiva permitió caracterizar las operaciones, entradas, salidas y recursos del sistema. La fase comparativa examinó las diferencias entre las alternativas mediante una unidad funcional, límites y procedimientos de cálculo comunes. Como estrategia se adoptó un estudio de caso territorial centrado en la Ciudad de México, adecuado para analizar un fenómeno contemporáneo en el que las condiciones técnicas, territoriales, regulatorias y económicas se encuentran relacionadas con el contexto en que ocurre (Yin, 2018).

El objeto de estudio estuvo constituido por los RCD predominantemente minerales susceptibles de procesamiento y aprovechamiento, como concreto, mortero, mampostería, productos cerámicos y materiales pétreos. Los residuos peligrosos, materiales con asbesto, suelos contaminados y otras fracciones sujetas a procedimientos especializados quedaron fuera del alcance. La comparación se normalizó mediante la unidad funcional correspondiente a la gestión de una tonelada de RCD de composición predominantemente mineral generada en la Ciudad de México.

La investigación se estructuró mediante análisis de escenarios. Este método permite comparar configuraciones coherentes cuando el desempeño depende de condiciones operativas o variables inciertas. Los escenarios se utilizaron como representaciones condicionales, no como predicciones, y compartieron supuestos explícitos y límites generales de evaluación (Börjeson et al., 2006). Este enfoque se ha aplicado para analizar conjuntamente consecuencias económicas y ambientales de rutas alternativas de RCD (Marzouk & Azab, 2014).

El procedimiento comprendió seis etapas: delimitación del sistema; recopilación y validación de datos; caracterización del proceso; formulación de escenarios; evaluación técnica, económica y ambiental; y comparación con análisis de sensibilidad. Esta secuencia integró herramientas de análisis de procesos, logística, costos y gestión ambiental propias de la formación en Ingeniería Industrial. La Figura 1 presenta la organización general de la investigación.

Figura 1. Secuencia metodológica para la evaluación de los escenarios de valorización de RCD.

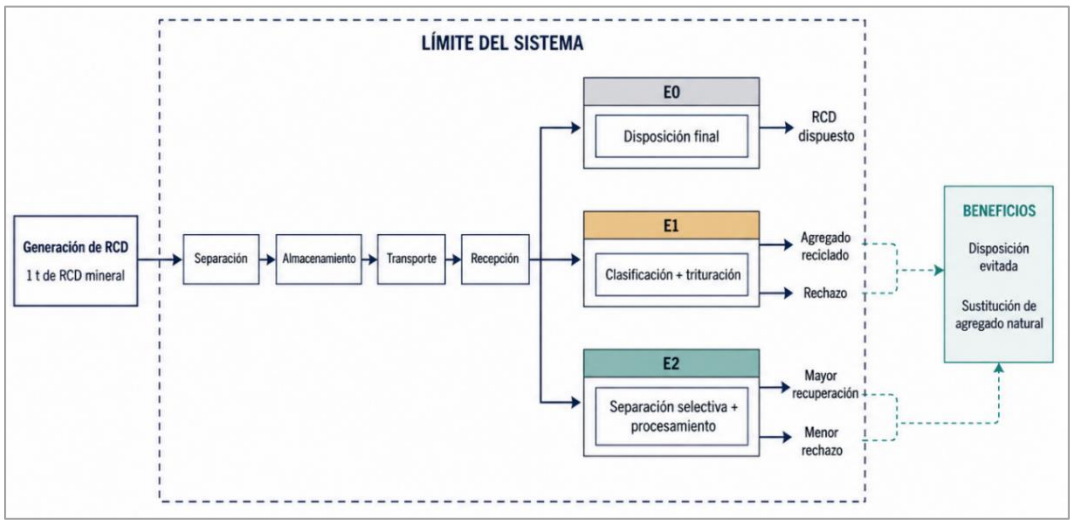


Fuente: elaboración propia.

Delimitación del sistema de estudio

El sistema de estudio se delimitó geográficamente a la Ciudad de México, entidad caracterizada por una elevada concentración de población, infraestructura y actividades de construcción, mantenimiento, remodelación y demolición. La selección también respondió a la existencia de un marco regulatorio específico y de instalaciones autorizadas para la recepción, tratamiento y aprovechamiento de RCD. La NACDMX-007-RNAT-2019 establece criterios para su separación, clasificación, recolección selectiva, almacenamiento, aprovechamiento, valorización y disposición final dentro de la entidad (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México [SEDEMA], 2021). La Figura 2 representa los límites del sistema y las rutas consideradas.

Figura 2. Límites del sistema y rutas de manejo consideradas para los escenarios de gestión de RCD.



Fuente: elaboración propia.

La unidad funcional fue la gestión de una tonelada de RCD de composición predominantemente mineral generada en la Ciudad de México. Con esta base se normalizaron los flujos de materiales, consumos, costos, emisiones y beneficios de recuperación, de forma consistente con evaluaciones previas de sistemas de RCD (Butera et al., 2015).

El sistema comprendió desde el momento en que el material adquirió la condición de residuo en el sitio generador hasta su disposición final o su transformación en agregado reciclado a la salida de la planta. Según el escenario, incluyó separación, almacenamiento, carga, transporte, recepción, clasificación, trituración, cribado y disposición de rechazos.

Se incluyeron concreto, mortero, mampostería, productos cerámicos y materiales pétreos. Se excluyeron residuos peligrosos, asbesto, suelos contaminados y otras fracciones sujetas a manejo especializado, así como la construcción de plantas, la fabricación de maquinaria y la infraestructura vial preexistente.

La delimitación ambiental tomó como referencia los principios de unidad funcional y límites del sistema de ISO 14040 e ISO 14044 (International Organization for Standardization [ISO], 2006a, 2006b). El inventario base comprendió la energía y el GWP del procesamiento y la disposición de rechazos. La masa desviada de disposición y la sustitución potencial se informaron por separado; el transporte y los créditos evitados no se incorporaron al cálculo. Por ello, los resultados se presentan como una evaluación ambiental parcial y no como un análisis de ciclo de vida completo.

La dimensión económica se delimitó como una comparación de evidencia publicada. Los valores se conservaron en la moneda y el año informados por cada fuente, debido a que no se dispuso de cotizaciones locales homogéneas para construir un costo neto representativo de la Ciudad de México.

La Tabla 1 resume los criterios empleados para delimitar el sistema.

Tabla 1. Delimitación técnica, geográfica, económica y ambiental del sistema

Elemento	Delimitación adoptada
Área geográfica	Ciudad de México
Unidad funcional	Gestión de 1 t de RCD de composición predominantemente mineral
Inicio del sistema	Punto en el que el material adquiere la condición de residuo en el sitio generador
Final del sistema	Disposición final del residuo o agregado reciclado a la salida de la planta
Fracciones incluidas	Concreto, mortero, mampostería, productos cerámicos y materiales pétreos

Fracciones excluidas	Residuos peligrosos, asbesto, suelos contaminados, residuos orgánicos y materiales sujetos a tratamiento especializado
Operaciones incluidas	Separación, almacenamiento temporal, carga, transporte, recepción, clasificación, trituración, cribado y disposición de rechazos
Evaluación técnica	Balance de masa, recuperación, rechazo, rendimiento y sustitución de agregados naturales
Evaluación económica	Comparación de costos publicados y condicionantes operativos
Evaluación ambiental	Energía y GWP parcial del procesamiento y disposición; transporte excluido
Tratamiento de valores económicos	Moneda y año originales de cada fuente; sin conversión a costos locales
Exclusiones de infraestructura	Construcción de plantas, fabricación de maquinaria e infraestructura vial preexistente

Fuente: elaboración propia.

La delimitación se aplicó de manera uniforme en E0, E1 y E2. Las diferencias cuantitativas se atribuyeron a las tasas de recuperación, los rechazos y la intensidad del procesamiento; los condicionantes logísticos y económicos se analizaron por separado.

Recopilación y validación de datos

La información utilizada para construir los escenarios se obtuvo mediante una revisión documental estructurada de fuentes oficiales, literatura científica, documentos técnicos y referencias comerciales. La recopilación se orientó a la composición y generación de los RCD, las condiciones operativas, los costos y los indicadores ambientales, variables recurrentes en evaluaciones integradas de estos sistemas (Mesa et al., 2021). Para cada dato se registraron fuente, unidad, año, ámbito geográfico y escenario de uso, con el propósito de conservar su trazabilidad.

La información regulatoria y las condiciones de manejo aplicables en la Ciudad de México se obtuvieron de la NOM-161-SEMARNAT-2011 y de la NACDMX-007-RNAT-2019 (SEMARNAT, 2013; SEDEMA, 2021). Estas disposiciones se utilizaron para identificar las fracciones consideradas, las operaciones permitidas y los requerimientos generales de separación, transporte, aprovechamiento y disposición final. Los parámetros de recuperación, generación de rechazos, consumo energético y capacidad de procesamiento se complementaron con artículos científicos y documentos técnicos relacionados con plantas de valorización de RCD.

Las distancias de transporte reportadas en la literatura se recopilaron para identificar su influencia potencial. No se incorporó una distancia representativa de la Ciudad de México al cálculo base, porque

no se contó con una matriz homogénea de orígenes, destinos, capacidades vehiculares y viajes de retorno; esta ausencia se trató como limitación y prioridad de validación.

La evidencia económica comprendió costos de gestión, inversión, transporte, procesamiento y disposición, así como referencias de ingreso por agregado reciclado. Para evitar comparaciones artificiales, las cifras internacionales se mantuvieron en sus unidades monetarias originales y se utilizaron únicamente como intervalos de referencia.

Los datos ambientales procedieron de inventarios publicados de plantas de reciclaje y disposición de materiales inertes. Se conservaron la unidad funcional, la cobertura de procesos y el ámbito geográfico de cada fuente. El cálculo base incluyó procesamiento y disposición de rechazos, pero excluyó el transporte y los créditos por sustitución de agregado natural para evitar incorporar supuestos locales no verificados.

La validación consideró correspondencia del residuo, compatibilidad de unidades, límites del sistema y trazabilidad. Se priorizaron fuentes revisadas por pares y documentos institucionales; los valores atípicos se conservaron cuando estaban documentados, porque representan la variabilidad tecnológica examinada en el análisis de sensibilidad. La Tabla 2 resume las fuentes y los criterios utilizados.

Tabla 2. Fuentes y criterios de validación de las variables empleadas.

Grupo de datos	Variables principales	Fuente prioritaria	Criterio de validación
RCD	Composición, clasificación y manejo	Normativa y registros oficiales	Correspondencia territorial y regulatoria
Operación	Capacidad, consumo, recuperación y rechazo	Literatura científica y fichas técnicas	Comparación de rangos y condiciones operativas
Logística	Distancias, carga y consumo de combustible	Literatura científica y parámetros técnicos	Identificación de variables críticas e incertidumbre
Economía	Transporte, procesamiento, disposición y precios	Estudios económicos revisados por pares	Moneda, año, alcance y componentes incluidos
Ambiente	Combustible, electricidad y emisiones	Inventarios de ciclo de vida publicados	Unidad funcional, límites y datos de actividad

Fuente: elaboración propia.

Caracterización del proceso de valorización

El proceso de gestión de los RCD se representó como un sistema de transformación de materiales integrado por operaciones de separación, transporte, recepción, clasificación, reducción de tamaño, cribado y manejo de rechazos.

Desde la perspectiva de la Ingeniería Industrial, esta caracterización permitió identificar las entradas, operaciones, recursos, productos y pérdidas correspondientes a cada etapa, así como establecer una estructura común para comparar posteriormente los escenarios.

La entrada correspondió a una tonelada de RCD mineral. Según el escenario, se consideró una separación inicial para retirar materiales incompatibles y reducir la contaminación de la fracción valorizable, condición que influye en la calidad del producto y en las necesidades posteriores de clasificación (Coelho & de Brito, 2013a; Gálvez-Martos et al., 2018).

Después de la carga y el transporte, los RCD ingresaron a recepción para su pesaje, inspección y aceptación. La fracción admitida se clasificó para retirar componentes impropios; posteriormente, la fracción mineral se trituró y cribó para obtener materiales con granulometría aprovechable.

El producto recuperado se consideró agregado reciclado únicamente cuando resultó técnicamente compatible con una aplicación definida. Los materiales impropios, finos fuera de especificación y demás fracciones no aprovechables se contabilizaron como rechazos destinados a disposición final.

La recuperación no se consideró equivalente a la masa procesada, ya que la clasificación y el acondicionamiento generan rechazos y pérdidas. El rendimiento depende de la composición, la eficiencia de separación, la tecnología y el destino del producto (Butera et al., 2015; Caro et al., 2024).

El balance de masa se expresó como:

$$M_{\mathrm{RCD}} = M_{\mathrm{AR}} + M_{\mathrm{R}} + M_{\mathrm{P}}$$

donde MRCD es la masa de RCD que ingresa al sistema; MAR, la masa de agregado reciclado; MR, la masa de rechazos; y MP, las pérdidas del proceso, todas expresadas por unidad funcional.

La eficiencia global de recuperación se calculó como:

$$\eta_{\mathrm{rec}} = \frac{M_{\mathrm{AR}}}{M_{\mathrm{RCD}}} \times 100$$

donde ηrec es la eficiencia global de recuperación (%), MAR es la masa de agregado reciclado y MRCD es la masa de RCD que ingresa al sistema.

La caracterización se utilizó como modelo general del proceso. Las operaciones efectivamente incluidas, sus eficiencias y la distribución de los flujos se modificaron en función de cada escenario.

De esta manera, E0 representó una ruta orientada a la disposición final, mientras que E1 y E2 incorporaron progresivamente operaciones de separación, procesamiento y recuperación.

Formulación de escenarios

Los escenarios se formularon como configuraciones alternativas para la gestión de una tonelada de RCD de composición predominantemente mineral. Su construcción respondió a un enfoque comparativo del tipo "¿qué ocurriría sí?", mediante el cual se modificaron las operaciones, el grado de separación y la eficiencia de recuperación, manteniendo constantes la unidad funcional y los límites generales del sistema. De acuerdo con Börjeson et al. (2006), los escenarios permiten examinar las consecuencias de distintas condiciones posibles, siempre que sus supuestos sean explícitos, coherentes y comparables.

Se definieron tres escenarios: manejo convencional (E0), valorización parcial (E1) y valorización intensiva (E2). Estos representaron una progresión en el nivel de separación, procesamiento y aprovechamiento de los residuos. E0 se utilizó como escenario de referencia, mientras que E1 y E2 incorporaron gradualmente operaciones orientadas a recuperar la fracción mineral. La Tabla 3 sintetiza sus diferencias operativas.

Escenario E0: manejo convencional

E0 representó la ruta de referencia basada en disposición final, con separación limitada y sin producción de agregado reciclado. En el inventario ambiental base, sus cargas correspondieron a la disposición del total de la unidad funcional; el transporte se examinó cualitativamente como fuente de incertidumbre.

Escenario E1: valorización parcial

E1 incorporó separación básica, clasificación, trituración y cribado. Una fracción se recuperó como agregado reciclado y los materiales impropios o fuera de especificación se enviaron a disposición final. Esta configuración añadió consumo de energía y costos de procesamiento, pero también ingresos potenciales por el producto recuperado y una menor disposición final.

Escenario E2: valorización intensiva

E2 consideró separación selectiva en la fuente, inspección más estricta, clasificación avanzada, trituración y cribado, con el propósito de aumentar la recuperación y reducir los rechazos.

Aunque requirió mayor control operativo, E2 produjo una mayor cantidad potencialmente aprovechable. El material solo se contabilizó como recuperado cuando cumplió las condiciones de la aplicación prevista (Butera et al., 2015; Caro et al., 2024).

Tabla 3. Configuración operativa de los escenarios de gestión de RCD

Característica	E0: convencional	E1: valorización parcial	E2: valorización intensiva
Separación en la fuente	Limitada	Básica	Selectiva
Transporte	A disposición final	A instalación de tratamiento	A instalación de tratamiento
Inspección y clasificación	Inspección de aceptación	Clasificación básica	Clasificación y control intensivos
Trituración y cribado	No incluidos	Incluidos	Incluidos con mayor control
Recuperación de materiales	No significativa	Intermedia	Alta
Generación de rechazos	Alta	Intermedia	Reducida
Sustitución de agregado natural	No considerada	Parcial	Mayor

Fuente: elaboración propia.

Parámetros variables y condiciones comunes

Los escenarios compartieron unidad funcional, límites generales y procedimientos de cálculo. Variaron en separación, recuperación, rechazo e intensidad del procesamiento. En todos los casos se verificó el cierre del balance de masa y se evitó contabilizar dos veces un mismo beneficio (Iodice et al., 2021).

Métodos de evaluación y análisis de sensibilidad

Los escenarios se evaluaron con indicadores técnicos, ambientales y económicos referidos a una tonelada de RCD mineral. La tasa de recuperación (r) se obtuvo como el cociente entre la masa recuperada y la masa de entrada; el rechazo se calculó por diferencia, verificando en cada escenario el cierre del balance de masa.

$$M_{\mathrm{RCD}} = M_{\mathrm{AR}} + M_{\mathrm{R}} + M_{\mathrm{P}}$$

donde MRCD es la masa de entrada, MAR la masa de agregado recuperado, MR la masa de rechazo y MP las pérdidas del proceso. En los escenarios calculados, las pérdidas fuera de especificación se agruparon con el rechazo, por lo que MP no se contabilizó como flujo independiente.

Para el inventario ambiental parcial, la energía y el GWP se calcularon ponderando las cargas del material procesado y del rechazo dispuesto:

$$I_{\mathrm{esc}} = r * I_{\mathrm{proc}} + (1 - r) * I_{\mathrm{disp}}$$

donde I_{esc} es el indicador del escenario, I_{proc} la carga unitaria del procesamiento e I_{disp} la carga unitaria de disposición. Para E1 se empleó la mediana del inventario de procesamiento y para E2 el percentil 75; esta elección representó una condición conservadora de mayor separación y control. El transporte y los créditos por sustitución se excluyeron del cálculo base.

La dimensión económica se examinó mediante costos publicados de sistemas fijos, móviles e híbridos. Los valores se utilizaron para discutir inversión, utilización de capacidad, transporte, disposición e ingresos potenciales, sin convertirlos en una estimación financiera local.

El análisis de sensibilidad varió r entre 0 y 90 % y combinó cada nivel de recuperación con el mínimo, la mediana, el percentil 75 y el máximo GWP de procesamiento observados en nueve plantas. Las demás condiciones se mantuvieron constantes. La Tabla 4 resume los indicadores comparados.

Tabla 4. Indicadores utilizados para comparar los escenarios.

Dimensión	Indicador	Unidad
Técnica	Recuperación de material	% y kg/t de RCD
Técnica	Rechazo a disposición	% y kg/t de RCD
Técnica	Sustitución potencial	t/t de RCD
Ambiental	Demanda energética parcial	MJ/t de RCD
Ambiental	GWP parcial	kg CO_2-eq/t de RCD
Económica	Costos publicados	USD/t o EUR/t
Sensibilidad	GWP respecto de recuperación	kg CO_2-eq/t de RCD

Fuente: elaboración propia.

Los indicadores se compararon mediante valores normalizados por unidad funcional. No se construyó un índice único de sostenibilidad, debido a que su elaboración requeriría asignar ponderaciones subjetivas a las dimensiones técnica, económica y ambiental. En su lugar, los resultados se presentaron de manera conjunta para identificar ventajas, compensaciones y posibles conflictos entre los escenarios.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados se construyeron mediante una síntesis cuantitativa de datos secundarios y su normalización a la unidad funcional de una tonelada de RCD predominantemente mineral. La base distingue tres niveles de evidencia: a) valores reportados directamente por las fuentes; b) estadísticos calculados a partir de inventarios publicados; y c) resultados derivados para los escenarios E0, E1 y E2. Esta separación es necesaria porque las cifras proceden de territorios, tecnologías y límites de sistema

diferentes. En consecuencia, los resultados representan escenarios de gabinete para contrastar posteriormente con datos locales y no mediciones realizadas en una instalación de la Ciudad de México.

Integración y comparabilidad de la evidencia

La revisión ampliada combinó estudios de caso, evaluaciones de ciclo de vida, análisis económicos y fuentes institucionales. Butera et al. (2015) y Dierks et al. (2024) utilizaron como unidad funcional la gestión de una tonelada de residuo mineral o concreto, lo que ofrece una correspondencia razonable con el presente trabajo. Ferronato et al. (2023) aportaron tasas de recuperación y costos para una ciudad latinoamericana, mientras que Hosseini et al. (2025) reunieron inventarios de nueve plantas en seis países o regiones. Caro et al. (2024) e Iodice et al. (2021) se conservaron como contrastes sistémicos y no como entradas directas, porque sus resultados corresponden a escalas regionales y contienen beneficios ambientales o sociales que exceden los límites del cálculo base. La función asignada a cada fuente se resume en la Tabla 5.

Tabla 5. Evidencia utilizada y función dentro del análisis.

Fuente	Ámbito	Dato principal	Función en el análisis
Butera et al. (2015)	Dinamarca	1 Mg de RCD mineral; reciclaje frente a disposición	Marco de comparación y límites
Ferronato et al. (2023)	La Paz	56.1–71.1 % de recuperación; 7.8–31.1 USD/t	Parametrización técnica y económica
Bayram y Greiff (2023)	76 artículos	Calidad, sustitución e incertidumbre como vacíos frecuentes	Control de calidad metodológica
Caro et al. (2024)	Unión Europea	89 % de recuperación; 264 kg CO_2-eq/t evitados; 25 EUR/t	Contraste ambiental-económico
Dierks et al. (2024)	Alemania	0.84 t de agregado natural sustituido; −12.3 kg CO_2-eq/t	Contraste de sustitución y transporte
Hosseini et al. (2025)	Nueve plantas	12.5–73.6 MJ/t; 0.939–5.39 kg CO_2-eq/t	Inventario ambiental
SEDEMA (2024); CTCN (2021)	Ciudad de México	55,449 t recuperadas; 65 % del volumen reportado a disposición	Contexto territorial

Fuente: elaboración propia a partir de las referencias indicadas.

La comparabilidad ambiental se examinó con especial cautela. Bayram y Greiff (2023), después de revisar 76 artículos, encontraron que más de 18 % no informaba de manera transparente el software, la base de datos o el método de evaluación, además de observar escasa consideración de la calidad del agregado reciclado. Por ello, en esta investigación no se mezclaron directamente beneficios que incluyen sustitución de materiales con cargas limitadas al procesamiento. La tasa de recuperación se

trató como indicador de flujo, pero no como sinónimo automático de circularidad: el 89 % reportado para la Unión Europea puede incluir usos de menor valor, como advierten Caro et al. (2024).

Balance de materiales y desempeño técnico

E0 se definió como la ruta convencional sin recuperación significativa. Para E1 y E2 se adoptaron los extremos del intervalo de reciclaje de agregados inertes de Ferronato et al. (2023): 56.1 y 71.1 %, respectivamente. Los porcentajes no se presentan como tasas observadas en la Ciudad de México, sino como referencias reproducibles de valorización parcial e intensiva en un contexto urbano latinoamericano. El balance normalizado se presenta en la Tabla 6.

Tabla 6. Balance de materiales normalizado. *Estimación exploratoria al aplicar el factor de sustitución 0.84 de Dierks et al. (2024) al material recuperado; no constituye un resultado medido en la CDMX.

Indicador	Unidad	E0	E1	E2
Recuperación	%	0.0	56.1	71.1
Material recuperado	kg/t RCD	0	561	711
Rechazo a disposición	kg/t RCD	1,000	439	289
Agregado natural potencial*	t/t RCD	0.000	0.471	0.597

Fuente: elaboración propia.

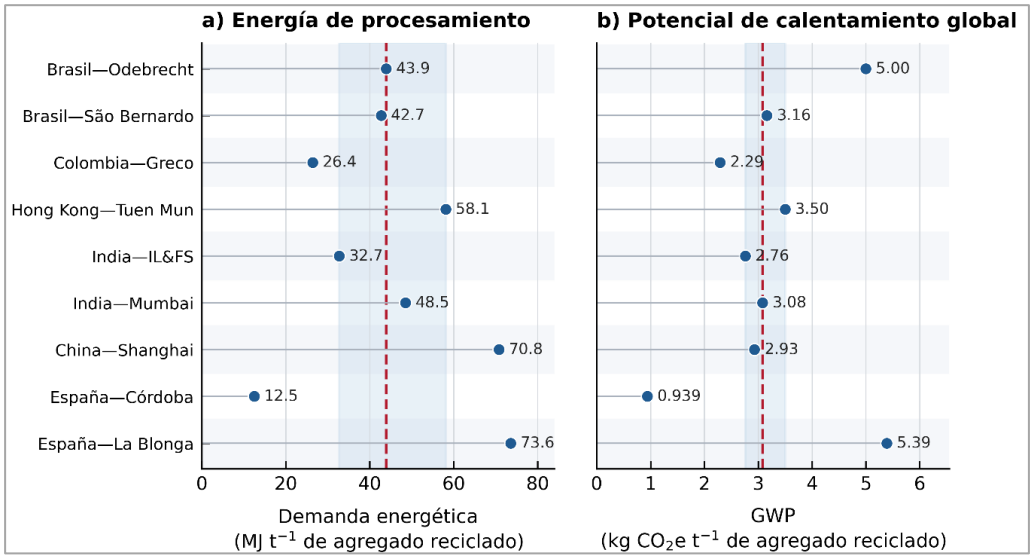
E2 recuperó 150 kg/t adicionales frente a E1, un incremento relativo de 26.7 %, y disminuyó el rechazo en 34.2 %. Si, únicamente como prueba de sensibilidad, se aplicara el factor alemán de sustitución de 0.84 t de agregado natural por tonelada de residuo de concreto procesado, el desplazamiento potencial sería de 0.471 t/t para E1 y 0.597 t/t para E2. Este cálculo debe interpretarse como potencial técnico: Dierks et al. (2024) incluyeron pérdidas de procesamiento y equivalencia funcional por densidad, mientras que el flujo aquí estudiado comprende RCD minerales mixtos cuya composición y calidad todavía deben medirse.

El contexto local respalda la pertinencia de disminuir la disposición, aunque no permite calcular una tasa total equivalente. El CTCN (2021) señaló que 65 % del volumen de RCD reportado —461,276.61 m^3/año— se dirigía a disposición. Posteriormente, SEDEMA (2024) informó la recuperación de 55,449 t con apoyo de dos plantas de tratamiento. Las unidades, periodos y universos de ambos datos difieren, por lo que no deben dividirse entre sí; en conjunto evidencian la coexistencia de una presión considerable sobre la disposición y una capacidad de valorización en desarrollo.

Variabilidad del procesamiento

El inventario de Hosseini et al. (2025) muestra que la tecnología de reciclaje no puede representarse adecuadamente con un único valor universal. Entre nueve plantas, la electricidad varió de 0.650 a 7.76 kWh/t de agregado, la demanda energética de 12.5 a 73.6 MJ/t y el GWP de 0.939 a 5.39 kg CO_2-eq/t. Las relaciones máximo/mínimo fueron de 5.9 para energía y 5.7 para GWP. La dispersión se asoció con la combinación de electricidad y diésel, la eficiencia de los equipos, el nivel de clasificación y las condiciones regionales. La Figura 3 muestra la dispersión de ambos indicadores entre plantas.

Figura 3. Variabilidad de los inventarios de procesamiento de agregado reciclado. Las líneas discontinuas representan las medianas.



Fuente: elaboración propia con datos tabulados por Hosseini et al. (2025).

La mediana fue 43.9 MJ/t y 3.08 kg CO_2-eq/t; el percentil 75 alcanzó 58.1 MJ/t y 3.50 kg CO_2-eq/t. Se seleccionó la mediana para E1 y el percentil 75 para E2, de modo que la valorización intensiva incorporara una carga conservadora por mayor separación y control del producto. Esta elección no presupone que una planta intensiva sea necesariamente menos eficiente: representa la incertidumbre tecnológica hasta disponer de consumos locales. La amplitud observada también justifica que el manuscrito reporte el rango completo y no solamente promedios.

Desempeño ambiental de los escenarios

A los rechazos se aplicó el inventario de disposición de material inerte reproducido por Hosseini et al. (2025): 158 MJ/t y 5.17 kg CO_2-eq/t. El resultado base se calculó como la suma de las cargas del material procesado y del rechazo dispuesto.

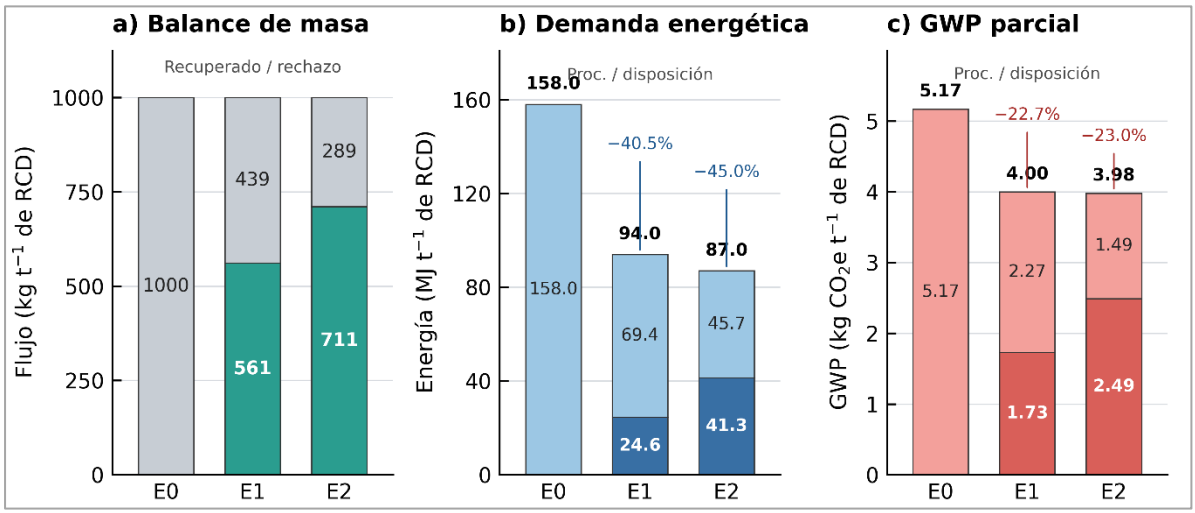
No se incorporaron el transporte ni los créditos por producción evitada de agregado natural; por ello, se trata de un inventario parcial y no de un análisis de ciclo de vida completo conforme a ISO 14040 e ISO 14044 (ISO, 2006a, 2006b). La Tabla 7 presenta la descomposición del inventario por escenario y la Figura 4 integra el balance de masa con los indicadores ambientales.

Tabla 7. Energía (MJ/t de RCD) y GWP (kg CO_2-eq/t de RCD) por componente.

Escenario	Energía procesamiento	Energía disposición	Energía total	GWP procesamiento	GWP disposición	GWP total
E0	0.00	158.00	158.00	0.00	5.17	5.17
E1	24.63	69.36	93.99	1.73	2.27	4.00
E2	41.31	45.66	86.97	2.49	1.49	3.98

Fuente: elaboración propia con el inventario de Hosseini et al. (2025).

Figura 4. Balance de masa y descomposición de los indicadores ambientales.



Fuente: elaboración propia con datos de Ferronato et al. (2023) y Hosseini et al. (2025).

En comparación con E0, E1 redujo 40.5 % la energía y 22.7 % el GWP, mientras que E2 alcanzó reducciones de 45.0 y 23.0 %. La mejora de E2 respecto de E1 fue clara en el balance de masa, pero pequeña en emisiones: apenas 0.015 kg CO_2-eq/t en el cálculo parcial. La mayor carga del procesamiento intensivo compensó casi todo el beneficio obtenido por disponer 150 kg/t menos. Este resultado evita una conclusión simplista: elevar la tasa de recuperación mejora la desviación de relleno, pero el beneficio climático depende del desempeño de la planta y del destino efectivo del producto.

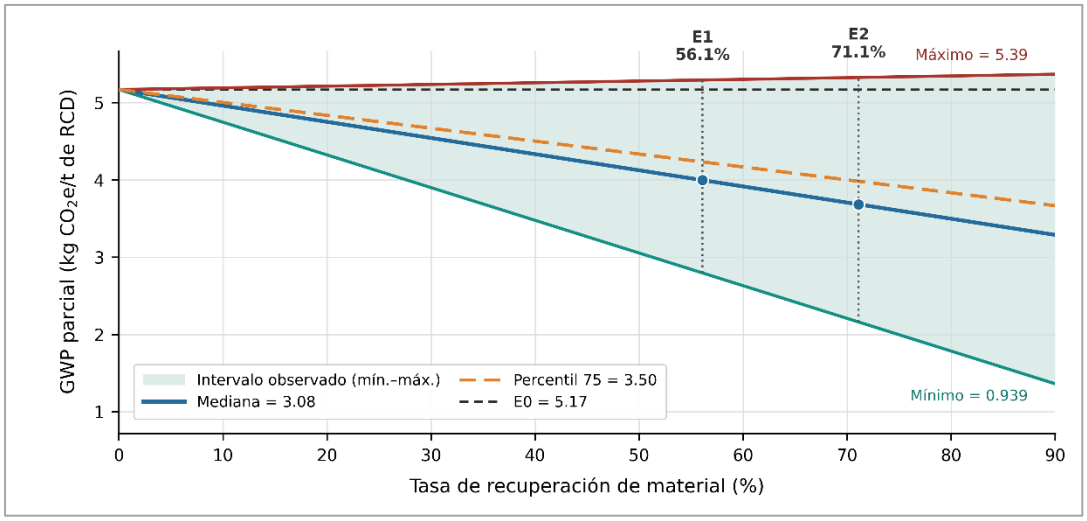
Los resultados publicados con límites más amplios pueden ser considerablemente mayores. Caro et al. (2024) estimaron un ahorro aproximado de 264 kg CO_2-eq/t para tecnologías avanzadas en la Unión Europea porque incorporaron rutas alternativas, efectos evitados y doce fracciones.

Dierks et al. (2024) calcularon una reducción neta de 12.3 kg CO_2-eq/t al elevar la calidad del reciclaje de concreto: 10.4 kg CO_2-eq/t de cargas adicionales fueron compensadas por procesamiento móvil evitado, producción y transporte de agregado natural evitados y cambios en otros flujos. Estas cifras no contradicen el resultado parcial; muestran que el límite del sistema y el crédito de sustitución determinan la magnitud final.

Sensibilidad e implicaciones logísticas

La sensibilidad se evaluó variando la recuperación entre 0 y 90 % y utilizando el mínimo, la mediana, el percentil 75 y el máximo GWP observados en las nueve plantas. Para cada combinación se aplicó $GWP = r \cdot GWP_{proc} + (1-r) \cdot GWP_{disp}$, donde r es la fracción recuperada. El análisis conserva constante el factor de disposición y no añade créditos evitados. La Figura 5 representa la envolvente resultante y las posiciones de E1 y E2.

Figura 5. Sensibilidad del GWP parcial respecto de la tasa de recuperación y la intensidad del procesamiento. La banda sombreada representa el intervalo mínimo-máximo observado; las líneas corresponden a la mediana y al percentil 75.



Fuente: elaboración propia con datos de Hosseini et al. (2025).

Cuando el procesamiento se mantiene por debajo de 5.17 kg CO_2-eq/t, aumentar la recuperación disminuye el GWP parcial. Sin embargo, con el máximo observado de 5.39 kg CO_2-eq/t, la pendiente se vuelve ligeramente desfavorable: la recuperación por sí sola no garantiza menores emisiones antes de contabilizar sustitución. En los puntos E1 y E2, el intervalo completo de tecnologías produce aproximadamente 2.80–5.29 y 2.16–5.33 kg CO_2-eq/t, respectivamente. La selección tecnológica es, por tanto, tan relevante como la tasa de recuperación.

El transporte permanece como la principal incertidumbre no cuantificada. Hosseini et al. (2025) concluyeron que recorridos largos o sistemas ineficientes pueden anular la ventaja del agregado reciclado. Dierks et al. (2024) identificaron el transporte como el único parámetro verdaderamente significativo en su sensibilidad y emplearon recorridos base de 25 km hacia la planta y el sitio de uso, frente a 50 km para agregados naturales y disposición. Estas distancias no deben trasladarse a la Ciudad de México; indican qué datos locales deben priorizarse: origen-destino, capacidad vehicular, viajes vacíos y proximidad entre planta y mercado.

Evidencia económica y configuración operativa

La evaluación económica mostró que la viabilidad de la valorización de RCD no depende únicamente del costo de trituración, sino de la configuración completa del sistema. Entre las variables determinantes se encuentran la separación en el origen, la distancia de transporte, la capacidad utilizada de los equipos, la disposición de los rechazos y la existencia de un mercado estable para los agregados reciclados. Debido a que no se dispuso de cotizaciones locales homogéneas para la Ciudad de México, los valores publicados se utilizaron como referencias comparativas y no como costos directamente transferibles al caso de estudio.

Ferronato et al. (2023) estimaron costos de gestión entre 7.8 y 31.1 USD por tonelada de RCD para diferentes escenarios implementados en La Paz, Bolivia, considerando un horizonte de evaluación de 20 años. Las alternativas con instalaciones fijas presentaron mayores requerimientos de inversión y una mayor sensibilidad al volumen procesado. En contraste, la configuración híbrida, que combinó separación en el origen con plantas fijas y unidades móviles, presentó el mejor equilibrio entre recuperación y asequibilidad. El estudio también mostró que una mayor eficiencia de separación puede reducir los costos de mantenimiento y disposición, además de aumentar los ingresos obtenidos por los materiales recuperados (Ferronato et al., 2023).

La evidencia europea confirma que el escenario de mejor desempeño ambiental no necesariamente presenta el menor costo operativo. Caro et al. (2024) estimaron un costo aproximado de 25 EUR/t para rutas avanzadas de reciclaje de RCD. No obstante, encontraron que el tránsito desde la disposición hacia el reciclaje puede reducir los costos sociales totales cuando se consideran las externalidades ambientales evitadas.

Esta diferencia evidencia la importancia de distinguir entre costos financieros del operador y costos socioeconómicos del sistema (Caro et al., 2024). La Tabla 8 sintetiza los valores económicos utilizados como referencia.

Tabla 8. Síntesis de la evidencia económica utilizada como referencia

Indicador	Valor publicado	Alcance
Costo de gestión de RCD	7.8-31.1 USD/t	Escenarios para La Paz, Bolivia
Costo anual del sistema	2.3-9.0 millones USD/año	Horizonte de evaluación de 20 años
Reciclaje avanzado	Aproximadamente 25 EUR/t	Doce fracciones de RCD en la Unión Europea
Configuración favorable	Sistema híbrido	Separación en origen y plantas fijas-móviles

Fuente: elaboración propia con información de Ferronato et al. (2023) y Caro et al. (2024).

Comparación integrada y alcance de los resultados

La comparación conjunta mostró que los escenarios de valorización superaron al manejo convencional en recuperación de materiales, reducción de rechazos y desempeño ambiental parcial. El escenario E1 permitió recuperar 561 kg de material por tonelada de RCD, mientras que E2 alcanzó 711 kg/t. En comparación con E0, estos resultados representaron una disminución del material destinado a disposición final de 56.1 y 71.1 %, respectivamente. La diferencia de 150 kg/t entre E1 y E2 confirma que una separación y un procesamiento más intensivos mejoran el aprovechamiento de la fracción mineral.

En la dimensión ambiental, E1 redujo 40.5 % la demanda energética y 22.7 % el GWP parcial respecto de E0; en E2, las reducciones fueron de 45.0 y 23.0 %, respectivamente. Sin embargo, la diferencia de GWP entre E1 y E2 fue únicamente de 0.015 kg CO_2e/t de RCD. Esto se debió a que la menor cantidad de rechazo en E2 fue compensada parcialmente por el mayor consumo asociado con su procesamiento. Por tanto, incrementar la recuperación no produce necesariamente una reducción proporcional de las emisiones, especialmente cuando la tecnología utilizada presenta una elevada intensidad energética.

El análisis de sensibilidad reforzó esta interpretación. Cuando el GWP del procesamiento se mantuvo por debajo del factor de disposición de 5.17 kg CO_2e/t, el aumento de la recuperación redujo el impacto total. En cambio, al emplear el máximo observado de 5.39 kg CO_2e/t, la tendencia se volvió ligeramente desfavorable.

Este comportamiento coincide con la literatura, que identifica la eficiencia tecnológica, el transporte y el grado de sustitución efectiva de materiales vírgenes como variables decisivas para determinar el beneficio neto del reciclaje (Hosseini et al., 2025; Dierks et al., 2024).

Desde la perspectiva económica y operativa, E1 representa una alternativa de transición con menores exigencias de separación, capacidad instalada y control del proceso. E2 ofrece el mayor aprovechamiento material, pero requiere asegurar un flujo suficiente de residuos, una operación continua y un mercado capaz de absorber el agregado reciclado. La experiencia reportada por Ferronato et al. (2023) indica que las configuraciones híbridas, basadas en separación en el origen y combinación de instalaciones fijas y móviles, pueden equilibrar los costos logísticos y la recuperación. Asimismo, Caro et al. (2024) advierten que las rutas con mejor desempeño ambiental pueden presentar mayores costos financieros, aunque resulten favorables cuando se incorporan los costos sociales evitados.

En consecuencia, E2 se identificó como el escenario con mejor desempeño técnico y ambiental parcial, pero su conveniencia económica para la Ciudad de México permanece condicionada por las distancias de transporte, la utilización de la capacidad, los costos de disposición y el valor comercial del producto recuperado. Los resultados deben interpretarse como una comparación sustentada en datos secundarios normalizados y no como mediciones de una instalación específica. La ausencia de información primaria sobre rutas, consumos, composición de los RCD y precios locales constituye la principal limitación del estudio. La validación posterior con datos operativos permitirá ajustar los inventarios y confirmar si la ventaja observada se conserva bajo las condiciones reales del sistema.

CONCLUSIONES

La evaluación mediante escenarios permitió comparar el manejo convencional y dos alternativas de valorización de residuos de construcción y demolición de composición predominantemente mineral. Los resultados mostraron que la incorporación de operaciones de separación, clasificación y procesamiento puede disminuir la cantidad destinada a disposición final y mejorar el aprovechamiento de los materiales. El escenario E1 recuperó 561 kg/t de RCD, mientras que E2 alcanzó 711 kg/t, frente a la ausencia de recuperación considerada en E0.

En la evaluación ambiental parcial, E1 redujo 40.5 % la demanda energética y 22.7 % el potencial de calentamiento global respecto del escenario convencional. E2 alcanzó reducciones de 45.0 y 23.0 %,

respectivamente. Aunque E2 presentó el mejor balance de masa, su ventaja sobre E1 en emisiones fue limitada, debido a que el mayor requerimiento energético del procesamiento compensó parcialmente el beneficio obtenido por la reducción de los rechazos. Por consiguiente, una mayor tasa de recuperación no garantiza por sí sola el mejor desempeño ambiental; también deben considerarse la eficiencia de los equipos, el consumo energético, el transporte y el destino efectivo del agregado reciclado.

Desde el punto de vista de la ingeniería industrial, E1 representa una alternativa de transición con menores exigencias tecnológicas y operativas, mientras que E2 ofrece el mayor aprovechamiento material, pero requiere una alimentación constante, una utilización adecuada de la capacidad instalada y un mercado estable para el producto recuperado. La evidencia económica analizada indica que una configuración híbrida, basada en la separación en el origen y la combinación de instalaciones fijas y móviles, puede reducir movimientos innecesarios de material y mejorar el equilibrio entre recuperación y costos. No obstante, su viabilidad en la Ciudad de México depende de las distancias de transporte, las tarifas de disposición, los costos energéticos y el precio de venta del agregado reciclado.

En términos generales, E2 se identificó como el escenario con mejor desempeño técnico y ambiental parcial, aunque su adopción debe plantearse de manera condicionada y progresiva. Una estrategia razonable consistiría en iniciar con esquemas equivalentes a E1 y avanzar hacia una valorización intensiva conforme aumenten la separación en la fuente, la capacidad de procesamiento y la demanda de materiales secundarios. Esta transición permitiría reducir los riesgos derivados de instalar capacidad ociosa o producir agregados sin una salida comercial definida.

Los resultados deben interpretarse considerando que el estudio utilizó información secundaria normalizada y que no incorporó mediciones directas de una planta específica, recorridos reales de transporte ni créditos ambientales por sustitución de agregados naturales. Por ello, no constituyen una estimación definitiva del desempeño del sistema de la Ciudad de México. Como continuidad de la investigación, se recomienda validar los escenarios con datos primarios sobre composición de los RCD, rutas de recolección, consumo de combustible, capacidad efectiva, costos locales y calidad del agregado reciclado. Esta información permitirá desarrollar una evaluación integral y apoyar decisiones sobre localización, tecnología y organización logística del sistema de valorización.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Bayram, B., & Greiff, K. (2023). Life cycle assessment on construction and demolition waste recycling: A systematic review analyzing three important quality aspects. *The International Journal of Life Cycle Assessment, 28*(8), 967-989. https://doi.org/10.1007/s11367-023-02145-1

Börjeson, L., Höjer, M., Dreborg, K.-H., Ekvall, T., & Finnveden, G. (2006). Scenario types and techniques: Towards a user's guide. *Futures, 38*(7), 723-739. https://doi.org/10.1016/j.futures.2005.12.002

Butera, S., Christensen, T. H., & Astrup, T. F. (2015). Life cycle assessment of construction and demolition waste management. Waste Management, *44*, 196-205. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.07.011

Cardoso, R., Silva, R. V., de Brito, J., & Dhir, R. K. (2016). Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in geotechnical applications: A literature review. Waste Management, *49*, 131-145. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.12.021

Caro, D., Lodato, C., Damgaard, A., Cristóbal, J., Foster, G., Flachenecker, F., & Tonini, D. (2024). Environmental and socio-economic effects of construction and demolition waste recycling in the European Union. *Science of the Total Environment, 908*, Article 168295. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168295

Climate Technology Centre and Network. (2021). Analysis of the current situation of the construction and demolition sector in respect of the circular economy in Mexico City. https://www.ctc-n.org/technical-assistance/projects/analysis-current-situation-construction-and-demolition-sector-respect

Coelho, A., & de Brito, J. (2013a). Economic viability analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal-Part I: Location, materials, technology and economic analysis. *Journal of Cleaner Production, 39*, 338-352. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.08.024

Coelho, A., & de Brito, J. (2013b). Economic viability analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal-Part II: Economic sensitivity analysis. *Journal of Cleaner Production, 39*, 329-337. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.05.006

Dierks, C., Hagedorn, T., Mack, T., & Zeller, V. (2024). Consequential life cycle assessment of demolition waste management in Germany. *Frontiers in Sustainability, 5*, Article 1417637. https://doi.org/10.3389/frsus.2024.1417637

Di Maria, A., Eyckmans, J., & Van Acker, K. (2018). Downcycling versus recycling of construction and demolition waste: Combining LCA and LCC to support sustainable policy making. *Waste Management, 75*, 3-21. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.01.028

European Commission. (s. f.). Construction and demolition waste. Recuperado el 3 de septiembre de 2026, de https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/construction-and-demolition-waste_en

Ferronato, N., Fuentes Sirpa, R. C., Guisbert Lizarazu, E. G., Conti, F., & Torretta, V. (2023). Construction and demolition waste recycling in developing cities: Management and cost analysis. *Environmental Science and Pollution Research, 30*(9), 24377-24397. https://doi.org/10.1007/s11356-022-23502-x

Gálvez-Martos, J. L., Styles, D., Schoenberger, H., & Zeschmar-Lahl, B. (2018). Construction and demolition waste best management practice in Europe. *Resources, Conservation and Recycling, 136*, 166-178. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.04.016

Hernández-Sampieri, R., & Mendoza Torres, C. P. (2018). Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta. McGraw-Hill Education.

Hosseini, S. A., Asghari, V., Liu, X., Hsu, S.-C., & Poon, C.-S. (2025). Cross-country life cycle assessment of construction and demolition waste recycling with evaluation of energy use, carbon emissions, and regional trade-offs. *Scientific Reports, 15*, Article 41377. https://doi.org/10.1038/s41598-025-25387-5

International Organization for Standardization. (2006a). *I*SO 14040:2006 environmental management-Life cycle assessment-Principles and framework. https://www.iso.org/standard/37456.html

International Organization for Standardization. (2006b). ISO 14044:2006 environmental management-Life cycle assessment-Requirements and guidelines. https://www.iso.org/standard/38498.html

Iodice, S., Garbarino, E., Cerreta, M., & Tonini, D. (2021). Sustainability assessment of construction and demolition waste management applied to an Italian case. Waste Management*, 128*, 83-98. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.04.031

Marzouk, M., & Azab, S. (2014). Environmental and economic impact assessment of construction and demolition waste disposal using system dynamics. Resources, Conservation and Recycling*, 82*, 41-49. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.10.015

Mercante, I. T., Bovea, M. D., Ibáñez-Forés, V., & Arena, A. P. (2012). Life cycle assessment of construction and demolition waste management systems: A Spanish case study. *The International Journal of Life Cycle Assessment, 17*, 232-241. https://doi.org/10.1007/s11367-011-0350-2

Mesa, J. A., Fúquene-Retamoso, C., & Maury-Ramírez, A. (2021). Life cycle assessment on construction and demolition waste: A systematic literature review. *Sustainability, 13*(14), Article 7676. https://doi.org/10.3390/su13147676

Rosado, L. P., Vitale, P., Penteado, C. S. G., & Arena, U. (2019). Life cycle assessment of construction and demolition waste management in a large area of São Paulo State, Brazil. *Waste Management, 85*, 477-489. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.01.011

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2013). Norma Oficial Mexicana NOM-161-SEMARNAT-2011. Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5286505&fecha=01/02/2013

Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. (2021). Norma Ambiental para la Ciudad de México NACDMX-007-RNAT-2019. Gaceta Oficial de la Ciudad de México. https://proyectos.sedema.cdmx.gob.mx/datos/gocdmx/gaceta-simple/norma-ambiental-para-la-ciudad-de-mexico-nacdmx-007-rnat-2019-que-establece-la-clasificacion-y-especificaciones-de-manejo-integral-para-los-residuos-de-la-construccion-y-demolición-en-la-cdmx

Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. (2024, 28 de agosto). Recupera Sedema 55 mil 449 toneladas de residuos de la construcción y demolición. https://sedema.cdmx.gob.mx/comunicacion/nota/recupera-sedema-55-mil-449-toneladas-de-residuos-de-la-construccion-y-demolicion

Silva, R. V., de Brito, J., & Dhir, R. K. (2014). Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. *Construction and Building Materials, 65*, 201-217. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.117

United Nations Environment Programme. (2025). Global status report for buildings and construction 2024/2025: Not just another brick in the wall. https://www.unep.org/resources/report/global-status-report-buildings-and-construction-20242025

Yin, R. K. (2018). Case study research and applications: Design and methods (6th ed.). SAGE Publications.

Zhang, C., Hu, M., Yang, X., Miranda-Xicotencatl, B., Sprecher, B., Di Maio, F., Zhong, X., & Tukker, A. (2020). Upgrading construction and demolition waste management from downcycling to recycling in the Netherlands. *Journal of Cleaner Production, 266*, Article 121718. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121718