Research Club Scientia Vol. 4, No 4
Frecuencia: Octubre–Diciembre 2026
ISSN: 3103 - 1315
DOI: https://doi.org/10.65415/1f3h0x65

Materiales para la economía circular: valorización de residuos industriales en materiales de alto valor sin comprometer su desempeño. Revisión sistemática de literatura

Materials for the circular economy: valorization of industrial waste into high-value materials without compromising performance. A systematic literature review

Materiali per l'economia circolare: valorizzazione dei rifiuti industriali in materiali ad alto valore senza comprometterne le prestazioni. Revisione sistematica della letteratura

Michelle Estefanía Cáceres Gurumendi[I]
mcaceresg2@unemi.edu.ec
ORCID: https://orcid.org/0009-0006-0685-9272
Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Carrera Ingeniería Industrial, Universidad Estatal de Milagro, Ecuador

Josué Alan Fariño Valdiviezo[I]
jfarinov5@unemi.edu.ec
ORCID: https://orcid.org/0009-0000-5862-3516
Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Carrera Ingeniería Industrial, Universidad Estatal de Milagro, Ecuador

Keila Trinidad Moran Villamar[I]
kmoranv8@unemi.edu.ec
ORCID: https://orcid.org/0009-0000-3046-0233
Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Carrera Ingeniería Industrial, Universidad Estatal de Milagro, Ecuador

Michael Tobias Peralta Uyaguari[I]
mperaltau@unemi.edu.ec
ORCID: https://orcid.org/0009-0002-6650-8301
Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Carrera Ingeniería Industrial, Universidad Estatal de Milagro, Ecuador

Jorge Tomas Holguín Anzules[I]
jholguina7@unemi.edu.ec
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4454-4184
Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Carrera Ingeniería Industrial, Universidad Estatal de Milagro, Ecuador

Correspondencia: mcaceresg2@unemi.edu.ec

.

Materiales para la economía circular: valorización de residuos industriales en materiales de alto valor sin comprometer su desempeño. Revisión sistemática de literatura

Artículo de Investigación

Aceptado: 27/Noviembre/2026 **Publicado:** 28/Noviembre/2026

I. Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Carrera Ingeniería Industrial, Universidad Estatal de Milagro, Ecuador

.

Resumen

Evaluar si los residuos industriales pueden transformarse en materiales de alto valor con un desempeño equivalente al de los productos convencionales constituye uno de los principales retos de la economía circular actual. Para abordar esta problemática en el entorno industrial, se desarrolló una revisión sistemática bajo los lineamientos PRISMA 2020, analizando investigaciones publicadas entre 2025 y 2026 en la base de datos Scopus. Tras filtrar 260 estudios iniciales, nos quedamos con 28 trabajos relevantes y seleccionamos 10 casos representativos dos por cada tipo de residuo para compararlos a fondo.

Los resultados son muy prometedores: En 5 de los 10 estudios, los materiales reciclados igualaron o superaron el desempeño de las materias primas vírgenes. En otros 4 casos se logró el mismo éxito ajustando las dosis o los procesos de fabricación, y apenas en 1 estudio se observaron pérdidas de resistencia mecánica. Entre las soluciones más destacadas figuran la zeolita BEA creada a partir de ceniza volante, un cementante de fosfoyeso activado con CO_2, estructuras MOF derivadas de plásticos PET, nanosílice extraída de la cascarilla de arroz y cátodos de baterías ($LiFePO_4$) regenerados. Eso sí, el factor decisivo no fue tanto el origen del residuo, sino la precisión en su pretratamiento y dosificación. Eso sí, hay que tomar estos datos con cautela: todas las pruebas se hicieron en laboratorio y todavía falta comprobar cómo resisten estos materiales a escala industrial y a lo largo de todo su ciclo de vida.

Palabras clave: Economía circular; valorización de residuos; residuos industriales; materiales de alto valor; revisión sistemática.

Abstract

Evaluating whether industrial waste can be transformed into high-value materials with performance equivalent to conventional products represents one of the main challenges of today's circular economy. To address this issue in the industrial sector, a systematic review was conducted following PRISMA 2020 guidelines, analyzing research published between 2025 and 2026 in the Scopus database. After screening 260 initial studies, 28 relevant works were retained, and 10 representative cases—two per waste type—were selected for an in-depth comparison.

The results are highly promising: in 5 out of the 10 studies, recycled materials matched or exceeded the performance of virgin raw materials. In another 4 cases, the same success was achieved by adjusting dosages or manufacturing processes, while losses in mechanical strength were observed in only 1 study. Among the most notable solutions are BEA zeolite synthesized from fly ash, a CO_2-activated phosphogypsum binder, MOF structures derived from PET plastics, nanosilica extracted from rice husk, and regenerated $LiFePO_4$ battery cathodes. Notably, the decisive factor was not so much the origin of the waste, but rather the precision of its pretreatment and dosage.

However, these findings must be interpreted with caution: all tests were conducted at laboratory scale, and the industrial-scale durability and full life-cycle performance of these materials remain to be verified.

Keywords: Circular economy; waste valorization; industrial waste; high-value materials; systematic review.

Riassunto

Valutare se i rifiuti industriali possano essere trasformati in materiali ad alto valore con prestazioni equivalenti a quelle dei prodotti convenzionali è una delle principali sfide dell'economia circolare. Per affrontare il problema in ambito industriale è stata condotta una revisione sistematica secondo le linee guida PRISMA 2020, analizzando studi pubblicati tra il 2025 e il 2026 e indicizzati in Scopus. Dei 260 record iniziali, 28 studi sono risultati pertinenti e dieci casi rappresentativi, due per ciascuna tipologia di rifiuto, sono stati selezionati per il confronto.

In cinque studi su dieci, i materiali riciclati hanno eguagliato o superato le prestazioni delle materie prime vergini. In altri quattro casi si sono ottenute prestazioni equivalenti modificando i dosaggi o i processi produttivi, mentre in un solo studio si è osservata una riduzione della resistenza meccanica. Tra le soluzioni più rilevanti figurano la zeolite BEA ottenuta da ceneri volanti, un legante a base di fosfogesso attivato con CO_2, strutture metallo-organiche (MOF) derivate da plastica PET, nanosilice estratta dalla lolla di riso e catodi di batterie $LiFePO_4$ rigenerati. I risultati sono dipesi soprattutto dalla precisione del pretrattamento e del dosaggio. Tutte le prove sono state condotte in laboratorio. Le prestazioni su scala industriale e lungo l'intero ciclo di vita restano da verificare.

Parole chiave: Economia circolare; valorizzazione dei rifiuti; rifiuti industriali; materiali ad alto valore; revisione sistematica.

1. Introducción

La industria genera cantidades de residuos que los sistemas lineales de disposición no consiguen gestionar. Escorias de acería, cenizas volantes, relaves mineros, fosfoyeso, plásticos y residuos agroindustriales y electrónicos terminan acumulados en vertederos y escombreras. Muchos de estos residuos son alcalinos o contienen metales lixiviables, por lo que su manejo supone un problema tanto ambiental como económico.

Las impurezas y la baja resistencia al agua del fosfoyeso, la cal libre de las escorias, la calidad variable de los agregados reciclados y la débil adherencia de los residuos poliméricos en matrices cementicias pueden reducir su desempeño.

En las economías en desarrollo, la generación de residuos industriales y agroindustriales aumenta más rápido que la infraestructura disponible para tratarlos. Su valorización permitiría reducir los pasivos ambientales de la minería, la agroindustria y la manufactura, además de sustituir materias primas importadas por materiales locales. Pero estas posibilidades dependen de una condición: que los productos obtenidos cumplan las mismas exigencias técnicas que los convencionales. Si no lo hacen, su uso queda limitado a aplicaciones de menor exigencia.

Los estudios recientes ya describen materiales avanzados obtenidos de residuos, entre ellos zeolitas para capturar CO_2, redes metal orgánicas (MOF) y cátodos de baterías regenerados. Los resultados, sin embargo, están dispersos entre disciplinas. Además, las revisiones suelen organizarse por tipo de residuo, lo que dificulta comparar las rutas que conservan el desempeño.

Aquí se considera material de alto valor aquel que supera en valor técnico o económico al destino convencional del residuo, como el relleno, la disposición final o su uso como agregado de bajo grado, y que además iguala el desempeño del material virgen o cumple los requisitos de su aplicación. Este criterio permite distinguir el supraciclaje del subciclaje, en el que el residuo se destina a un uso de menor exigencia con pérdida de propiedades. Así, cada ruta se juzga por el desempeño alcanzado y no únicamente por la cantidad de residuo aprovechada.

Esta revisión reúne la evidencia publicada en 2025 y 2026 para responder a la pregunta orientadora: ¿qué residuos industriales pueden convertirse en materiales de alto valor sin comprometer su desempeño? Para ello, se realizó una revisión sistemática de literatura (RSL) conforme a PRISMA 2020. Las secciones siguientes describen la metodología y presentan los resultados, su discusión y las conclusiones.

2. Metodología

Diseño, pregunta y estrategia de búsqueda

El presente estudio corresponde a una revisión sistemática de literatura (RSL) de corte cualitativo-descriptivo, en la que se combinó un análisis narrativo con un recuento semicuantitativo siguiendo la guía PRISMA 2020. Como punto de partida, se planteó la pregunta de investigación utilizando el formato PICO (Tabla 1). La revisión de documentos se efectuó en noviembre de 2026 y abarcó 26 búsquedas distintas organizadas por cada familia de residuo, restringiendo los resultados a trabajos publicados entre 2025 y 2026. Para reunir los artículos se consultaron repositorios institucionales y portales editoriales como ScienceDirect, MDPI, SpringerLink y RSC Publishing. En todas estas plataformas se aplicó la misma combinación de palabras clave centradas en el origen del desecho, su proceso de transformación y el rendimiento obtenido: ("industrial waste" OR "industrial by-product" OR "fly ash" OR slag OR "red mud" OR tailings OR phosphogypsum OR "construction and demolition waste" OR "plastic waste" OR "e-waste") AND (valorization OR

upcycling OR recycling OR "circular economy") AND ("high-value" OR "high performance" OR properties).

Tabla 1. Pregunta PICO y criterios de elegibilidad

Componente	Criterio
Población (P)	Residuos sólidos industriales o agroindustriales
Intervención (I)	Aplicación de un tratamiento inteligente a los residuos industriales de las fábricas para convertirlo en un producto útil
Comparación (C)	Comparación del material valorizado frente a mezclas de control sin residuos, materias primas vírgenes o los requisitos técnicos exigidos para su aplicación final
Resultado (O)	Es la evidencia cuantitativa que valida el desempeño del material valorizado: resistencia física, eficacia funcional, rendimiento electroquímico y seguridad ambiental.
Inclusión	Artículos originales de 2025–2026 en revistas indexadas en Scopus
Exclusión	Revisiones, tesis, actas, preprints, patentes y estudios sin datos cuantitativos

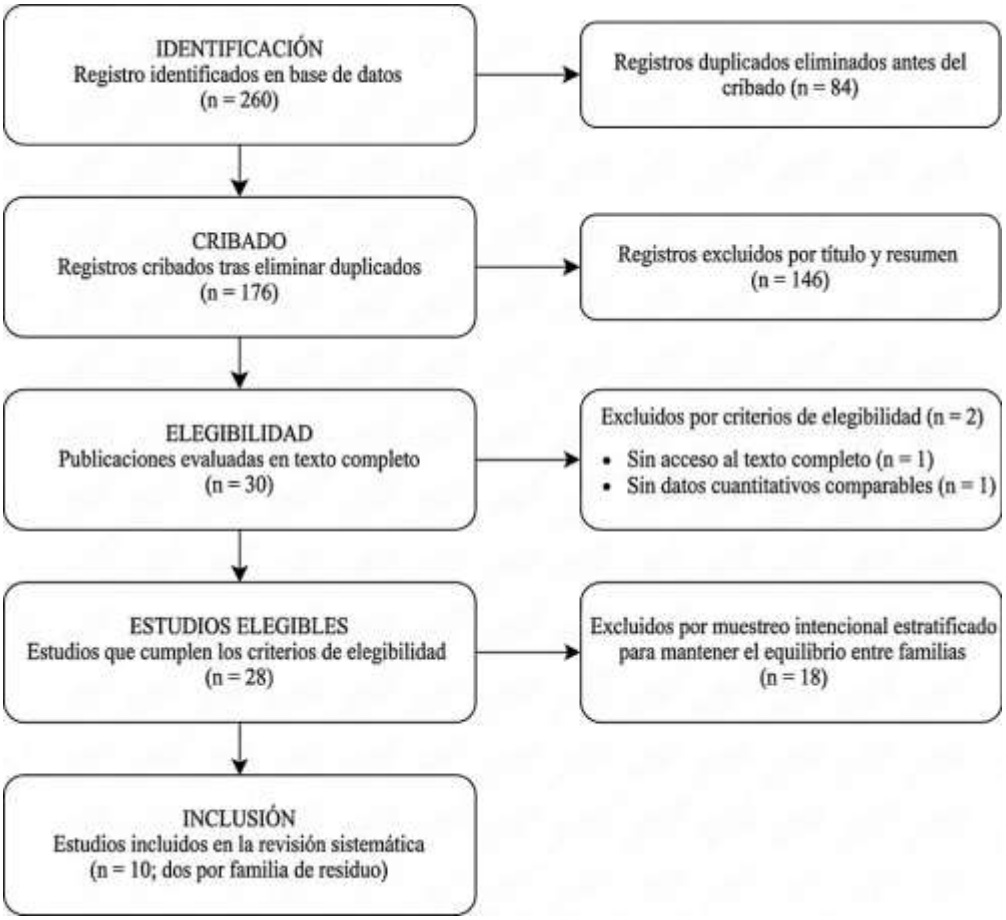
Nota. Elaboración propia. La tabla resume el enfoque PICO aplicado y los filtros utilizados para seleccionar los estudios indexados en Scopus.

Criterios de elegibilidad y selección

Para garantizar la confiabilidad de las fuentes, comprobamos directamente en los portales editoriales y registros oficiales tanto la indexación en Scopus como los metadatos de cada publicación (autores, volumen y DOI). Partimos de 260 registros iniciales y descartamos 84 por estar duplicados. Tras revisar los 176 restantes, excluimos 146 por título y resumen al no ajustarse al tema. De los 30 artículos evaluados a texto completo, uno no estuvo disponible para descarga y otro carecía de mediciones numéricas comparables, lo que dejó 28 estudios elegibles.

Para evitar que las categorías de residuos más estudiadas (como cenizas volantes o escombros) dominaran el análisis y lograr una comparación equilibrada, aplicamos un muestreo intencional estratificado. Así, seleccionamos 10 trabajos (dos por cada una de las cinco familias de residuos) priorizando aquellos con mayor detalle experimental frente a un material de referencia, diversidad de rutas tecnológicas y evaluaciones complementarias de durabilidad, lixiviación o impacto ambiental. Los otros 18 estudios válidos se excluyeron únicamente para mantener este balance entre grupos, lo cual se reconoce como una limitación metodológica.

Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA del proceso de identificación, cribado, elegibilidad e inclusión de los estudios sobre valorización de residuos industriales.



Nota. Elaboración propia con base en los lineamientos PRISMA 2020. La búsqueda inicial en los portales editoriales arrojó $n = 260$ registros, de los cuales se depuraron $n = 84$ duplicados. Tras revisar los títulos y resúmenes de los $n = 176$ artículos restantes, se excluyeron $n = 146$ por alejarse del enfoque de la revisión. De las $n = 30$ publicaciones evaluadas en texto completo, solo $n = 2$ quedaron fuera por criterios de elegibilidad ($n = 1$ por falta de acceso al documento y $n = 1$ por carecer de datos cuantitativos comparables), consolidando un grupo de $n = 28$ estudios elegibles. Para garantizar una representación equilibrada entre las cinco familias de residuos analizadas, se aplicó un muestreo intencional estratificado que descartó $n = 18$ de estos trabajos válidos.

En los casos donde una misma familia contaba con más de dos investigaciones elegibles, se dio prioridad a aquellas con mayor solidez experimental, mejor caracterización fisicoquímica y fecha de publicación más reciente, seleccionando finalmente $n = 10$ estudios (dos por familia) para la síntesis.

Extracción y síntesis de datos

De cada estudio seleccionado agrupamos cuatro datos clave: el tipo de residuo, el material obtenido, el método aplicado y los resultados principales. Para evaluar qué tan bien funcionó cada material, establecimos tres categorías de desempeño integrando tanto los parámetros técnicos como la seguridad ambiental: **C (Cumple)**, cuando igualó o superó al material tradicional o a los requisitos de su aplicación sin comprometer su perfil ambiental; **CC (Cumple con Condiciones)**, cuando alcanzó ese nivel únicamente bajo ajustes específicos de dosificación, tratamiento o proceso, o cuando su viabilidad técnica vino acompañada de restricciones o cargas ambientales que exigen control; y **P (Pérdida)**, cuando persistieron disminuciones importantes en sus propiedades o riesgos ambientales inaceptables. Bajo este criterio integral, materiales como el cobre recuperado se clasificaron en la categoría CC: aunque su pureza y desempeño son técnicamente equivalentes al del cobre primario, su ruta de recuperación presenta una mayor carga ambiental asociada, lo que condiciona su sostenibilidad frente al proceso convencional. Si detectábamos alguna diferencia entre los datos del resumen y el texto completo, optábamos siempre por el valor más conservador. Los datos de identificación, objetivo y método de cada estudio se resumen en la matriz bibliográfica de la Tabla 2.

Como punto de comparación tomamos el estándar establecido en cada investigación, ya fuera una mezcla tradicional sin residuos, un producto elaborado con materias primas vírgenes o una exigencia normativa (como una resistencia mínima o un límite de contaminación). Cuando un artículo evaluaba distintas mezclas o tratamientos, asignamos la categoría según el mejor resultado documentado, pero también registramos el rango en el que el rendimiento se mantuvo estable. Esto nos permitió distinguir claramente entre los materiales que funcionan sin restricciones y aquellos que exigen límites precisos para no fallar.

Finalmente, organizamos los residuos en cinco grandes familias: combustión y metalúrgicos (cenizas volantes y escorias); minerales y de construcción (relaves, fosfoyeso y escombros de demolición); poliméricos y compuestos (plásticos, caucho y fibras); agroindustriales (cascarillas, cáscaras y cenizas de biomasa); y residuos electrónicos (RAEE) y baterías. Para presentar los hallazgos, combinamos un análisis descriptivo de cada grupo con el conteo de los estudios según su ruta de aprovechamiento, el tipo de prueba realizada y su nivel de desempeño.

Tabla 2. Síntesis bibliográfica y metodológica de los 10 estudios analizados

N.º	Autores y tema	Revista	Objetivo	Método
1	Ameh et al. (2026), ceniza volante → zeolita BEA	Microporous Mesoporous Mater.	Sintetizar zeolita para captar CO_2	Hidrotermal 10–72 h; BET; adsorción de CO_2; ciclos

N.º	Autores y tema	Revista	Objetivo	Método
2	Wang et al. (2025), escoria de acería	Materials	Mineralizar CO_2 con vapor	Carbonatación gas–sólido a 550 °C; fases; microestructura
3	Zheng et al. (2025), fosfoyeso	Cem. Concr. Compos.	Cementante de alto desempeño	Activación alcalina con CO_2; compresión; lixiviación
4	Khan et al. (2026), agregado de demolición	Structures	Evaluar agregado reciclado en concreto	45 probetas; ultrasonido; 500 °C; SEM/EDS/XRD
5	Choi et al. (2025), PET → MOF	Korean J. Chem. Eng.	Sintetizar MIL-53(Al) con PET	Hidrólisis ácida; solvotermal; adsorción de gases
6	Han et al. (2025), caucho de neumático	Case Stud. Constr. Mater.	Predecir propiedades del concreto con caucho	Ensayos + >400 datos; tracción; flexión; Ec
7	Radha et al. (2026), cascarilla de arroz	RSC Advances	Efecto de la atmósfera de calcinación	700 °C en aire, O_2 limitado y N_2; pureza; tamaño
8	Khamput et al. (2025), ceniza de bagazo y polvo de piedra	Applied Sciences	Sustituir cemento y arena	Hasta 40 % de ceniza; compresión a 90 d; durabilidad; costo
9	Hao et al. (2025), $LiFePO_4$ agotado	Energy Environ. Sci.	Regenerar el cátodo	Hidrotermal con ácido tartárico; recocido; NPDF; ciclado
10	Kelly et al. (2026), placas de circuito impreso	Environ. Sci.: Adv.	Recuperar cobre de alta pureza	Lixiviación; extracción por solventes; electroobtención; ACV

Nota. Elaboración propia. Todos los trabajos analizados corresponden a pruebas experimentales en laboratorio, aunque el estudio 6 también incorporó un modelo matemático ajustado a datos ya publicados. Abreviaturas: ACV = análisis de ciclo de vida; BET = área superficial (método Brunauer, Emmett, Teller); Ec = módulo de elasticidad; MOF = red metalorgánica; NPDF = función de distribución de pares de neutrones; SEM/EDS = microscopía electrónica de barrido con espectroscopía de energía dispersiva; XRD = difracción de rayos X.

Tabla 3. Verificación de la indexación en Scopus de las 24 revistas

Revista	Editorial	Estudio(s) incluido(s)	Fuente de verificación de la indexación en Scopus
Applied Sciences	MDPI	Khamput et al. (2025)	Sección de indexación del sitio del editor
Buildings	MDPI	Siddiq et al. (2025); Guo et al. (2025)	Sección de indexación del sitio del editor
Case Studies in Construction Materials	Elsevier	Han et al. (2025)	Sección de indexación del sitio del editor
Cement and Concrete Composites	Elsevier	Zheng et al. (2025)	Sección de indexación del sitio del editor
Ceramics	MDPI	Hussain et al. (2025)	Sección de indexación del sitio del editor
Construction and Building Materials	Elsevier	Jian et al. (2025)	Sección de indexación del sitio del editor
Energy & Environmental Science	RSC	Hao et al. (2025)	Sección de indexación del sitio del editor
Environmental Science: Advances	RSC	Kelly et al. (2026)	Sección de indexación del sitio del editor
Fibers	MDPI	Dega et al. (2025)	Sección de indexación del sitio del editor
Journal of Cleaner Production	Elsevier	Ferreira Junior et al. (2025)	Sección de indexación del sitio del editor
Journal of Materials Chemistry A	RSC	Yadav et al. (2025)	Sección de indexación del sitio del editor

Revista	Editorial	Estudio(s) incluido(s)	Fuente de verificación de la indexación en Scopus
Journal of Sustainable Metallurgy	Springer	Eskandarinia et al. (2026)	Sección de indexación del sitio del editor
Korean Journal of Chemical Engineering	Springer / KIChE	Choi et al. (2025)	Sección de indexación del sitio del editor
Materials	MDPI	Wang et al. (2025); Reyes-Román et al. (2025); Tola et al. (2026)	Sección de indexación del sitio del editor
Microporous and Mesoporous Materials	Elsevier	Ameh et al. (2026)	Sección de indexación del sitio del editor
Molecules	MDPI	Liu et al. (2025)	Sección de indexación del sitio del editor
Polymers	MDPI	Sato et al. (2025)	Sección de indexación del sitio del editor
Recycling	MDPI	Quinagoran et al. (2026)	Sección de indexación del sitio del editor
RSC Advances	RSC	Radha et al. (2026); Kareem y Eyiler (2026)	Sección de indexación del sitio del editor
Structures	Elsevier	Khan et al. (2026)	Sección de indexación del sitio del editor
Sustainability	MDPI	Magalhães et al. (2025)	Sección de indexación del sitio del editor
Technologies	MDPI	Kostura et al. (2025)	Sección de indexación del sitio del editor
Waste and Biomass Valorization	Springer	Farji y Williams (2026)	Sección de indexación del sitio del editor

Revista	Editorial	Estudio(s) incluido(s)	Fuente de verificación de la indexación en Scopus
Waste Management	Elsevier	Stabile et al. (2025)	Sección de indexación del sitio del editor

Nota. La indexación se comprobó en la página de indexación (Indexing & Abstracting) de cada revista en el sitio oficial de su editorial. Tres revistas (Buildings, Materials y RSC Advances) publicaron más de un estudio incluido, por lo que 28 estudios corresponden a 24 revistas.

Métodos empleados en los estudios analizados

Los 10 estudios fueron experimentales de laboratorio, y uno de ellos complementó sus ensayos con un modelo ajustado a más de 400 grupos de datos. Las intervenciones se agruparon en cinco rutas (Tabla 4). La caracterización se basó principalmente en difracción de rayos X (n = 6) y microscopía electrónica de barrido (n = 5). El desempeño se evaluó con ensayos mecánicos (n = 4), propiedades funcionales como la adsorción, el área superficial o la capacidad electroquímica y, en menor medida, con ensayos de lixiviación (n = 1), de durabilidad (n = 2) e indicadores de ciclo de vida, huella de CO_2 o costos (n = 2).

Tabla 4. Rutas de valorización de los estudios analizados (n = 10)

Ruta de valorización	n	Residuo → material
Síntesis química	3	Ceniza volante → zeolita; PET → MOF; cascarilla de arroz → nanosílice
Incorporación en concreto	3	Concreto de demolición, caucho de neumático y ceniza de bagazo
Activación alcalina con CO2	1	Fosfoyeso → cementante
Carbonatación con vapor	1	Escoria de acería → escoria estable
Hidrometalurgia o regeneración	2	Placas de circuito → cobre; LiFePO4 agotado → cátodo
Total	10	

Nota. Elaboración propia a partir de los estudios analizados. La tabla agrupa los procesos usados para transformar cada residuo en un material útil.

3. Resultados

Los 10 estudios analizados se publicaron en 2025 (n = 6) y 2026 (n = 4) en revistas de Elsevier (n = 4), Royal Society of Chemistry (n = 3), MDPI (n = 2) y Springer (n = 1). Cada familia de residuo

aportó dos estudios: combustión y metalúrgicos; minerales y de construcción; poliméricos; agroindustriales, y residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) y baterías.

En los residuos de combustión y metalúrgicos, la nanosílice extraída de ceniza volante permitió sintetizar, por vía hidrotermal durante 10 a 72 horas, zeolita BEA con un área superficial de hasta 547 m^2/g, una adsorción de CO_2 de hasta 3,24 mmol/g y una pérdida de capacidad cercana al 9 % tras 10 ciclos (Ameh et al., 2026). En la escoria de acería, la carbonatación gas–sólido a unos 550 °C, con 20 a 100 % de CO_2 y 5 a 20 % de vapor, mostró que el vapor acelera la mineralización: con 15 % de vapor fijó 52,8 kg CO_2/t y mineralizó el 91,73 % de la cal libre, causante de su inestabilidad volumétrica (Wang et al., 2025).

Ambos casos ilustran dos destinos del mismo grupo de residuos: un material funcional de alto valor y un residuo estabilizado apto para usos cementicios.

Entre los residuos minerales y de construcción, el fosfoyeso activado con asistencia de CO_2 alcanzó 49,3 MPa (+50,83 %), un coeficiente de ablandamiento de 0,97 y una lixiviación de P y F cercana a 1 mg/L (Zheng et al., 2025). En 45 probetas ensayadas a compresión, tracción, flexión, ultrasonido y exposición a 500 °C, el agregado reciclado de concreto de demolición redujo la resistencia a compresión en 7, 15 y 30 % con sustituciones de 25, 50 y 100 %, por lo que se recomendó no superar el 50 % (Khan et al., 2026).

En los residuos poliméricos, el ácido tereftálico recuperado por hidrólisis ácida de PET posconsumo y empleado en síntesis solvotermal produjo un MOF MIL-53(Al) con estructura, morfología y porosidad equivalentes a las del obtenido con ligando comercial, además de alta selectividad CO_2/N_2 (Choi et al., 2025). En cambio, en un estudio que combinó ensayos propios con más de 400 datos publicados para proponer ecuaciones de predicción, la incorporación de 3 % de caucho de neumático redujo la resistencia a tracción del concreto entre 13,2 y 32,2 %, con mayor pérdida cuanto más fina fue la partícula (Han et al., 2025).

En los residuos agroindustriales, la calcinación de cascarilla de arroz a 700 °C se comparó en aire, con oxígeno limitado y en nitrógeno; en aire se recuperó el 98,1 % de la sílice como nanopartículas de 20–37 nm con pureza superior al 98 % (Radha et al., 2026), frente a 40,2–58,6 % en las demás atmósferas. La ceniza de bagazo molida, combinada con polvo de piedra como sustituto de la arena y evaluada hasta con 40 % de reemplazo del cemento, solo superó al concreto de control con 10 % de sustitución, al alcanzar 48,0 MPa a 90 días (103 % del control) con 88 % del costo (Khamput et al., 2025); con 40 % de reemplazo, la resistencia descendió al 91 % del control.

En RAEE y baterías, la regeneración directa del $LiFePO_4$ agotado mediante tratamiento hidrotermal con ácido tartárico y un recocido breve restauró las vías de difusión del litio y recuperó 150,5 mAh/g a 0,5 C con 94,9 % de retención tras 500 ciclos (Hao et al., 2025). El cobre recuperado

de placas de circuito impreso mediante lixiviación, extracción por solventes y electro obtención, evaluado además con análisis de ciclo de vida, alcanzó 99,84 % de pureza, aunque con una huella de 13,0–40,3 kg CO_2-eq/kg, cerca de un orden de magnitud superior a la del cobre primario (Kelly et al., 2026).

En conjunto, cinco estudios (50 %) se clasificaron como **C**, cuatro (40 %) como **CC** y uno (10 %) como **P**. La clase **C** agrupó materiales funcionales o de síntesis zeolita, cementante de fosfoyeso, MOF, nanosílice y cátodo regenerado cuyo desempeño igualó o superó al de la referencia sin restricciones relevantes. La clase CC reunió rutas que cumplieron solo dentro de ciertos márgenes: la escoria carbonatada dependió de la humedad del proceso; el agregado reciclado y la ceniza de bagazo, de la proporción de sustitución, y el cobre recuperado, aunque técnicamente equivalente al primario, presentó una mayor carga ambiental. La única clase **P** correspondió a la incorporación de caucho en concreto, donde la pérdida mecánica persistió en todas las granulometrías evaluadas. Cada familia de residuo tuvo al menos un estudio clasificado como C, lo que indica que ninguna familia queda excluida de producir materiales de alto valor.

4. Discusión

Discusión de la revisión sistemática

La RSL integró cinco familias de residuos que suelen revisarse por separado, con fuentes recientes, revistas indexadas en Scopus y metadatos verificados. No obstante, los 10 estudios analizados fueron de laboratorio; solo uno evaluó lixiviación, dos midieron durabilidad y dos incluyeron indicadores ambientales o económicos.

La heterogeneidad de ensayos y unidades impidió un metaanálisis. Otras limitaciones son el posible sesgo de publicación, la ventana de dos años, la selección de dos estudios por familia entre los 28 elegibles, el carácter interpretativo de la clasificación C/CC/P y que la búsqueda se hizo en plataformas editoriales y no en la interfaz de Scopus; replicarla en Scopus, Google Académico y Semantic Scholar ampliaría la cobertura.

Otras limitaciones son el posible sesgo de publicación, la ventana de dos años, la selección de dos estudios por familia entre los 28 elegibles, el carácter interpretativo de la clasificación C/CC/P y que la búsqueda se hizo en plataformas editoriales y no en la interfaz de Scopus; replicarla en Scopus, Google Académico y Semantic Scholar ampliaría la cobertura.

Discusión de los resultados

En respuesta a la pregunta orientadora, nueve de los 10 estudios (90 %) obtuvieron materiales compatibles con su aplicación, aunque cuatro de ellos solo bajo condiciones específicas. La preservación del desempeño dependió menos del tipo de residuo que de tres factores controlables:

la composición química, el pretratamiento o la estabilización como la carbonatación de la escoria y del fosfoyeso y la dosificación, pues tanto el agregado reciclado como la ceniza de bagazo perdieron desempeño al superar sustituciones moderadas.

Los residuos ricos en Si, Al y Ca fueron los candidatos más consistentes y ya generan materiales funcionales de mayor valor que los ligantes, como zeolitas y nanosílice. En los polímeros, el alto valor surgió de la conversión química, mientras que su incorporación física en concreto fue un subciclaje con penalización mecánica. En baterías, la regeneración directa preservó la funcionalidad del cátodo; en cambio, el cobre de alta pureza mostró que un material de alto valor no implica necesariamente un menor impacto ambiental.

Estos hallazgos también muestran que la escala y el contexto condicionan el valor real de cada ruta. Las rutas químicas, como la síntesis de zeolitas, MOF o nanosílice, producen materiales de alto precio unitario, pero consumen reactivos, energía y agua que rara vez se cuantifican; las rutas cementicias, en cambio, aprovechan grandes volúmenes de residuo con menor valor añadido y dependen de normas que aún no reconocen plenamente los materiales secundarios. En consecuencia, la elección de la ruta debería considerar el volumen disponible del residuo, la variabilidad de su composición, la cercanía del mercado de destino y la existencia de especificaciones técnicas que permitan su comercialización.

La dimensión ambiental merece una atención particular. Que un material provenga de un residuo no garantiza que sea más sostenible: la reducción de la lixiviación de fósforo y flúor en el fosfoyeso demuestra que la estabilización puede convertir un pasivo en un producto seguro, mientras que la mayor huella de carbono del cobre recuperado demuestra que los procesos de purificación pueden anular parte del beneficio. Por ello, la valorización debe acompañarse de balances de masa y energía, ensayos de lixiviación del producto final y análisis de ciclo de vida comparativos con la ruta convencional.

Para Ecuador y la región andina, los resultados apuntan a oportunidades concretas. La cascarilla de arroz y la ceniza de bagazo son residuos abundantes y estacionales de la agroindustria costera, y las rutas analizadas muestran que pueden transformarse en nanosílice o en sustitutos parciales del cemento con desempeño equivalente cuando se controla su dosificación. Del mismo modo, los relaves y los residuos de construcción de las zonas urbanas y mineras podrían incorporarse en materiales cementicios si se acompañan de ensayos de lixiviación y de especificaciones técnicas locales.

Para la investigación futura, la evidencia analizada sugiere tres prioridades: escalar a nivel piloto las rutas que ya alcanzaron la clase C, documentar la variabilidad entre lotes del residuo y reportar de forma estandarizada los ensayos de durabilidad, lixiviación, consumo energético y costo, de modo que futuras revisiones puedan compararlos mediante metaanálisis.

Por tanto, el desempeño debe evaluarse más allá de la resistencia o la capacidad inicial, incorporando durabilidad, lixiviación y ciclo de vida, y respaldarse con control de calidad del residuo y especificaciones técnicas basadas en desempeño.

5. Conclusiones

El desarrollo de esta revisión demuestra que los residuos industriales no tienen por qué terminar acumulados como basura contaminante; por el contrario, pueden convertirse en materiales avanzados y de gran calidad cuando se les aplica el tratamiento adecuado. Dentro de las categorías analizadas, los residuos aluminosilicatados y cálcicos ricos en compuestos de aluminio, silicio y calcio resultan los más maduros, desplazando su aprovechamiento desde los ligantes tradicionales hacia productos de mayor valor como adsorbentes, zeolitas y nanosílice. Asimismo, el reciclaje químico de polímeros y la regeneración directa de cátodos se consolidan como las rutas que con mayor claridad generan un valor superior al del material de origen, mientras que la incorporación física en matrices cementicias exige pretratamientos y límites estrictos de dosificación.

Al evaluar los 10 estudios seleccionados por muestreo intencional estratificado en representación de las cinco familias de desechos, se confirma que el 90 % de los casos logró generar materiales funcionalmente compatibles. En concreto, la mitad de los estudios (cinco casos; 50 %) igualó o superó el rendimiento de los productos convencionales sin restricciones, como ocurrió con las zeolitas extraídas de cenizas volantes, la nanosílice de cascarilla de arroz, los materiales sintetizados a partir de botellas PET o los cátodos de baterías regenerados; mientras que otros cuatro casos (40 %) alcanzaron dicho desempeño únicamente bajo condiciones específicas de dosificación, tratamiento o proceso.

No obstante, los hallazgos también dejan ver un reto importante que aún frena su aplicación masiva: hoy en día la mayoría de las investigaciones se enfocan en probar qué tan resistentes o eficientes son estos materiales recién fabricados en el laboratorio, pero todavía falta estudiar cuánto duran con el paso del tiempo, cuánto cuesta producirlos a escala industrial y si realmente son seguros para el medio ambiente sin liberar sustancias tóxicas ni generar una huella de carbono elevada durante su limpieza.

Por último, aterrizar los principios de la economía circular a contextos reales evidencia que, en sectores con fuerte actividad agroindustrial y minera, como ocurre en Ecuador y la región andina, existe un enorme potencial para aprovechar desechos abundantes como la cascarilla de arroz, la ceniza de bagazo y los relaves. Como extensión de este trabajo, se propone priorizar proyectos demostrativos que articulen a universidades, industrias y gestores de residuos, garantizando controles estrictos de calidad para trasladar con éxito lo que ya funciona en el laboratorio hacia aplicaciones reales en la industria.

Research Club Scientia Vol. 4, No 4, Octubre - Diciembre, pp. 1794-1809, ISSN: 3103 – 1315

Referencias

Ameh, A. E., Feyziyeva, S., Mukaba, J.-L., Pokpas, K., Zarbaliyev, B., Fatoba, O. O., Louis, B., Petrik, L. F., & Oyekola, O. O. (2026). Synthesis of BEA zeolite from coal fly ash nano-silica extract: Application in CO_2 adsorption. *Microporous and Mesoporous Materials*, *412*, 114249. https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2026.114249

Choi, H. L., Yang, H., Woo, J., Mun, J.-H., & Bae, T.-H. (2025). Upcycling PET waste into high-performance metal–organic frameworks: Sustainable synthesis of MIL-53(Al) for gas separation and storage. *Korean Journal of Chemical Engineering*, *42*(14), 3619–3626. https://doi.org/10.1007/s11814-025-00538-6

Han, X., Wang, L., Chen, A., Feng, L., Ji, Y., Wang, Z., Gao, Z., Li, K., Yuan, Q., Xia, X., & Zhang, Q. (2025). Experimental and analytical evaluation of mechanical properties of rubberized concrete incorporating waste tire crumb rubber. *Case Studies in Construction Materials*, *23*, e04970. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04970

Hao, S., Lv, Y., Zhang, Y., Liu, S., Tan, Z., Liu, W., Xia, Y., Yin, W., Liao, Y., Ji, H., Kong, Y., Shao, Y., Huang, Y., & Yuan, L. (2025). Restoration of Li^+ pathways in the [010] direction during direct regeneration for spent $LiFePO_4$. *Energy & Environmental Science*, *18*(8), 3750–3760. https://doi.org/10.1039/D5EE00641D

Kelly, N., Boelens, P., Parvez, A. M., Kutschke, S., Ebert, D., Guy, B. M., Möckel, R., Aamir, M. H., Sanchez-Garrido, C., Fischer, U., Sajjad, M., Renno, A. D., Ott, L., Ellinger, F., Patil, A. B., & Gutzmer, J. (2026). Hydrometallurgical recovery of high-purity copper from waste printed circuit boards: An experimental study and life cycle assessment. *Environmental Science: Advances*, *5*(3), 772–790. https://doi.org/10.1039/d5va00348b

Khamput, P., Masae, M., Somna, K., & Klathae, T. (2025). Mechanical and durability performance of sustainable concrete incorporating stone dust as sand substitute and sugarcane bagasse ash as cement replacement. *Applied Sciences*, *15*(22), 12076. https://doi.org/10.3390/app152212076

Khan, N. A., Aloisio, A., Younas, R., Stochino, F., & Monti, G. (2026). Upcycled C&D waste as recycled concrete aggregate for green cementitious composites: Mechanical, NDT and post-fire performance. *Structures*, *90*, 112330. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2026.112330

Radha, F. H. S., Kareem, M. T., & Abdullah, O. G. (2026). Atmosphere-dependent synthesis and crystallization behavior of silica nanoparticles derived from rice husk biomass. *RSC Advances*, *16*(19), 16874–16886. https://doi.org/10.1039/d6ra00367b

Wang, X., Yue, C., Lu, G., Huo, X., Yi, G., Li, H., Guo, M., & Zhang, M. (2025). Steam efficiently enhancing CO_2 direct mineralization steel slag towards actual production: Phase evolution, microstructure, and mechanisms. *Materials*, *18*(20), 4786. https://doi.org/10.3390/ma18204786

Zheng, Y., Cui, K., Zhao, Y., Wu, W., Shen, P., & Poon, C. S. (2025). Development of high-performance phosphogypsum-based cementitious materials through CO_2-assisted alkali activation. *Cement and Concrete Composites*, *162*, 106144. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2025.106144