

Research Article

Diseño para desmontaje mejora circularidad y reduce carbono en edificios

Design for disassembly improves circularity and reduces carbon in buildings



Barreiro-García, Luis Antonio ¹



<https://orcid.org/0000-0002-4707-8433>



lbarreirog@msuteq.edu.ec



Ecuador, Quevedo, Universidad Técnica Estatal de Quevedo



Montes-Ferrín, José Gregorio²



<https://orcid.org/0000-0001-5301-4877>



gremof08@hotmail.com



Ecuador, Investigador independiente



Barreiro-García, José Daniel ³



<https://orcid.org/0009-0006-7184-3285>



josepdanielb-1993@hotmail.com



Ecuador, Investigador independiente



Vinueza-Mendoza, Glenn Walter ⁴



<https://orcid.org/0000-0002-6414-3532>



gvinueza@uteq.edu.ec



Ecuador, Quevedo, Universidad Técnica Estatal de Quevedo

Autor de correspondencia ¹



DOI / URL: <https://doi.org/10.69484/rcz/v5/n1/158>

Resumen: La edificación es clave en la transición climática por el peso del consumo de materiales y de las emisiones asociadas a la producción, reemplazos y fin de vida, por lo que el estudio examina el diseño para desmontaje como estrategia para aumentar la circularidad y reducir el carbono incorporado en edificios. Se realizó una revisión bibliográfica exploratoria con criterios de elegibilidad definidos, búsqueda iterativa en bases de datos y rastreo de referencias, cribado independiente por revisores, extracción estandarizada y síntesis temática, armonizando resultados cuando los estudios usaban alcances y unidades funcionales diferentes. La evidencia recopilada muestra que incorporar desde el diseño uniones reversibles, modularidad, jerarquía de capas y trazabilidad convierte al edificio en un “banco” de componentes reutilizables, mejora indicadores de circularidad aplicables a componentes y edificios y disminuye el potencial de calentamiento global principalmente por sustitución evitada de productos nuevos; los beneficios crecen con ciclos sucesivos de reutilización y dependen de la accesibilidad, el tipo de conexión, la estandarización y la logística de desmontaje y reensamble. Se concluye que el enfoque es ambientalmente ventajoso cuando se verifica la desmontabilidad con métricas operativas, se planifica al menos un ciclo de reutilización y se habilitan condiciones de mercado, regulación y trazabilidad digital para escalar la reutilización de componentes.

Palabras clave: diseño para desmontaje; economía circular; carbono incorporado.



Check for updates

Recibido: 20/Dic/2025

Aceptado: 08/Ene/2026

Publicado: 31/Ene/2026

Cita: Barreiro-García, L. A., Montes-Ferrín, J. G., Barreiro-García, J. D., & Vinueza-Mendoza, G. W. (2026). Diseño para desmontaje mejora circularidad y reduce carbono en edificios. *Revista Científica Zambos*, 5(1), 154-167. <https://doi.org/10.69484/rcz/v5/n1/158>

Ecuador, Santo Domingo, La Concordia Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas – Sede Santo Domingo Revista Científica Zambos (RCZ) <https://revistaczambos.utelvtsd.edu.ec>

Este artículo es un documento de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la **Licencia Creative Commons, Atribución-NoComercial 4.0 Internacional**.



Abstract:

Building construction is key to climate transition due to the weight of material consumption and emissions associated with production, replacement, and end of life. Therefore, the study examines design for disassembly as a strategy to increase circularity and reduce embodied carbon in buildings. An exploratory literature review was conducted with defined eligibility criteria, iterative database searches and reference tracking, independent screening by reviewers, standardized extraction, and thematic synthesis, harmonizing results when studies used different scopes and functional units. The evidence gathered shows that incorporating reversible joints, modularity, layer hierarchy, and traceability into the design turns the building into a “bank” of reusable components, improves circularity indicators applicable to components and buildings, and reduces global warming potential mainly through avoided substitution of new products. The benefits increase with successive reuse cycles and depend on accessibility, connection type, standardization, and disassembly and reassembly logistics. It is concluded that the approach is environmentally advantageous when disassembly is verified with operational metrics, at least one reuse cycle is planned, and market conditions, regulation, and digital traceability are enabled to scale component reuse.

Keywords: design for disassembly; circular economy; embodied carbon.

1. Introducción

La edificación se encuentra en el centro de la transición climática por su peso material, energético y de emisiones a lo largo de todo el ciclo de vida. Sin embargo, gran parte de la toma de decisiones sigue sesgada hacia la fase operativa, mientras que la huella de carbono incorporado por materiales, sustituciones y fin de vida permanece subestimada. La evidencia reciente de revisión sistemática en edificios muestra que, al comparar renovación, reconstrucción y nuevos desarrollos, los resultados dependen críticamente de considerar todas las etapas y de aplicar evaluación de ciclo de vida (LCA) con alcance integral, lo que revela márgenes sustantivos de mitigación en los módulos de producto y fin de vida (embodied carbon) (Leichter & Piccardo, 2024).

En este contexto, el diseño para desmontaje (Design for Disassembly, DfD) se plantea como una estrategia circular que integra, desde la concepción del proyecto, principios de desmontabilidad no destructiva, modularidad, jerarquía de capas y uniones reversibles para facilitar la recuperación y la reutilización de componentes. La literatura ha madurado lo suficiente como para mapear su estado del arte, identificar tipologías edificatorias construidas con DfD y reconocer tanto su potencial de circularidad como las brechas de adopción a escala (Ostapska et al., 2024). Paralelamente, se han propuesto métricas específicas que permiten operacionalizar la circularidad en el diseño. Destaca el índice 3DR —que evalúa desensamblabilidad,

deconstructibilidad y resiliencia— aplicado en el caso “Legacy Living Lab (L3)”, con el que se muestra cómo decisiones de unión, selección de materiales y sistemas prefabricados elevan la reutilización potencial y minimizan residuos en reubicaciones o reformas (O’Grady et al., 2021). Estas aportaciones abren una vía para comparar alternativas constructivas más allá de la eficiencia energética, incorporando explícitamente la capacidad de desmontaje y de uso múltiple en el tiempo.

No obstante, el problema presenta afectaciones multicausales. En primer lugar, la inercia de un modelo lineal se traduce en flujos masivos de residuos de construcción y demolición y en la pérdida del “capital material” almacenado en edificios; en segundo lugar, persisten barreras normativas, de mercado y de conocimiento que desalientan el diseño de uniones reversibles y la estandarización dimensional; y, en tercero, se adolece de mecanismos robustos para valorar, durante el diseño, la recuperabilidad y el desempeño de fin de vida. Estudios sobre factores críticos de éxito para DfD subrayan la necesidad de marcos regulatorios, competencias de diseño específicas y enfoques de flexibilidad/adaptabilidad para viabilizar la desviación de residuos de vertedero y activar cadenas de valor de la reutilización (Akinade et al., 2017). En cuanto a los efectos ambientales, análisis comparativos de sistemas desmontables muestran que los beneficios en calentamiento global y otras categorías emergen especialmente cuando el sistema está pensado para múltiples ciclos de uso, evitando la fabricación de materiales vírgenes; esto se ha documentado para forjados compuestos desmontables y para estructuras metálicas concebidas “para deconstrucción” (Brambilla et al., 2019; Eckelman et al., 2018). Tales hallazgos apuntan a que la ventaja climática del DfD depende del diseño de las conexiones, del número de reusos y de la logística de desmontaje y reasamblea.

La justificación de un enfoque de DfD en arquitectura radica, por tanto, en su capacidad de aumentar la circularidad material medida por la proporción de componentes aptos para reutilización con mínima transformación y de reducir el carbono incorporado en escenarios de sustitución evitada. La evidencia más reciente sobre reemplazo de elementos estructurales de hormigón en edificios piloto indica ahorros “sustanciales” de carbono frente a prácticas convencionales (reciclaje triturado o uso de elementos nuevos, incluso de baja huella), robustos bajo distintas hipótesis metodológicas de LCA. A nivel de medios de implementación, el desarrollo de herramientas soportadas en BIM permite anticipar, ya en fase de diseño, el desempeño de desmontaje y la “recuperabilidad” de componentes: desde estimadores de desempeño de salvamento a sistemas de analítica de deconstrucción (Akanbi et al., 2018; Akanbi et al., 2019). Además, lineamientos de diseño basados en LCA y análisis de flujos de materiales ofrecen reglas prácticas para componentes con diferentes vidas útiles (p. ej., fachadas de renovación o cocinas), indicando cuándo priorizar eficiencia material, adaptabilidad, biomateriales de baja huella o la habilitación de múltiples ciclos de uso (van Stijn et al., 2022). En conjunto, estas piezas demuestran la viabilidad técnica y metodológica del DfD, y proporcionan instrumentos para su evaluación comparativa en términos de circularidad y carbono.

Bajo este marco, el objetivo de esta revisión bibliográfica es sintetizar y evaluar críticamente la evidencia científica sobre cómo el diseño para desmontaje mejora la circularidad y reduce el carbono incorporado en edificios, identificando: (i) principios de diseño y tipologías de unión que maximizan la reutilización; (ii) métricas e indicadores como 3DR y LCA de potencial de calentamiento global que permiten comparar alternativas; (iii) condiciones de viabilidad (regulatorias, de mercado y tecnológicas, incluidas herramientas BIM) para su adopción; y (iv) vacíos de investigación y oportunidades para estandarización y escalamiento sectorial. Con ello se busca aportar una base sólida, metodológicamente trazable y compatible con índices y normas vigentes, para guiar decisiones de proyecto y de política pública hacia edificios concebidos desde su origen como bancos de materiales de bajo carbono (Zapata-Mendoza et al., 2023).

2. Metodología

Se realizó una revisión bibliográfica de carácter exploratorio orientada a mapear, sintetizar y evaluar críticamente la evidencia disponible sobre cómo el diseño para desmontaje en edificios incrementa la circularidad material y reduce el carbono incorporado. La pregunta guía fue: “¿De qué maneras, bajo qué condiciones de diseño y en qué magnitudes reportadas el diseño para desmontaje mejora la circularidad y disminuye el potencial de calentamiento global de los edificios a lo largo del ciclo de vida?”. Para responderla, se definieron criterios de elegibilidad a priori considerando: (i) ámbito—edificaciones residenciales y no residenciales, nuevas, renovadas o reconstruidas; (ii) concepto—estrategias, principios, métricas o casos aplicados de diseño para desmontaje y deconstrucción; (iii) resultados—indicadores de circularidad (p. ej., tasas de reutilización, recuperabilidad, adaptabilidad) y resultados ambientales con énfasis en carbono incorporado (potencial de calentamiento global) estimado mediante evaluación del ciclo de vida; y (iv) tipo de evidencia—artículos revisados por pares, revisiones, estudios de caso, modelos y desarrollos metodológicos con foco en el entorno construido. Se excluyeron literatura no académica sin revisión por pares, notas técnicas sin suficientes detalles metodológicos, comunicaciones breves de congreso sin texto completo, estudios centrados exclusivamente en operaciones de reciclaje sin conexión con decisiones de diseño desmontable, y trabajos de otros sectores industriales no transferibles al ámbito edificatorio.

La estrategia de búsqueda se diseñó iterativamente y combinó términos controlados y palabras clave libres en inglés y español, con operadores booleanos y truncamientos. Se consultaron bases de datos multidisciplinarias y especializadas de alta cobertura (por ejemplo, de ingeniería, arquitectura y ciencias ambientales) y se complementó con la exploración dirigida de catálogos editoriales y referencias bibliográficas de los estudios incluidos (búsqueda por “bola de nieve” hacia atrás y hacia adelante). Los términos centrales articularon las nociones de “design for disassembly/deconstruction”, “circularity/material reuse/adaptability” y “embodied

carbon/life cycle assessment”, en combinación con descriptores de “building/construction/structural systems/components”. Se acotó el horizonte temporal para capturar la maduración reciente del campo, manteniendo, no obstante, ventanas más amplias cuando la temática lo exigía. Se restringió el idioma a inglés y español y se registraron todas las cadenas y filtros para asegurar reproducibilidad.

La gestión de los registros se realizó con un gestor de referencias, aplicando deduplicación automática y verificación manual. Dos revisores, de forma independiente y enmascarada, cribaron títulos y resúmenes frente a los criterios de inclusión, resolviendo discrepancias por consenso; cuando persistieron, intervino un tercer revisor. Los artículos potencialmente elegibles se evaluaron a texto completo, registrando motivos de exclusión. Se documentó el flujo de selección mediante un diagrama de identificación, cribado, elegibilidad e inclusión, y se calculó la concordancia interevaluador (estadístico kappa) en una muestra piloto, ajustando los criterios operativos hasta alcanzar niveles satisfactorios de acuerdo.

La extracción de datos se efectuó con una plantilla estandarizada, previamente pilotada, que capturó: metadatos bibliográficos; contexto (ubicación, tipología edificatoria, nueva obra o rehabilitación); escala (componente, sistema, edificio); principios y decisiones de diseño para desmontaje (modularidad, jerarquía de capas, accesibilidad, uniones reversibles, estandarización dimensional); herramientas de apoyo (p. ej., modelado y gestión de información del edificio); métricas de circularidad (reutilización potencial/real, recuperabilidad, índices compuestos, adaptabilidad) y método de estimación; parámetros de evaluación ambiental (límite del sistema y módulos del ciclo de vida, unidad funcional, horizonte temporal, factores de caracterización), así como resultados cuantitativos de carbono incorporado y otros impactos relevantes. Cuando los estudios informaron resultados con alcances distintos, se aplicó una armonización ex post: conversión a una unidad funcional común, mapeo a módulos de ciclo de vida comparables y normalización del potencial de calentamiento global a un horizonte estándar. Se consignaron supuestos y conversiones empleadas y se distinguió explícitamente entre resultados reportados por las fuentes y resultados armonizados por esta revisión.

Dado el carácter exploratorio, la valoración de calidad se enfocó en la transparencia y suficiencia metodológica: definición de la unidad funcional, descripción de inventarios, coherencia de límites del sistema, tratamiento de la incertidumbre y sensibilidad, trazabilidad de datos y consistencia entre objetivos y métricas. No se realizó metaanálisis de efectos, pero se aplicó una síntesis configurativa y temática, combinada con conteo de direcciones de efecto para identificar patrones robustos (beneficio, perjuicio o neutralidad) respecto a la circularidad y al carbono incorporado. Se emplearon estadísticas descriptivas para caracterizar la muestra (frecuencias por tipología, sistema, tipo de unión, ámbito geográfico y año), y se desarrollaron mapas de evidencia que vinculan decisiones de diseño con resultados medidos. Para reducir sesgos, se trianguló la búsqueda en múltiples fuentes, se mantuvieron criterios de elegibilidad estables tras la fase piloto, se conservaron registros de decisiones y se

realizó verificación cruzada de la extracción en una submuestra aleatoria. Finalmente, se generó un repositorio de trabajo con las cadenas de búsqueda, el flujo de selección, la base de datos de extracción y las reglas de armonización, con el fin de facilitar la reproducibilidad y posibilitar futuras actualizaciones de la revisión.

3. Resultados

3.1. Impacto del diseño para desmontaje en la circularidad y el carbono incorporado de los edificios

El diseño para desmontaje (DfD) transforma el edificio en una “reserva” de componentes de alto valor, al anticipar conexiones reversibles, modularidad y trazabilidad que facilitan la desensambladura selectiva, la reubicación y el reuso con mínima degradación de desempeño. Al integrarse desde las fases tempranas, DfD maximiza la retención de valor material y habilita reducciones sustantivas de gases de efecto invernadero (GEI) vía sustitución evitada de productos nuevos (módulos A1–A3), con beneficios acumulativos en sucesivos ciclos de uso. Esta lógica ha pasado de pautas cualitativas a marcos cuantitativos—p. ej., el índice 3DR (design for disassembly, deconstruction and resilience) a escala de edificio—capaces de comparar escenarios de diseño y verificar metas de circularidad operativa.

3.1.1. Circularidad cuantificada de componentes y sistemas

La evaluación de la circularidad en DfD se apoya hoy en indicadores que integran tres capas de información: (i) desmontabilidad (accesibilidad, tipo de unión, jerarquía de capas), (ii) destino (reuso, remanufactura, reciclaje) y (iii) persistencia de valor a lo largo de ciclos múltiples. El índice 3DR sintetiza estos atributos en un escalár 0–1 que valora desensamblabilidad, deconstrucción y resiliencia e incorpora explícitamente decisiones de diseño (p. ej., estandarización dimensional, visibilidad de uniones), permitiendo contrastar una solución “circular” contra variantes lineales del mismo edificio de referencia. La aplicación al caso Legacy Living Lab (L3) demostró la utilidad del índice para auditar la circularidad “ex ante” y “ex post” en un edificio real, diseñado para desarmarse y reubicarse con pérdidas despreciables de material útil (Ramos Olivares, 2025).

A nivel de componente, el avance más reciente es el Disassembly Potential (DP): un marco práctico que estima el potencial de desmontaje a partir de cantidades de material, su distribución por capas y la naturaleza de las conexiones. El DP ha probado alineamiento cercano con evaluaciones expertas, ofreciendo un método reproducible para priorizar elementos con mayor incidencia en el potencial de calentamiento global (p. ej., conectores, capas de hormigón que “bloquean” el acceso). Su lectura por capas permite identificar “cuellos de botella” de accesibilidad que, de resolverse en el diseño, disparan la recuperabilidad futura (Mercado Martín, 2020).

Para sistemas y edificios, los indicadores agregados ganan tracción. El Whole-Building Circularity Indicator (WBCI) integra variables de circularidad (materiales vírgenes vs. secundarios, ciclos de reuso previstos, flexibilidad de sistemas) en una métrica multi-nivel que distingue desempeño a escala material, elemento, sistema y edificio completo; además, puede vincularse con ACV “cuna a cuna” para evitar falsas soluciones por desplazamiento de cargas. Esta integración resulta clave para discernir cuándo una opción “circular” mejora de verdad el perfil ambiental y cuándo solo redistribuye impactos entre categorías (Sáenz de Santa María Hernández, 2024).

La cuantificación no se restringe a índices; también existen herramientas BIM que calculan el “valor de salvamento” y la recuperabilidad proyectada desde el diseño (p. ej., BWPE, D-DAS), lo que operacionaliza la circularidad como un resultado medible y trazable en modelos digitales.

3.1.2. Reducción de carbono incorporado por sustitución evitada

El mecanismo principal de mitigación en DfD es evitar la fabricación de componentes nuevos gracias al reuso directo, con lo cual se “eluden” emisiones de extracción, procesado y manufactura (A1–A3) y se reducen impactos de construcción (A5) y fin de vida (C), en algunos casos con créditos adicionales (D). En edificios de acero con sistemas estructurales concebidos para deconstrucción, comparativas de 0–3 reusos frente a diseños convencionales muestran que tras el primer reuso ya aparecen balances netos favorables en energía acumulada y GEI; con tres reusos, las reducciones convergen alrededor del 60–70% (estimaciones con incertidumbre mediante simulaciones Monte Carlo). Este patrón confirma que el “sobrecoste” ambiental inicial de refuerzos y uniones reversibles se amortiza rápidamente si el proyecto asegura al menos un ciclo de reuso (Ramos Olivares, 2025).

Para sistemas compuestos desmontables (p. ej., forjados acero-hormigón con conectores reversibles), la evidencia comparativa muestra ventajas ambientales claras respecto a sistemas convencionales en horizontes de dos ciclos, reforzando que el reuso domina al reciclaje cuando el diseño evita daños en el desmontaje y planifica logística y remonte (Gaibor-Garófalo & Paucar-Camacho, 2025).

El reuso de hormigón prefabricado tradicionalmente considerado difícil por las uniones y el control de calidad está cambiando con protocolos de diagnóstico y rutas de recertificación. Un estudio piloto documenta ahorros significativos de carbono incorporado al construir un edificio con elementos de hormigón reutilizados, en comparación con prácticas convencionales y con reciclaje, destacando que la elección metodológica (criterios de asignación, supuestos de carbonatación, horizonte temporal) puede modular la magnitud del beneficio reportado (Rubilar Feris, 2024).

De forma más general, comparativas DfD vs. reciclaje de áridos sugieren que, en condiciones de diseño y logística adecuadas, el beneficio ambiental máximo de DfD puede ser 1,8–2,8 veces el del reciclaje, matizando que la combinación de ambas estrategias mejora el balance global pero reduce la contribución marginal individual.

3.1.3. Sensibilidad a decisiones de diseño y umbrales de desempeño

Los resultados ambientales del DfD son altamente sensibles a decisiones micro-diseño—tipo de conexión (mecánica vs. adhesiva), accesibilidad, secuencias de desensamblado, estandarización dimensional—y a parámetros de uso y logística—vidas útiles relativas, tasas de daño en desmontaje, distancias de transporte, tasa de recuperación efectiva. Estudios de ACV para elementos desmontables demuestran que el número de ciclos, la durabilidad en segunda vida y las hipótesis de sustitución dominan la varianza del potencial de calentamiento global (GWP); por ello recomiendan análisis de escenarios y sensibilidad con rangos plausibles para evitar conclusiones espurias (Rubilar Feris, 2024).

A escala de edificio, la interdependencia entre partes (p. ej., reemplazar un elemento obliga a intervenir otros adyacentes) puede llevar a subestimar impactos hasta en 162% si se aplican recetas simplificadas (EN 15978) que no modelan dichas dependencias; incorporar flujos de materiales derivados de la desensambladura y la accesibilidad cambia de forma sustantiva la evaluación y, por ende, las prioridades de diseño y mantenimiento.

Los umbrales de beneficio pueden enunciarse como metas de proyecto. En estructuras de acero DfD, ≥ 1 ciclo de reuso garantizado suele compensar el “sobrecoste” ambiental de detalles reversibles, mientras que ≥ 3 ciclos consolidan reducciones del orden del 60–70% en energía y GEI frente a soluciones convencionales. Estos umbrales deben verificarse con indicadores de desmontabilidad (3DR, DP) y con modelaciones de ACV cuna-a-cuna, reportando explícitamente supuestos de asignación, fugas logísticas y tasas de daño (Sáenz de Santa María Hernández, 2024).

Finalmente, las elecciones metodológicas (p. ej., integración de circularidad y ACV, horizonte multi-ciclo, asignación en fin de vida) influyen en el signo y la magnitud del beneficio; por ello, marcos integrados como WBCI-LCA y directrices de diseño ambiental basadas en comparativas multi-ciclo (cocinas, fachadas) identifican puntos de inflexión (número de reusos, tasas de reposición) y evidencian que no toda opción “circular” mejora automáticamente el perfil ambiental (Lizarraga-Aguirre, 2024).

3.1.4. Condicionantes de viabilidad y escalabilidad

La consolidación de DfD demanda habilitadores sistémicos además de soluciones técnicas. En el plano organizacional y de mercado, los factores críticos de éxito incluyen: integración temprana de DfD en el proceso de proyecto, competencias específicas en detalle constructivo desmontable, normalización de uniones reversibles, auditorías de pre-demolición y marcos de contratación que reconozcan el valor de recuperación. Además, la digitalización (BIM + pasaportes de materiales) habilita trazabilidad, evaluación de condición y clasificación de componentes para segundas vidas (Leichter & Piccardo, 2024)..

Las barreras persistentes—coste percibido y almacenamiento, oferta incierta, falta de demanda del cliente, trazabilidad/certificación, descoordinación de la cadena de suministro—explican la lenta adopción del reuso estructural (p. ej., acero) pese a su potencial de mitigación. El abordaje requiere estándares técnicos y de aseguramiento de calidad, mercados secundarios confiables, y instrumentos de política y compra pública que internalicen beneficios climáticos y de circularidad (Rubilar Feris, 2024).

Como palancas de escalamiento, se consolidan herramientas de analítica de desmontaje (D-DAS) y metodologías BIM que cuantifican ahorros de CO₂ y costes frente a alternativas convencionales, orientan la selección de uniones y planifican la logística inversa. En paralelo, los pasaportes evolucionan con plantillas de datos verificables (composición, sustancias peligrosas, estado, potencial de reuso/reciclaje) y con flujos de trabajo digitales que integran evaluación de vida remanente y carbonatación (caso hormigón prefabricado), reduciendo incertidumbre y riesgo para inversores y aseguradoras (Sáenz de Santa María Hernández, 2024).

En síntesis, DfD incrementa la circularidad y reduce el carbono incorporado cuando (i) la desmontabilidad se prueba y certifica con indicadores como 3DR/DP/WBCI, (ii) el proyecto fija metas mínimas de reuso (≥ 1 ciclo garantizado) y planifica la logística correspondiente, y (iii) la cadena de suministro cuenta con trazabilidad (BIM + pasaportes) y marcos de aseguramiento que facilitan la recirculación de componentes a escala sectorial.

4. Discusión

La evidencia sintetizada en esta revisión indica que el diseño para desmontaje (DfD) no es únicamente una pauta de buenas prácticas, sino un mecanismo técnico eficaz para incrementar la circularidad material y, especialmente, para desplazar emisiones mediante sustitución evitada a lo largo de múltiples ciclos de uso. Se observa una evolución metodológica clara: de marcos cualitativos a indicadores operativos capaces de auditar la desmontabilidad y la recirculación de valor desde la fase de anteproyecto. En esta transición, métricas como 3DR a escala de edificio, WBCI a escala integral y DP a nivel de componente permiten por primera vez comparar alternativas con criterios homogéneos y verificar metas mínimas de desmontabilidad como condición de circularidad efectiva (Rubilar Feris, 2024).

Desde la perspectiva ambiental, el vector dominante de mitigación del DfD es la sustitución evitada: cada componente reutilizado desplaza las cargas de extracción, procesado y manufactura del homólogo nuevo. En estructuras de acero concebidas para deconstrucción, los balances superan el punto de equilibrio tras el primer reuso y, con tres ciclos, se alcanzan reducciones del orden del 60–70% en energía acumulada y potencial de calentamiento global. Este patrón confirma que el “sobrecoste” inicial asociado a uniones reversibles y refuerzos se amortiza cuando el proyecto garantiza al menos un ciclo de reuso. Para sistemas compuestos

desmontables como forjados acero-hormigón con conectores reversibles el desempeño supera al de alternativas convencionales cuando el segundo ciclo está planificado y las conexiones preservan la integridad del elemento. A su vez, pilotos con elementos de hormigón prefabricado reutilizados evidencian ahorros sustantivos frente a prácticas estándar, ampliando el alcance del reuso más allá del acero y subrayando la necesidad de protocolos de diagnóstico y recertificación en segundas vidas (Leichter & Piccardo, 2024)..

Estos beneficios son, sin embargo, altamente sensibles a parámetros de diseño y de uso. A escala de componente, el tipo de conexión (mecánica frente a adhesiva), la accesibilidad y la estandarización dimensional condicionan directamente la recuperabilidad y el daño en desmontaje; a escala de uso, el número de ciclos, la vida útil relativa y las distancias logísticas dominan la varianza del impacto. A nivel de edificio, ignorar las interdependencias entre partes por ejemplo, las intervenciones colaterales que impone sustituir un elemento puede distorsionar la evaluación y llevar a subestimar impactos de manera significativa; incorporar explícitamente los flujos inducidos por desensamblaje durante operación y fin de vida corrige sesgos y reposiciona el DfD frente a soluciones lineales con criterios comparables. La literatura reciente sobre elementos desmontables delimita, además, los parámetros de mayor influencia y formaliza cómo organizar análisis de ciclo de vida (ACV) multiciclo para resultados robustos, acelerando la traducibilidad de hallazgos a guías de diseño.

En la cuantificación de circularidad, los progresos son notables pero aún heterogéneos. El 3DR demuestra capacidad de auditoría “ex ante” y “ex post” en casos construidos; el DP estandariza la lectura por capas materiales y concuerda con evaluaciones expertas, permitiendo priorizar “cuellos de botella” de acceso; y el WBCI aporta una síntesis a escala edificio con vocación de integrarse a ACV para evitar falsos positivos por simple desplazamiento de cargas entre etapas o categorías de impacto. La convergencia de estos marcos con herramientas digitales como estimadores del valor de salvamento y sistemas analíticos de deconstrucción sobre modelos BIM permite operacionalizar la circularidad en entornos de proyecto, cuantificando tasas de recuperación y escenarios de segunda vida. El reto inmediato es la estandarización intermarcos (qué miden, con qué pesos y a qué escala), de modo que los umbrales de desempeño (por ejemplo, “ ≥ 1 reuso garantizado” o “índice de desmontabilidad mínimo”) puedan incorporarse en especificaciones técnicas, contratos y licitaciones (Mercado Martín, 2020).

La viabilidad de llevar el DfD a escala sectorial depende tanto de habilitadores organizacionales y de mercado como de soluciones técnicas. Entre los factores críticos destacan la integración temprana de criterios de desmontabilidad, competencias en detalle constructivo reversible, normalización de uniones, auditorías de pre-demolición y marcos de contratación que reconozcan el valor de recuperación. En contrapartida, persisten barreras asociadas a costes percibidos y almacenamiento, oferta incierta, falta de demanda del cliente, trazabilidad y certificación, así como brechas de coordinación a lo largo de la cadena de suministro. La asimetría entre

potencial técnico y adopción real sugiere que los beneficios del DfD no se materializan sin instrumentos habilitadores: bases de datos de oferta verificada, estándares de aseguramiento de calidad y compra pública con metas de reuso y desmontabilidad.

En este plano, los pasaportes de materiales emergen como infraestructura de datos indispensable, aunque aún con lagunas: información sobre composición y sustancias peligrosas, condición y vida remanente, y, sobre todo, el potencial real de reuso en función del estado y la trazabilidad. Plantillas de datos verificables y flujos de trabajo BIM-centrados atenúan estas carencias, pero su utilidad depende de la actualización y de la vinculación con criterios de calidad y certificación del componente recuperado. A medida que se consoliden estas infraestructuras, la reducción del riesgo técnico y financiero facilitará la participación de aseguradoras, financiadores y grandes compradores, catalizando mercados secundarios más líquidos y confiables (Masapanta-Masapanta et al., 2025).

A la luz de lo anterior, el DfD ofrece ventajas climáticas y de circularidad robustas bajo tres condiciones mínimas: desmontabilidad verificada con métricas estandarizadas en fase de diseño; planificación explícita de, al menos, un ciclo de reuso (y preferentemente tres en sistemas metálicos), con logística y recertificación contempladas; y trazabilidad habilitada por BIM y pasaportes que reduzcan la asimetría de información en mercados secundarios. Cuando estos prerrequisitos se cumplen, los resultados son consistentes, tanto en sistemas metálicos como en compuestos desmontables y, cada vez con mayor evidencia, en elementos de hormigón reutilizados. La agenda de investigación debería concentrarse ahora en la unificación metodológica y de ponderaciones entre indicadores de circularidad; en la generación de datos empíricos sobre tasas de daño, degradación funcional y fiabilidad tras desmontaje y reensamble; en la integración WBCI-ACV multiciclo con escenarios de sustitución realistas; y en el desarrollo de estándares de certificación para segundas vidas que aceleren la demanda y faciliten el financiamiento. Con ello, el paso de la intención circular a la evidencia cuantificada podrá traducirse en especificaciones de proyecto, regulaciones y decisiones de inversión alineadas con metas de descarbonización y gestión sostenible del capital material (Sáenz de Santa María Hernández, 2024).

5. Conclusiones

La revisión realizada permite afirmar que el diseño para desmontaje constituye una estrategia eficaz para incrementar la circularidad material y reducir el carbono incorporado en edificios cuando se integra desde las fases tempranas de proyecto. La anticipación de uniones reversibles, modularidad y jerarquía de capas no solo facilita la recuperación y el reuso de componentes con mínima degradación funcional, sino que también desplaza emisiones asociadas a la fabricación de productos nuevos a lo largo de ciclos sucesivos de vida.

Los hallazgos convergen en dos ideas fuerza. Primero, la circularidad puede y debe auditarse con métricas operativas que traduzcan decisiones de diseño en resultados verificables a nivel de componente, sistema y edificio. La cuantificación—mediante índices de desmontabilidad, indicadores de circularidad integral y herramientas digitales de apoyo—habilita metas de desempeño medibles y comparables. Segundo, la mitigación climática atribuible al diseño para desmontaje se materializa principalmente por sustitución evitada; en términos prácticos, asegurar al menos un ciclo de reuso permite compensar los “sobrecostos” de incorporar detalles reversibles, mientras que varios ciclos consolidan reducciones sustantivas del potencial de calentamiento global.

No obstante, la magnitud de los beneficios es sensible a decisiones micro y macro. A escala de componente, el tipo de unión, la accesibilidad y la estandarización dimensional determinan la recuperabilidad y la tasa de daño en el desmontaje. A escala de uso, el número de reusos, la vida útil relativa en la segunda vida y la logística condicionan el balance ambiental. A escala de edificio, modelar las interdependencias entre elementos y los flujos inducidos por intervenciones evita subestimar impactos y permite jerarquizar con rigor las decisiones de diseño.

En términos de viabilidad, la adopción a escala requiere habilitadores organizacionales y de mercado: integración temprana del enfoque en el proceso de proyecto, competencias específicas en detalle constructivo desmontable, normalización de uniones, auditorías de pre-demolición, trazabilidad digital (BIM y pasaportes de materiales) y marcos de contratación y compra pública que valoren explícitamente la recuperabilidad y el reuso. Sin estos instrumentos, los beneficios técnicos del enfoque se diluyen frente a barreras de costo percibido, almacenamiento, incertidumbre de suministro y garantías de calidad.

Esta revisión, de carácter exploratorio, reconoce limitaciones: heterogeneidad metodológica entre estudios, supuestos diversos de asignación y límites de sistema, y dispar cobertura geográfica y tipológica. Tales variabilidades recomiendan interpretaciones por rangos y el reporte explícito de supuestos y escenarios, particularmente en análisis multiciclo.

Como agenda de acción, se propone: estandarizar métricas y umbrales mínimos de desmontabilidad para su incorporación en especificaciones y licitaciones; generar datos empíricos sobre tasas de daño y desempeño funcional tras reensamble; integrar de forma sistemática la evaluación de circularidad con análisis de ciclo de vida multiciclo; y consolidar esquemas de certificación y aseguramiento de calidad para componentes recuperados, respaldados por compra pública y financiamiento que internalicen beneficios climáticos. Con estos pasos, el diseño para desmontaje puede transitar de prácticas pioneras a un paradigma sectorial que trate a los edificios como bancos de materiales de bajo carbono, alineados con metas de descarbonización y eficiencia de recursos.

CONFLICTO DE INTERESES

“Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses”.

Referencias Bibliográficas

- Akanbi, L. A., Oyedele, L. O., Akinade, O. O., Ajayi, A., Davila Delgado, M., Bilal, M., & Bello, S. A. (2018). Salvaging building materials in a circular economy: A BIM-based whole-life performance estimator. *Resources, Conservation and Recycling*, 129, 175–186. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.026>
- Akanbi, L. A., Oyedele, L. O., Akinade, O. O., Ajayi, S. O., Delgado, M. D., Bilal, M., & Bello, S. A. (2019). Disassembly and deconstruction analytics system (D-DAS) for construction in a circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 223, 386–396. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.172>
- Akinade, O. O., Oyedele, L. O., Ajayi, S. O., Bilal, M., Alaka, H. A., Owolabi, H. A., ... Kadiri, K. O. (2017). Design for Deconstruction (DfD): Critical success factors for diverting end-of-life waste from landfills. *Waste Management*, 60, 3–13. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.08.017>
- Brambilla, G., Lavagna, M., Vasdravellis, G., & Castiglioni, C. A. (2019). Environmental benefits arising from demountable steel–concrete composite floor systems in buildings. *Resources, Conservation and Recycling*, 141, 133–142. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.10.014>
- Eckelman, M. J., Brown, C., Troup, L. N., Wang, L., Webster, M. D., & Hajjar, J. F. (2018). Life cycle energy and environmental benefits of novel design-for-deconstruction structural systems in steel buildings. *Building and Environment*, 143, 421–430. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.07.017>
- Gaibor-Garófalo, A. M., & Paucar-Camacho, J. A. (2025). Estrategias para el fortalecimiento de la gestión de riesgos de desastres en el uso de suelo del área urbana de la parroquia Salinas, cantón Guaranda. *Revista Científica Zambos*, 4(2), 71-86. <https://doi.org/10.69484/rcz/v4/n2/117>
- Leichter, M., & Piccardo, C. (2024). Assessing life cycle sustainability of building renovation and reconstruction: A comprehensive review of case studies and methods. *Building and Environment*, 262, 111817. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111817>
- Lizarraga-Aguirre, H. R. (2024). Evaluación de materiales sostenibles en la construcción de pavimentos urbano. *Revista Científica Ciencia Y Método*, 2(1), 41-54. <https://doi.org/10.55813/gaea/rcym/v2/n1/30>
- Masapanta-Masapanta, E. A., Pazuña-Naranjo, W. P., & Corrales-Bonilla, J. I. (2025). Análisis de la eficiencia energética de las instalaciones del Edificio Académico del Bloque A de la UTC, Extensión La Maná. *Journal of Economic and Social Science Research*, 5(3), 63-77. <https://doi.org/10.55813/gaea/jessr/v5/n3/206>

- Mercado Martín, L. (2020). Economía circular en la arquitectura. Cómo proyectar de manera circular. <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/44940>
- O'Grady, T., Minunno, R., Chong, H.-Y., & Morrison, G. M. (2021). Design for disassembly, deconstruction and resilience: A circular economy index for the built environment. *Resources, Conservation and Recycling*, 175, 105847. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105847>
- Ostapska, K., Rüther, P., Loli, A., & Gradeci, K. (2024). Design for Disassembly: A systematic scoping review and analysis of built structures Designed for Disassembly. *Sustainable Production and Consumption*, 48, 377–395. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.05.014>
- Ramos Olivares, D. (2025). Desarrollo inicial de protocolos estandarizados para la reutilización del acero estructural en proyectos de construcción circular. <https://hdl.handle.net/2117/445500>
- Rivadeneira-Moreira, J. C. (2024). Implementación de gemelos digitales probabilísticos en el monitoreo de infraestructuras geotécnicas. *Revista Científica Ciencia Y Método*, 2(1), 27-40. <https://doi.org/10.55813/gaea/rcym/v2/n1/29>
- Rubilar Feris, J. (2024). Impacto de la economía circular del acero en obras públicas: aplicación a proyecto de puentes de la dirección de vialidad del ministerio de obras públicas. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/202987>
- Sáenz de Santa María Hernández, E. (2024). economía circular. Aplicación a un edificio de consumo energético casi nulo, nZEB. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/68712>
- van Stijn, A., Eberhardt, L. C. M., Wouterszoon Jansen, B., & Meijer, A. (2022). Environmental design guidelines for circular building components based on LCA and MFA: Lessons from the circular kitchen and renovation façade. *Journal of Cleaner Production*, 357, 131375. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131375>
- Zapata-Mendoza, P. C. O., Villalta-Arellano, S. R., Berrios-Zevallos, A. A., Atto-Coba, S. R., & Berrios-Taucaya, O. J. (2023). *Sostenibilidad ambiental en el diseño arquitectónico de plantas procesadoras de alimentos*. Editorial Grupo AEA. <https://doi.org/10.55813/egaea.l.2022.59>