

Reúso de residuos de la construcción y demolición en un muro verde Reuse of construction and demolition waste on a green wall

S. Hernández-Villarreal^a , G. A. Vázquez-Rodríguez^b , E. Aguirre-Álvarez^b , L. D. López-León^a ,
L. Lizárraga-Mendiola^{a,*} 

^aÁrea Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

^bÁrea Académica de Química, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

Resumen

La insostenibilidad del crecimiento urbano demanda gran cantidad de recursos naturales y genera muchos residuos de la construcción y demolición. El objetivo de este trabajo consistió en reusar esos residuos en la construcción de 1 m² de un muro verde y sus macetas con concreto ecológico, así como el relleno de las mismas. También, se evaluó su viabilidad económica comparando su costo con el de un muro verde con concreto regular. Se sustituyeron cantidades parciales del concreto empleado en el muro y sus 15 macetas con 10% de concreto triturado (en lugar del cemento), 30% de vidrio (en lugar de arena). El relleno de las macetas -del fondo a la superficie- contiene por partes iguales concreto triturado que sustituyó a las gravas y tabique rojo triturado en lugar de arena, así como suelo vegetal. La viabilidad económica se evaluó considerando el costo comercial al menudeo de los materiales necesarios para el concreto regular (cemento, grava y arena) y relleno de macetas (grava, arena y suelo) descartando la mano de obra, ya que se propone como autoconstrucción. En el concreto ecológico se descartó el costo de los residuos empleados. Se determinó que el muro verde ecológico es 7.37% más económico que uno fabricado con agregados naturales. El relleno de las macetas representó 72.08% de ahorro total, mientras que el concreto ecológico sólo un 6.1%, dado que el cemento es el material más costoso y se sustituyó únicamente un 10% de la cantidad necesaria. Se concluye que los residuos de la construcción y demolición son una opción económicamente viable para reducir el consumo de recursos naturales como grava y arena a través de alternativas de infraestructura sostenible como los muros verdes.

Palabras Clave: Agregados, eco-material, economía circular, soluciones basadas en la naturaleza.

Abstract

Urban growth is unsustainable as it requires a large amount of natural resources and generates significant waste. This study aimed to reuse construction and demolition waste in creating a 1 m² green wall and its pots using ecological concrete. The economic feasibility of this approach was evaluated by comparing it with the cost of a green wall made with regular concrete. In the creation of the green wall, 10% of the cement used in the concrete was replaced with crushed concrete, and 30% of the sand was replaced with glass. The pots were filled with a mixture of crushed concrete, crushed red brick, and vegetal soil, replacing gravel and sand. The economic feasibility was assessed based on the retail and commercial cost of the materials, excluding labor, as it is proposed as a self-construction project. It was found that the ecological green wall was 7.37% more cost-effective than one made with natural aggregates. The most significant savings were achieved through filling the pots, which represented 72.08% of the total savings. Using ecological concrete provided a savings of only 6.1%, as cement is the most expensive material and only 10% of the total amount was replaced. In conclusion, using construction and demolition waste in sustainable infrastructure alternatives such as green walls is an economically viable option that reduces the consumption of natural resources like gravel and sand.

Keywords: Aggregates, eco-material, circular economy, nature-based solutions.

1. Introducción

La expansión urbana desde un punto de vista del imaginario colectivo representaba oportunidades de crecimiento

económico y desarrollo humano. No obstante, en la actualidad, el crecimiento de las ciudades se asocia con estrés hídrico, inundaciones, deforestación, contaminación del suelo, agua y aire, destrucción del hábitat, falta de servicios básicos (salud,

*Autor para la correspondencia: mendiola@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: he318990@uaeh.edu.mx (Saúl Hernández-Villarreal), gvazquez@uaeh.edu.mx (Gabriela A. Vázquez-Rodríguez), ag472659@uaeh.edu.mx (Estefanía Aguirre-Álvarez), luis_lopez@uaeh.edu.mx (Luis D. López-León), mendiola@uaeh.edu.mx (Liliana Lizárraga-Mendiola).

esparcimiento, culturales), entre otros (Rashed, 2023). El Informe Mundial de Ciudades 2016 determinó que este enfoque de crecimiento urbano afecta a las personas, ocasiona gastos innecesarios, pone en riesgo al ambiente y es injusto (ONU-Habitat, 2016). La manera en que se transforme el desarrollo urbano por medio de su equipamiento e infraestructura desde una visión sostenible, influirá para que las generaciones siguientes cuenten con la calidad de vida y el acceso a los recursos naturales en cantidad y calidad suficientes (OCDE, 2018).

1.1. La insostenibilidad del sector de la construcción

La industria de la construcción se caracteriza por sus prácticas insostenibles en el uso de recursos naturales. A nivel mundial, ésta consume casi 40% de la energía y produce el 34% de las emisiones de gases de efecto invernadero (López-Ruiz et al., 2020). Los agregados como la grava y arena son el grupo de materiales naturales más utilizado en la actualidad.

Al menos el 50% de la extracción de recursos naturales alcanzó las 89 gigatoneladas (Gt.) en el año 2015; de estos, el 71.9% corresponde a minerales no metálicos (Krausmann et al., 2018). Estos recursos son muy requeridos en la construcción de infraestructura y equipamiento de las ciudades, especialmente en los países de América Latina donde son un requisito indispensable para el crecimiento económico (Bisht, 2022).

Por otra parte, este crecimiento urbano también incluye actividades de excavación y limpieza, rehabilitación y demolición, que producen una gran cantidad de residuos; estos, en su mayoría, carecen de una gestión ambiental adecuada. Se estima que entre 30-40% de los residuos sólidos urbanos provienen de actividades relacionadas con la construcción (Shurrab et al., 2019). Estos residuos se producen durante actividades como la limpieza del terreno, la construcción, remodelación, demolición, así como durante los desastres naturales (Pacheco-Bustos et al., 2017). Como ejemplos, en China se produjeron 2.5 billones de toneladas (t) de residuos de la construcción y demolición (RCD) en el 2020; India produce 750 millones de toneladas anualmente; en la Unión Europea se estimaron 850 millones de toneladas durante el 2022, cantidad equivalente a un tercio de sus residuos sólidos urbanos producidos ese año (Jiang et al., 2023). En Estados Unidos, el 29% de estos se compone por RCD; en Australia, 42% del volumen total equivalen a 9.4 millones de toneladas anuales de RCD. Países como Japón tienen una gestión más eficiente en la construcción, ya que produce sólo el 16% de residuos, equivalente a 750,000 toneladas anuales (Tam et al., 2010). Como se aprecia, indistintamente en países con o sin reconocida trayectoria en la gestión de sus residuos, los RCD son un recurso disponible para explorar distintas opciones a través de su reúso.

Aunque no hay cifras oficiales en México, se calcula que sólo en la capital del país se produjeron 149,468.29 m³ de RCD durante el 2019 (Gaceta Oficial de la Ciudad de México, 2021). Se estima que de éstos se aprovecha solamente 3% a través del reciclaje y 1% a través de su reúso (CMIC, 2013). Este

volumen contiene entre 60-70% de materiales minerales como tierra, concreto, ladrillo y cerámicos (Gaceta Oficial de la Ciudad de México, 2021). Es por ello que en la capital del país se instalaron plantas de tratamiento y aprovechamiento de los RCD. La primera planta entró en operación en agosto de 2022; recibe 2,500 t/mes y produce y comercializa agregados reciclados como grava y arena (González-Alvarado, 2023). Este es sólo un ejemplo de la variedad de aplicaciones que pueden tener estos residuos según su composición.

De acuerdo con Sharma et al. (2023), los RCD pueden clasificarse como a) Difíciles de reciclar (asbesto, pintura, solventes), b) Reciclaje indirecto (vidrio, plástico, cartón, madera, etc.) y c) Reciclaje directo (asfalto, cerámicos, suelo, concreto, tabique, entre otros). Este último tipo de RCD es comúnmente utilizado como sustituto de agregados gruesos (gravas) y finos (arenas), así como sustituto del cemento (CMIC, 2013), por lo que es un área de oportunidad que se explora en este trabajo como una alternativa de la construcción sostenible.

1.2. La economía circular y la construcción sostenible

La economía circular (EC) en el sector de la construcción comprende desde la disminución en el consumo de recursos naturales, reutilización y reciclaje de materiales, así como la recuperación y reúso de sus insumos (Christensen et al., 2022). La gestión adecuada de RCD por medio de su reaprovechamiento en la industria de la construcción puede favorecer su flujo en un círculo virtuoso en el que los residuos se convierten en un recurso (Véliz et al., 2023). Desde un enfoque sostenible, es importante aprovechar al máximo los materiales recuperados por medio de su reutilización o reciclaje al final de su vida útil (Jiang et al., 2023). Comúnmente, la disposición final de este tipo de residuos incluye desde su vertido clandestino o controlado, hasta su reciclaje en centros especiales o *in situ*, siendo esta última opción la más económica de todas, con un costo equivalente a 98.31 pesos mexicanos por cada tonelada recuperada (Liu et al., 2019). Un caso de éxito son las estaciones de reciclaje que existen en la isla de Bornholm, Dinamarca, donde los usuarios privados pueden depositar gratuitamente sus RCD, mientras que fuentes de origen comerciales pagan una tarifa. Estos residuos después se procesan y reciclan para su reúso en la construcción a través de un ciclo cerrado de EC (Christensen et al., 2022). En la Tabla 1 se sintetizan algunas de las principales y diversas aplicaciones de los RCD en distintas partes del mundo, así como los resultados que alientan nuevas líneas de investigación.

Islam et al. (2019) calcularon el valor económico del reciclaje de RCD como el concreto y tabique (40 dólares/t cada uno). Además, plantean que el potencial de reciclaje de estos residuos es alto, puesto que el 75% del concreto puede reusarse, reduciendo entre 6-7% el consumo de agregados naturales (Islam et al., 2019). De estos, 21% del volumen de los RCD corresponde al tabique (Islam et al., 2019).

Tabla 1. Datos sobre el reúso de los RCD en la actualidad

RCD	Datos y cantidades	Resultados y perspectivas	Lugares	Referencias
Ladrillo rojo y concreto triturado como relleno en un techo verde	Proporción 1:1 en una capa de 20 cm de espesor	Potencial como sustituto de materiales vírgenes; recomendable realizar pruebas para determinar su potencial descontaminante	Reino Unido	Bates et al. (2015)
Concreto reciclado como agregado grueso en un pavimento permeable	100% sustitución de agregados gruesos	Porosidad (15-21.8%); permeabilidad (1.95 y 21.14 mm/s); su forma angular y textura rugosa reducen la trabajabilidad del concreto y su grado de compactación	Brasil	Lunkes-Strieder, et al. (2022)
Ladrillo rojo y concreto	Tasas de reutilización: 68% (ladrillo rojo) y 87% (concreto)	Ambos residuos tienen un adecuado potencial para su reutilización; es necesario mejorar su uniformidad, ya que su calidad es inconsistente	Dinamarca	Christensen, et al. (2022)
Ladrillo rojo triturado en un mortero	5% y 10% en sustitución de arena silícea	Las propiedades mecánicas del mortero modificado aumentaron 10% respecto a uno convencional	Brasil	Silva, et al. (2009)
Agregados de concreto triturado en un techo verde	Partículas de 3 a 5 cm de diámetro como relleno en espesores de 20 a 30 cm	Este sustrato almacenó el 21.9% de CO ₂ . Esto fue 1.8 veces superior a un sustrato natural	China	Fan, et al. (2020)
Todo tipo de RCD en sitios clandestinos y sin una gestión adecuada	Tasa de generación de RCD = 235.37 kg/m ² , 83.062 kg/m ² y 35.97 kg/m ² para concreto, ladrillo y mortero, respectivamente	El reciclaje de residuos de hormigón y ladrillos puede añadir un valor económico de alrededor de 44.96 millones de dólares	Bangladesh	Islam, et al. (2019)
Recuperación de RCD por medio de minería urbana	Se emplean tecnologías emergentes de detección, modelado de información de edificios y sistemas de información geográfica	Un plan exitoso de gestión de residuos debe incluir métodos de eliminación, instrucciones detalladas sobre qué materiales deben separarse en el sitio, planes logísticos para el transporte y almacenamiento y procedimientos para el manejo de diferentes materiales	China	Jiang, et al. (2023)
Todos	Reúso de elementos prefabricados como fachadas, muros secos, losas prefabricadas y unidades de escalera (65% a 80%). Se reduce el 76.9% en impactos del cambio climático	Etapas para un modelo integral de economía circular: 1) Pre-construcción, 2) construcción y renovación de edificios, 3) recolección y distribución, 4) fin de la vida útil y 5) recuperación y producción de materiales	Internacional	López-Ruiz, et al. (2020)
Todos	No hay cifras. Es una evaluación cualitativa	Una separación selectiva puede evitar contaminación de materiales; la demolición selectiva permite recuperar un mayor volumen	Colombia	Pacheco-Bustos, et al. (2017)
Pavimento asfáltico recuperado, roca estéril, agregados de concreto reciclado, vidrio reciclado, ladrillo triturado	5 a 100%	Contenidos de humedad menores a 70% hacen que los RCD sean un material geotécnico adecuado para subbases y bases de pavimentos. Se requieren mejoras en la elaboración de mezclas, pues la parte económica aún es inviable	India	Sharma, et al. (2023)
Sustrato de ladrillos reciclados	30 cm de espesor con partículas de 5 a 8 mm	Después de 5 años de operación, el CH ₄ de los techos verdes disminuyó un 120.85%, y el CO ₂ de los techos verdes aumentó un 139.33%	China	Xinping, et al. (2023)

En otro estudio, se determinó que el 87% de los residuos de concreto son reutilizables, mientras que un 68% de residuos de tabique rojo tienen un valor potencial si se aprovechan (Christensen et al., 2022). El reúso de los RCD representa un ahorro de 50%/t métrica en comparación con su disposición en rellenos sanitarios (Lin, 2018). En cuanto al vidrio, este residuo tiene un atractivo potencial de reúso y reciclaje, ya que pueden reducirse 175 kg/t en los rellenos sanitarios; también, generan 20% menos contaminación del aire/t de vidrio reciclado y 50% menos contaminación del agua/t (Lin, 2018).

En este trabajo se propone el reúso de residuos de concreto, vidrio y tabique rojo para construir un muro verde, así como comparar su costo respecto a un muro construido con materiales naturales y determinar su potencial de reciclaje. Se destacan sus ventajas como estrategia de economía circular en la construcción.

2. Los muros verdes

Los muros verdes son un tipo de infraestructura basada en la naturaleza que ayudan a mitigar las consecuencias adversas del crecimiento urbano tales como el efecto de isla de calor o las inundaciones (Meral et al., 2018). Los tipos más comunes de muro verde son sistemas modulares y muros hidropónicos (Lizárraga-Mendiola et al., 2021). Los primeros pueden ensamblarse según las condiciones del espacio disponible, mientras que los segundos tienen un sistema de riego que se aprovecha desde la parte superior y a través de las hileras hacia su parte inferior. También, pueden estar cubiertos parcial o totalmente por vegetación y contar con una capa impermeabilizante (López-Uceda et al., 2018). Éstos consisten en un sistema vertical que contiene un sustrato y vegetación (Addo-Bankas et al., 2021). Entre sus ventajas están que reducen el volumen de escorrentía, mejoran la estética de espacios urbanos, son una alternativa para producir alimentos localmente, reducen el consumo energético en edificaciones, mejoran la calidad del aire, proveen beneficios a la salud, entre otros (Prodanovic et al., 2019).

Una alternativa a explorar para aumentar la gama de ventajas ambientales de este tipo de infraestructura sostenible son los RCD. Algunos residuos tienen propiedades que pueden ser aptas para construir un muro verde: a través de la reducción del cemento, como agregados reciclados en la mezcla del concreto, o como rellenos. Distintos casos de estudio han demostrado las ventajas potenciales de su reutilización. RCD minerales como el tabique o el concreto tienen capacidad incluso para remover contaminantes del agua infiltrada en forma de riego (Dos Reis et al., 2021). Tams et al. (2022) confirmaron que el tabique rojo triturado es apto para emplearlo como sustrato. En otro estudio, se utilizó una capa de drenaje con partículas de tabique rojo de 5 a 8 mm; los autores determinaron su factibilidad como material de relleno en un techo verde (Xinping et al., 2023). En un trabajo similar, se incorporó una mezcla 1:1 de residuos de tabique (75 mm de espesor) y concreto triturados (40 mm de espesor) (Bates et al., 2015). Los residuos de concreto tuvieron una baja capacidad de absorción de agua (2-4%), mientras que los residuos de tabique retienen entre 22 y 25% de humedad (Bates et al., 2015). En el relleno de tabique, esta propiedad puede asociarse con una humedad potencial disponible para las raíces de las

plantas (Bates et al., 2015), lo que lo convierte en una opción deseable en zonas con escasas precipitaciones. En otro estudio se utilizaron partículas de tabique rojo de 3-5 cm como material de relleno y se determinó su potencial para secuestrar carbono (Fan et al., 2020). Residuos de vidrio también se han utilizado como parte del sustrato en este tipo de infraestructura y se ha demostrado su potencial para el crecimiento de la vegetación (Fan et al., 2020). En todos los casos, los autores citados también destacaron un ahorro económico al sustituir materiales naturales con RCD.

3. Metodología

A continuación, se describen los pasos para diseñar, construir y cuantificar el costo de un muro verde ecológico sustituyendo parcialmente con RCD los materiales naturales necesarios. Se identificaron además algunas áreas de oportunidad para el reúso de estos residuos.

3.1. Diseño del muro verde

Se eligió el muro verde de tipo modular para crear un diseño propio ensamblable, que se adapte en espacios pequeños o amplios y pueda construirse con residuos de obras de remodelación o rehabilitación disponibles en una vivienda. El diseño consistió en un sistema modular de 1 m² formado por 15 piezas de concreto ecológico con dimensiones de 40 cm x 20 cm cada una (Figura 1).

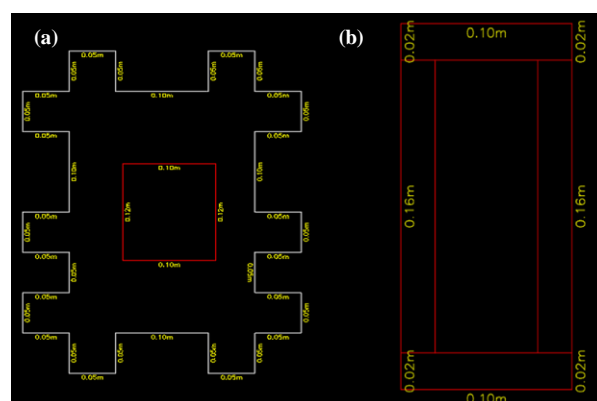


Figura 1. Piezas que incluye el muro verde: a) Módulos ensamblables y b) Macetas.

Las 15 macetas se diseñaron para adaptarse a los espacios huecos en los módulos ensamblables. En la figura 1 se especifican sus dimensiones.

3.2. Construcción del sistema modular

Se diseñó una mezcla de concreto con $f'c$ de 150 kg/cm², ya que es un tipo de concreto común empleado en muros no divisorios, guarniciones y banquetas, principalmente. Se seleccionó este tipo de concreto ya que se requería un material con baja resistencia a la compresión, pues soporta solamente la carga de sus módulos y las macetas. Los materiales necesarios en la mezcla para elaborar los módulos del muro y las macetas se modificaron con un 10% de concreto triturado en sustitución del cemento y 30% de vidrio triturado en sustitución de la arena (Lizárraga-Mendiola et al., 2021).

La cantidad de agregados gruesos (grava, $\phi 3/4''$) y de agua no se modificaron. También, se ensamblaron moldes con madera reciclada MDF (*Medium Density Fibreboard*) empleando pegamento, en los cuales se vació la mezcla del concreto ecológico (Figura 2).



Figura 2. Construcción del muro verde.

Durante el llenado de los moldes se eliminaron las burbujas de aire con una varilla y se curaron durante 5 días, añadiendo 100 ml de agua cada tercer día. Posteriormente, los módulos y macetas se separaron del molde y se conservaron durante 7 días hasta su instalación (Figura 3). El relleno de las macetas consistió en sus capas desde el fondo hasta la superficie de 6 cm de concreto triturado del tamaño de gravas ($\phi 3/4''$), 2 cm de tabique rojo triturado del tamaño de arenas y 4 cm de suelo vegetal.



Figura 3. Instalación de un módulo del muro verde. a) Relleno de gravas (concreto triturado), b) Relleno de arenas (tabique rojo), c) Relleno de suelo vegetal y d) Módulo y maceta instalados.

Para la selección de los materiales y espesor de las capas del relleno se tomó como guía el trabajo de autores que emplearon estos residuos en otro ejemplo de infraestructura basada en la naturaleza, como es el caso de los techos verdes (Bates et al., 2015). En la figura 3d se incluye un módulo con planta

suculenta (*succulentus*) únicamente para representar su escala y debido a que es una planta con poca necesidad de riego y requiere muy pocos cuidados.

3.3. Evaluación económica del muro verde

Para estimar el costo del muro verde (en pesos mexicanos), sus macetas y el relleno de estas, se obtuvieron los precios comerciales de los materiales naturales en su compra al menudeo. Por medio del diseño de mezcla se definieron las cantidades necesarias de cemento (t), así como de los agregados y el agua (m^3) para un concreto regular ($f'c= 150 \text{ kg/cm}^2$) (Tabla 2).

Tabla 2. Cantidades necesarias de materiales naturales para concreto y relleno de macetas.

		Módulos de concreto		Costo
	Unidad	Cantidad	15 Piezas	(unitario)
Concreto				
Cemento gris	t	0.00830537	0.05813759	\$233.71
Arena	m^3	0.02101281	0.14708967	\$90.02
Grava	m^3	0.02755347	0.19287429	\$86.79
Agua	m^3	0.00702933	0.04920531	\$0.88
			Sub-total=	\$411.41
Macetas de concreto				
Cemento gris	t	0.0000348192	0.00052228	\$2.10
Arena	m^3	0.0000697632	0.00104644	\$0.64
Grava	m^3	0.0000914784	0.00137217	\$0.62
Agua	m^3	0.0000233376	0.00035006	\$0.01
			Sub-total=	\$3.36
Relleno natural - macetas				
Suelo	m^3	0.000384	0.00576	\$2.19
Arena	m^3	0.000192	0.00288	\$1.76
Grava	m^3	0.000576	0.00864	\$3.89
			Sub-total=	\$7.84
			Total =	\$422.61

Después, estos costos se estimaron para elaborar la mezcla del concreto ecológico con la que finalmente se construyó el muro verde. En esta segunda evaluación económica se consideró la sustitución de cantidades parciales de cemento y arena para el sistema modular, así como la sustitución total de arena y grava en el relleno de las macetas (descritos en el apartado 3.2). En esta propuesta, el costo de los RCD incluidos como materiales de sustitución en el concreto, así como en el relleno de las macetas fue igual a cero, ya que estaban disponibles para su reúso en una vivienda. En la tabla 3 se incluyen las cantidades de material necesarias con sustitutos de RCD, además del costo al menudeo representativo de las proporciones empleadas en este trabajo. No se consideró ni el tipo de plantas a utilizar, ni su costo, pues no fueron parte del objetivo principal. Tampoco se consideró el costo de mano de obra, pues es un proyecto de autoconstrucción.

Tabla 3. Cantidades de materiales naturales y RCD para concreto ecológico y relleno de macetas.

Módulos de concreto ecológico				Costo (unitario)
Unidad	Cantidad	15 Piezas		
Cemento gris (concreto triturado)	t	0.001657755	0.024866325	\$211.97
Arena (vidrio)	m ³	0.00550615	0.08259225	\$88.51
Grava	m ³	0.00722005	0.10830075	\$85.34
Agua	m ³	0.00184195	0.02762925	\$0.50
			Sub-total=	\$386.31
Macetas de concreto ecológico				
Cemento gris (concreto triturado)	t	0.000034819	0.000522288	\$2.10
Arena (vidrio)	m ³	0.000048834	0.000732513	\$0.45
Grava	m ³	0.000064034	0.000960523	\$0.43
Agua	m ³	0.000023337	0.000350064	\$0.01
			Sub-total=	\$2.99
Relleno - macetas				
Suelo	m ³	0.000384	0.00576	\$2.19
Tabique rojo (arena)	m ³	0.00024	0	\$0.00
Concreto triturado (grava)	m ³	0.000528	0	\$0.00
			Sub-total=	\$2.19
			Total =	\$391.49

4. Resultados y discusión

Una vez construido el muro verde ecológico, se compararon las ventajas y desventajas económicas para determinar su viabilidad desde una perspectiva de economía circular.

4.1. Evaluación económica del muro verde

Al comparar el costo de los módulos, macetas y el relleno en un muro verde construido con concreto regular respecto a un muro verde con el concreto ecológico diseñado en este trabajo, se interpretó lo siguiente:

El costo total del muro verde construido es 7.37% más económico que uno construido con concreto regular (sin RCD). Se obtuvo un mayor ahorro en los materiales de relleno (72.08%), ya que únicamente se utilizó suelo como recurso natural, mientras que las capas de arena y grava se sustituyeron en su totalidad a partir de los residuos de construcción y demolición disponibles (concreto y tabique rojo triturados). Hubo un menor ahorro en el concreto ecológico (6.1%), ya que

el precio del cemento es el más alto de los materiales naturales empleados; el costo de éste comparado con un concreto regular varía ligeramente al ser sustituido por sólo un 10% de RCD. En cuanto a la sustitución de arena con restos de vidrio, el ahorro fue de 1.8%, lo que también se explica por las cantidades empleadas en esta propuesta (0.0017 m³).

Wong et al. (2010) mencionan que la instalación de muros verdes en las paredes de edificaciones puede incrementar su costo, ya que requiere de mantenimiento para evitar daños en sus instalaciones. La ventaja de este muro verde ecológico está en que, al ser modular, puede adaptarse en espacios aislados o junto a muros donde no se requiere de una estructura especial para su instalación. Otra manera en la que puede reducirse su costo es obtener el suelo a partir del compostaje de materia orgánica disponible en una vivienda. Hemalatha et al. (2021) emplearon cáscaras de frutas y vegetales y las mezclaron con suelo de jardín; sus resultados indicaron que son un sustrato idóneo para vegetación en un muro verde.

En lo que respecta a su recuperación potencial durante trabajos de demolición y/o rehabilitación en una vivienda, los RCD como el tabique, piedra, vidrio, entre otros, tienen un alto valor de conservación y aprovechamiento (Christensen et al., 2022). En la tabla 4 se sintetizan los volúmenes recuperables de los RCD (por m²), mismos que se seleccionaron para emplearse en el muro verde.

Tabla 4. Cantidad de RCD recuperables durante una demolición selectiva en viviendas (Christensen et al., 2022).

RCD obtenido	Volumen total generado (t)	Volumen disponible (t)
Tabique	9.09	6.15
Losa de concreto	8.03	6.96

Según los autores, es posible recuperar 67.7% del tabique y 86.71% del concreto (Christensen et al., 2022). Las cantidades restantes tendrían que disponerse en sitios adecuados para este fin. Si se instalan centros especiales en otras ciudades del país para el reciclaje de estos RCD residuales, como se hace en la Ciudad de México y otros países, el valor de recuperación de estos materiales es equivalente a 394.22 pesos mexicanos/t (Liu et al., 2019).

4.2. Áreas de oportunidad de los RCD en infraestructura sostenible

En el apartado anterior se mostró una propuesta económica para la reutilización de RCD por medio de la sustitución de materiales naturales (cemento, agregados y suelo). También, se demostró la viabilidad de emplear un concreto ecológico para elementos no estructurales como el muro verde. Esto aporta un área de oportunidad para explorar otras opciones de infraestructura sostenible.

Carmo et al. (2022) evaluaron la sustitución de agregados naturales en un asfalto poroso, cuya función fue gestionar la escorrentía urbana a través de la infiltración. Los autores comprobaron que con 25% de RCD en sustitución de agregados naturales y 4.5% como ligante, es posible obtener una superficie suficientemente permeable con una influencia

mínima en sus propiedades mecánicas. En otro estudio, se determinaron propiedades físicas de RCD de tabique y concreto como sustitutos de agregados (Kong et al., 2020). Los agregados reciclados pueden servir como material de relleno en jardines o zanjas de infiltración, donde se quiere favorecer la retención de humedad para un buen desarrollo de la vegetación. Según los autores, el tabique tuvo mejor contenido de humedad (12.40-15.80%) y relación de vacíos (0.8-0.9), en contraste con el concreto (2.5-3.2% y 0.30-0.60, respectivamente). Alam et al. (2013) sustituyeron agregados naturales en un concreto ecológico no estructural en proporciones de 25%. Los autores concluyeron que el concreto obtuvo propiedades similares a un concreto regular, aunque la principal diferencia fue que el concreto modificado tuvo mayor absorción de agua. En otro estudio, se construyeron bloques de adoquín (otro tipo de pavimento permeable) con sustitución de RCD (45% gravas y 100% arena de río) (Kumar et al., 2022). Estos autores concluyeron que, aunque no se obtuvo el costo-beneficio esperado, el impacto ambiental es positivo, ya que hay una reducción importante en el consumo de agregados naturales.

5. Conclusiones

En este trabajo se propuso el reúso de residuos de la construcción y demolición (RCD) tales como concreto, vidrio y tabique rojo triturados como una alternativa para promover la construcción de infraestructura sostenible. Dada la cantidad de RCD empleados en el muro verde ecológico, se aprecia una ligera diferencia económica respecto al uso de materiales naturales. No obstante, cabe destacar que esta es una de las múltiples opciones que existen en cualquier ciudad para su reutilización.

Se recomienda explorar su potencial económico en obras de construcción donde la cantidad de RCD disponibles sea suficiente para su empleo como sustituto de agregados, principalmente en guarniciones o banquetas, por ejemplo. También, como se hizo en este estudio, es posible considerar su reúso como material de relleno en camellones, jardines públicos y privados. Estos son elementos de infraestructura común en cualquier parte de una ciudad donde no se requiere forzosamente de agregados naturales.

Otra recomendación es que las autoridades locales pueden adoptar estrategias de economía circular por medio de: a) Crear sitios para gestionar su recolección y reciclaje, b) Promover una red de colaboración entre los constructores para su reutilización, c) Incentivar su empleo en obras públicas de infraestructura y equipamiento sostenibles. Lo anterior podría favorecer la recirculación de estos residuos a través de su revalorización en un círculo virtuoso que cree sinergias entre dependencias de gobierno, empresas y la sociedad.

Como limitaciones de este trabajo, se destaca que no se realizó la evaluación ambiental que representa la sustitución de RCD por materiales vírgenes (ni durante la construcción del muro, ni en los materiales de relleno). Se recomienda como línea futura de investigación la evaluación del análisis de ciclo de vida, para determinar su impacto en las emisiones atmosféricas.

Referencias

- Addo-Bankas, O., Zhao, Y., Vymazal, J., Yuan, Y., Fu, J., Wei, T. (2021). Green walls: A form of constructed wetland in green buildings. *Ecological Engineering*, 169, 106321.
- Alam, M. S., Slater, E., Muntasir-Billah, A. H. M. (2013). Green concrete made with RCA and FRP scrap aggregate: Fresh and hardened properties. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(12), 1783-1994.
- Bates, A. J., Sadler, J. P., Greswell, R. B., Mackay, R. (2015). Effects of recycled aggregate growth substrate on green roof vegetation development: A six-year experiment. *Landscape and Urban Planning*, 135, 22-31.
- Bisht, A. (2022). Sand futures: Post-growth alternatives for mineral aggregate consumption and distribution in the global south. *Ecological Economics*, 191, 107233.
- Carmo, J. L., Rohden, A. B., Garcez, M. R. (2022). Recycling Construction and Demolition Waste as Aggregate in Porous Asphalt Pavement for Urban Stormwater Management. *Journal of Materials in Civil Engineering* 34(10), 1-13.
- Christensen, T. B., Rosenberg-Johansen, M., Visby-Buchard, M., Glarborg, C. N. (2022). Closing the material loops for construction and demolition waste: The circular economy on the island Bornholm, Denmark. *Resources, Conservation & Recycling Advances*, 15, 200104.
- CMIC, Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (2013). Plan de manejo de residuos de la construcción y demolición. Consultado el 5 de junio de 2023 desde: <https://www.cmic.org.mx/comisiones/Sectoriales/medioambiente/Flayer/PM%20RCD%20Completo.pdf>.
- Dos Reis, G. S., Quattrone, M., Monteiro-Ambrós, W., Cazacliu, B. G., Hoffman-Sampaio, C. (2021). Current Applications of Recycled Aggregates from Construction and Demolition: A Review. *Materials*, 14(7), 1700.
- Fan, L., Wang, J., Liu, X., Luo, H., Zhang, K., Fu, X., Li, M., Li, X., Jiang, B., Chen, J., Fu, S., Mo, Y., Li, L., Chen, W., Cheng, L., Chen, F., Ji, L., Ma, D., Zhang, X., Anderson, B. C. (2020). Whether the carbon emission from green roofs can be effectively mitigated by recycling waste building material as green roof substrate during five-year operation?. *Environmental Science and Pollution Research*, 27 (32), 40893-40906.
- Gaceta Oficial de la Ciudad de México (2021). NACDMX-007-RNAT-2019, Norma Ambiental para la Ciudad de México que establece la clasificación y especificaciones de manejo integral para los residuos de la construcción y demolición en la Ciudad de México. Consultado el 25 de mayo de 2023 desde: http://data.sedema.cdmx.gob.mx/sitios/conadf/documentos/proyectos-normas/NACDMX_007_RNAT_2019.pdf
- González-Alvarado, R. (2023). En CDMX, de 14 mil toneladas de residuos de construcción sólo se procesan 6 mil cada día. Reportaje especial publicado en *La Jornada*, 18 de abril de 2023 desde: <https://www.jornada.com.mx/notas/2023/04/18/reportaje/en-cdmx-de-14-mil-toneladas-de-residuos-de-construccion-solo-se-procesan-6-mil-cada-dia/>
- Hemalatha, T., Raj, N. R., Gopal, R. (2021). Pervious Concrete for Green Walls. *Journal of Architectural Engineering*, 27(4), 1-5.
- Islam, R., Nazifa, T. H., Yuniarto, A., Uddin, A. S. M. S., Salmiati, S., Shahid, S. (2019). An empirical study of construction and demolition waste generation and implication of recycling. *Waste Management*, 95, 10-21.
- Jiang, J., Chu, C., Song, L., Gao, X., Huang, B., Zhang, Y., Zhang, Y., Liu, Y., Hou, L., Ju, M., Cao, Z. (2023). From prospecting to mining: A review of enabling technologies, LCAs, and LCCAs for improved construction and demolition waste management. *Waste Management*, 159, 12-26.
- Kong, D., Wan, R., Zhang, L., He, Z., Wang, Y., Huang, W. (2020). Effects of Brick Content on Crushing Behavior of Subgrade Backfill Material Composed of Construction Waste. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(3), 1-13.
- Krausmann, F., Lauk, C., Haas, W., Wiedenhofer, D. (2018). From resource extraction to outflows of wastes and emissions: The socioeconomic metabolism of the global economy 1900–2015. *Global Environmental Change*, 52, 131-140.
- Kumar, G., Gupta, R. C., Shrivastava, S. (2022). Sustainable Zero-Slump Concrete Containing Recycled Aggregates from Construction and Demolition Waste of a 63-Year-Old Demolished Building. *Journal of Civil Materials in Engineering*, 34(7), 1-19.
- Lin, K. Y. (2018). User experience-based product design for smart production to empower industry 4.0 in the glass recycling circular economy. *Computers & Industrial Engineering*, 125, 729-738.
- Liu, J., Teng, Y., Jiang, Y., Gong, E. (2019). A cost compensation model for construction and demolition waste disposal in South China. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 13773–13784.

- Lizárraga-Mendiola, L., Vázquez-Rodríguez, G. A., Bigurra-Alzati, C. A. (2021). Gestión sostenible de la escorrentía urbana por medio de jardines de lluvia en zonas semiáridas de México. III Congreso Virtual Desarrollo Sustentable y Desafíos Ambientales “El Ambiente, los problemas ambientales y la Pos-pandemia”. Bolivia, 8 al 18 de noviembre de 2021. Pp. 532-544. ISBN 978-99905-809-9-0.
- López-Ruiz, L. A., Roca-Ramón, X., Gassó-Domingo, S. (2020). The circular economy in the construction and demolition waste sector—A review and an integrative model approach. *Journal of Cleaner Production*, 248, 119238.
- López-Uceda, A., Galvín, A. P., Ayuso, J., Jiménez, J. R., Vanwalleghem, T., Peña, A. (2018). Risk assessment by percolation leaching tests of extensive green roofs with fine fraction of mixed recycled aggregates from construction and demolition waste. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 36024–36034.
- Lunkes-Trieder, H., Pasa-Dutra, V. F., Gaio-Graeff, A., Peres-Núñez, W., Meert-Merten F. R. (2022). Performance evaluation of pervious concrete pavements with recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 315, 125384.
- Meral, A., Başaran, N., Yalçınalp, E., Doğan, E., Kıvanç-Ak, M., Eroğlu, N. (2018). A Comparative Approach to Artificial and Natural Green Walls According to Ecological Sustainability. *Sustainability*, 10(6), 1995.
- OCDE (2018). Rethinking Urban Sprawl. Moving Towards Sustainable Cities. Publicado el 14 de junio de 2018, 168 pp. <https://doi.org/10.1787/9789264189881-en>.
- ONU-Hábitat (2016). Informe de las ciudades del mundo 2016. Urbanización y desarrollo: futuro emergente. Organización de las Naciones Unidas, Nairobi, Kenia, 262 pp. <https://unhabitat.org/world-cities-report-2016>.
- Pacheco-Bustos, C. A., Fuentes-Pumarejo, L. G., Sánchez-Cotte, E. H., Rondón-Quintana, H. A. (2017). Residuos de construcción y demolición (RCD), una perspectiva de aprovechamiento para la ciudad de Barranquilla desde su modelo de gestión. *Ingeniería y Desarrollo*, 35(2), 533-555.
- Prodanovic, V., Wang, A., Deletic, A. (2019). Assessing water retention and correlation to climate conditions of five plant species in greywater treating green walls. *Water Research*, 167, 115092.
- Rashed, A. H. (2023). The Impacts of Unsustainable Urbanization on the Environment. *Sustainable Regional Planning*, Ed. Almusaed, A. Z. y Almsaad, A. IntechOpen. doi:10.5772/intechopen.110089.
- Sharma, A., Shrivastava, N., Lohar, J. (2023). Construction & demolition waste in geotechnical applications: A review. *Materials Today: Proceedings*, in press.
- Shurab, J., Hussain, M., Khan, M. (2019). Green and sustainable practices in the construction industry: A confirmatory factor analysis approach. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 26(6), 1063-1086.
- Silva, J., de Brito, J. Veiga, R. (2009). Incorporation of fine ceramics in mortars. *Construction and Building Materials*, 23, 556–564.
- Tam, V. W. Y., Tam, L., Le, K. N. (2010). Cross-cultural comparison of concrete recycling decision-making and implementation in construction industry. *Waste Management*, 30(2), 291-297.
- Tams, L., Nehls, T., Calheiros C. S. C. (2022). Rethinking green roofs- natural and recycled materials improve their carbon footprint. *Building Environment*, 219 (2022), 109122.
- Véliz, K. D., Walters, J. P., Busco, C., Vargas, M. (2023). Modeling barriers to a circular economy for construction demolition waste in the Aysén region of Chile. *Resources, Conservation & Recycling Advances*, 18, 200145.
- Xinping, L., Lin, Y., Liu, X., Liang, J., Yang, X., Zhang, K., Jiang, B., Luo, H., Li, L., Wei, Z., An, X., Chen, W., Chen, K., Yang, L., Zhang, X. (2023). Effect of using construction and demolition waste as substrate on methane and carbon dioxide emissions from green roofs. *Ecological Engineering*, 192, 106967.
- Wong, N. H., Kuang-Tang, A. Y., Tan, P. Y., Sia, A., Wong, N. C. (2010). Perception Studies of Vertical Greenery Systems in Singapore. *Journal of Urban Planning and Development*, 136(4), 287-383.