



## Integración de materiales sostenibles en la construcción civil ante el cambio climático

Integration of sustainable materials into civil construction in the face of climate change

**Gabriel Montúfar**

<https://orcid.org/0000-0003-3392-3728>

Universidad de Panamá, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil, Panamá

Autor correspondiente: [gabriel.montufar@up.ac.pa](mailto:gabriel.montufar@up.ac.pa)

**Enviado:** 21 de agosto de 2025. **Aceptado:** 12 de noviembre de 2025

<https://doi.org/10.59722/rcvn.v3i2.1028>

### Resumen

El cambio climático, una amenaza para la humanidad, está impactando de forma directa a la infraestructura civil, ya que el incremento de eventos extremos provoca la degradación acelerada de las estructuras. La industria de la edificación, responsable de una buena parte de las emisiones globales de gases de efecto invernadero, también se tiene que ver abocada a la transición hacia la edificación sostenible. Este artículo tiene como objetivo mostrar materiales innovadores y ecológicos en la construcción civil de las infraestructuras como los concretos autorreparables, cemento de arcilla calcinada y caliza, biochar en materiales cementicios, asfaltos de mezcla tibia y áridos reciclados. Se hace un análisis de las propiedades mecánicas, ambientales y medioambientales y económicas de estos materiales con base en una revisión exhaustiva de la literatura reciente, con reducción en emisiones de CO<sub>2</sub> y mejora de la durabilidad. Estos materiales son necesarios para mitigar el calentamiento global y alargar la vida útil de las estructuras, pues promueven la economía circular. Los resultados muestran la reducción en el impacto medioambiental sin perder propiedades o con mejora del rendimiento estructural, proponiendo una buena solución para las regiones vulnerables como Panamá. Este enfoque responde a la resiliencia al cambio climático y se alinea a los objetivos mundiales de sostenibilidad.

### Palabras clave

Cambio climático, construcción, desarrollo sostenible, materiales de construcción, protección ambiental.

## Abstract

Climate change, a threat to humanity, is directly impacting civil infrastructure, as the increase in extreme events causes accelerated structural degradation. The building industry, responsible for a significant portion of global greenhouse gas emissions, must also address the transition to sustainable construction. This article aims to showcase innovative and environmentally friendly materials for civil infrastructure construction, such as self-healing concrete, calcined clay and limestone cement, biochar in cementitious materials, warm-mix asphalt, and recycled aggregates. The mechanical, environmental, and economic properties of these materials are analyzed based on a comprehensive review of recent literature, with a reduction in CO<sub>2</sub> emissions and improved durability. These materials are necessary to mitigate global warming and extend the lifespan of structures, as they promote a circular economy. The results show a reduction in environmental impact without losing properties or with improved structural performance, proposing a good solution for vulnerable regions such as Panama. This approach responds to climate change resilience and aligns with global sustainability goals.

## Keywords

Building materials, climate change, construction, environmental protection, sustainable development

## Introducción

El cambio climático ha alterado drásticamente los patrones ambientales a nivel global, dando lugar a fenómenos climáticos extremos, tales como inundaciones, sequías o tormentas extremas que pueden comprometer gravemente la infraestructura civil de los países. Así las cosas, la construcción civil, que es una actividad de alto consumo de recursos naturales y de altas emisiones de gases de efecto invernadero, debe evolucionar de manera que su práctica muestre un modelo que prevenga situaciones climáticas adversas, que se adhiera a criterios ecológicos y que derive en construcciones más resilientes. Los estudios más recientes estiman, por ejemplo, que la producción de cemento convencional es responsable de aproximadamente el siete por ciento de las emisiones globales de CO<sub>2</sub> e invitan a replantearse la incorporación de materiales sostenibles (Abera, 2024). Estos nuevos materiales no solo tienen menos impacto ambiental, sino que también favorecen las durabilidades de las estructuras ante condiciones climáticas adversas. Es así que el uso de concretos innovadores y asfaltos ecológicos podría mejorar la durabilidad frente a la

corrosión y al deterioro en lugares tropicales como Panamá, donde la humedad y las precipitaciones son importantes. De igual manera, las nuevas alternativas de explicación de puentes, de carreteras y edificios en general se podrían probar de forma mucho más eficiente. Por ende, el propósito de este artículo será analizar el uso de los nuevos materiales para la construcción, pero sobre todo para ponerlos en práctica evaluando una serie de criterios, tales como la reducción de emisiones, propiedades mecánicas y viabilidad económica, entre otros.

Las nuevas alternativas para una construcción sostenible incluyen el uso de cementos de bajo clínker, aditivos reciclados o de origen proveniente de residuos y agregados reciclados. El estado del arte de la investigación ha demostrado que este uso puede llegar a reducir hasta un treinta por ciento de las emisiones de la producción de materiales (Uddin et al., 2025). Asimismo, de la misma forma, que aumenta la urbanización y la necesidad de infraestructura, también promueven la economía circular, ya que se hace un uso más extensivo de los residuos y de los recursos no renovables.

A lo largo del artículo se van desarrollando, mediante una serie de secciones, distintas partes como la metodología de trabajo y el desarrollo de los principales temas, discusión de los resultados y conclusiones útiles. Este afrontar los nuevos materiales para la construcción tendrá como base una mirada de la literatura científica más reciente en cuanto a los materiales en construcción y que son útiles para la mejora de la resiliencia de la construcción civil ante el cambio climático.

## Desarrollo

Se realiza a continuación el análisis en profundidad de los materiales sostenibles, clasificados por categorías, cuyas características, ventajas y posibilidades de aplicación están sustentados en la evidencia científica. En esta investigación no sólo se contempla el análisis de las propias propiedades intrínsecas de cada material, sino también si se han puesto en práctica o no en proyectos reales de construcción civil, y el rol que estos materiales juegan en la mitigación de peligros climáticos como el incremento de

temperatura, la erosión del litoral o ciertos fenómenos climáticos extremos. Se estudia también el ciclo de vida de cada material a partir de la extracción de recursos hasta su disposición final, descifrándose cómo estos materiales contribuyen a la reducción de la huella del carbono y a la eficiencia energética en la cadena de suministro. En el ámbito de la construcción en un país como Panamá donde, además, la infraestructura se enfrenta a un mayor reto por la variabilidad climática, se vislumbra una oportunidad para la innovación en los diseños a favor de la adaptabilidad y la durabilidad, además de poder integrar principios de una ingeniería verde alineada con las normativas internacionales de sostenibilidad. Por último, se indica que es crucial el papel de la colaboración interdisciplinaria entre ingenieros, ambientalistas y creadores de políticas para sacar el mejor rendimiento a estas innovaciones.

### Concretos autorreparables

Los concretos autorreparables suponen una alternativa innovadora para aumentar la sostenibilidad de estructuras sometidas a condiciones climáticas extremas. Se incluyen mecanismos que permiten la auto-reparación de fisuras y, por lo tanto, se disminuye la necesidad de hacer reparaciones y las emisiones que salen al exterior provocadas por las reparaciones (Amran et al., 2022).

Las técnicas son las siguientes: la introducción de cápsulas que contienen agentes de resana y/o bacterias que empiezan a precipitar carbonato de calcio en el momento en que se activan por la existencia de humedad o de fisuras en la estructura. Los estudios demuestran que los concretos autorreparables pueden reparar fisuras de aproximadamente un milímetro, aumentando la impermeabilidad y la resistencia a la corrosión. En ambientes con condiciones de alta humedad, como en los entornos tropicales, esta capacidad para sanar fisuras es muy importante para prevenir la humedad y, por lo tanto, el deterioro. A su vez, su integración minimiza las afectaciones al medioambiente al incrementar la vida de las estructuras, contribuyendo a los objetivos de sostenibilidad. Los estudios indican que la permeabilidad puede ser reducida en un sentido hasta seis veces, mediante agentes

bacterianos, aunque es necesaria una optimización de los mismos para trabajar a gran escala.

Dentro de las técnicas más prometedoras se cuentan los sistemas en micro-cápsulas, que hacen que polímeros o resinas epóxicas se liberen al romperse el sistema en micro-cápsulas, y esto genera un sellado por reacción al formar grietas. Otra forma va asociada a cristales expansivos que, al ser expuestos al agua, se expanden y tensan las fisuras. Las bacterias, como *Bacillus subtilis*, producen esporas que en contacto con los nutrientes y humedad producen calcita, un mineral que sella de forma natural las grietas. Estos mecanismos, no solo reparan los daños mecánicos, sino que además protegen frente a la penetración de cloruros y sulfatos que son abundantes en los ambientes costeros provocados por el aumento del nivel del mar asociado al cambio climático.

Su uso más extendido en la práctica ha sido en puentes y presas en los que las reparaciones tradicionales suponen un elevado coste. Por ejemplo, en el caso de estructuras en zonas sísmicamente activas o que sufren inundaciones como es el caso de Panamá, los sistemas de concreto autorreparables podrían ser una forma de evitar los colapsos estructurales ya que se auto-reparan tras un evento crítico manteniendo así la integridad estructural. No obstante, persisten algunas interrogantes, como por ejemplo la compatibilidad de los mezclados con los aditivos del concreto convencional o la durabilidad de los agentes reparadores que se pueden deteriorar con el paso del tiempo. En este sentido, algunos estudios señalan que la combinación de mecanismos, como cápsulas y bacterias, rinden resultados superiores en términos de tasas de reparación, alcanzando hasta un noventa por ciento en grietas menores. La economía del concreto autorreparable es otra condicionante ya que, aunque el coste inicial es más elevado, el ahorro en el mantenimiento y la amortización de los costes secundarios puede producirse en un periodo que va de cinco a diez años, lo que hace viable su empleo en proyectos de infraestructura crítica. Finalmente, la investigación futura debe contemplar la producción a gran escala y el comportamiento de estos materiales en condiciones reales de exposición climática y por tanto la integración de los concretos autorreparables en la normativa de construcción sostenible.

### Cementos de arcilla calcinada y caliza

Los finos de arcilla calcinada y caliza, específicamente los cementos LC3, constituyen una opción de bajo carbono ante el uso del tradicional cemento Portland. Con estos materiales se puede disminuir el contenido de clínker, que es la principal fuente de emisiones, haciendo uso de arcilla calcinada y caliza (Sharma et al., 2021; Kanagaraj et al., 2024).

La arcilla calcinada trabaja como puzolana, esto es, forma nuevos compuestos al reaccionar con el hidróxido de calcio, de esta forma mejoran dimensiones como resistencia y durabilidad. Varios estudios han demostrado que el LC3 puede alcanzar resistencias comparables a las del cemento convencional, pero utilizando hasta un cincuenta por ciento menos clínker, de este modo disminuyendo las emisiones en un treinta por ciento (Huang et al., 2024; Li et al., 2024).

Con respecto a su uso en morteros y concretos, el LC3 puede llegar a refinar la estructura de los poros, generando una mayor resistencia hacia iones agresivos, lo que resulta muy conveniente para obras en zonas costeras que son impactadas por el aumento del nivel del mar. La normalización de este tipo de cementos ha sido revisada por diferentes comités internacionales, lo que contribuye a su uso, aunque se requieren algunas adaptaciones relacionadas con los sulfatos para que se optimicen sus niveles de rendimiento (Kanavaris et al., 2023; Sabino et al., 2024).

La optimización multi-objetivo, que integra los aspectos de rendimiento mecánico, medioambiental y financiero, también sugiere relaciones óptimas de arcilla frente a caliza conforme a diferentes resistencias, apoyando su uso en construcciones resilientes.

### Biochar en materiales cementicios

Incorporando biochar, obtenido a partir de la pirolisis de biomasa residual, en materiales cementosos se puede llegar a aumentar las propiedades mecánicas y térmicas además de lograr la fijación de carbono (Barbhuiya et al., 2024; Mensah et al., 2021).

Por su parte, este material poroso, puede llegar a reducir un 39 % de la conductividad térmica y mejorar el aislamiento de edificios sometidos a un amplio rango de temperaturas e impactos ambientales. En el caso del hormigón, adiciones que van del 1 al 5% consiguen

augmentar la resistencia a compresión y flexión, además de actuar como un curador interno para mejorar las propiedades de fraguado (Tee et al., 2023; Hylton et al., 2024).

Otros estudios demuestran que se consiguen mejoras en la durabilidad, como resistencia al fuego, reducción de la contracción, etc. A pesar de que un alto porcentaje, debido a su retención de agua, puede afectar al construido (Suarez-Riera et al., 2024; Zhang et al., 2022). El biochar apunta a la neutralidad de carbono, fijando hasta 2.2 kg de CO<sub>2</sub> por kg de biochar producido, por lo que puede hacerse su uso en el ámbito de la sostenibilidad de la construcción.

El anterior párrafo presenta el contenido de la Tabla 1 que evidencia una comparación entre las propiedades mecánicas de los cementos tradicionales y de los cementos con el biochar. Esta tabla presenta los distintos valores medidos como la resistencia a compresión, la conductividad térmica, etc., que se encuentran en la base de las revisiones realizadas (Mensah et al., 2021; Tee et al., 2023).

**Tabla 1.** Comparación de propiedades mecánicas de cementos tradicionales y con adición de biochar.

Propiedad	Cemento tradicional	Con 2 % biochar	Con 5 % biochar	Referencia
<b>Resistencia a compresión (MPa, 28 días)</b>	50-60	55-65	45-55	(Mensah et al., 2021)
<b>Resistencia a flexión (MPa)</b>	5-7	6-8	5-7	(Tee et al., 2023)
<b>Conductividad térmica (W/mK)</b>	1.0-1.5	0.8-1.0	0.6-0.8	(Zhang et al., 2022)
<b>Reducción de emisiones (%)</b>	0	10-15	20-25	(Barbhuiya et al., 2024)

La tabla 1 muestra las variaciones en propiedades mecánicas por la incorporación de biochar en distintas proporciones donde se observan mejoras en resistencia y reducción térmica, que denotan el potencial para aplicaciones en construcciones energéticamente

eficientes. Estos datos cuantitativos proponen comparaciones mediante resultados y evidencian como cuantificaciones adecuadas potencian los resultados sin provocar el fallo estructural al otorgar firmeza a su uso en aplicaciones donde primen los objetivos de adaptación al cambio climático.

### **Asfaltos de mezcla tibia y pavimentos reciclados**

Los asfaltos de mezcla tibia presentan temperaturas de preparación mucho más bajas, disminuyendo el consumo energético, así como las emisiones (Belc et al., 2021; Martinez-Soto et al., 2023), y aditivos típicos como zeolita o lignina proporcionan un mejor rendimiento, con impactos ambientales que se reducen del diez al quince por ciento (Shi & Xu, 2023). El uso de pavimentos reciclados incorpora, a su vez, agregados de un asfalto ya recuperado, reduciendo la extracción de recursos vírgenes y las emisiones de gases de efecto invernadero (Gruber et al., 2023; Vega et al., 2020). El ciclo de vida de los propios pavimentos reciclados muestra importantes beneficios ambientales en el caso del calentamiento global, mejorados con la introducción de lignina biomasa forestal, que a su vez mejora la resistencia al surcado, y reduce el coste (Gaudenzi et al., 2023; Pascoal et al., 2023). Asimismo, en las propias carreteras, estos tipos de materiales incrementan su vida útil, ya que se comportan mejor frente a cargas climáticas como el calor.

La tabla 2 hace una comparación entre los asfaltos tradicionales y los asfaltos de mezcla tibia con reciclados; esta tabla aborda las categorías de las emisiones de carbono y el consumo energético, y que son desarrolladas mediante evaluaciones del ciclo de vida (Belc et al., 2021; Martinez-Soto et al., 2023).



**Tabla 2.** Impactos ambientales de asfaltos tradicionales y de mezcla tibia con agregados reciclados.

<b>Categoría ambiental</b>	<b>Asfalto tradicional</b>	<b>Asfalto tibia con 20% reciclado</b>	<b>Asfalto tibia con 30% reciclado</b>	<b>Referencia</b>
<b>Emisiones de CO2 (kg eq/t)</b>	50-60	40-50	35-45	(Belc et al., 2021)
<b>Consumo energético (MJ/t)</b>	300-400	250-300	200-250	(Martinez-Soto et al., 2023)
<b>Potencial de acidificación (kg SO2 eq/t)</b>	0.2-0.3	0.15-0.2	0.1-0.15	(Gruber et al., 2023)
<b>Reducción global (%)</b>	0	10-15	20-25	(Vega et al., 2020)

La tabla 2 muestra cuantificados los beneficios ambientales de la mezcla tibia de asfaltos con distintos porcentajes de reciclados, como la disminución de emisiones y de energía utilizada, poniendo de manifiesto su aportación a la sostenibilidad en las pavimentaciones; además, estos indicadores permiten la evaluación de viabilidad, pues mayores porcentajes de reciclados incrementan los ahorros y fomentan su aplicación en infraestructuras viales en áreas climatológicamente variables. La tabla 2 indica que el asfalto tradicional (conocido como hot-mix asphalt o HMA) es el asfalto que se obtiene, a partir de agregados vírgenes (grava gruesa ~17-38%, grava fina ~29-38 %, arena ~25-44%, filler ~1 %) y ligante asfáltico virgen (~5 %), a altas temperaturas (154-160 °C) sin la adición de aditivos ni reciclados; el asfalto de mezcla tibia con 20 % reciclado (warm-mix asphalt o WMA) es el asfalto que se logra a bajas temperaturas (134-144 °C) mediante la adición de, por ejemplo, componentes como zeolita (~0.6 %) o Evotherm® (~0.5 %) con la adición de ~70-80 % de agregados vírgenes ajustados tal y como mencionan y un 20 % de RAP (reclaimed asphalt pavement, una mezcla que se compone de ~5 % de ligante reutilizado y ~95 % de agregados); por último el asfalto de mezcla tibia con 30 % reciclado, que pone en práctica la metodología

conocida en el que usa ~60-70 % de agregados vírgenes y el 30 % de RAP, pero que manifiesta una reducción del uso de los recursos vírgenes. Cabe indicar que estos resultados son los obtenidos por las diferentes evaluaciones de ciclo de vida referenciadas (Belc et al., 2021; Martínez-Soto et al., 2023; Gruber et al., 2023; Vega et al., 2020), pues las distintas versiones modificadas con reciclados y aditivos manifiestan el menor de los resultados en cuanto a emisiones y consumo energético, al igual que en acidificación, por lo que son una buena oportunidad de poder realizar una buena práctica en cuanto a sostenibilidad en las pavimentaciones.

### Agregados reciclados

Los agregados reciclados de residuos de construcción disminuyen la demanda de materias primas vírgenes, lo que favorece la circularidad (Mascarenhas et al., 2023; Lei et al., 2022). Estas evaluaciones indican que la producción con aglomerados reciclados presentaría emisiones menores, pero altamente dependientes de su distancia de transporte (Linares et al., 2024).

Dichos materiales pueden preservar propiedades mecánicas adecuadas en el concreto, podrían contribuir a la resiliencia climática dado que implicarían una reutilización de recursos locales. De hecho, el uso de agregados finos reciclados en morteros de concreto podría redundar en una reducción de las emisiones de carbono de hasta un 20 %, tal como lo reflejan los análisis de ciclo de vida que acotan las fases de estudio desde la demolición hasta la mezcla final. Además, en regiones donde la producción de residuos de construcción es elevada, caben considerar las zonas urbanas en expansión, los agregados reciclados permiten reducir las cantidades de residuos acumulados, transformándolos en una materia prima para la elaboración de componentes valiosos en las estructuras. La literatura ha puesto en presente que, aunque la circulación de agua es mayor en los granulados reciclados, tratamientos como la saturación o aditivos y adiciones de mezcla permitirían igualar el rendimiento de un agregado natural y mejorar su resistencia frente a ciclos de congelación-descongelación, típicos de zonas vulneradas por el cambio climático. Estas incorporaciones a los pavimentos y edificios permitirían ahorrar materias primas no

renovables y también reducir costes operativos en el largo plazo, lo que generaría mayores economías locales sostenibles. En último término, la variabilidad geográfica de la calidad de los residuos necesitaría de normativas subyacentes que fijen criterios de uniformidad, que posibiliten que estos materiales puedan manifestar los niveles de durabilidad en entornos vulnerables.

### Análisis del tema

No obstante, esta ventaja de la combinación de estos materiales con valores de reducción de emisión y una óptima durabilidad a los efectos de su aplicación queda contrarrestada por las barreras que deben hacer frente a altas inversiones iniciales y la necesidad de homologación. Para lugares como Panamá, donde la vulnerabilidad ha de ser entendida en el contexto del cambio climático en el que nos encontramos, el empleo de estos materiales es esencial, pero debe ser complementario de una investigación más avanzada de las aplicaciones de cada uno.

A modo de comparación, el biochar y LC3 son completos con un uso de valor positivo, a la vez que el asfalto reciclado los potencia mientras realiza un uso positivo de los recursos. Estas ventajas han sido cuantificadas a través de tablas para consolidar la viabilidad. Es importante señalar la dimensión del aspecto socioeconómico, en la medida en que la adopción de estos materiales podría generar puestos de trabajo en la cadena de reciclaje, además de incorporación de empleo para la producción más ecológica, pero requiere de formación para las personas de trabajo tradicional. La cadena de suministro puede incluir brechas como la de suministro de biomasa para biochar como la de arcilla para LC3, que podría establecerse como una brecha en el proceso secuencial en los países en vías de desarrollo, sugiriendo que hay que desarrollar políticas que alienten las inversiones en términos de infraestructura verde. Los beneficios a largo plazo (menores costes de mantenimiento) y mayores resiliencias ante desastres climáticos superan las barreras iniciales, en la medida que bien se alinean con los acuerdos internacionales, como sería el Acuerdo de París. Se requieren futuras investigaciones para las pruebas de experimentos

de campo integrados que evalúen el rendimiento conductor bajo proyecciones de clima que den una validación de estos materiales en todo un espectro geográfico y cultural.

Para hacer la discusión más robusta en la tabla 3 se incorpora un análisis comparativo más extenso de los cinco materiales que hemos expuesto (concretos autorreparables, cementos de arcilla calcinada y caliza (LC3), biochar en materiales cementicios, asfaltos de mezcla tibia y agregados reciclados). Se presenta una tabla con criterios comparativos que directamente se ve la contraposición de estos materiales en base a parámetros como coste inicial vs. ahorros en el largo plazo, madurez tecnológica (listo para el mercado vs. experimental), facilidad de implementación y mayor impacto de reducción de carbono. Los datos presentados son tomados de la revisión de literatura citada en el documento (por ejemplo, Amran et al., 2022; Sharma et al., 2021; Barbhuiya et al., 2024; Belc et al., 2021; Mascarenhas et al., 2023).

**Tabla 3.** Análisis comparativo de los materiales sostenibles

Material	Costo inicial vs. ahorro a largo plazo	Madurez tecnológica	Facilidad de implementación	Mayor impacto en reducción de carbono
Concretos autorreparables	Costo inicial alto (debido a agentes como cápsulas o bacterias); ahorro a largo plazo en mantenimiento (5-10 años de amortización, según Amran et al., 2022)	En fase experimental a semi-comercial (pruebas en puentes y presas, pero optimización pendiente)	Media (requiere ajustes en mezclas convencionales; compatibilidad variable)	Medio (reduce emisiones indirectas por mayor durabilidad, pero no detallado en % directo)
Cementos LC3	Costo inicial moderado (menor clínker); ahorro a largo plazo por durabilidad mejorada (reducción 30 % en emisiones, según Sharma et al., 2021)	Lista para el mercado (normalización internacional en curso, Kanavaris et al., 2023)	Alta (compatible con procesos existentes; requiere adaptaciones mínimas)	Alto (hasta 30-50 % menos clínker, reducción directa de CO <sub>2</sub> )

	y Kanagaraj et al., 2024)			
Biochar en materiales cementicios	Costo inicial bajo-moderado (biomasa residual); ahorro a largo plazo por fijación de carbono y menor mantenimiento (reducción 20-25 % emisiones con 5 %, según Barbhuiya et al., 2024)	Semi-comercial (pruebas experimentales positivas, pero optimización en dosis, Mensah et al., 2021)	Media (adicción simple, pero afecta fraguado si >5 %; Tee et al., 2023)	Alto (fija hasta 2.2 kg CO <sub>2</sub> /kg; reducción 10-25 %, Zhang et al., 2022)
Asfaltos de mezcla tibia	Costo inicial moderado (aditivos como zeolita); ahorro a largo plazo por menor energía (reducción 20-25 % global, según Belc et al., 2021 y Martinez-Soto et al., 2023)	Lista para el mercado (usos extendidos en pavimentos)	Alta (temperaturas más bajas facilitan producción; compatible con reciclados)	Medio-alto (10-25 % menos emisiones y energía, Gruber et al., 2023)
Agregados reciclados	Costo inicial bajo (reutilización de residuos); ahorro a largo plazo por menor extracción (reducción 20 % emisiones, según Mascarenhas et al., 2023 y Lei et al., 2022)	Lista para el mercado (ampliamente usado, pero depende de calidad local)	Media-alta (tratamientos para igualar propiedades; distancia de transporte clave, Linares et al., 2024)	Medio (menor demanda de vírgenes; impacto variable por transporte, no detallado en % fijo)

Este contraste pone de manifiesto que entre los cementos LC3 y asfaltos de mezcla tibia están entre aquellos con alta madurez y facilidad, que serían ideales para una pronta adopción en algunas regiones vulnerables como Panamá, mientras que el resto de elementos de interés, los concretos autorreparables, presentan un gran potencial en cuanto a resiliencia, pero su desarrollo implica un proceso más largo. El biochar es altamente

efectivo en incentivación de reducción de carbono, pero su aplicación debe ser equilibrada con características mecánicas.

Sin embargo, las barreras son más allá del costo y estandarización: el conocimiento técnico en la industria es escaso (muchos ingenieros y constructores que no están expuestos a las mezclas innovadoras deberían recibir entrenamiento extenso); resistencia a los cambios por parte de los constructores (preferencia por métodos tradicionales que han sido probados, por miedo a que no van a funcionar), y la falta de políticas e incentivos gubernamentales (por ejemplo, subsidios, regulaciones obligatorias o créditos fiscales que podrían permitir la transición a alcanzar objetivos globales, pero que nunca han existido en contextos como Panamá). Estas son algunas de las barreras que, si no se resuelven, podrían limitar el escalado; abogo a favor de integralidad en políticas, dado que hay suficiente evidencia en la literatura que muestra que los beneficios ambientales y económicos superan los riesgos, y en ausencia de un apoyo sistémico, la adopción tardará.

### **Análisis costo-beneficio**

A pesar de que el artículo se pronuncia sobre la viabilidad económica de los materiales sostenibles, no presenta datos específicos sobre los costos. Para reforzar el argumento a favor de su adopción, se comparte el resultado del análisis de costo-beneficio. Este análisis tiene como base la literatura revisada y consiste en comparar los costos iniciales en relación con los ahorros a largo plazo en tanto que los costos tienen como objetivo buscar reducciones de emisiones, mantenimiento y producción.

Concretos autorreparables: Su coste inicial es elevado debido a los agentes, como las cápsulas o las bacterias, que pueden llegar a tener un coste de 10-30% mayor que el concreto tradicional, según Amran et al. (2022). Sin embargo, los ahorros en mantenimiento amortizan la inversión inicial en un periodo de 5-10 años, como muestran sus reducciones de costos de reparación que pueden llegar a ser de un 50 % además de una durabilidad mayor (Amran et al., 2022).

Cementos LC3: Los costes de producción pueden llegar a ser hasta un 25 % por debajo del cemento Portland dado el menor clínker y energía Sharma et al. (2021). Disminución de

emisiones de CO<sub>2</sub> del 30-40 %, con beneficios económicos a largo plazo a partir de durabilidad comparable o superior (Sharma et al., 2021; Kanagaraj et al., 2024).

Biochar en materiales cementosos: costo inicial bajo o moderado (biomasa residual), con disminuciones en emisiones del 10-25 % y fijación del carbono (2.2 kg CO<sub>2</sub>/kg, Zhang et al., 2022); ahorros por beneficios en el aislamiento térmico y mantenimiento hacen que en el tiempo sea ventajoso, con costes que disminuyen aproximadamente 1 USD por cada 0.25 % de incorporación de biochar (Barbhuiya et al., 2024).

Asfaltos de mezcla tibia: moderado coste inicial (aditivos aportan de 2 a 4 USD por tonelada), aunque existe un ahorro de energía (20-30 % menos) y de emisiones (10-15 %) que lo superan rápidamente (Belc et al., 2021). Se obtienen beneficios netos en el ciclo de vida, con reducciones totales de costes de hasta el 14% al incorporar material reciclado (Martinez-Soto et al., 2023). Agregados reciclados: Más barato de producir que los agregados vírgenes (un poco más costo-efectivos, derivando en precios 0-10 % más caros para concreto reciclado en cierta medida, pero más barato en el otro sentido) con emisiones reducidas hasta un 20 %, y también en extracción y residuos (Mascarenhas et al., 2023; Lei et al., 2022).

Estos datos provienen del hecho de que, a pesar de los costes iniciales diferentes, los beneficios futuros superan esas inversiones porque favorecen la adopción en contextos vulnerables.

### Revisión de las normativas y criterios existentes

El artículo propone políticas sin describir cuál era la situación de la normativa vigente; aquí se considera la revisión de las normativas internacionales de la construcción sostenible junto a la adecuación de estos materiales para facilitar la adopción de los mismos.

Las certificaciones como LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) y BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) también fomentan la utilización de esos materiales en el contexto de la sostenibilidad. El LEED otorga créditos en categorías como "Materiales y Recursos" derivado del uso de materiales reciclados (por ejemplo, los agregados reciclados, los asfaltos tibios contribuyen a puntos como contenido

reciclado y la reducción de emisiones) y en "Energía y Atmósfera" por eficiencia (por ejemplo, con el biochar para aislamiento térmico) y el BREEAM evalúa en "Materiales" y en "Energía" otorgando reconocimiento a la reducción del CO<sub>2</sub>, y análisis de ciclo de vida; específicamente, el LC3 y los concretos auto-reparantes suman puntos por durabilidad y bajo impacto. De manera particular para el LC3, los estándares como RILEM (Kanavaris et al., 2023) son útiles para su normalización, alineándose con las normas de certificación europeas de los cementos de bajo clínker. Por la parte de los materiales, asfaltar reciclados pueden acceder a la normativa de la UE de la economía circular. La escasez de estímulos por parte de los gobiernos en países como Panamá merma la adopción, por lo que las recomendaciones apuntan a la integración de incentivos en normativas locales en forma de subsidios o mandatos.

### Ejemplos prácticos

A fin de realizar un componente práctico se resume brevemente uno o dos casos de implementación a gran escala estimulados por la reciente literatura.

Proyecto de infraestructura vial con mezclas de asfaltos reciclados en Europa: El proyecto Re-Road (UE, 2008-2012) tuvo como objetivo reducir el uso de asfalto reciclado en capas de rodadura de las autopistas, con un uso de hasta 99 % de material reciclado en mezclas calientes. Los resultados indicaron que había reducciones de emisiones en 20-30 % para las mezclas con asfalto reciclado y unos costos similares o inferiores a los de los usados habitualmente, además de durabilidad equivalente para la mayoría de las capas rodantes; se aplicó en secciones de carreteras en varios países, evitándose colapsos y fomentando la circularidad.

Construcción con cemento LC3 en India: Los pilotos en India (2016-2019) produjeron cemento LC3 a escala industrial, usado principalmente en bloques de pavimentación y construcciones de vivienda. Mostró resistencias comparativas en 2-10 % superiores a las del cemento Portland así como reducciones de CO<sub>2</sub> en 30-40 %; por ejemplo, en productos de construcción, mejoró la fuerza y la viabilidad económica con respecto a los códigos locales.



Estos casos demuestran la aplicabilidad real del contenido, validando una serie de beneficios en contextos similares al de Panamá.

### Impacto social

El presente análisis se centra en aspectos ambientales, mecánicos y económicos; en este punto también se añade un breve comentario sobre impactos sociales.

La adopción de estos materiales promueve la economía circular creando trabajos en todo lo que se refiere al reciclado (e.g., agregados y asfaltos reciclados) y en términos de producción (e.g., biochar de biomasa residual) estimando hasta 50 veces más trabajos en el caso de reciclaje y 200 veces más empleos en el caso de reparación con respecto a los vertederos, con un potencial de 1.8 millones de trabajos en EE.UU. que se podrán conseguir conforme se vayan implementando prácticas circulares de aquí a 2030 (extrapolables a nivel global). También mejora la calidad de vida ya que se generan infraestructuras más duraderas y seguras y se disminuyen los riesgos ante el clima, especialmente en regiones vulnerables (e.g., en Panamá) al igual que la justicia porque se aprovechan recursos recurrentemente disponibles en cada contexto. No obstante, se requiere formación a los trabajadores tradicionales para que se disminuyan la resistencia a los cambios.

### Conclusión

La incorporación de estos materiales sostenibles en la construcción civil es clave para limitar el cambio climático al reducir emisiones de CO<sub>2</sub> y al mismo tiempo mejorar la resiliencia de las infraestructuras. De los materiales que hemos revisado, los cementos de arcilla calcinada y caliza (LC3) son los que ofrecen mayor reducción de emisiones (30-50 %) gracias a la disminución de clínicas (Sharma et al., 2021; Kanagaraj et al., 2024); los cementos con biochar son los que fijan más CO<sub>2</sub> (2.2 kg de CO<sub>2</sub> por kg de biochar producido) y ofrecen una reducción de las emisiones de 10-25 % (Barbhuiya et al., 2024; Zhang et al., 2022). En comparación estos también superan a las opciones de los concretos autorreparables (impacto intermedio, indirecto por durabilidad) o los asfaltos de mezcla tibia (reducción de 10-25 %) (Amran et al., 2022; Belc et al., 2021).

La priorización de su implementación en zonas vulnerables como Panamá optimiza el balance entre sostenibilidad ambiental y propiedades mecánicas. Se consideran necesarias políticas públicas orientadas a la investigación, formación e inter-sectores academia-industria-gobierno, que integren el uso de estos materiales en las normativas nacionales de infraestructura con el fin de construir infraestructuras resilientes ante eventos climáticos extremos, crecimiento económico y resiliencia intergeneracional, alineados con los objetivos de desarrollo sostenible. Algunas líneas futuras de investigación son pruebas de larga duración en autorreparables para ciclos de corrosión costera (Amran et al., 2022); análisis de ciclo de vida de asfaltos de mezcla tibia con lignina local (Gaudenzi et al., 2023; Pascoal et al., 2023).

## Referencias

- Abera, Y. A. (2024). Sustainable building materials: A comprehensive study on eco-friendly alternatives for construction. *SAGE Open Engineering*, 12(1). <https://doi.org/10.1177/26349833241255957>
- Amran, M., Onaizi, A. M., Fediuk, R., Abdelgader, H. S., & Rashid, R. S. M. (2022). Self-healing concrete as a prospective construction material: A review. *Materials*, 15(9), 3214. <https://doi.org/10.3390/ma15093214>
- Barbhuiya, S., Das, B. B., & Kanavaris, F. (2024). Biochar-concrete: A comprehensive review of properties, production and sustainability. *Case Studies in Construction Materials*, 20, e02859. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02859>
- Belc, A. L., Ciutina, A., Buzatu, R., Belc, F., & Costescu, C. (2021). Environmental impact assessment of different warm mix asphalts. *Sustainability*, 13(21), 11869. <https://doi.org/10.3390/su132111869>
- Gaudenzi, E., Cardone, F., Lu, X., & Canestrari, F. (2023). The use of lignin for sustainable asphalt pavements: A literature review. *Construction and Building Materials*, 362, 129773. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129773>
- Gruber, M. R., & Hofko, B. (2023). Life cycle assessment of greenhouse gas emissions from recycled asphalt pavement production. *Sustainability*, 15(5), 4629. <https://doi.org/10.3390/su15054629>
- Huang, G., Liu, Y., Benn, T., Luo, L., Xie, T., & Zhuge, Y. (2024). A comprehensive framework for the design and optimisation of limestone-calcined clay cement: Integrating mechanical, environmental, and financial performance. *Journal of Composites Science*, 8(12), 524. <https://doi.org/10.3390/jcs8120524>
- Hylton, J., Hugen, A., Rowland, S. M., Griffin, M., & Tunstall, L. E. (2024). Relevant biochar characteristics influencing compressive strength of biochar-cement mortars. *Biochar*, 6,

87. <https://doi.org/10.1007/s42773-024-00375-6>  
Kanagaraj, B., Anand, N., Alengaram, U. J., Samuvel Raj, R., & Karthick, S. (2024). Limestone calcined clay cement (LC3): A sustainable solution for mitigating environmental impact in the construction sector. *Resources, Conservation & Recycling Advances*, 21, 200197. <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2023.200197>
- Kanavaris, F., Vieira, M., Bishnoi, S., et al. (2023). Standardisation of low clinker cements containing calcined clay and limestone: A review by RILEM TC-282 CCL. *Mater Struct*, 56, 169. <https://doi.org/10.1617/s11527-023-02257-y>
- Lei, B., Yu, L., Chen, Z., Yang, W., Deng, C., & Tang, Z. (2022). Carbon emission evaluation of recycled fine aggregate concrete based on life cycle assessment. *Sustainability*, 14(21), 14448. <https://doi.org/10.3390/su142114448>
- Li, Y., Li, Y., Ma, H., & Li, J. (2024). The hydration, microstructure, and mechanical properties of vaterite calcined clay cement (VC3). *Cement and Concrete Research*, 175, 107374. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107374>
- Linares, R., López-Uceda, A., Piccinali, A., Martínez-Ruedas, C., & Galvín, A. P. (2024). LCA applied to comparative environmental evaluation of aggregate production from recycled waste materials and virgin sources. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(31), 44023–44035. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33868-9>
- Martinez-Soto, A., Calabi-Floody, A., Valdes-Vidal, G., Hucke, A., & Martinez-Toledo, C. (2023). Life cycle assessment of natural zeolite-based warm mix asphalt and reclaimed asphalt pavement. *Sustainability*, 15(2), 1003. <https://doi.org/10.3390/su15021003>
- Mascarenhas, Z. M. G., Piao, Z., Vasconcelos, K. L., Poulikakos, L. D., & Bernucci, L. L. B. (2023). Comparative environmental performance of pavement structures considering recycled materials and regional differences. *Science of the Total Environment*, 858, 159862. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159862>
- Mensah, R. A., Shanmugam, V., Narayanan, S., Razavi, N., Ulfberg, A., Blanksvärd, T., Sayahi, F., Simonsson, P., Reinke, B., Försth, M., Sas, G., Sas, D., & Das, O. (2021). Biochar-added cementitious materials—A review on mechanical, thermal, and environmental properties. *Sustainability*, 13(16), 9336. <https://doi.org/10.3390/su13169336>
- Pascoal, A., Almeida, A., Capitão, S., & Picado-Santos, L. (2023). Improvement of warm-mix asphalt concrete performance with lignin obtained from bioethanol production from forest biomass waste. *Materials*, 16(23), 7339. <https://doi.org/10.3390/ma16237339>
- Sabino, T. D. de M. M., Nunes, U. S., Marinho, G. S., de Oliveira Freitas, J. C., Martinelli, A. E., & Vieira da Nóbrega, A. C. (2024). Limestone calcined clay cement (LC<sup>3</sup>) coating mortars as an energy-efficient option for construction. *Construction and Building Materials*, 437, 136954. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136954>
- Sharma, M., Bishnoi, S., Martirena, F., & Scrivener, K. (2021). Limestone calcined clay cement and concrete: A state-of-the-art review. *Cement and Concrete Research*, 149, 106564. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106564>
- Shi, X., & Xu, T. (2023). Physicochemical properties of enzymatic hydrolysis lignin-modified bitumen and its modification mechanism. *International Journal of Pavement Engineering*, 24(2). <https://doi.org/10.1080/10298436.2023.2290094>

- Suarez-Riera, D., Lavagna, L., Carvajal, J. F., Tulliani, J.-M., Falliano, D., & Restuccia, L. (2024). Enhancing cement paste properties with biochar: Mechanical and rheological insights. *Applied Sciences*, 14(6), 2616. <https://doi.org/10.3390/app14062616>
- Tee, K. F., Kamini, G. P., & Gim bun, J. (2023). Biochar in cementitious material—A review on physical, chemical, mechanical, and durability properties. *AIMS Materials Science*, 10(3), 405–425. <https://doi.org/10.3934/matensci.2023022>
- Uddin, M. A., Shahabuddin, M., Jameel, M., Rahman, M., Hosen, M. A., & Alanazi, F. (2025). Sustainable construction practices in urban areas: Innovative materials, technologies, and policies to address environmental challenges. *Energy and Buildings*, 341, 115831. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115831>
- Vega A., D. L., Santos, J., & Martinez-Arguelles, G. (2020). Life cycle assessment of hot mix asphalt with recycled concrete aggregates for road pavements construction. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(4), 923–936. <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1778694>
- Zhang, Y., He, M., Wang, L., Yan, J., Ma, B., Zhu, X., Ok, Y. S., Mechtcherine, V., & Tsang, D. C. W. (2022). Biochar as construction materials for achieving carbon neutrality. *Biochar*, 4, 59. <https://doi.org/10.1007/s42773-022-00182-x>