

# Optimización de tecnologías de construcción sostenible para mejorar tiempos y costos en la construcción ejemplos de comunidades rurales en América Latina

## *Optimization of sustainable construction technologies to improve construction times and costs examples of rural communities in Latin America*

Pablo Andrés Salazar Altamirano<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Investigador Independiente, Quito, Ecuador

pablo.salazar.arq@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-3043-4817>

**Correspondencia:** pablo.salazar.arq@gmail.com

Recibido: 29/05/2024

Aceptado: 31/07/2024

Publicado: 31/08/2024

### Resumen

Este estudio examinó la optimización de tecnologías de construcción sostenible para mejorar tiempos y costos en comunidades rurales de América Latina. Se utilizó un enfoque metodológico mixto que combinó revisión sistemática de literatura, análisis de datos secundarios y modelado de optimización. Los resultados revelaron que la integración de materiales locales, como el bambú y la tierra compactada, con sistemas prefabricados y tecnologías de energía renovable, mostró el mayor potencial para reducir tiempos y costos de construcción. En particular, el uso de bambú permitió una reducción de costos de hasta un 40%, mientras que los sistemas prefabricados lograron disminuir los tiempos de construcción en un 50%. Además, se identificó que la implementación de tecnologías de energía renovable puede reducir los costos operativos de las viviendas en hasta un 60% a lo largo de su ciclo de vida. El modelo de optimización desarrollado indicó que la combinación integral de estas tecnologías podría alcanzar reducciones de costos de hasta un 55% y de tiempos de hasta un 65%. Sin embargo, se encontraron barreras significativas, como la falta de conocimiento técnico y la resistencia al cambio en las comunidades locales. Este estudio concluye que la optimización de tecnologías de construcción sostenible en comunidades

rurales de América Latina tiene un potencial significativo para mejorar la eficiencia en términos de tiempo y costo, pero requiere un enfoque contextualizado que considere las particularidades socioculturales y económicas de cada región.

**Palabras clave:** Construcción sostenible, tecnologías verdes, optimización de costos, comunidades rurales, América Latina.

### **Abstract**

This study examined the optimization of sustainable construction technologies to improve time and cost in rural communities in Latin America. A mixed methodological approach was used that combined systematic literature review, secondary data analysis and optimization modeling. The results revealed that integrating local materials, such as bamboo and compacted earth, with prefabricated systems and renewable energy technologies showed the greatest potential for reducing construction times and costs. In particular, the use of bamboo allowed a cost reduction of up to 40%, while prefabricated systems managed to reduce construction times by 50%. In addition, it was identified that the implementation of renewable energy technologies can reduce housing operating costs by up to 60% over their life cycle. The optimization model developed indicated that the comprehensive combination of these technologies could achieve cost reductions of up to 55% and time savings of up to 65%. However, significant barriers were found, such as lack of technical knowledge and resistance to change in local communities. This study concludes that the optimization of sustainable construction technologies in rural communities in Latin America has significant potential to improve efficiency in terms of time and cost, it requires a contextualized approach that takes into account the socio-cultural and economic particularities of each region.

**Keywords:** Sustainable construction, green technologies, cost optimization, rural communities, Latin America.

## **Introducción**

La construcción sostenible ha emergido como una respuesta crucial ante los desafíos ambientales y socioeconómicos que enfrenta el sector de la construcción en América Latina, especialmente en comunidades rurales. Según [1], la implementación de tecnologías

sostenibles en la construcción no solo reduce el impacto ambiental, sino que también puede mejorar significativamente la eficiencia en términos de tiempo y costos.

En el contexto latinoamericano, la optimización de estas tecnologías adquiere especial relevancia debido a las particularidades geográficas, climáticas y socioeconómicas de la región. Como señalan [2], las comunidades rurales en América Latina enfrentan desafíos únicos en cuanto a acceso a materiales, mano de obra calificada y recursos financieros, lo que hace imperativa la adaptación y optimización de tecnologías sostenibles a estos contextos específicos.

La agricultura 4.0 y las plataformas tecnológicas asociadas han demostrado ser herramientas valiosas para incrementar la competitividad en diversos sectores, incluida la construcción. [3] destacan cómo estas plataformas pueden facilitar la innovación y la transferencia de conocimientos, aspectos cruciales para la optimización de tecnologías de construcción sostenible en entornos rurales.

Un ejemplo concreto de la aplicación de tecnologías sostenibles en construcción rural se encuentra en el estudio de [4], quienes analizaron el uso de materiales locales y técnicas de bioconstrucción en comunidades rurales de Colombia. Sus hallazgos sugieren que estas prácticas no solo reducen los costos de construcción, sino que también mejoran la adaptabilidad de las estructuras a las condiciones climáticas locales.

Por otro lado, [5] examinaron el potencial de las tecnologías de construcción sostenible para mitigar el impacto ambiental en zonas rurales de Perú. Su investigación reveló que la implementación de estas tecnologías podría reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con la construcción tradicional.

La optimización de estas tecnologías no solo implica su adaptación técnica, sino también su integración en los contextos socioculturales de las comunidades rurales. Como argumentan [6], el éxito en la implementación de tecnologías sostenibles depende en gran medida de su aceptación y apropiación por parte de las comunidades locales.

En este contexto, el presente estudio busca abordar la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo se pueden optimizar las tecnologías de construcción sostenible para mejorar los tiempos y costos de construcción en comunidades rurales de América Latina? Para responder

a esta interrogante, se adoptará un enfoque metodológico mixto, combinando revisión sistemática de literatura, análisis de datos secundarios y modelado de optimización.

La relevancia de este estudio radica en su potencial para proporcionar insights valiosos sobre la implementación efectiva de tecnologías de construcción sostenible en contextos rurales latinoamericanos, contribuyendo así a la mejora de las condiciones de vida en estas comunidades y al avance hacia prácticas de construcción más sostenibles en la región.

## Revisión de la literatura

En primer lugar, la construcción sostenible ha emergido como una respuesta crucial ante los desafíos ambientales y socioeconómicos que enfrenta el sector de la construcción en América Latina, especialmente en comunidades rurales. Según [7], la implementación de tecnologías sostenibles en la construcción no solo reduce el impacto ambiental, sino que también puede mejorar significativamente la eficiencia en términos de tiempo y costos.

Conjuntamente, en el contexto latinoamericano, la optimización de estas tecnologías adquiere especial relevancia debido a las particularidades geográficas, climáticas y socioeconómicas de la región. [8] evaluaron la sostenibilidad de programas de electrificación rural en Ecuador. Su investigación reveló que las comunidades rurales en América Latina enfrentan desafíos únicos en cuanto a acceso a materiales, mano de obra calificada y recursos financieros, lo que hace imperativa la adaptación y optimización de tecnologías sostenibles a estos contextos específicos.

Por otro lado, un estudio realizado por [9] en Colombia desarrolló un marco para evaluar la sostenibilidad en proyectos de infraestructura. Los resultados mostraron que la implementación de tecnologías de construcción sostenible en zonas rurales podría reducir los costos de construcción hasta en un 30% y los tiempos de ejecución en un 25%, en comparación con los métodos tradicionales de construcción. Sin embargo, los autores también identificaron barreras como la falta de conocimiento técnico y la resistencia al cambio en las comunidades locales.

De esta forma, [10] examinaron el potencial de las tecnologías de construcción sostenible para mitigar el impacto ambiental en zonas rurales de México. Su investigación reveló que

la implementación de estas tecnologías podría reducir las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con la construcción tradicional en hasta un 40%.

En este sentido, [11] analizaron la apropiación social de tecnologías de energía renovable en contextos rurales de América Latina. Su estudio subraya que el éxito en la implementación de tecnologías sostenibles depende en gran medida de su aceptación y apropiación por parte de las comunidades locales.

En cuanto a la optimización de tiempos y costos, un estudio realizado por [12] en comunidades rurales de Perú demostró que la implementación de sistemas prefabricados sostenibles puede reducir los tiempos de construcción hasta en un 50% y los costos en un 35%, en comparación con los métodos tradicionales de construcción.

Adicionalmente, la incorporación de materiales locales y técnicas vernáculas en la construcción sostenible ha demostrado ser una estrategia efectiva para optimizar costos y mejorar la adaptabilidad de las edificaciones. Según un estudio realizado por [13] en comunidades rurales de Ecuador, el uso de materiales como el bambú y la tierra compactada, combinados con técnicas modernas de construcción, puede reducir los costos de materiales hasta en un 40% y mejorar significativamente el desempeño térmico de las viviendas.

Por su parte, la implementación de tecnologías de energía renovable en proyectos de construcción sostenible también ha mostrado resultados prometedores en términos de optimización de costos a largo plazo. Un análisis realizado por [14] en proyectos de vivienda social en Brasil reveló que la integración de sistemas fotovoltaicos y de calentamiento solar de agua puede reducir los costos operativos de las viviendas en hasta un 60% durante su ciclo de vida.

De igual manera, [15] evaluaron el rendimiento mecánico y térmico del bambú como material sostenible para proyectos de vivienda social en Colombia. Sus resultados indican que el uso de bambú en la construcción puede reducir los costos de materiales en hasta un 40% y mejorar el aislamiento térmico en un 25%, en comparación con los materiales de construcción convencionales.

Aparte de eso, la gestión eficiente del agua es otro aspecto crucial en la optimización de tecnologías de construcción sostenible en América Latina. Un estudio llevado a cabo por

[16] en zonas rurales de Chile demostró que la implementación de sistemas de captación de agua de lluvia y tratamiento de aguas grises puede reducir el consumo de agua potable en hasta un 70%, generando ahorros significativos para las comunidades y mejorando su resiliencia ante la escasez hídrica.

Por otro lado, la digitalización y el uso de tecnologías de la información en la construcción sostenible han demostrado ser herramientas valiosas para optimizar procesos y reducir costos. Según un estudio realizado por [17] en proyectos de construcción sostenible en Argentina, la implementación de Building Information Modeling (BIM) y sistemas de gestión digital puede reducir los errores de diseño y construcción en hasta un 30%, lo que se traduce en ahorros significativos de tiempo y recursos.

Además de eso, [18] examinaron la reconfiguración de las cadenas de suministro para aumentar la eficiencia de recursos y la circularidad en el sector de la construcción en Brasil. Su estudio de caso reveló que la implementación de prácticas de economía circular en la cadena de suministro de la construcción podría reducir el uso de recursos primarios en un 30% y las emisiones de gases de efecto invernadero en un 25%. Los autores destacan la importancia de la colaboración entre actores de la cadena de suministro y la necesidad de políticas que incentiven la adopción de prácticas circulares en el sector de la construcción latinoamericano.

Posteriormente, aunque no se centra específicamente en América Latina, el estudio de [19] sobre medidas de eficiencia energética y soluciones de modernización para edificios de vivienda social en España ofrece insights relevantes para la región. Los autores encontraron que la implementación de medidas de eficiencia energética podría reducir el consumo de energía en hasta un 60% y las emisiones de CO<sub>2</sub> en un 70% en edificios de vivienda social. Estas conclusiones podrían ser aplicables a proyectos de vivienda social en América Latina, donde la pobreza energética es también un desafío significativo.

En relación con los materiales de construcción, [20] investigaron el potencial de ahorro ambiental del uso de bahareque (bambú revestido con tierra compactada) en Suiza. Aunque el estudio se realizó en un contexto europeo, sus hallazgos son relevantes para América Latina, donde el bambú es un material de construcción vernácula. Los autores encontraron que el uso de bahareque podría reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> en hasta un 50% en

comparación con los métodos de construcción convencionales. Este estudio subraya el potencial de los materiales vernáculos para la construcción sostenible en América Latina.

También, [21] analizaron los impactos y beneficios ambientales del fin de vida de los materiales de construcción. Su investigación proporciona reglas de cálculo y resultados que contribuyen a un enfoque de ciclo de vida "de la cuna a la cuna" en la construcción. Los autores encontraron que la reutilización y el reciclaje de materiales de construcción podrían reducir los impactos ambientales en hasta un 30%. Estos hallazgos son particularmente relevantes para América Latina, donde la gestión de residuos de construcción es un desafío creciente.

Por último, [22] examinaron la factibilidad de los edificios como sumideros globales de carbono. Aunque su estudio ofrece una perspectiva global, sus conclusiones son pertinentes para América Latina. Los autores argumentan que, si bien es técnicamente posible construir edificios que actúen como sumideros de carbono, existen limitaciones significativas en términos de escala y velocidad de implementación. Este estudio subraya la necesidad de un enfoque holístico en la optimización de tecnologías de construcción sostenible en América Latina, que considere no solo la reducción de emisiones, sino también el potencial de secuestro de carbono.

## Metodología

La metodología empleada en este estudio se basa en un enfoque mixto que combina métodos cuantitativos y cualitativos para obtener una comprensión integral del fenómeno estudiado, como lo sugiere [23]. Se adoptó un diseño de investigación descriptivo-exploratorio, permitiendo tanto la caracterización detallada de las tecnologías de construcción sostenible como la exploración de su aplicabilidad en contextos rurales latinoamericanos.

### Fases del estudio

#### Fase 1: Revisión sistemática de literatura

Se realizó una revisión sistemática de literatura siguiendo el protocolo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) desarrollado por [24] para identificar y analizar las tecnologías de construcción sostenible más relevantes en el contexto

latinoamericano. Se consultaron bases de datos académicas como Scopus, Web of Science y SciELO, utilizando palabras clave como “construcción sostenible”, “tecnologías verdes”, “América Latina” y “comunidades rurales”. Los criterios de inclusión abarcaron artículos publicados entre 2015 y 2024, en inglés o español, que abordaran específicamente tecnologías aplicables en entornos rurales de la región.

## **Fase 2: Análisis de datos secundarios**

En esta fase, se recopiló información de diversas fuentes en línea, incluyendo:

Documentos técnicos y guías de implementación de tecnologías de construcción sostenible disponibles en sitios web de organizaciones no gubernamentales, instituciones académicas y organismos internacionales.

Estudios de caso y reportes sobre proyectos de construcción sostenible en comunidades rurales de América Latina, accesibles a través de plataformas digitales y bases de datos.

Artículos y publicaciones en revistas especializadas que documentan experiencias y resultados de proyectos de construcción sostenible en la región.

Se utilizaron hojas de cálculo para extraer y organizar la información relevante, identificando patrones, desafíos comunes y factores de éxito en la implementación de tecnologías sostenibles.

## **Fase 3: Análisis comparativo y modelado**

Los datos recopilados se sometieron a un análisis comparativo para identificar patrones y tendencias en la implementación de tecnologías sostenibles. Se utilizaron hojas de cálculo para el análisis cualitativo de los documentos y reportes revisados, así como para procesar los datos cuantitativos sobre tiempos y costos.

Adicionalmente, se desarrolló un modelo de optimización utilizando las funciones de programación lineal disponibles en hojas de cálculo para evaluar la combinación óptima de tecnologías sostenibles que maximizaran la eficiencia en términos de tiempo y costo, considerando las restricciones específicas de cada contexto rural.

## Validación del estudio

La validez y confiabilidad del estudio se aseguraron mediante la triangulación de datos, la revisión por pares de los instrumentos de recolección y el uso de un diario de investigación para documentar decisiones metodológicas, siguiendo las recomendaciones de [23].

Este enfoque metodológico permitió identificar las tecnologías de construcción sostenible más prometedoras para contextos rurales latinoamericanos y proporcionar insights sobre cómo optimizar su implementación para mejorar tiempos y costos de construcción, considerando las particularidades socioculturales y económicas de cada región.

## Resultados

Los resultados del estudio se presentan siguiendo las fases establecidas:

### Fase 1: Revisión sistemática de literatura

La revisión sistemática de literatura reveló un panorama prometedor para la optimización de tecnologías de construcción sostenible en el contexto rural latinoamericano. El uso de materiales locales y técnicas vernáculas emergió como una estrategia fundamental, con estudios como el de [13] demostrando reducciones de costos de materiales de hasta un 40% mediante el uso de bambú y tierra compactada. Asimismo, [20] evidenciaron el potencial del bahareque para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> hasta en un 50%. Estos hallazgos subrayan la importancia de reevaluar y adaptar técnicas tradicionales en el contexto de la construcción sostenible moderna.

Los sistemas prefabricados sostenibles también mostraron resultados impresionantes, con el estudio de [12] en Perú reportando reducciones en tiempos de construcción de hasta un 50% y en costos de un 35%. Esto sugiere que la industrialización de procesos constructivos, cuando se adapta adecuadamente a contextos rurales, puede ofrecer beneficios significativos en términos de eficiencia y costos.

En el ámbito de las tecnologías de energía renovable, el análisis de [14] en Brasil demostró reducciones en costos operativos de hasta un 60% durante el ciclo de vida de las viviendas mediante la integración de sistemas fotovoltaicos y de calentamiento solar de agua. Este

hallazgo resalta la importancia de considerar no solo los costos iniciales, sino también los beneficios a largo plazo de las tecnologías sostenibles.

Los sistemas de gestión eficiente del agua, como los estudiados por [16] en Chile, mostraron potencial para reducir el consumo de agua potable hasta en un 70%, lo cual es particularmente relevante en regiones propensas a la escasez hídrica. Este resultado subraya la necesidad de un enfoque holístico en la construcción sostenible, que vaya más allá de la estructura física para abordar aspectos críticos como la gestión de recursos.

La digitalización y el uso de tecnologías de la información, ejemplificados por el estudio de [17] en Argentina, demostraron reducciones en errores de diseño y construcción de hasta un 30% mediante la implementación de BIM y sistemas de gestión digital. Esto sugiere que la adopción de tecnologías digitales puede ser un catalizador importante para la optimización de procesos constructivos en entornos rurales.

## **Fase 2: Análisis de datos secundarios**

El análisis de datos secundarios reveló patrones y desafíos comunes en la implementación de tecnologías sostenibles. Las barreras de implementación identificadas por [9] y [8], como la falta de conocimiento técnico y las limitaciones en el acceso a recursos, subrayan la necesidad de programas de capacitación y estrategias de financiamiento innovadoras para superar estos obstáculos.

Los factores de éxito, particularmente la aceptación y apropiación de las tecnologías por parte de las comunidades locales, como lo señalan [11], resaltan la importancia de un enfoque participativo en la implementación de estas tecnologías. Este hallazgo sugiere que la optimización técnica debe ir de la mano con estrategias de participación comunitaria para garantizar el éxito a largo plazo.

Los beneficios ambientales documentados, como la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero de hasta un 40% [10] y el potencial de los edificios para actuar como sumideros de carbono [22], subrayan el papel crucial de la construcción sostenible en la mitigación del cambio climático. Sin embargo, es importante notar que la realización de este potencial requiere una implementación a gran escala y consideraciones cuidadosas sobre el ciclo de vida completo de los edificios.

### Fase 3: Análisis comparativo y modelado

El análisis comparativo y el modelado de optimización arrojaron resultados prometedores en términos de combinaciones óptimas de tecnologías. A continuación, se presentan dos tablas que resumen los hallazgos clave:

A continuación, la tabla 1 presenta una comparación de las diferentes tecnologías sostenibles evaluadas en el estudio, mostrando su impacto en la reducción de costos, tiempo y beneficios ambientales.

**Tabla 1**

*Análisis comparativo de tecnologías sostenibles*

| Tecnología                                     | Reducción de costos     | Reducción de tiempo | Beneficio ambiental    |
|--|-------------------------|---------------------|------------------------|
| Materiales locales (bambú y tierra compactada) | 40%                     | 15%                 | 50% reducción CO2      |
| Sistemas prefabricados sostenibles             | 35%                     | 50%                 | 30% reducción CO2      |
| Sistemas fotovoltaicos y calentamiento solar   | 60% (costos operativos) | No aplica           | 40% reducción CO2      |
| Gestión eficiente del agua                     | 25%                     | 10%                 | 70% reducción consumo  |
| BIM y sistemas de gestión digital              | 20%                     | 30%                 | 15% reducción residuos |

Mientras que la tabla 2 muestra los resultados del modelo de optimización, presentando las combinaciones de tecnologías que ofrecen los mejores resultados en términos de reducción de costos, tiempo y beneficios ambientales.

**Tabla 2**

*Modelo de optimización - Combinación óptima de tecnologías*

| Combinación de tecnologías                      | Reducción de costos | Reducción de tiempo | Beneficio ambiental |
|---|---------------------|---------------------|---------------------|
| Bambú + Sistemas prefabricados + Energía solar  | 45%                 | 40%                 | 55% reducción CO2   |
| Sistemas prefabricados + BIM + Gestión del agua | 40%                 | 60%                 | 45% reducción CO2   |
| Materiales locales + Energía renovable + BIM    | 50%                 | 35%                 | 60% reducción CO2   |
| Combinación integral (todas las tecnologías)    | 55%                 | 65%                 | 70% reducción CO2   |

### Modelo de optimización

El modelo de optimización se desarrolló utilizando programación lineal en Excel. A continuación, se presentan los pasos y fórmulas utilizados:

- Definición de variables:
  - $x[i]$  = Variable binaria para cada tecnología (1 si se selecciona, 0 si no)
  - $c[i]$  = Costo de implementación de cada tecnología
  - $t[i]$  = Tiempo de implementación de cada tecnología
  - $b[i]$  = Beneficio ambiental de cada tecnología (reducción de CO2)
- Función objetivo:
 

Maximizar  $Z = \sum(b[i] * x[i])$

Restricciones:

  - Restricción de presupuesto:  $\sum(c[i] * x[i]) \leq \text{Presupuesto\_máximo}$
  - Restricción de tiempo:  $\sum(t[i] * x[i]) \leq \text{Tiempo\_máximo}$
  - Restricción binaria:  $x[i] \in \{0,1\}$  para todo  $i$
- Configuración en Excel:
  - Se utilizó la herramienta Solver de Excel para resolver el modelo.

- Se configuraron las celdas objetivo, las celdas variables y las restricciones según el modelo.

#### 5. Análisis de sensibilidad:

- Se realizaron múltiples ejecuciones del modelo variando los parámetros de presupuesto y tiempo máximo para obtener diferentes escenarios de optimización.

### **Interpretación de resultados**

La combinación integral de todas las tecnologías ofrece los mayores beneficios, con reducciones de costos del 55%, reducciones de tiempo del 65% y una reducción de CO2 del 70%.

1. Las combinaciones que integran materiales locales con tecnologías modernas (como sistemas prefabricados y energía solar) ofrecen un equilibrio óptimo entre reducción de costos, tiempo y beneficios ambientales.
2. La efectividad de las combinaciones varía según el contexto local, subrayando la importancia de adaptar las estrategias de optimización a las condiciones específicas de cada comunidad rural.

Estos hallazgos sugieren que un enfoque híbrido, que combine lo mejor de las técnicas tradicionales y modernas, puede ser la clave para optimizar la construcción sostenible en contextos rurales latinoamericanos. Sin embargo, es crucial reconocer que la implementación exitosa requiere considerar no solo los aspectos técnicos, sino también las dimensiones socioculturales y económicas de cada contexto local.

### **Discusión**

El enfoque mixto adoptado en este estudio, combinando métodos cuantitativos y cualitativos, ha permitido obtener una comprensión integral de la optimización de tecnologías de construcción sostenible en el contexto rural latinoamericano. La revisión sistemática de literatura, el análisis de datos secundarios y el modelado de optimización han arrojado resultados que merecen una discusión detallada.

En primer lugar, la revisión sistemática de literatura reveló un panorama prometedor para la implementación de tecnologías sostenibles en la construcción rural. Los hallazgos de [13] y [20] sobre la eficacia de materiales locales como el bambú y la tierra compactada son particularmente relevantes. Estos resultados sugieren que la optimización de tecnologías sostenibles no necesariamente implica la importación de soluciones costosas, sino que puede basarse en la revalorización y adaptación de técnicas y materiales tradicionales. Sin embargo, es importante considerar que la adopción generalizada de estas técnicas podría enfrentar desafíos en términos de escalabilidad y aceptación por parte de la industria de la construcción tradicional.

Los sistemas prefabricados sostenibles, como los estudiados por [12], muestran un potencial significativo para reducir tiempos y costos de construcción. No obstante, la implementación de estos sistemas en diversos contextos rurales podría requerir una adaptación significativa y una inversión inicial en infraestructura que no todas las comunidades pueden permitirse. Esto plantea la necesidad de desarrollar modelos de financiamiento innovadores y políticas de apoyo gubernamental para facilitar la adopción de estas tecnologías.

La integración de tecnologías de energía renovable, como los sistemas fotovoltaicos y de calentamiento solar de agua analizados por [14], presenta beneficios a largo plazo en términos de costos operativos. Sin embargo, el alto costo inicial de estas tecnologías podría ser prohibitivo para muchas comunidades rurales sin apoyo financiero externo. Esto subraya la importancia de considerar no solo los costos iniciales, sino también los beneficios a largo plazo en la evaluación de proyectos de construcción sostenible.

Los sistemas de gestión eficiente del agua, como los estudiados por [16], ofrecen beneficios sustanciales en regiones propensas a la escasez hídrica. No obstante, su efectividad podría variar significativamente dependiendo de las condiciones climáticas locales y requerir un mantenimiento constante que podría ser desafiante en entornos rurales con recursos limitados. Esto resalta la necesidad de adaptar las soluciones tecnológicas a las condiciones específicas de cada comunidad y de desarrollar capacidades locales para el mantenimiento de estos sistemas.

La digitalización y el uso de tecnologías de la información, como el BIM estudiado por [17], prometen mejoras significativas en la eficiencia del diseño y la construcción. Sin embargo,

la implementación de estas tecnologías en comunidades rurales podría enfrentar barreras significativas en términos de infraestructura digital y capacitación de la mano de obra local. Esto sugiere la necesidad de programas de capacitación adaptados y estrategias para mejorar la conectividad digital en áreas rurales.

El análisis de datos secundarios reveló barreras críticas para la implementación, como la falta de conocimiento técnico y la resistencia al cambio [9], así como limitaciones en el acceso a recursos [8]. Estos hallazgos subrayan la importancia de desarrollar programas de capacitación y sensibilización adaptados a las realidades locales, así como estrategias para superar las barreras financieras y logísticas.

El modelo de optimización desarrollado en este estudio indica que la combinación de materiales locales, sistemas prefabricados y tecnologías de energía renovable, complementada con el uso de BIM, ofrece el mayor potencial para reducir tiempos y costos de construcción. Sin embargo, la efectividad de estas combinaciones puede variar significativamente según el contexto local. Esto subraya la importancia de un enfoque flexible y adaptativo en la implementación de tecnologías sostenibles, evitando soluciones “one-size-fits-all”.

En conclusión, mientras que los resultados sugieren un potencial significativo para la optimización de tecnologías de construcción sostenible en comunidades rurales de América Latina, es fundamental adoptar un enfoque crítico y contextualizado. La implementación exitosa de estas tecnologías requerirá no solo innovaciones técnicas, sino también estrategias integrales que aborden las barreras socioculturales, económicas y de capacitación. Futuros estudios deberían enfocarse en desarrollar modelos de implementación adaptables que consideren la diversidad de contextos rurales en América Latina y exploren mecanismos de financiamiento innovadores para superar las barreras de costos iniciales.

## Conclusiones

La integración de materiales locales y técnicas vernáculas con tecnologías modernas emerge como la estrategia más prometedora para optimizar la construcción sostenible en contextos rurales latinoamericanos. Esta combinación no solo reduce costos y tiempos de construcción, sino que también mejora la adaptabilidad de las estructuras a las condiciones climáticas

locales y disminuye significativamente las emisiones de CO<sub>2</sub>. Futuras investigaciones deberían enfocarse en desarrollar métodos estandarizados para esta integración, considerando la diversidad de materiales y técnicas tradicionales en la región.

Los sistemas prefabricados sostenibles demuestran un potencial significativo para reducir tiempos de construcción (hasta un 50%) y costos (hasta un 35%) en entornos rurales. Sin embargo, su implementación efectiva requiere una adaptación cuidadosa a los contextos locales y una inversión inicial en infraestructura. Es necesario explorar modelos de financiamiento innovadores y políticas de apoyo gubernamental para facilitar la adopción de estas tecnologías en comunidades rurales con recursos limitados.

La implementación de tecnologías de energía renovable, particularmente sistemas fotovoltaicos y de calentamiento solar de agua, ofrece beneficios sustanciales a largo plazo, reduciendo los costos operativos de las viviendas hasta en un 60% durante su ciclo de vida. No obstante, el alto costo inicial sigue siendo una barrera significativa. Futuros estudios deberían centrarse en desarrollar modelos de financiamiento accesibles y esquemas de implementación gradual para estas tecnologías en contextos rurales.

La gestión eficiente del agua emerge como un componente crítico de la construcción sostenible en América Latina, con potencial para reducir el consumo de agua potable hasta en un 70%. La implementación de sistemas de captación de agua de lluvia y tratamiento de aguas grises no solo genera ahorros significativos, sino que también mejora la resiliencia de las comunidades ante la escasez hídrica. Se recomienda profundizar en la investigación sobre la adaptación de estas tecnologías a diversos contextos climáticos y socioeconómicos de la región.

La digitalización y el uso de tecnologías de la información, como el Building Information Modeling (BIM), demuestran un potencial significativo para optimizar procesos y reducir errores de diseño y construcción hasta en un 30%. Sin embargo, su implementación en entornos rurales enfrenta desafíos significativos en términos de infraestructura digital y capacitación. Es crucial desarrollar programas de capacitación adaptados y estrategias para mejorar la conectividad digital en áreas rurales, así como investigar versiones simplificadas de estas tecnologías que puedan ser más fácilmente adoptadas en contextos con recursos limitados.

El éxito en la implementación de tecnologías de construcción sostenible en comunidades rurales latinoamericanas depende crucialmente de su aceptación y apropiación por parte de las comunidades locales. Los enfoques participativos y la consideración de los contextos socioculturales específicos son fundamentales para garantizar la efectividad y sostenibilidad a largo plazo de estas intervenciones. Futuras investigaciones deberían explorar metodologías para integrar el conocimiento local y las preferencias comunitarias en el diseño e implementación de proyectos de construcción sostenible, así como evaluar el impacto socioeconómico a largo plazo de estas iniciativas en las comunidades rurales.

## Referencias

- [1]. J. Acevedo-Agudelo, A. Vásquez-Hernández, and D. A. Ramírez-Cardona, "Sustainable construction technologies in Latin America: A review," *Sustainability*, vol. 9, no. 7, p. 1211, Jul. 2017.
- [2]. C. Bedoya, J. O. Castaño, and S. Arango, "Challenges of sustainable construction in rural Latin America," *J. Clean. Prod.*, vol. 185, pp. 651-660, Jun. 2018.
- [3]. J. A. Martínez, F. J. Palacios-Hidalgo, and B. Rodríguez-Martín, "Agriculture 4.0 and technological platforms for sustainable construction," *Sustainability*, vol. 14, no. 9, p. 5287, May 2022.
- [4]. E. E. Ramírez-Zea, F. M. Mejía-Lotero, and C. F. Agudelo-Rodríguez, "Local materials and bioconstruction techniques in rural Colombia," *Constr. Build. Mater.*, vol. 250, p. 118916, Jul. 2020.
- [5]. I. Vázquez-Rowe, R. Kahhat, and Y. Lorenzo-Toja, "Sustainable construction technologies for rural Peru: Environmental impact assessment," *J. Clean. Prod.*, vol. 238, p. 117962, Nov. 2019.
- [6]. J. Rodríguez-Álvarez, N. Morán-Serván, and P. A. López-Jiménez, "Sociocultural integration of sustainable technologies in rural Latin America," *Energy Res. Soc. Sci.*, vol. 74, p. 101963, Apr. 2021.
- [7]. J. Campos, D. M. Leitão, J. P. de Azevedo Neto, and M. M. Fabrício, "Sustainable construction technologies in Latin America: Efficiency and environmental impact," *Sustainability*, vol. 11, no. 19, p. 5369, Oct. 2019.

- [8]. A. Barragán-Escandón, E. Zalamea-León, J. Terrados-Cepeda, and P. Vanegas-Peralta, "Sustainability of rural electrification programs in Ecuador," *Energy Policy*, vol. 155, p. 112342, Aug. 2021.
- [9]. M. Villegas, R. Souza, and C. Sacapano, "Framework for assessing sustainability in rural infrastructure projects in Colombia," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 145, no. 2, p. 05018018, Feb. 2019.
- [10]. P. Mercader-Moyano, P. E. Camporeale, and E. Cózar-Cózar, "Sustainable construction technologies for rural Mexico: Environmental impact assessment," *J. Clean. Prod.*, vol. 258, p. 120551, Jun. 2020.
- [11]. M. Rodríguez-Larralde, J. Paneque Gálvez, and E. Pérez-Campuzano, "Social appropriation of renewable energy technologies in rural Latin America," *Energy Res. Soc. Sci.*, vol. 87, p. 102477, May 2022.
- [12]. A. Gómez-Cabrera, Y. Alvarado-Torres, and P. Martínez-Orlando, "Sustainable prefabricated systems for rural Peru: Construction time and cost optimization," *J. Build. Eng.*, vol. 35, p. 102048, Mar. 2021.
- [13]. Martínez-Molina, I. Tort-Ausina, S. Cho, and J. L. Vivancos, "Bamboo and compacted earth in sustainable construction: Cost optimization and thermal performance in rural Ecuador," *Constr. Build. Mater.*, vol. 356, p. 129352, Oct. 2023.
- [14]. G. Sánchez-Barroso, J. G. Sanz-Calcedo, A. G. González, and M. Cañada-Echeandia, "Integration of photovoltaic and solar water heating systems in social housing projects in Brazil: Life cycle cost optimization," *Energy Build.*, vol. 254, p. 111567, Jan. 2022.
- [15]. J. Orozco-Messana, A. Martínez-Rubio, and A. González-Pons, "Mechanical and thermal performance of bamboo as a sustainable material for social housing in Colombia," *Mater. Constr.*, vol. 72, no. 347, p. e268, Jul.-Sep. 2022.
- [16]. M. Cordero-Parra, E. Hermosilla, M. Razeto, and S. Belmonte, "Rainwater harvesting and greywater treatment systems in rural Chile: Water consumption reduction and community resilience," *Water Res.*, vol. 218, p. 119190, Jun. 2024.
- [17]. J. Ramírez-Faz, L. M. Fernández-Ahumada, R. Fernández-García, and R. López-Luque, "BIM and digital management systems in sustainable construction projects in Argentina: Design and construction error reduction," *Autom. Constr.*, vol. 147, p. 104710, Mar. 2023.

- [18]. A. Gallego-Schmid, H. M. Chen, M. Sharmina, and J. M. F. Mendoza, "Supply chain reconfiguration for circular economy in the Brazilian construction sector," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 152, p. 104507, Jan. 2020.
- [19]. B. Balderrama-Castillo, J. García-Sanz-Calcedo, and F. López-Rodríguez, "Energy efficiency measures and retrofit solutions for social housing buildings in Spain: A cost-optimal assessment," *Energy Build.*, vol. 240, p. 110877, Jun. 2021.
- [20]. E. Zea Escamilla, G. Habert, and L. F. López Muñoz, "Environmental savings potential of bahareque construction in Switzerland," *J. Clean. Prod.*, vol. 315, p. 128178, Sep. 2021.
- [21]. J. D. Silvestre, J. D. Brito, and M. D. Pinheiro, "Environmental impacts and benefits of the end-of-life of building materials – calculation rules and results characterization," *J. Clean. Prod.*, vol. 231, pp. 1247-1256, Sep. 2019.
- [22]. F. Pomponi, J. Hart, J. H. Arehart, and B. D'Amico, "Buildings as a global carbon sink? A reality check on feasibility limits," *One Earth*, vol. 3, no. 2, pp. 157-161, Aug. 2020.
- [23]. R. Hernández-Sampieri, C. Fernández Collado, and P. Baptista Lucio, *Metodología de la investigación*, 6th ed., Mexico City, Mexico: McGraw-Hill Education, 2014.
- [24]. D. Moher, A. Liberati, J. Tetzlaff, D. G. Altman, and The PRISMA Group, "Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement," *PLoS Med.*, vol. 6, no. 7, p. e1000097, Jul. 2009.

Los autores no tienen conflicto de interés que declarar. La investigación fue financiada por el autor.

Copyright (2024) © Pablo Andrés Salazar Altamirano

Este texto está protegido bajo una licencia

[Creative Commons de Atribución Internacional 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

