



PALABRAS CLAVE

Cambio climático,
Construcción con tierra,
Construcción sostenible,
Energía embebida,
Emisiones de CO₂

KEYWORDS

Climate change,
Earth building,
Sustainable construction,
Embodied energy,
CO₂ emissions

RECIBIDO

9 DE AGOSTO 2021

ACEPTADO

30 DE MAYO DE 2022



EL CONTENIDO DE ESTE ARTÍCULO
ESTÁ BAJO LICENCIA DE ACCESO
ABIERTO CC BY-NC-ND 2.5 AR

ANÁLISIS COMPARATIVO DE TRES SISTEMAS CONSTRUCTIVOS DE TIERRA. ENERGÍA EMBEBIDA Y EMISIONES DE CO₂

*COMPARATIVE ANALYSIS OF THREE EARTH BUILDING
SYSTEMS. EMBODIED ENERGY AND CO₂ EMISSIONS*

> **ALLECK J. GONZÁLEZ CALDERÓN**
Universidad Autónoma de Coahuila
Unidad Torreón, Escuela de Arquitectura

> **CÓMO CITAR ESTE ARTÍCULO (NORMAS APA):**

González Calderón, A. J. (mayo-octubre 2022). Análisis comparativo de tres sistemas constructivo de tierra. Energía embebida y emisiones de CO₂. [Archivo PDF]. *AREA*, 28(2), pp. 1-15. Recuperado de https://www.area.fadu.uba.ar/wp-content/uploads/AREA2802/2802_gonzalez-calderon.pdf

RESUMEN

Debido a que la edificación con tierra ha demostrado ser sostenible en un contexto de cambio climático, se han reinterpretado técnicas tradicionales como la del adobe y la del bajareque para su aplicación en sistemas contemporáneos. El objetivo de este trabajo es exponer un análisis comparativo de energía embebida y de emisiones de CO₂, para determinar la sostenibilidad de tres sistemas constructivos de tierra: adobe y bloques de tierra comprimida y un prototipo denominado Bajareque Tecnificado, construido en la Universidad Autónoma de Coahuila en Torreón, México. La metodología contempla la cuantificación de materiales, así como, la asignación de pesos volumétricos y coeficientes de energía embebida y de emisiones de CO₂. Con base en los resultados, se demuestran las cualidades ecológicas del Bajareque Tecnificado, para considerarse un sistema constructivo sostenible.

ABSTRACT

Due to building with earth, has proven to be sustainable, in a context of climate change, it has been reinterpreted traditional techniques like to adobe and bajareque, for their application in contemporary systems. The objective of this paper is to present a comparative analysis of embedded energy and CO₂ emissions, to determine the sustainability of three construction systems with earth: adobe and blocks earth compressed, against a prototype named Technified Bajareque, built at the Autonomous University of Coahuila in Torreón, Mexico. The methodology contemplates quantification of materials, as well as the assignment of volumetric weights and coefficients of embedded energy and CO₂ emissions. Based on the results, the ecological qualities of the Technified Bajareque are demonstrated, to be considered a sustainable construction system.

> ACERCA DEL AUTOR

ALLECK J. GONZÁLEZ CALDERÓN. Arquitecto, con grado de Maestro y de Doctor en Ciencias y Artes para el Diseño, por la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM), Ciudad de México. Actualmente, adscrito como Profesor Investigador de Tiempo Completo a la Escuela de Arquitectura, Unidad Torreón, en la Universidad Autónoma de Coahuila, integrante del Cuerpo Académico: Territorio, Asentamientos Humanos

y Resiliencia. Entre sus últimas publicaciones, como autor y coautor, se encuentran: “Capacidad de mitigación de tres materiales constructivos de acuerdo con su desempeño térmico en zonas áridas. Caso de estudio: Torreón, Coahuila” y “Diseño y tecnología en procesos de producción social del hábitat. Sistemas constructivos de bambú en Manizales, Colombia”.

✉ <alleck@hotmail.com>

Introducción

Uno de los mayores retos que enfrenta la humanidad es la mitigación y la adaptación ante el cambio climático. Dicho fenómeno es motivado por procesos de industrialización que, al consumir grandes cantidades de energía, obtenida de fuentes fósiles, emiten enormes volúmenes de dióxido de carbono (CO₂) y otros Gases de Efecto Invernadero (GEI) que al concentrarse en la atmósfera intensifican el calentamiento global y contribuyen con el cambio climático.

Desde mediados del siglo XX, los cálculos que incluyeron los intercambios de CO₂ entre la atmósfera, la biósfera y los océanos predecían que la concentración llegaría a la condición crítica de 380 ppm para el año 2000 (Meadows, Meadows, Randers y Behrens, 1972). Sin embargo, en 2019 la Organización Meteorológica Mundial informó que la concentración mundial de CO₂ en la atmósfera superó el umbral de 410 ppm (WMO, 2020). Limitar el calentamiento global a 1,5 °C o 2 °C sin gastar en exceso el presupuesto de carbono requerirá cambios muy rápidos en la producción de electricidad, el transporte, la agricultura, la industria, así como, en el sector de la edificación. Cuanto más tiempo se emita CO₂ al ritmo actual, más rápida deberá ser la descarbonización (WMO, 2018).

Por su parte, la industria de la construcción es una de las que mayores impactos ecológicos genera. En 2010 el sector de la edificación fue responsable del 32% del consumo de la energía final y de emisiones de 8,8 Gt CO₂, incluidas emisiones directas e indirectas. Las proyecciones indican que la demanda de energía de este sector se duplicará y las emisiones de CO₂ aumentarán entre 50% y 150% a mediados del presente siglo (Edenhofer et al., 2015).

De continuar con la tendencia de aumento de los GEI, cada vez serán más visibles los impactos sociales, económicos y ambientales, entre otros, causados por el cambio climático. Las graves inundaciones, tormentas, sequías y olas de calor, así como, la degradación de las tierras y bosques y la salinización de las aguas subterráneas, que se observan en la actualidad, son un anticipo del cambio climático interactuando con otros impactos antropogénicos (Fritzsche, Schneiderbauer, Bubeck, Kienberger, Buth, Zebisch y Kahlenborn, 2016).

Para analizar la energía consumida durante la fase de producción de materiales, que incluye la extracción y transformación de materias primas en productos para su puesta en obra,

convencionalmente se emplea la medición de energía incorporada o energía embebida. La cuantificación del consumo energético y de las emisiones de CO₂, permite realizar comparaciones entre soluciones alternativas. Así como, reconocer la importancia de la reducción del consumo de recursos, el reciclaje, el compostaje y el uso de materiales de construcción ecológicos (UNEP, 2013).

A pesar de que existen sistemas constructivos vernáculos como los de tierra, en combinación con otros materiales de origen natural, que han demostrado poseer distintas cualidades ecológicas, entre las que destacan su reducido consumo energético y de emisiones de CO₂, en la actualidad los sistemas industrializados con menores propiedades ecológicas podrían sustituir a los vernáculos, que durante siglos han sustentado la implementación de técnicas, materiales y mano de obra locales en el hábitat urbano y rural.

En los sistemas constructivos de tierra, los procesos de extracción, transportación y transformación del material se hacen *in situ*, lo cual representa una reducción de consumos de materia y energía (Guerrero, 2014). Durante el proceso de construcción con tierra se utilizan pequeñas cantidades de agua y energía, ya que el trabajo es manual, y se generan muy pocos residuos, cumpliendo así varios principios de lo que puede considerarse como construcción sostenible (Henneberg, 2014).

Entre los componentes de origen tradicional que aún permanecen en algunas zonas urbanas y rurales de Latinoamérica, destaca el sistema constructivo conocido en México como bajareque, que en otras latitudes se le denomina bahareque, quincha, embarrado o entramado. Se trata de un procedimiento constructivo que emplea tierra mezclada con fibras vegetales y se aplica sobre un entramado de carrizos, varas, ramas o rajas de bambú que se entretejen o se atan entre sí, a un marco generalmente hecho de madera (Guerrero, 2017).

Si bien, el bajareque se ha empleado comúnmente para la construcción de viviendas, se trata de una técnica muy versátil que puede implementarse para otras edificaciones, incluso para adquirir distintas formas arquitectónicas. En la región de Caldas, Colombia, gran parte de las edificaciones erigidas desde su fundación hasta avanzado el siglo XX se han construido con bajareque. Al paso del tiempo se realizaron innovaciones de tal manera que la técnica tradicional ha sido reinterpretada para edificaciones públicas y para conjuntos de vivienda popular (González Calderón, 2018).



En América Latina se han realizado edificaciones con variantes constructivas en torno a la reinterpretación del bajareque tradicional. El bajareque encementado es una técnica que reutiliza el sistema estructural del bajareque tradicional, consiste en una cimentación de hormigón que soporta una estructura de bambú o de madera, a la que se adhiere una retícula de cañas o esterillas que se fijan por medio de clavos, para recibir revoques de mortero de cemento para formar muros sólidos y la cubierta normalmente se construye con tejas de fibrocemento o de barro y arcilla (Kaminski, Laurence y Trujillo, 2016). El caso de la quincha metálica consiste en un sistema estructural de perfiles metálicos, a los que se une mediante soldadura una malla de acero, que es tensada para posibilitar un entramado que integra una malla de metal y una mezcla de tierra (Cortés, 2010). Aunque el uso del bajareque se ha extendido territorial y temporalmente, en la actualidad existen obstáculos como la sobreexplotación y el agotamiento de recursos naturales, así como, el olvido, el desconocimiento y en ocasiones el rechazo, que ponen en riesgo la continuidad de esta cultura constructiva milenaria. Sin embargo, se trata de una técnica propensa a innovaciones que ha demostrado ser versátil para adaptarse a distintos contextos socioculturales y climáticos, que puede continuar vigente por largo tiempo. Por ello, es preciso evaluar la posibilidad de innovar técnicas tradicionales como la de bajareque para su posible aplicación en viviendas sostenibles. Entre los principales aspectos a considerar están las variables de energía embebida y emisiones de CO₂, con la finalidad de mostrar sus cualidades al compararse frente a sistemas constructivos industrializados y con otros que emplean tierra como material para la edificación.

En este trabajo se exponen los resultados de la comparación entre un prototipo denominado Sistema Bajareque Tecnificado (SBT), edificado en 2020 dentro del campus de la Universidad Autónoma de Coahuila en Torreón (UAdeC-Torreón), México, frente a dos modelos de dimensiones similares, pero realizados con bloques de adobe tradicional y con bloques de tierra comprimida (BTC). La comparación ecológica entre los sistemas analizados se establece en base a las prácticas de construcción tradicionales y experimentales, de vivienda popular desplegadas en Torreón. En el caso del adobe, la técnica se ha reproducido en el contexto urbano y rural, mientras el sistema de BTC se ha propuesto como una técnica alternativa para la edificación de vivienda social para la región, con opción de participación social (Quiroa, Castañeda, González y González, 2019).

Construcción sostenible

El desarrollo y la innovación tecnológica del sector de la edificación ha dado lugar a la disponibilidad de muchos tipos de materiales de construcción. Sin embargo, estos materiales habrían consumido una gran cantidad de energía desde su producción hasta el momento de su utilidad. La cantidad de energía consumida es directamente proporcional a las emisiones de CO₂. Los edificios generan casi el 40% de las emisiones totales de CO₂, eso los convierte en uno de los principales contribuyentes del cambio climático (Sabnis, Mysore y Anant, 2015). Alcanzar y mantener condiciones habitacionales, desde el punto de vista del derecho universal, con acceso a una vivienda adecuada conlleva la redefinición de las formas actuales de generación del hábitat, transitando

Figura 1

(Izquierda) Bajareque tradicional, en Salamina. (Derecha) Bajareque encementado con estructura de bambú, en Manizales. Fuente: (izquierda) registro fotográfico propio. (Derecha) registro fotográfico gentileza de G. Flórez.



Figura 2

Proceso constructivo del Sistema Bajareque Tecnificado, edificado en UAdeC-Torreón, México. Fuente: registro fotográfico propio.

hacia la edificación sostenible, entendida como aquella que provee las condiciones de habitabilidad necesarias, en un marco limitado de consumo de recursos (Arcas, Pages y Casals, 2011). Uno de los retos más grandes que se debe afrontar es el desarrollo de marcos teóricos y prácticos en búsqueda de consolidar la construcción sostenible, ya que de eso depende la reducción del impacto ambiental generado durante todo el ciclo de vida de las edificaciones (Acosta, 2009). Debido a que la Tierra es un sistema de recursos finitos, el principal objetivo de la construcción sostenible es protegerlos, pero en especial aquellos que no son renovables, optimizando la producción y el uso de los materiales de construcción, reducir el consumo de suelo, mantener la biodiversidad, así como, minimizar el consumo de energía. Para lograrlo, se deben examinar el flujo total, de entradas y salidas de materia y energía durante todo el ciclo de vida de las edificaciones (BMUB, 2016), registrando el requerimiento de la energía incorporada o embebida para producirlo. Esto incluye la energía consumida durante las fases de extracción de la materia prima y de fabricación de productos, así como, en las de transporte al sitio y de instalación final en las edificaciones. Sin embargo, la energía consumida generalmente proviene de la quema de combustibles fósiles, que son recursos no renovables, o de energía eléctrica que comúnmente suele provenir de plantas generadoras alimentadas por gas o combustóleo.

En la actualidad se reconoce que la energía y el carbono incorporados a los materiales de construcción están intrincadamente conectados; cuanto mayor sea la energía incorporada, mayor será el carbono incorporado y, en consecuencia, también se contribuirá con el aumento del calentamiento global y con el incremento de los impactos generados por el cambio climático (Sabnis, Mysore y Anant, 2015). Es evidente que existen materiales con distintos coeficientes energéticos y de emisiones de dióxido de carbono. Entre los materiales industrializados que presentan mayores cargas energéticas y de emisiones de dióxido de carbono, se encuentran el aluminio virgen con 194 MJ/kg y 14.200 g CO₂/kg, el acero de refuerzo con 8,6 MJ/kg y 575 g CO₂/kg, el hormigón con 1,2 MJ/kg y 164 g CO₂/kg (Alcorn, 2010). Sin embargo, algunos productos tienen una energía incorporada menor cuando su transformación se realiza mediante procedimientos poco mecanizados, o bien, cuando son reciclados. Por ejemplo, el aluminio reciclado tiene el 10% de la energía incorporada con respecto al que se fabrica a partir de la extracción de mineral de bauxita. De manera similar, el acero reciclado tiene el 20% de la energía incorporada del acero hecho con minerales naturales (Kibert, 2013). Un material sostenible es aquel que genera un menor impacto sobre el medioambiente. Generalmente, son de origen natural, elaborados a partir de recursos renovables,

reutilizados o reciclados y son durables. Además, tienen baja energía embebida, así como, bajas emisiones de gases tóxicos y contaminantes durante todo su ciclo de vida (DEGREN, 2020). Entre los materiales de origen natural, empleados en la construcción, con bajos coeficientes energéticos y de dióxido de carbono están la madera con 2,7 MJ/kg y -1.670 g CO₂/kg, la tierra con 0,15 MJ/kg y -12 g CO₂/kg, la paja 0,24 MJ/kg y -1.660 g CO₂/kg (Alcorn, 2010). La madera es un recurso renovable, que producida de forma legal y sostenible es la más respetuosa con el medio ambiente. En comparación con los materiales de construcción convencionales no emite gases de efecto invernadero, requiere poca cantidad de energía durante su proceso de producción y se considera un sumidero de carbono. Así mismo, los materiales constructivos de tierra son reciclables, con una energía incorporada muy baja en comparación con el resto de los recursos constructivos y tienen notables capacidades de retardo y aislamiento térmico y acústico (UN-Habitat, 2012). Aumentar la producción de estructuras de madera en la industria de la construcción, a partir de materias primas gestionadas de manera sostenible, puede contribuir significativamente a la captura de dióxido de carbono atmosférico a largo plazo. Esta puede ser una estrategia importante para mitigar el problema del cambio climático (Bejo, 2017). El secuestro de carbono es una propiedad física inherente de un material. En el caso de los materiales de origen natural, el carbono secuestrado en la hojarasca u otra biomasa que queda en el bosque o en el campo es carbono neutral. Existen valores de carbono secuestrado para productos que contienen biomasa: tierra apisonada 0,12 kg CO₂/kg, pacas de paja 1,59 kg CO₂/kg, madera contrachapada 1,33 kg CO₂/kg, madera secada en horno 1,59 kg CO₂/kg (IFC, 2017). Incrementar el uso de materiales que secuestran carbono es una estrategia más eficaz para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, en comparación con intentar minimizar las emisiones de los materiales industrializados. Las emisiones de CO₂ como parte de un proceso de producción de materiales artificiales cuentan positivamente, mientras que los productos de madera tienen coeficientes de CO₂ negativos. No obstante, es fundamental entender que los productos de origen natural solo se pueden considerar sostenibles si los procesos de producción son gestionados desde una perspectiva ecológica.

Sin embargo, a medida que aumenta el precio de la madera virgen, la estructura de acero se está convirtiendo en una alternativa viable para la construcción residencial. Debido a que es altamente resistente a esfuerzos mecánicos, se necesitan menos componentes estructurales para soportar la misma carga. Aunque el acero tiene un contenido energético incorporado muy alto, se puede reutilizar y reciclar fácilmente (Kim y Rigdon, 1998). Esto abre la posibilidad de plantear sistemas constructivos que incorporen materiales como el acero en sus componentes estructurales, combinados con componentes naturales como la madera, la tierra y la paja. En climas áridos y semiáridos la madera es un recurso escaso y poco durable por la radiación solar y la baja humedad ambiental, mientras que el acero puede ser de fabricación local y soportar de mejor manera las condiciones climáticas. No obstante, edificaciones milenarias han demostrado que en climas extremos la madera y la paja pueden conservar su integridad si se recubren con tierra. De este modo se podría aprovechar el potencial de cada componente en una interacción compatible.

Metodología

Con base en un análisis comparativo, que contempla las variables de peso, energía embebida y emisiones de CO₂, entre tres sistemas constructivos que incorporan tierra como material de construcción, de 10 m² cada uno, se busca demostrar la sostenibilidad del SBT, edificado en la Universidad Autónoma de Coahuila. La propuesta contempla la tradición constructiva del bajareque con madera, tierra y paja, incorporando en menor medida componentes de acero y hormigón en su enmarcamiento estructural y cimentación. Los parámetros de sostenibilidad del módulo SBT (Figura 3, en la página siguiente), se compararon con dos locales, de las mismas dimensiones, realizados con técnicas de construcción con tierra: Sistema de Adobe Tradicional (SAT), común en la región, y el BTC, como sistema alternativo. El SBT, se analizó con base en los siguientes datos:

- a. cimientos aislados de hormigón armado, con base de 0,8 m x 0,8 m x 0,15 m y dado de 0,2 m x 0,2 m x 0,65 m;
- b. columnas de acero tipo PTR (perfil tubular rectangular), con sección de 0,1 m x 0,1 m y calibre de 0,0019 m;

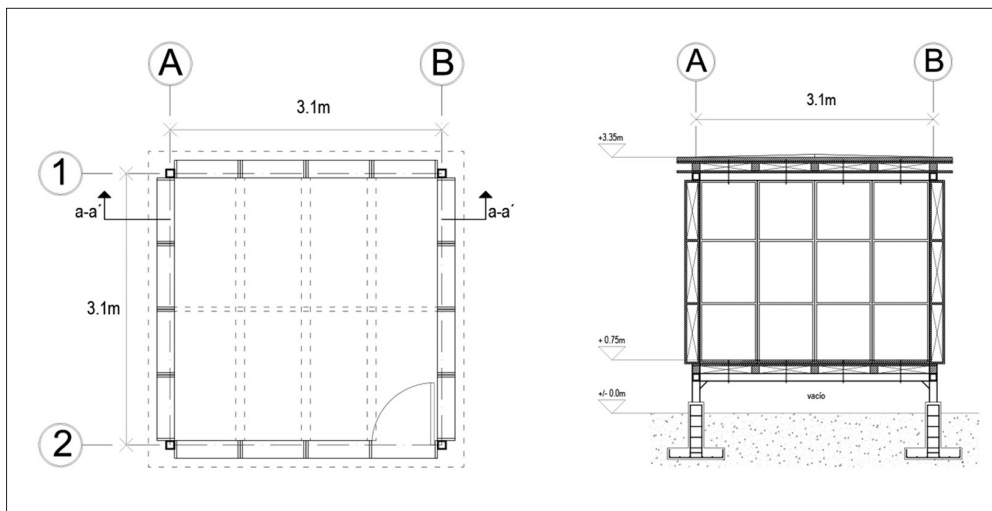
- c. vigas de acero tipo PTR, con secciones de 0,1 m x 0,1 m y calibre de 0,0019 m;
- d. piso con entramado de madera de pino, con secciones de 0,1 m x 0,1 m para envigado y secciones de 0,3 m x 0,025 m colocadas sobre el envigado, para soportar una placa hormigón armado de 0,025 m de espesor;
- e. muros con estructura de madera de pino¹, con modulación de 2,4 m x 0,75 m x 0,2 m y secciones de 0,2 m x 0,025 m, con aplicación de malla de acero, para corral de aves, en cara interior y exterior, para recibir revoques de tierra-paja de trigo con 0,05 m de espesor. La disposición de los revoques genera una cámara ventilada de 0,1 m al interior de los muros;
- f. techo de entramado de madera de pino, con secciones de 0,1 m x 0,1 m para envigado y componentes de 0,3 m x 0,025 m colocadas en la parte inferior y superior del envigado, que soportan una placa de hormigón armado de 0,025 m de espesor. La disposición de una doble cara de

madera genera una cámara ventilada de 0,1 m al interior de la cubierta.

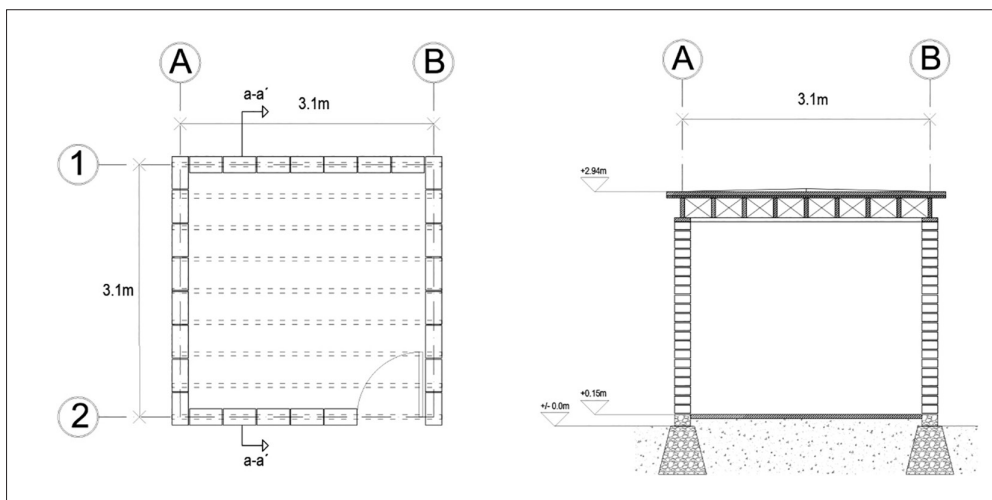
Para el análisis del SAT (Figura 4), se consideró la siguiente información:

- a. cimientos continuos de piedra, de forma trapezoidal, base mayor de 0,6 m, base menor de 0,3 m y altura de 0,6 m. Sobrecimiento con base de 0,2 m y altura de 0,15 m;
- b. sin columnas;
- c. sin vigas;
- d. piso de hormigón armado, con espesor de 0,05 m;
- e. muros de adobe, con piezas de 0,4 m x 0,2 m x 0,1 m;
- f. cubierta de entramado de madera de pino, con piezas de 3,1 m x 0,2 m x 0,05 m para soleras, secciones de 0,05 m x 0,25 m y 3,3 m para envigado, así como, tablas de 3,5 m x 0,3 m x 0,025 m colocadas en la parte superior del envigado, que soportan una placa de hormigón armado de 0,05 m de espesor.

1. El proceso constructivo inicia con la construcción de cuatro cimientos de hormigón armado, a los cuales se ancla la estructura metálica que sirve de soporte para pisos, muros y techos que conforman la envolvente. Los muros se inician con el armado de los paneles prefabricados de madera, a los cuales se fija con clavos una malla de corral para aves, que es tensada por las caras interiores y exteriores de cada panel. Posteriormente, se anclan cuatro paneles a la parte inferior y superior de la estructura de acero, por medio de varillas roscadas de 6 mm de diámetro, que atraviesan los perfiles metálicos, para cerrar cada una de las cuatro caras de la edificación. Finalmente, los muros reciben tres capas de distintas mezclas de tierra y paja, por el interior y el exterior: la primera con tierra y paja de 0,1 m de longitud, con un espesor de 0,025 m; la segunda con tierra y paja de 0,05 m de longitud, con un espesor de 0,02 m; la tercera solo con tierra, con un espesor de 0,005 m.



3



4

Figura 3
Planta y sección del Sistema Bajareque Tecnificado.
Fuente: elaboración propia.

Figura 4
Planta y sección del Sistema Adobe Tradicional.
Fuente: elaboración propia.

Para el caso del BTC (Figura 5), se analizaron los datos expresados:

- cimientos continuos de hormigón armado, con base de 0,75 m x 0,15 m y contratrabe de 0,5 m x 0,15 m;
- columnas de hormigón armado, con sección de 0,15 m x 0,15 m;
- vigas de hormigón armado, con sección de 0,2 m x 0,15 m;
- piso de hormigón armado, con espesor de 0,05 m;
- muros de bloques de tierra comprimida, con dimensiones de 0,28 m x 0,14 m x 0,1 m;
- cubierta compuesta por viguetas de hormigón armado, con sección de 0,1 m x 0,15 m y bovedillas de poliestireno, con sección de 0,64 m x 0,15 m, así como, una capa de compresión de hormigón armado con 0,05 m de espesor.

El análisis se basa en la cuantificación de materiales, de cada sistema constructivo, para determinar su peso volumétrico en m³, así como, la energía embebida en MJ/kg y las emisiones de dióxido de carbono en gramos, por cada kilogramo de material constructivo g CO₂/kg.

El proceso metodológico se dividió en seis etapas, aplicadas para cada uno de los tres modelos analizados:

- > Inventario de materiales.
- > Cuantificación de materiales.
- > Peso volumétrico de materiales.
- > Cuantificación de energía incorporada.
- > Cuantificación de emisiones de CO₂.
- > Comparación de sistemas constructivos.

Desde la elaboración de planos se registran todos los componentes de los sistemas constructivos, así como, sus tipologías y materiales que los constituyen. La cuantificación de los materiales en m³ se realizó con base en las características y dimensiones de cada componente empleado para cimentación, columnas, vigas, pisos, muros y cubiertas. Esta información se obtuvo por medio de la revisión de fichas técnicas de materiales emitidas por los fabricantes. A partir de la cuantificación de los materiales empleados para cada componente constructivo, se asignó su peso volumétrico expresado en kg/m³ que se obtuvo multiplicando el peso volumétrico de cada material en m³ por el peso asignado en kg/m³, con base en datos de CEMEX (2005). Una vez obtenido el peso volumétrico de los materiales empleados en los componentes de cada sistema constructivo, se asignaron los coeficientes de MJ/g para determinar la energía incorporada, así como, los coeficientes de g CO₂/kg, para determinar las emisiones de dióxido de carbono. Dicha información fue obtenida del Centre of Building Performance Research, de la Universidad Victoria de Wellington, Nueva Zelanda (Alcorn, 2003), elegida por tratarse de una base de datos reconocida a nivel mundial y porque incluye todos los materiales que se emplearon en los módulos analizados. Finalmente, con la elaboración de gráficas, se expresaron y compararon los resultados de los volúmenes, pesos, energía incorporada y emisiones de dióxido de carbono, de los materiales consumidos en los componentes de cada sistema constructivo analizado.

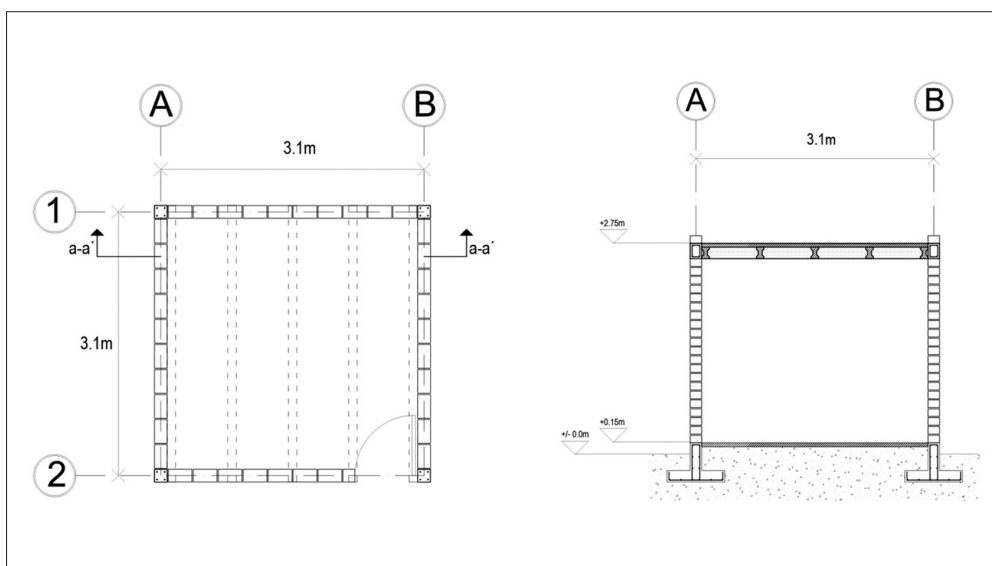


Figura 5
Planta y sección del sistema de Bloques de Tierra Comprimidos.
Fuente: elaboración propia.

Resultados

Cimientos

El peso de la cimentación del SBT es menor que la del SAT, con una diferencia de 8.054,42 kg, que representa 88,7%.

De la misma manera, es menor que la del sistema BTC, con una diferencia de 3.834,13 kg, que representa 78,9%.

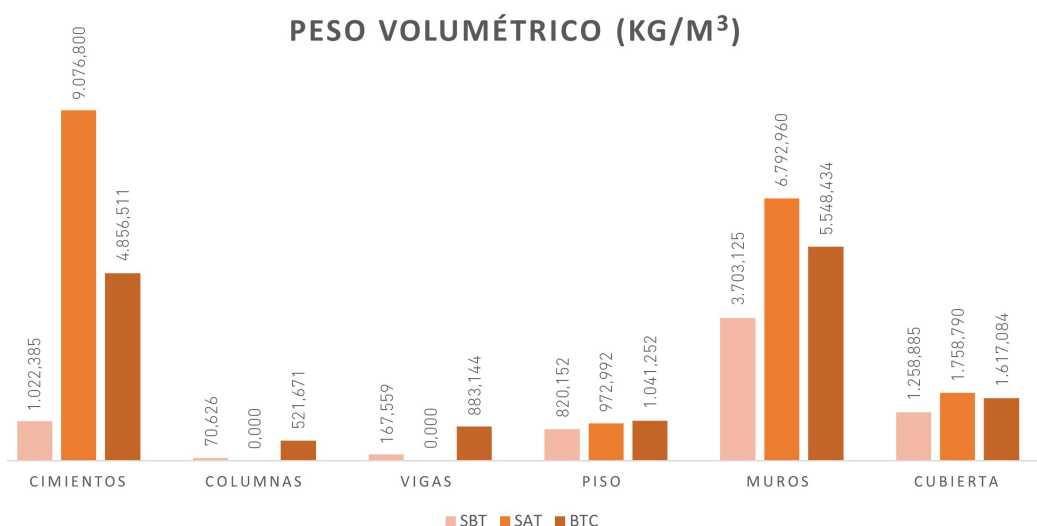
Pese a que la densidad de la piedra es menor que la del hormigón armado, la cimentación del SBT es más ligera que la del SAT debido al menor volumen de materiales incorporados en los cuatro cimientos aislados de hormigón, en comparación con una cimentación continua del mismo material o de piedra.

La energía embebida de la cimentación del SBT es menor que la del SAT, con una diferencia de 5.511,47 MJ, que representa 73,3%. Así mismo, es menor que la del sistema BTC, con una diferencia de 6.992,89 MJ, que representa 77,7%.

Las emisiones de dióxido de carbono de la cimentación del SBT son menores que las del SAT, con una diferencia de 643.906,8 g CO₂, equivalentes a 0,64 t CO₂, que representan 81,2%. Igualmente, son menores que las del sistema BTC, con una diferencia de 538.782,6 g CO₂, equivalentes a 0,53 t CO₂, que representan 78,3%.

Si bien, la energía embebida por kg de hormigón es mayor que la energía incorporada por kg de piedra, la cimentación del SBT tiene un menor consumo energético porque su volumen apenas representa la décima parte de la cimentación continua en piedra del SAT y una quinta parte de la cimentación de hormigón del BTC.

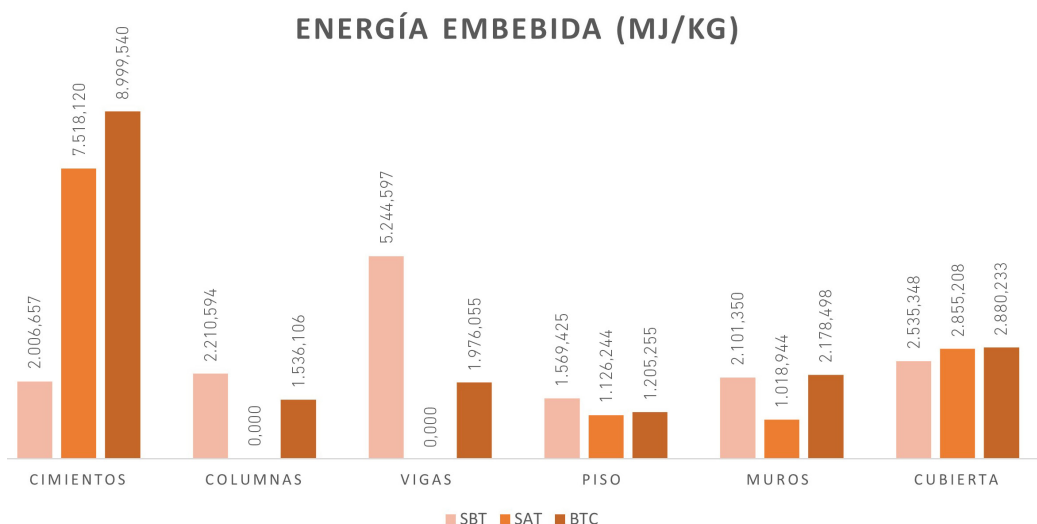
En consecuencia, las emisiones de dióxido de carbono de la cimentación del SBT son menores frente a las del SAT y las del BTC.



Gráfica 1

Peso volumétrico (kg/m³) de componentes por cada sistema constructivo.

Fuente: elaboración propia.

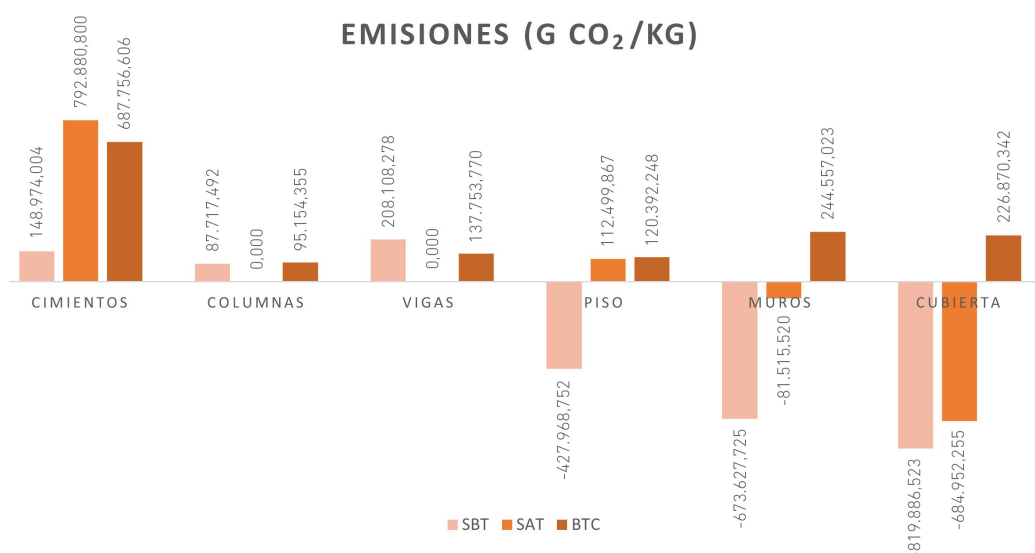


Gráfica 2

Energía embebida (MJ/kg) de componentes por cada sistema constructivo.

Fuente: elaboración propia.

EMISIONES (G CO₂/KG)



Gráfica 3

Emisiones de dióxido de carbono (g CO₂/kg) de componentes por cada sistema constructivo.

Fuente: elaboración propia.

Columnas

Debido a que las construcciones tradicionales de adobe no incluyen columnas, no existe punto de comparación con el peso de las columnas del SBT. No obstante, el peso de las columnas del SBT es menor que las del sistema BTC, con una diferencia de 451,05 kg, que representa 86,4%.

Aunque el peso volumétrico del acero sea tres veces mayor que el del hormigón, las columnas de acero del SBT son más ligeras que las del BTC debido a que los perfiles metálicos empleados son de alma hueca. Por ende, el peso total de las columnas del SBT representan poco más de un décimo de las del BTC. Ya que los sistemas de adobe tradicional no contienen columnas, no existen elementos comparativos con la energía incorporada de las columnas del SBT. Sin embargo, la energía embebida de las columnas del sistema BTC es menor que las del SBT, con una diferencia de 674,49 MJ, que representa 30,5%.

Por la ausencia de columnas en las edificaciones tradicionales de adobe, no es posible establecer comparación con las emisiones de dióxido de carbono de las columnas del SBT. Pero, las emisiones de las columnas del SBT son menores que las del sistema BTC, con una diferencia de 7.436,86 g CO₂, equivalente a 0,007 t CO₂, que representa 7,8%. Ya que el acero concentra más MJ por kilogramo de material en comparación con el hormigón, su mayor uso incrementará el consumo energético. Debido a que en las columnas del BTC se usa la mitad del acero empleado en las columnas del SBT, se tiene como resultado un menor consumo energético. Sin embargo, las emisiones de dióxido de carbono de las columnas del BTC son mayores que las del SBT por la incorporación de hormigón y acero de refuerzo.

Vigas

Debido a que las construcciones tradicionales de adobe no incluyen vigas, no se establece comparación con el peso de las vigas del SBT. No obstante, el peso de las vigas del SBT es menor que las del sistema BTC, con una diferencia de 715,59 kg, que representa 81%. Así como en el caso de las columnas, las vigas de acero del SBT son más ligeras que las del BTC debido a que los perfiles metálicos empleados son de alma hueca. Por lo cual, el peso total de las vigas del SBT representa una quinta parte de las del BTC.

Ya que los sistemas de adobe tradicional no contienen vigas, no existe comparación con la energía incorporada de las vigas del SBT. Sin embargo, la energía embebida de las vigas del sistema BTC es menor que las del SBT, con una diferencia de 3.268,54 MJ, que representa 62,3%.

Por la ausencia de vigas en las edificaciones tradicionales de adobe, no es posible establecer comparación con las emisiones de dióxido de carbono de las vigas del SBT. Pero, las emisiones de las vigas del sistema BTC son menores que las del SBT, con una diferencia de 70.354,5 g CO₂, equivalente a 0,07 t CO₂, que representa 33,8%.

Debido a que en las vigas de hormigón armado del BTC se usa una cuarta parte del volumen de acero empleado en las vigas del SBT, se tiene como resultado un menor consumo energético aun sumando la energía embebida del hormigón. Si bien, el volumen total de las vigas del SBT es menor que el del BTC, las emisiones de dióxido de carbono de las vigas del SBT se incrementan por la mayor incorporación de acero, ya que los g CO₂/kg de hormigón son hasta diez veces menores que los del acero.

Pisos

El peso del piso del SBT es menor que el del SAT, con una diferencia de 152,84 kg, que representa 15,7%. De la misma manera, es menor que el del sistema BTC, con una diferencia de 221,1 kg, que representa 21,2%. Pese a que el piso de los tres sistemas constructivos está constituido por una capa de compresión de hormigón, el peso total del piso del SBT es menor debido a que se empleó una capa de compresión de la mitad del espesor de los otros dos sistemas. Aun considerando en el peso del entramado de madera que sostiene el piso del SBT, este componente resulta más liviano ya que el peso volumétrico de la madera es cuatro veces menor que el del hormigón.

La energía embebida del piso del SAT es menor que la del SBT, con una diferencia de 443,18 MJ, que representa 28,2%. Así mismo, la energía incorporada del piso del sistema BTC es menor, con una diferencia de 364,17 MJ, que representa 23,2%.

Las emisiones de dióxido de carbono del piso del SBT son menores que las del SAT, con una diferencia de 540.468,61 g CO₂, equivalentes a 0,54 t CO₂, que representan 480,4% menos. Igualmente, son menores que las del sistema BTC, con una diferencia de 548.360,99 g CO₂, equivalentes a 0,54 t CO₂, que representan 455,4% menos. Debido a que la energía embebida por kg de madera es mayor que la energía incorporada por kg de hormigón, el piso del SAT y del BTC tiene un menor consumo energético comparado con el del SBT. Sin embargo, las emisiones de CO₂ del piso del SBT son mucho menores que las de los otros dos sistemas, porque la madera usada para el entramado absorbe dióxido de carbono durante su proceso de cultivo. Mientras el hormigón tiene un coeficiente de emisiones positivo, la madera tiene un coeficiente negativo.

Muros

El peso de los muros del SBT es menor que los del SAT, con una diferencia de 3.089,84 kg, que representa 45,4%. También, es menor que los del sistema BTC, con una diferencia de 1.845,31 kg, que representa 33,2%.

Si bien, los muros de los tres sistemas emplean tierra como material de construcción, los del SBT resultan más ligeros que los del SAT a pesar de tener el mismo espesor, ya que tienen una cámara de ventilación interna que reduce a la mitad el volumen de tierra empleada. Aunque los muros del BTC tienen seis centímetros menos de anchura que los del SBT, son más pesados debido a

que se emplean piezas sólidas que incrementan el peso volumétrico de los muros.

La energía embebida de los muros del SAT es menor que la del SBT, con una diferencia de 1.082,41 MJ, que representa 51,5%.

En contraste, la energía incorporada de los muros del SBT es menor que los del sistema BTC, con una diferencia de 77,14 MJ, que representa 3,5%.

Las emisiones de dióxido de carbono de los muros del SBT son menores que las del SAT, con una diferencia de 755.143,24 g CO₂, equivalentes a 0,75 t CO₂, que representan 726,3% menos. Igualmente, son menores que las del sistema BTC, con una diferencia de 918.184,74 g CO₂, equivalentes a 0,91 t CO₂, que representan 375,4% menos.

Debido a que la energía incorporada por kilogramo de madera es mayor que la energía embebida por kilogramo de tierra, los muros del SAT a pesar de tener mayor volumen de tierra que los de SBT tienen un menor consumo energético porque los del SBT integran madera en los paneles que dan soporte a los embarrados de tierra-paja. En cambio, la energía consumida en los muros del SBT es ligeramente menor que la del BTC porque este último emplea un pequeño porcentaje de hormigón para estabilizar cada bloque de tierra. Ya que los megajulios por kilogramo de tierra son hasta seis veces menores que los del hormigón.

Sin embargo, las emisiones de dióxido de carbono de los muros del SBT son mucho menores que las de los otros dos sistemas, porque la madera usada para los paneles tiene coeficiente negativo. Aunque en el proceso de industrialización de la madera se tienen coeficientes positivos, estos se reducen negativamente por la cualidad que tienen las especies maderables de absorber dióxido de carbono durante su crecimiento.

Cubiertas

El peso de la cubierta del SBT es menor que la del SAT, con una diferencia de 499,91 kg, que representa 28,4%. También, es menor que la del sistema BTC, con una diferencia de 358,2 kg, que representa 22,2%.

Aunque la madera empleada en las cubiertas del SBT y del SAT aligera el peso total de cada una, la del SBT es menos pesada porque incorpora una capa de compresión de hormigón de la mitad de espesor. De la misma manera, la cubierta del SBT es más ligera que la del BTC porque su capa de compresión es de la mitad de espesor, pero otro aspecto que la hace más ligera es que los elementos que soportan la capa de compresión están

constituidos por madera, mientras que los del BTC son viguetas de hormigón que tienen mayor peso que los elementos de madera. La energía embebida de la cubierta del SBT es menor que la del SAT, con una diferencia de 319,86 MJ, que representa 11,2%. Así mismo, es menor que la del sistema BTC, con una diferencia de 344,89 MJ, que representa 11,9%.

La cubierta del SBT tiene un consumo energético menor que la del SAT, debido a que se reduce a la mitad el uso de hormigón. También, la cubierta del SBT resulta con menor carga energética que la del BTC, pese a que los coeficientes de energía embebida de la madera son mayores que los del hormigón y los del poliestireno son hasta veinte veces mayores que los de la madera. Por tal motivo, la carga energética de los sistemas que incorporan casetones de poliestireno puede verse muy incrementada.

Las emisiones de dióxido de carbono de la cubierta del SBT son menores que las del SAT, con una diferencia de 134.934,01 g CO₂, equivalentes a 0,13 t CO₂, que representan 16,4% menos. Igualmente, son menores que las del sistema BTC, con una diferencia de 1.046.756,86 g CO₂, equivalentes a 1,04 t CO₂, que representan 461,3% menos. En tanto que, las emisiones de dióxido de carbono de las cubiertas del SBT y del SAT son negativas porque en mayor medida incorporan materiales naturales como la madera, la cubierta del BTC resulta con elevadas emisiones de gases de efecto invernadero por el uso extensivo de materiales

industrializados como el hormigón armado y casetones de poliestireno. Aunque el uso de casetones de poliestireno puede aligerar las cubiertas, también se podrán incrementar las emisiones de dióxido de carbono, debido a que los coeficientes de emisión del poliestireno incluso duplican a los del acero.

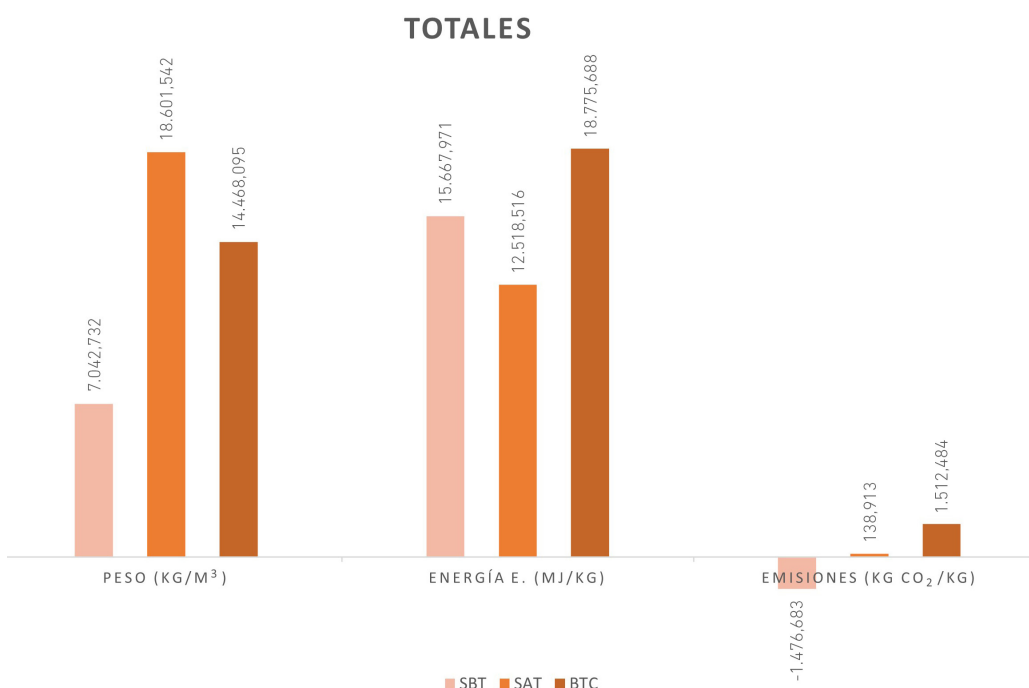
Totales

El peso total del SBT es menor que el SAT, con una diferencia de 11.558,81 kg, que representa 62,1%. Igualmente, es menor que el peso total del sistema BTC, con una diferencia de 7.425,36 kg, que representa 51,3% menos. La energía embebida total del SAT es menor que la del SBT, con una diferencia de 3.149,46 MJ, que representa 20,1%. No obstante, la energía incorporada total del SBT es menor que la del sistema BTC, con una diferencia de 3.107,71 MJ, que representa 16,5% menos.

Las emisiones de dióxido de carbono totales del SBT son menores que las del SAT, con una diferencia de 1.615,59 kg CO₂, equivalentes a 1,61 t CO₂, que representan 1.169,5% menos. Igualmente, son menores que las del sistema BTC, con una diferencia de 2.989,16 kg CO₂, equivalentes a 2,98 t CO₂, que representan 197,6% menos.

Conclusiones

El Bajareque Tecnificado no solo es una reinterpretación constructiva de la quincha, también es un sistema que demuestra ventajas



Gráfica 4

Peso, energía y emisiones totales por cada sistema constructivo.

Fuente: elaboración propia.

frente a otros sistemas constructivos de tierra. Eso lo convierte en una opción muy viable para su implementación en la construcción de viviendas sostenibles. Entre sus ventajas ha demostrado ser más ligero que los sistemas de adobe tradicional y de BTC; sin embargo, la cualidad ecológica más relevante del sistema es que al emplear en mayor medida materiales naturales como la madera, la tierra y la paja se logran coeficientes negativos en cuanto a sus emisiones de dióxido de carbono. A su vez, el uso de estos materiales naturales lo convierte en un sistema que secuestra carbono de manera indirecta.

A partir en los datos generados para un área de 10 m², se deduce que el SBT tiene un peso de 704,2 kg/m², una energía incorporada de 1.566,7 MJ/m², y genera -147,6 kg CO₂/m². De esta manera, se puede establecer que por cada 60 m² de construcción, tomando como referencia el área mínima de una vivienda social, se tendría un peso de 42.252 kg, equivalentes a 42,2 toneladas, una energía embebida de 94.002 MJ, y generaría -8.856 kg CO₂. El dato más relevante del Bajareque Tecnificado radica en el resultado negativo de las emisiones de dióxido de carbono, lo cual quiere decir que se trata de un sistema sostenible que, en lugar de incrementar las emisiones, por el uso de madera y tierra termina por absorber de manera indirecta dióxido de carbono. De esta manera, se estaría contribuyendo con la mitigación del cambio climático.

El uso de la madera en la construcción no solo ayudaría a incentivar la reforestación de grandes superficies de suelo, también se generarían grandes sumideros de carbono que ayudarían a mitigar el cambio climático. Sin embargo, se trata de un gran reto en el que deben participar gobiernos e instituciones que promuevan una gestión adecuada

de este recurso renovable. Así mismo, se requiere que la academia desarrolle cursos de construcción sostenible que incorporen técnicas para edificar con madera en combinación con otros materiales naturales, de tal forma que los futuros arquitectos logren su despliegue técnico en prácticas profesionales. Por otra parte, existen territorios donde las características climáticas no permiten la reproducción de especies vegetales.

No obstante, la tierra es un material que está presente en la mayoría de los ecosistemas, y que tiene cualidades ecológicas para considerarse un material sostenible. Además, con el uso de la tierra como material de construcción no solo se fomenta la sostenibilidad del hábitat, sino también se conservaría el patrimonio de las culturas constructivas que durante siglos han desarrollado, innovado, preservado y transmitido las técnicas asociadas con estos sistemas constructivos. El desarrollo de sistemas constructivos alternativos como el Bajareque Tecnificado puede apoyar de manera sustantiva en el esfuerzo global por reducir el calentamiento global y mitigar el cambio climático. Además, desde una perspectiva social, se trata de un sistema que puede ser fácilmente adaptado a procesos de autoconstrucción asistida y que es viable para su implementación tanto en medios rurales como urbanos, consiguiéndose en todo caso los beneficios aquí documentados. Por último, se considera relevante que en Latinoamérica se desarrollen bancos de datos en torno a coeficientes relacionados con energía embebida y de emisiones de dióxido de carbono de los materiales utilizados para edificar, con la finalidad de cuantificar y analizar, de manera más precisa y con datos locales, los impactos que pueden generar las prácticas de construcción en los países que integran el continente ■

> REFERENCIAS

- Acosta, D. (2009). Arquitectura y construcción sostenibles: Conceptos, problemas y estrategias. [Archivo PDF]. *Dearq*, (4), pp. 14-23. DOI: <https://doi.org/10.18389/dearq4.2009.02>
- Alcorn, A. (2010). *Global sustainability and the New Zealand house*. [Tesis doctoral]. Wellington: Victoria University.
- Alcorn, A. (2003). *Embodied energy and CO2 coefficients for NZ building materials*. Wellington: Victoria University.
- Arcas, J., Pages, A. y Casals, M. (2011). El futuro del hábitat: Repensando la habitabilidad desde la sostenibilidad. El caso español. [Archivo PDF]. *Revista INVI*, 26(72), pp. 65-93. Disponible en <http://www.revistainvi.uchile.cl/index.php/INVI/article/view/556>
- Bejo, L. (2017). Operational vs. Embodied Energy: a Case for Wood Construction. [Archivo PDF]. *Drvna Industrija*, 68(2), pp. 163-172. Recuperado de http://drvnaindustrija.sumfak.hr/pdf/Drv_20Ind_20Vol_2062_202_20Bejo.pdf
- Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety-BMUB. (2016). *Guideline for Sustainable Building*. [Archivo PDF]. Rostock: Publikationsversand der Bundesregierung. Recuperado de https://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/Sustainable_Building/LFNB_E_160309.pdf
- CEMEX. (2005). *Manual del constructor*. México DF: Talleres de proceso gráfico.
- Cortés, M. (2010). Sistema estructural quincha metálica [pp. 239-244]. [Archivo PDF]. En J. L. Sáinz Guerra y F. Jové Sandoval (Coords.), *La arquitectura construida en tierra. Tradición e innovación*. Valladolid: CIATTI. Recuperado de https://www5.uva.es/grupotierra/publicaciones/digital/libro2010/2010_9788469345542_p239-244_cortes.pdf
- Design and Green Engineering-DEGREN. (2020). *Guía para la selección de materiales de construcción sostenible*. [Archivo PDF]. Cáceres: INTROMAC. Recuperado de <http://www.degren.eu/wp-content/uploads/2020/05/DEGREN-SMCS.pdf>
- Fritzsche, K., Schneiderbauer, S., Bubeck, P., Kienberger, S., Buth, M., Zebisch, M. y Kahlenborn, W. (2016). *El libro de la vulnerabilidad. Conceptos y lineamientos para la evaluación estandarizada de la vulnerabilidad*. [Archivo PDF]. Bonn y Eschborn: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit-GIZ. Recuperado de https://www.adaptationcommunity.net/download/va/vulnerability-guides-manuals-reports/giz_sbv_ES_SOURCEBOOK_screen_v171019.pdf
- González Calderón, Alleck J. (2018). *Valoración y sostenibilidad de sistemas constructivos en el contexto de la autoproducción habitacional. El caso de Manizales, Colombia*. [Tesis doctoral]. México DF: Universidad Autónoma Metropolitana.
- Guerrero, L. (2017). Pasado y porvenir de la construcción con bajareque. [Archivo PDF]. *Revista Gremium*, 4(8), pp. 69-80. Recuperado de <https://editorialrestauro.com.mx/pasado-y-porvenir-de-la-construccion-con-bajareque/>
- Guerrero, L. (2014). La arquitectura de tierra [pp. 79-100]. En M. Rodríguez (Ed.), *Introducción a la arquitectura bioclimática*. México DF: LIMUSA.
- Henneberg, A. (2014). Tres pasos para la recuperación de la arquitectura de tierra en el estado de Zulia, Venezuela [pp. 235-242]. [Archivo PDF]. En F. Jové Sandoval y J. L. Sáinz Guerra (Coords.), *Construcción con la Tierra. Investigación y documentación*. Valladolid: CIATTI. Recuperado de <https://www5.uva.es/grupotierra/publicaciones/digital/libro2015/024henneberg.pdf>
- International Finance Corporation-IFC. (2017). *India Construction Materials Database of Embodied Energy and Global Warming Potential. Methodology Report*. [Archivo PDF]. Washington DC: IFC-WBG/EU. Recuperado de [http://www.ecocities.in/sites/default/files/2018-09/India Construction Materials Database of Embodied Energy and Global Warming Potential - Methodology Report.pdf](http://www.ecocities.in/sites/default/files/2018-09/India%20Construction%20Materials%20Database%20of%20Embodied%20Energy%20and%20Global%20Warming%20Potential%20-%20Methodology%20Report.pdf)
- Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Farahani, E., Kadner, S., Seyboth, K., Adler, A., Baum, I., Brunner, S., Eickemeier, P., Kriemann, B., Savolainen, J., Schlömer, S., von Stechow, C., Zwickel, T. y Minx, J. C. (Eds.). (2015). *Cambio climático 2014: Mitigación del cambio climático. Contribución del Grupo de trabajo III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. [Archivo PDF]. Cambridge/Nueva York: Cambridge University Press/IPCC. Recuperado de https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/WGIIIAR5_SPM_TS_Volume_es.pdf
- Kaminski, S., Laurence, A. y Trujillo, D. (2016). *Guía de diseño para la vivienda de bahareque encementado*. Beijing: INBAR.
- Kibert, C. J. (2013). *Sustainable construction: Green building design and delivery*. Nueva Jersey: Wiley.
- Kim, J.-J. y Rigdon, B. (1998). Qualities, use and examples of sustainable building materials. [Archivo PDF]. Ann Arbor: National Pollution Prevention Center for Higher Education. Recuperado de <http://www.umich.edu/~nppcpub/resources/compendia/ARCHpdfs/ARCHsbmIntro.pdf>

Meadows, D., Meadows, D. L., Randers, J. y Behrens, W. (1972). *The limits to growth: A report for the of Rome's project on the predicament of mankind*. Nueva York: Universe Books.

Quiroa, J., Castañeda, G., González, A. y González, E. (2019). Vivienda Social y Cooperativismo: Acercamiento de una Propuesta de Vivienda Alternativa. [Archivo PDF]. *Revista de Arquitectura IMED*, 8(1), pp. 95-110. Recuperado de <https://seer.imed.edu.br/index.php/arqimed/article/view/3299/2357>

Sabnis, A., Mysore, P. y Anant, S., (2015, octubre). Construction Materials-Embodied Energy Footprint-Global Warming; Interaction. [Archivo PDF]. Singapur: Structural Engineers World Congress. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/310022790_Construction_Materials-Embodied_Energy_Footprint-Global_Warming_Interaction

United Nations Environment Programme-UNEP. (2013). *Sustainable solutions for social housing: guidelines for project developers*. [Archivo PDF]. Kenia: UNEP. Recuperado de <https://www.unep.org/search/node?keys=social+housing&category=All&type=All&topic=All®ion=All>

UN-Habitat (2012). *Going green: A handbook of sustainable housing practices in developing countries*. [Archivo PDF]. Kenia: UN-Habitat. Recuperado de [https://unhabitat.org/sites/default/files/download-manager-files/Going Green.pdf](https://unhabitat.org/sites/default/files/download-manager-files/Going%20Green.pdf)

World Meteorological Organization-WMO. (2020, 23 de noviembre). The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2019. [Archivo PDF]. *WMO Greenhouse Gas Bulletin*, (16), pp. 1-9. Recuperado de https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10437

World Meteorological Organization-WMO. (2018). *Understanding the IPCC Special Report on 1.5°C*. [Archivo PDF]. Ginebra: WMO/UN Environment. Recuperado de https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=20660#Yw4IGPHMLUI