

ADOBE TRADICIONAL Y BAJAREQUE TECNIFICADO: ANÁLISIS COMPARATIVO DE ENERGÍA EMBEBIDA Y EMISIONES DE CO₂

Alleck J. González Calderón¹, Luis F. Guerrero Baca²

¹Universidad Autónoma de Coahuila, Unidad Torreón, México, alleck@hotmail.com

²Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco, México, luisfg1960@yahoo.es

Palabras clave: cambio climático, consumo energético, construcción sostenible, entramados de tierra

Resumen

Por sus valores sociales, culturales, económicos, ecológicos y tecnológicos, los sistemas constructivos de tierra se consideran formas de edificación sostenible desplegadas históricamente en distintas partes del mundo. No obstante, en la actualidad existe la tendencia que apunta hacia la reinterpretación de las técnicas tradicionales para su implementación en la vivienda urbana y rural, al mismo tiempo que se busca incrementar sus cualidades. El objetivo de este trabajo es desarrollar un análisis comparativo, desde una perspectiva ecológica, del sistema constructivo de adobe tradicional, tal como se reproduce en algunas regiones de Coahuila, México, frente a un modelo experimental denominado sistema bajareque tecnificado (SBT). La metodología consta de seis etapas en las que se analiza de manera comparativa y cuantitativa las variables de peso, energía embebida y emisiones de dióxido de carbono. Los resultados indican que el SBT es más ligero y genera menos emisiones de CO₂ que el sistema constructivo de adobe tradicional.

1 INTRODUCCIÓN

Sin duda, uno de los mayores retos que enfrenta la humanidad es la mitigación y la adaptación ante el cambio climático. Fenómeno causado principalmente por intensos procesos de industrialización que emiten grandes cantidades de CO₂, que al concentrarse de manera excesiva en la atmósfera genera calentamiento global y en consecuencia desequilibrios climáticos con distintos impactos sobre el hábitat.

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 dióxido de carbono llegaría a la condición crítica de 380 ppm para el año 2000 (Meadows et al., 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).

Por su parte, la industria de la construcción es una de las que mayores impactos ecológicos genera. Tan solo 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. Sin embargo, 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).

Aunque se sabe que la industria de la construcción es una de las más contaminantes del mundo por la fabricación masiva de materiales con alta demanda energética, paralelamente, existen sistemas constructivos de bajo contenido energético, que podrían considerarse sostenible, como los que implementan la tierra y otros materiales naturales como material de construcción. En el caso de 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 sistemas constructivos de origen tradicional que aún permanecen en 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 es una técnica ancestral, desde las últimas décadas del siglo pasado se han generado algunas innovaciones en torno a la prefabricación de paneles que reciben entramados y revoques de tierra para conformación de muros.

Una de las primeras propuestas de paneles prefabricados para entramados de tierra se desarrolló en Perú, en el Instituto Nacional de Investigación y Normalización de la Vivienda (ININVI), como parte del programa de Tecnologías Tradicionales, por Díaz (1984). Dicho panel está constituido por un bastidor de madera aserrada, que no supera el 20% de humedad, con dimensiones de 2,4 m de alto y dos opciones de ancho: 0,6 m y 1,2 m. Conformado por dos parantes y cuatro travesaños con sección de 0,03 m x 0,065 m y cuatro diagonales con escuadría de 0,02 m x 0,03 m. Todas las piezas unidas con clavos de 4 y 5 pulgadas. En tanto, el entramado de relleno está conformado por varas de carrizo, caña brava, o bambú, entrecruzadas de manera vertical entre los cuatro travesaños, hasta conformar un soporte rígido para los revoques. La propuesta incluye seis tipos de revoques, el Tipo 2 tiene una capa inicial de barro-paja en una proporción de 2 kg de paja por cada 100 kg de tierra, y una segunda capa fina de 0,015 m a 0,02 m de espesor, con una tierra areno-arcillosa cernida finamente para rellenar posibles fisuras, con un revestimiento final por medio de una lechada de cemento aplicada con brocha en dos capas (Díaz, 1984).

Posteriormente, a raíz del sismo del 31 de marzo de 1983, ocurrido en Popayán, Colombia, que destruyó 4372 viviendas, el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) financió a un grupo de técnicos del ININVI para transferir la tecnología de “La Casa de Quincha” a sus pares del Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), en Colombia. La investigación desarrollada por ININVI condujo al diseño de varios paneles, considerando el P6B como el más adecuado para su empleo en edificaciones de quincha. La propuesta tiene medidas generales de 2,4 m de alto x 1,2 m de ancho, y 0,1 m de espesor, constituido por dos pies derechos unidos por cuatro travesaños, ambos componentes con secciones de 3” x 1 ½”, el inferior en forma de “T” invertida, y cuatro refuerzos diagonales con sección cuadrangular de 1 ½” para evitar deformaciones (SENA, 1984).

Otra variante más reciente se realizó con un bastidor de madera, con dimensiones de 2,4 m de alto y 1,2 m de ancho puede estar constituido por dos parantes de 2,4 m, con sección de 0,1 m x 0,025 m, dos soleras de 1,2 m, con sección de 0,1 m x 0,25 m, cuatro travesaños de 1,15 m, con sección de 0,05 m x 0,025 m, y cuatro diagonales de 0,6 m, con sección de 0,05 m x 0,025 m, para dar mayor rigidez al panel. Una vez conformado el bastidor, se aplican dos capas de barro sobre el entretejido colocado de manera vertical sobre el panel: la primera, con un espesor de 0,008 – 0,02 m, con un mortero de una parte de tierra arcillosa de con partículas de 0,005 m, dos partes de arena cribada con malla de 0,005 m, y un tercio de paja cortada a 0,03 m de largo; la segunda, una capa fina de 0,001 – 0,002 m de espesor, con un mortero de una parte de tierra pasada por una malla de 0,002 m, y de tres a cuatro partes de arena fina; finalmente, sobre la capa fina se realiza un sellado haciendo movimientos circulares con ayuda de una esponja y de una brocha para eliminar partículas sueltas (Carazas; Rivero, 2002).

Debido a que el bajareque es una técnica que ha demostrado ser versátil para adaptarse a distintos contextos socioculturales, socioeconómicos y climáticos, es importante valorar la posibilidad de innovar las técnicas tradicionales y contemporáneas para su posible aplicación en viviendas sostenibles. Si bien, los sistemas constructivos de tierra han demostrado ser sostenibles, es relevante establecer comparaciones entre variables de peso, energía embebida y emisiones de CO₂, con la finalidad de identificar las ventajas ecológicas de cada sistema constructivo.

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, Unidad Torreón (UAdeC-Torreón), México, frente a un modelo de dimensiones similares, pero realizado con la técnica de adobe tradicional, denominado sistema adobe tradicional (SAT). La comparación ecológica entre los sistemas analizados se establece con base en las prácticas de construcción tradicionales de vivienda popular, con adobe, desplegadas en diferentes contextos urbanos y rurales de Coahuila, México.



Figura 1. Sistemas constructivos de adobe en Torreón, Coahuila, México. En contexto rural (izquierda). En contexto urbano (derecha)



Figura 2. Sistema bajareque tecnificado edificado en la Universidad Autónoma de Coahuila, Unidad Torreón, México

2 METODOLOGÍA

Con base en un análisis comparativo, que contempla las variables de peso, energía embebida y emisiones de CO₂ (González; Guerrero, 2022), entre dos 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, Unidad Torreón. 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, se compararon con los de un local de las mismas dimensiones denominado SAT, de uso común en distintas regiones de Coahuila, México.

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 perfil tubular rectangular (PTR), 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 pino, 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.

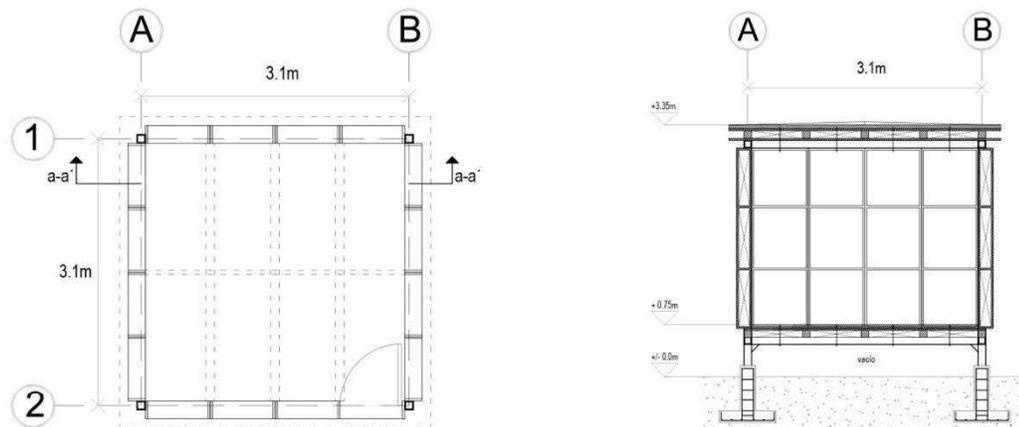


Figura 3. Detalles constructivos de sistema bajareque tecnificado

Para el análisis del SAT, 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 y superior del envigado, que soportan una placa de hormigón armado de 0,05 m de espesor.

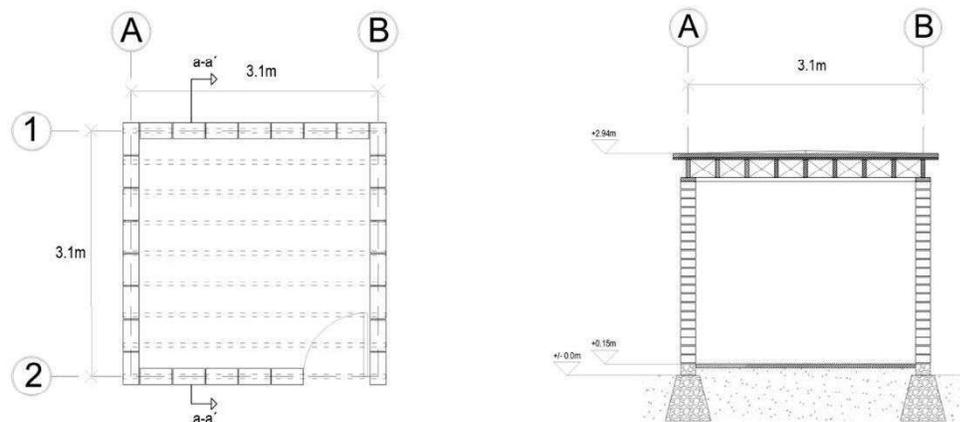


Figura 4. Detalles constructivos de sistema adobe tradicional

El análisis se basa en la cuantificación de materiales, de cada sistema constructivo, para determinar su peso volumétrico en m^3 , así como, la energía embebida en MJ/kg y las emisiones de dióxido de carbono en gramos, por cada kilogramo de material constructivo gCO_2/kg .

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

Etapas 1: Inventario de materiales.

Etapas 2: Cuantificación de materiales.

Etapas 3: Peso volumétrico de materiales.

Etapas 4: Cuantificación de energía incorporada.

Etapas 5: Cuantificación de emisiones de CO_2 .

Etapas 6: Comparación de sistemas constructivos.

A partir de la cuantificación de los materiales empleados para cada componente constructivo, se asignó su peso volumétrico expresado en kg/m^3 , 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/kg para determinar la energía incorporada, así como, los coeficientes de $g CO_2/kg$, 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). La información se procesó por medio de elaboración de tablas en Microsoft Excel, que permiten cuantificar las variables de energía incorporada y de emisiones de CO_2 por componente de cada sistema constructivo. Finalmente, con la elaboración de gráficas se compararon los resultados sobre el peso, energía incorporada y emisiones de dióxido de carbono, de los materiales consumidos en los componentes de cada sistema constructivo analizado.

3 RESULTADOS



Figura 5. Datos comparativos de peso volumétrico

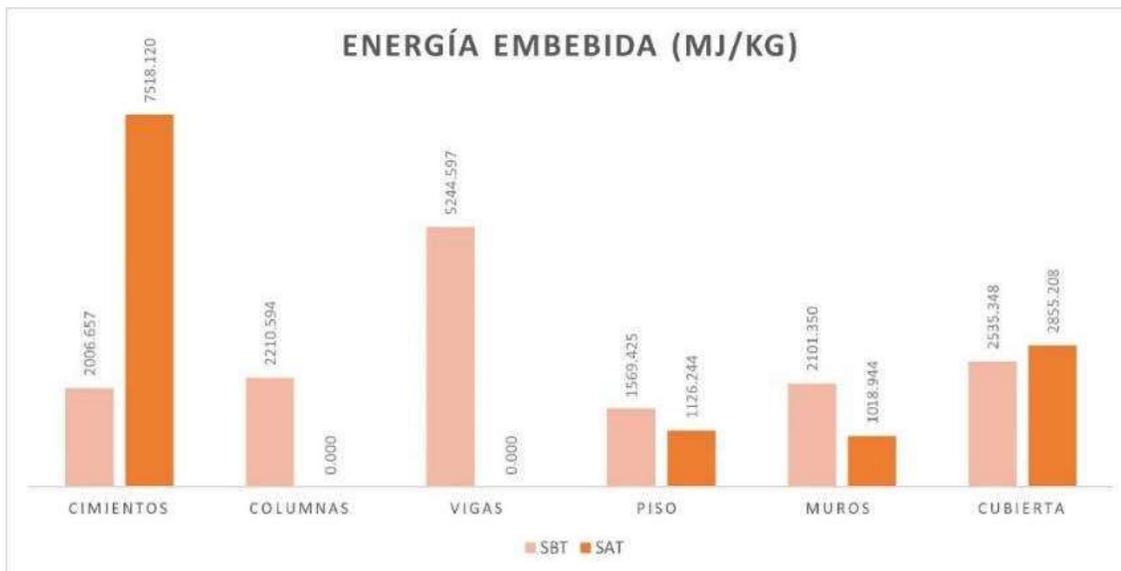
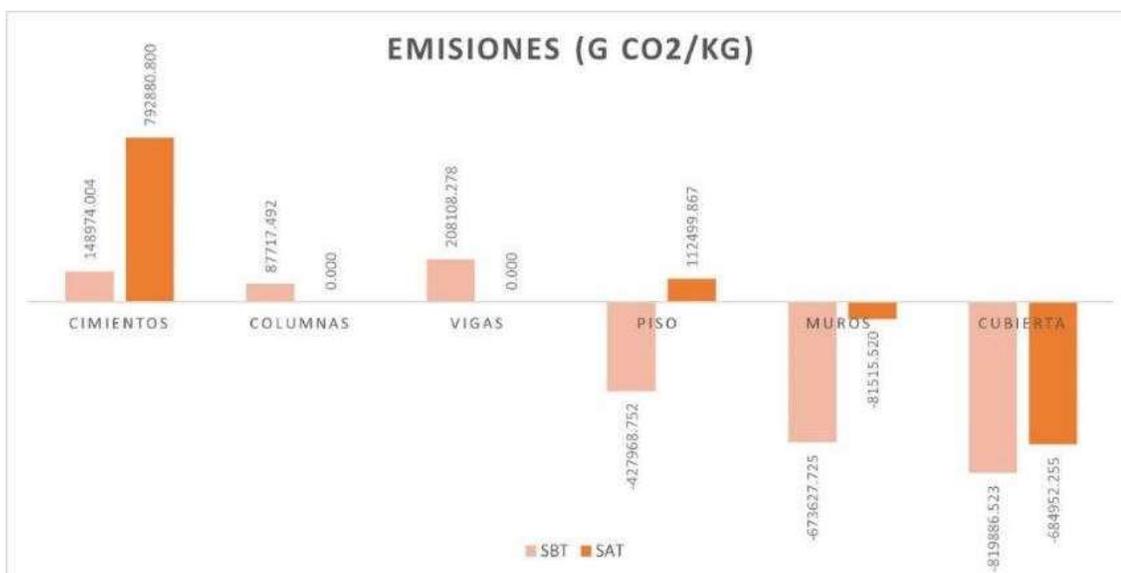


Figura 6. Datos comparativos de energía embebida

Figura 7. Datos comparativos de emisiones de CO₂.

3.1 Cimientos

El peso de la cimentación del SBT es menor que la del SAT, con una diferencia de 8054,42 kg, que representa 88,7%. En tanto, la energía embebida de la cimentación del SBT es menor que la del SAT, con una diferencia de 5511,47 MJ, que representa 73,3%. Las emisiones de dióxido de carbono de la cimentación del SBT son menores que las del SAT, con una diferencia de 643906,8 g CO₂, equivalentes a 0,64 t CO₂, que representan 81,2%.

3.2 Columnas

Debido a que las construcciones tradicionales de adobe no incluyen columnas, no existe punto de comparación entre las variables de peso, energía incorporada y emisiones de dióxido de carbono de las columnas del SBT.

3.3 Vigas

Debido a que las construcciones tradicionales de adobe no incluyen vigas, no existe punto de comparación entre las variables de peso, energía incorporada y emisiones de dióxido de carbono de las vigas del SBT.

3.4 Pisos

El peso del piso del SBT es menor que el del SAT, con una diferencia de 152,84 kg, que representa 15,7%. La energía embebida del piso del SAT es menor que la del SBT, con una diferencia de 443,18 MJ, que representa 28,2%. Las emisiones de dióxido de carbono del piso del SBT son menores que las del SAT, con una diferencia de 540468,61 g CO₂, equivalentes a 0,54 t CO₂, que representan 480,4% menos.

3.5 Muros

El peso de los muros del SBT es menor que los del SAT, con una diferencia de 3089,84 kg, que representa 45,4%. La energía embebida de los muros del SAT es menor que la del SBT, con una diferencia de 1082,41 MJ, que representa 51,5%. Las emisiones de dióxido de carbono de los muros del SBT son menores que las del SAT, con una diferencia de 755143,24 g CO₂, equivalentes a 0,75 t CO₂, que representan 726,3% menos.

3.6 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%. 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%. Las emisiones de dióxido de carbono de la cubierta del SBT son menores que las del SAT, con una diferencia de 134934,01 g CO₂, equivalentes a 0,13 t CO₂, que representan 16,4% menos.

3.7 Totales

El peso total del SBT es menor que el SAT, con una diferencia de 11558,81 kg, que representa 62,1%. La energía embebida total del SAT es menor que la del SBT, con una diferencia de 3149,46 MJ, que representa 20,1%. Las emisiones de dióxido de carbono totales del SBT son menores que las del SAT, con una diferencia de 1615,59 kg CO₂, equivalentes a 1,61 t CO₂, que representan 1.169,5% menos.



Figura 8. Datos comparativos totales

4 CONCLUSIONES

El SBT no solo es una reinterpretación constructiva del bajareque, también es un sistema que demuestra ventajas ecológicas frente a otros sistemas industrializados (González; Guerrero, 2022), y en este caso, aunque la diferencia no es tan significativa, también demuestra ciertas ventajas ecológicas frente a los sistemas constructivos de adobe. 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; 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 en comparación con otros sistemas constructivos.

Con base 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 1566,7 MJ/m², y -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 42252 kg, equivalentes a 42,2 toneladas, una energía embebida de 94002 MJ, y generaría -8856 kg CO₂.

Por su parte, para un área de 10 m², se deduce que el SAT tiene un peso de 1860,15 kg/m², una energía incorporada de 1251,85 MJ/m², y 13,89 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 111609 kg, equivalentes a 111,6 toneladas, una energía embebida de 75111 MJ, y generaría 833,4 kg CO₂.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcorn, A. (2003). *Embodied energy and CO₂ coefficients for NZ building materials*. Wellington: Victoria University.
- Carazas, W.; Rivero, A. (2002). *Bahareque. Guía de construcción parasísmica*. Villefontaine, Francia: CRATerre.
- CEMEX. (2005). *Manual del constructor*. México DF: Talleres de proceso gráfico.
- Díaz, A. (1984). Sistema constructivo "Quincha Prefabricada". *Informes de la Construcción*, 36(361), 25-33. DOI: <https://doi.org/10.3989/ic.1984.v36.i361.1962>
- 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*. Cambridge/Nueva York: Cambridge University Press/IPCC. Recuperado de https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/WGIIIAR5_SPM_TS_Volume_es.pdf
- González, A. J.; Guerrero, L. F. (2022). Bajareque tecnificado. Evaluación de energía incorporada y emisiones de CO₂ en comparación con la edificación convencional: Sistema constructivo alternativo para la vivienda rural de Torreón, México. *Vivienda Y Comunidades Sustentables*, (11), 9–21. DOI: <https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i11.177>
- Guerrero, L. (2014). La arquitectura de tierra. En M. Rodríguez (Ed.), *Introducción a la arquitectura bioclimática*. México DF: LIMUSA. p. 79-100
- Guerrero, L. (2017). Pasado y porvenir de la construcción con bajareque. *Revista Gremium*, 4(8), 69-80. Recuperado de <https://editorialrestauero.com.mx/pasado-y-porvenir-de-la-construccion-con-bajareque/>
- Henneberg, A. (2014). Tres pasos para la recuperación de la arquitectura de tierra en el estado de Zulia, Venezuela. En: F. Jové Sandoval y J. L. Sáinz Guerra (Coords.), *Construcción con la tierra. Investigación y documentación*. Valladolid: CIATTI. p. 235-242. Recuperado de <https://www5.uva.es/grupotierra/publicaciones/digital/libro2015/024henneberg.pdf>
- Meadows, D.; Meadows, D. L.; Randers, J.; Behrens, W. (1972). *The limits to growth: A report for the of Rome's project on the predicament of mankind*. Nueva York: Universe Books.

SENA (1984). La casa de bahareque modular: Quincha. Solución para la vivienda en áreas rurales y periurbanas. Bogotá, Colombia: Servicio Nacional de Aprendizaje

WMO (2020). The State of Greenhouse gases in the atmosphere based on global observations through 2019. World Meteorological Organization, Greenhouse Gas Bulletin, (16), 1-9. Recuperado de https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10437

AUTORES

Alleck J. González Calderón, arquitecto, con maestría y doctorado en Ciencias y Artes para el Diseño, profesor investigador de tiempo completo en la Escuela de Arquitectura, Unidad Torreón, de la Universidad Autónoma de Coahuila. Integrante del Cuerpo Académico: Territorio, Asentamientos Humanos y Resiliencia.

Luis Fernando Guerrero Baca, doctor en diseño con especialidad en conservación del patrimonio edificado, maestro en restauración, arquitecto, profesor investigador de tiempo completo en la UAM Xochimilco, jefe del área de Conservación y Reutilización del Patrimonio Edificado. Miembro de la Red Iberoamericana PROTERRA, miembro de la Cátedra UNESCO “Arquitecturas de tierra, culturas constructivas y desarrollo sostenible” de CRAterre.