

Bajareque tecnificado. Evaluación de energía incorporada y emisiones de CO_2 en comparación con la edificación convencional

Technified bajareque. Evaluation of incorporated energy and CO_2 emissions in comparison with conventional building

DOI: <https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i11.177>

ALLECK J. GONZÁLEZ CALDERÓN

<https://orcid.org/0000-0001-6850-7594> / alleck@hotmail.com
Universidad Autónoma de Coahuila, Unidad Torreón, México

LUIS FERNANDO GUERRERO BACA

<https://orcid.org/0000-0001-8256-4851> / luisfg1960@yahoo.es
Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco, México

Recibido: 25 de enero de 2021 Aceptado: 28 de abril de 2021

RESUMEN

La edificación de estructuras de bajareque ha demostrado ser altamente sostenible desde el punto de vista ecológico, económico y socio-cultural por lo que sirvió como referente para la realización de un prototipo tecnificado en la Universidad Autónoma de Coahuila en Torreón. A partir de la cuantificación de materiales se ha analizado comparativamente el peso volumétrico, la energía incorporada y las emisiones de CO_2 con relación a un modelo realizado con sistemas constructivos convencionales, demostrándose de manera cuantitativa las destacables cualidades ecológicas del sistema alternativo construido con bajareque tecnificado.

Palabras clave: Energía embebida, Contaminación atmosférica, Cambio climático, Construcción sostenible, Vivienda rural.

ABSTRACT

The construction of bajareque structures has proven to be highly sustainable from an eco-

logical, economic and sociocultural point of view, which is why it served as a reference for the realization of a technified prototype at the Autonomous University of Coahuila in Torreón. From the quantification of materials, the volumetric weight, the incorporated energy and the CO_2 emissions have been comparatively analyzed in relation to a model made with conventional construction systems, quantitatively demonstrating the remarkable ecological qualities of an alternative system built with technified bajareque.

Keywords: Embodied energy, Air pollution, Climate change, Sustainable construction, Rural housing.

INTRODUCCIÓN

El periodo histórico que va desde la primera Revolución Industrial se ha caracterizado por una incesante búsqueda de crecimiento económico y desarrollo tecnológico. No obstante, de manera simultánea se ha generado una crisis ecológica, motivada por intensos procesos de industrialización que, al consumir grandes cantidades de



energía, de fuentes fósiles, emiten enormes volúmenes de CO₂ y otros Gases de Efecto Invernadero (GEI), que al concentrarse en la atmósfera intensifican el calentamiento global y contribuyen con el fenómeno de cambio climático.

En 1972, el Club de Roma desarrolló una investigación denominada “Informe Meadows”, en la que se analizaron cinco rubros. Las conclusiones indicaron que: si las actuales tendencias de crecimiento de la población mundial, la industrialización, la contaminación, la producción de alimentos y el agotamiento de los recursos permanecen sin cambios, los límites del crecimiento en el planeta se alcanzarán en algún momento del presente siglo (Meadows, Meadows, Randers y Behrens, 1972).

También en 1972, la concentración atmosférica de CO₂ observada desde 1958 había crecido constantemente, con un aumento promedio de 1,5 partes por millón (ppm) cada año. Los cálculos que incluyeron los intercambios de CO₂ entre la atmósfera, la biosfera y los océanos predecían que la concentración de CO₂ 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 media mundial de CO₂ en la atmósfera superó ya el umbral de 410 ppm (WMO, 2019).

Debido a que las actividades industriales demandan una gran cantidad de energía que proviene de fuentes fósiles, la generación de CO₂ procedente de procesos industriales contribuyó en torno al 78% del aumento total de emisiones de GEI entre 1970 y 2010 (IPCC, 2014). En 1970 se produjeron 14,8 millones de kilotonos de CO₂, mientras que en 2010 se alcanzaron los 31,9 millones de kilotonos (Banco Mundial, 2020).

En los últimos cuarenta años se duplicó el consumo de energías provenientes de fuentes fósiles y con ello se ha incrementado el calentamiento global. Limitar el calentamiento global a 1,5 °C o 2 °C sin gastar en exceso el presupuesto de carbono requeriría cambios muy rápidos en la producción de electricidad, el transporte, la construcción, la agricultura y la industria. Cuanto más tiempo se

emita CO₂ al ritmo actual, más rápida deberá ser esta descarbonización (WMO, 2018).

Como ha sido ampliamente documentado la industria de la construcción es de las que mayores impactos ambientales genera. Los edificios ejercen una enorme presión sobre nuestro medio ambiente, ya que son responsables de una parte significativa del consumo global de energía, aproximadamente el 40%, más del 30% del uso de materiales y el 20% del uso de agua. A esto hay que agregar la generación de desechos que del total mundial la construcción produce 30% de residuos sólidos, y 20% de aguas residuales y más del 30% de las emisiones globales de Gases de Efecto Invernadero (UNEP, 2013).

En 2010 el sector de la edificación fue responsable de alrededor del 32% del uso de la energía final y de emisiones de 8,8 Gt CO₂, incluidas emisiones directas e indirectas, y lamentablemente las proyecciones indican que la demanda de energía del sector aproximadamente se duplicará y las emisiones de CO₂ aumentarán entre el 50% y el 150% a mediados de siglo. Este crecimiento de la demanda de energía se debe al incremento en la riqueza, el cambio de estilos de vida, el acceso a servicios energéticos modernos y viviendas adecuadas y la urbanización (IPCC, 2015).

De continuar la tendencia de aumento de gases de GEI, cada vez serán más visibles los impactos sociales, ambientales y económicos, 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 vemos en la actualidad, son un anticipo del cambio climático interactuando con otros impactos antropogénicos (GIZ, 2016).

La industria de la construcción es un gigante entre los consumidores de energía; su uso se divide entre las fases de producción, operación y demolición de los edificios, y asciende en total a no menos del 40% del total de la energía utilizada por toda la sociedad. La construcción sostenible es, por tanto, uno de los retos más importantes a los que nos enfrentamos (Berge, 2009).

La cuantificación de los gases emitidos a la atmósfera, medidos convencionalmente sólo a partir de las emisiones de CO₂, nos informa del potencial de calentamiento global a causa de los gases emitidos durante la producción y puesta en obra de los materiales de construcción (Arguello y Cuchí, 2008). Es evidente que el CO₂ es parte de la naturaleza y que no es el único gas cuyo desequilibrio puede afectarla. Hay sustancias mucho más nocivas, pero desde hace décadas se emplea ese dato como un referente internacional que retrata muy fielmente las condiciones ambientales.

La evaluación de emisiones asociada a los datos de consumo de recursos caracteriza muy claramente la relación de cada material y el medio ambiente. Para analizar los recursos empleados durante la producción se utiliza convencionalmente la medición de la energía que se requirió para transformar las materias primas en productos y es lo que se denomina energía incorporada o energía embebida. La cuantificación de emisiones de CO₂ y el balance de energía de fabricación permite realizar comparaciones con soluciones alternativas. Esto permite reconocer la importancia de la reducción de empleo de recursos, el reciclaje, el compostaje y el uso de materiales de construcción ecológicos (UNEP, 2013).

Debido a que la humanidad se encuentra en un proceso de rápida urbanización, los sistemas constructivos y materiales industrializados podrían sustituir a los vernáculos que durante siglos han sustentado la implementación de técnicas, materiales y mano de obra locales en el hábitat rural.

Además de las graves condiciones provocadas por el consumo de recursos, gasto energético y contaminación, la humanidad enfrenta el fenómeno de urbanización exponencial que conduce a la pérdida de la vida rural que paradójicamente es la que durante milenios garantizó la producción de alimentos para la sociedad. Se estima que actualmente la proporción de la población urbana mundial es del 55.7% pero no deja de crecer (Banco mundial, 2019). Por lo que además de prever la necesaria reducción de los materiales industrializados empleados en la edificación en

zonas urbanas, resulta imperioso mantener la vivienda rural y los saberes constructivos que han probado su eficacia a lo largo de la historia.

Entre los componentes de origen tradicional que aún permanecen en algunas zonas rurales, destaca el sistema constructivo conocido en México como bajareque y en otras latitudes se le llama bahareque, quinchá, 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 entretajan o se atan entre sí, y a un marco generalmente hecho de madera (Guerrero, 2017). En la Figura 1 se observa una edificación en la que se reinterpreta la técnica de bajareque para su implementación en viviendas de más de dos niveles.

Desde hace varios años en la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco y en la Universidad Autónoma de Coahuila en Torreón, se ha venido experimentado diferentes alternativas para evaluar la viabilidad de la recuperación de esta técnica de origen ancestral y su puesta al día para ser aplicada en viviendas sostenibles. Entre los principales factores a evaluar se encuentran las dos variables antes mencionadas: emisiones de CO₂ y energía incorporada, a fin de mostrar de forma fehaciente sus cualidades con respecto a las obras realizadas de manera convencional en la vivienda masiva de todo el país. En el presente texto se exponen los resultados obtenidos a partir de la comparación entre un módulo realizado con bajareque tecnificado en el campus de la UAdeC-Torreón en 2020, y los datos de un espacio similar pero realizado con muros de block de cemento y estructura de concreto armado.

FIGURA 1

Edificio histórico de cuatro niveles construido con bajareque en Cuenca, Ecuador.



Fuente: Elaboración propia.

MATERIALES Y SISTEMAS CONSTRUCTIVOS SOSTENIBLES

La construcción sostenible conlleva un proceso integral que busca restaurar y mantener la armonía entre los ambientes naturales y construidos. Implica un pensamiento holístico en lo que respecta a la construcción y gestión del entorno, a partir de la perspectiva del ciclo de vida (CIB, 2002).

Los principios de la construcción sostenible buscan entre otros aspectos, reducir el consumo de insumos, reutilizar recursos, emplear materiales reciclables, proteger la naturaleza, eliminar sustancias tóxicas, aplicar el análisis de ciclo de vida y elevar la calidad ambiental y confort de los espacios edificados. Estos principios han de aplicarse durante las fases de planificación, desarrollo, diseño, construcción, uso y operación, mantenimiento, modificación y deconstrucción, tomando en consideración recursos como el suelo, materiales, agua, energía y ecosistemas (Kibert, 2013).

Debido a que la Tierra es un sistema de recursos finitos, uno de los problemas más graves que se deben enfrentar en la búsqueda de una construcción sostenible destaca el impacto ambiental durante todo el ciclo de vida de la edificación (Acosta, 2009). El análisis de ciclo de vida de los productos de construcción proporciona una mejor

comprensión de los costos a largo plazo de los materiales. Cada etapa del ciclo, desde la extracción de materias primas, fabricación, distribución e instalación, hasta su reutilización o eliminación, se examina por su impacto ambiental. A su vez, el ciclo de vida de un material puede organizarse en tres fases: pre-construcción, construcción, post-construcción (Kim y Rigdon, 1998).

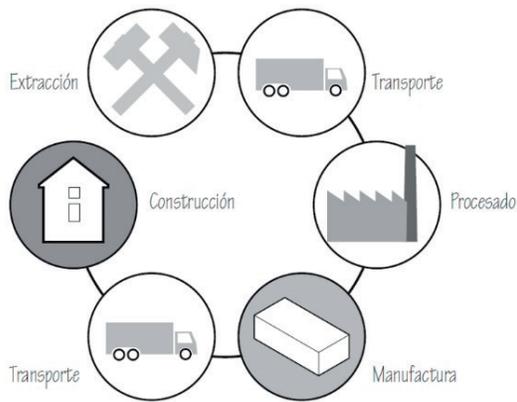
Los impactos relacionados con la producción de materiales se corresponden estrechamente con la energía incorporada en los materiales. Un ejemplo importante es la calcinación de la cal y las arcillas durante la producción de cemento, donde, además de muchos otros gases contaminantes, se liberan grandes cantidades de CO₂ (Berge, 2009). Reducir el consumo de energía del entorno construido y las emisiones de desechos al medio ambiente, son objetivos nodales de la construcción sostenible. El cambio climático está siendo causado por actividades humanas que están aumentando las concentraciones de gases que atrapan el calor y que contienen carbono, en particular CO₂, en la atmósfera. La cantidad de estos gases que se liberan está en función tanto de la cantidad de energía que se consume como de la fuente de generación (Kibert, 2013).

La “energía incorporada” y las emisiones de CO₂ a la atmósfera, durante la extracción de materias primas, los procesos de transformación y el transporte de los materiales hasta su destino final de utilización son parte fundamental de la valoración de su ciclo de vida (Rocha, 2011). En la figura 2 se muestra un esquema que integra las distintas fases del ciclo de vida de un material: extracción, transporte, procesado, manufactura, transporte y construcción.

Los materiales que se pueden considerar sostenibles son aquellos que limitan el consumo de recursos, además de incorporar materias primas reutilizadas y recicladas, con la finalidad de reducir sus impactos ambientales. Uno de los aspectos más importantes a considerar es la fabricación y empleo de materiales con menor energía incorporada o embebida, con el fin de reducir las emisiones de CO₂ generadas por las prácticas de edificación.

FIGURA 2

Energía incorporada desde el proceso de extracción hasta la puesta en obra.



Fuente: Ching y Shapiro, 2014, p. 219

La energía incorporada a un material es la que se requirió para producirlo. Esto incluye la energía del combustible utilizado para alimentar el equipo de recolección o minería, el de procesamiento y los dispositivos de transporte que mueven la materia prima dentro de las instalaciones, incluida la fabricación, el transporte y la instalación final. Esta energía generalmente proviene de la quema directa de combustibles fósiles, que son un recurso limitado y no renovable, o bien de energía eléctrica que en general también suele provenir de plantas generadoras alimentadas por gas o por combustóleo. Cuanto mayor es la energía incorporada de un material, mayor fue la cantidad de esfuerzo necesario para producirlo, lo que implica consecuencias ecológicas más graves (Kim y Rigdon, 1998). Lógicamente existe una correlación directa entre la energía incorporada y el impacto ambiental derivado de las emisiones y gases de efecto invernadero asociados con el consumo energético.

Sin embargo, algunos productos tienen una energía incorporada relativamente menor cuando su extracción y transformación se realizan 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).

Si bien, el cemento representa aproximadamente el 70% del coeficiente energético del concreto estándar, representa aproximadamente el 85% del CO₂ emitido. El alto coeficiente de CO₂ que emite la fabricación de cemento se explica por el aporte de calor para la calcinación y por el CO₂ liberado durante la calcinación de carbonato de calcio (CaCO₃) a óxido de calcio (CaO) (Alcorn, 2010).

Aunque la mayoría de los materiales son emisores netos de CO₂, los que tuvieron un origen vegetal son absorbentes netos. La madera, los carrizos, el bambú o la paja durante su desarrollo absorben cantidades importantes de CO₂ debido a la fotosíntesis que los mantuvo vivos. Una vida útil más larga para la mayoría de los materiales reduce las emisiones anualizadas. Pero los materiales de origen vegetal se consideran acumuladores de CO₂ (Guerrero y Soria, 2018).

El almacenamiento de carbono en los productos de construcción puede contribuir a reducir la concentración de CO₂ atmosférico durante un período prolongado por lo que ayuda de manera significativa a la reducción del calentamiento global (Berge, 2009). Por lo que al analizar los coeficientes de emisiones de CO₂ de los derivados de origen vegetal se observan cifras con signo negativo, que representan el CO₂ neto absorbido durante su vida.

La madera es un recurso renovable, 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 sus procesos de producción y se considera un almacén 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).

Maximizar el empleo de materiales que “secuestran” carbono, como la madera, el bambú y paja, es el medio más eficaz para reducir las emisiones anuales netas que minimizar las emisiones de otros materiales. Las emisiones de CO₂ como parte de un proceso de producción cuentan positivamente, mientras que el CO₂ absorbido equilibra la ecuación. Incluso los productos de madera con mayores insumos de energía, como la que se produce en forma laminada o el contrachapado, todavía tienen coeficientes de CO₂ negativos.

No obstante, es fundamental entender que los productos de origen vegetal solamente se pueden considerar sostenibles si existen procesos de siembra, cultivo y conservación cuidadosos. El agotamiento de los acuíferos y el incremento en los niveles de CO₂ de la atmósfera están directamente ligados con la pérdida de los bosques y selvas.

En este sentido, 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. No obstante, un inconveniente del uso de acero en exteriores es su elevada conductividad térmica, ya que se necesita más aislamiento para proporcionar la misma resistencia térmica que una pared de postes de madera tradicional (Kim y Rigdon, 1998).

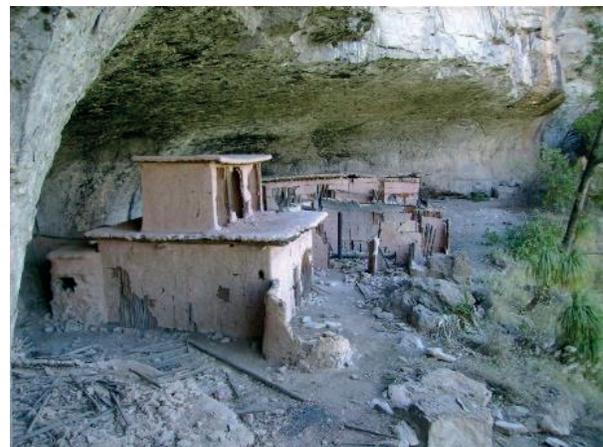
Esto abre la posibilidad de plantear sistemas constructivos que incorporen materiales como el acero en sus componentes estructurales, combinados con, componentes naturales como la madera, la tierra y la paja. En climas áridos y semiáridos la madera es un recurso escaso y poco durable por la radiación 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 aprovecha el potencial de cada componente en una interacción compatible.

Entre las ventajas constructivas del bajareque, además de sus cualidades ecológicas al emplear tierra y material vegetal, destacan su ligereza, facilidad de construcción, compatibilidad estructural, escasa demanda de mantenimiento, resistencia a los terremotos y, sobre todo, su durabilidad. Como se visualiza en la Figura 3, se han encontrado restos arqueológicos construidos con bajareque de hace más de mil años en la Cueva del Maguey, Durango y con más de cuatro mil años de antigüedad en Caral, Perú (Guerrero, 2017).

FIGURA 3

Vestigios arqueológicos en la Cueva del Maguey, Durango.



Fuente: Elaboración propia.

MATERIALES Y MÉTODOS

A partir de un análisis comparativo, que contempla las variables de peso, energía embebida y de emisiones de CO₂, entre dos sistemas constructivos empleados para la edificación de un local de 10 m² cada uno, se busca demostrar de manera cuantitativa la sostenibilidad de un sistema alternativo denominado bajareque tecnificado (SBT), edificado en la Universidad Autónoma de Coahuila en Torreón. Esta propuesta basada en la tradición constructiva del bajareque con madera, la tierra y la paja, incorpora algunos componen-

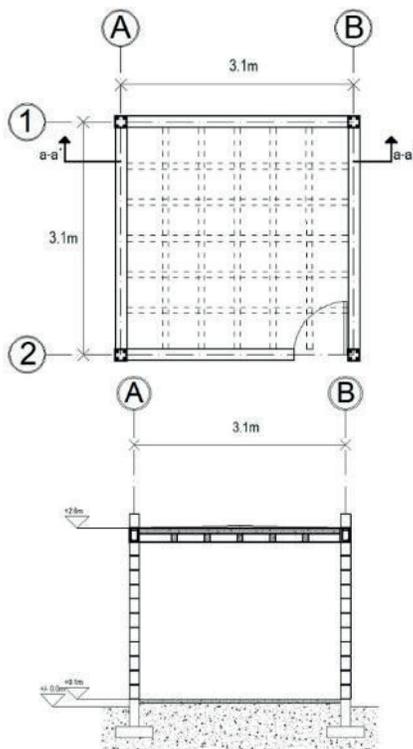
tes de acero y concreto en su enmarcamiento estructural y cimentación.

Los datos parámetros de sostenibilidad de dicho módulo se compararon con los de un local realizado con un sistema convencional, de amplio uso en la región, que sólo emplea acero y concreto. El sistema convencional se calculó previendo los siguientes datos:

a) cimientos continuos de concreto armado, con base de 0.55 m x 0.15 m y contratrabe de 0.55 m x 0.15 m; b) columnas de concreto armado, con sección de 0.15 m x 0.15 m; c) vigas de concreto armado, con sección de 0.2 m x 0.15 m; d) piso de concreto armado, con espesor de 0.05 m; e) muros de block hueco de concreto, con dimensiones de 0.4 m x 0.2 m x 0.15 m; f) cubierta reticular de concreto armado, con viguetas de 0.12 m x 0.08 m, capa de compresión de 0.05 m de espesor, placas de poliestireno de 0.4 m x 0.4 m x 0.1 m. En la Figura 4 se observan las características espaciales y constructivas del sistema convencional.

FIGURA 4

Planta y sección del módulo hecho con sistema constructivo convencional.



Fuente: Elaboración propia.

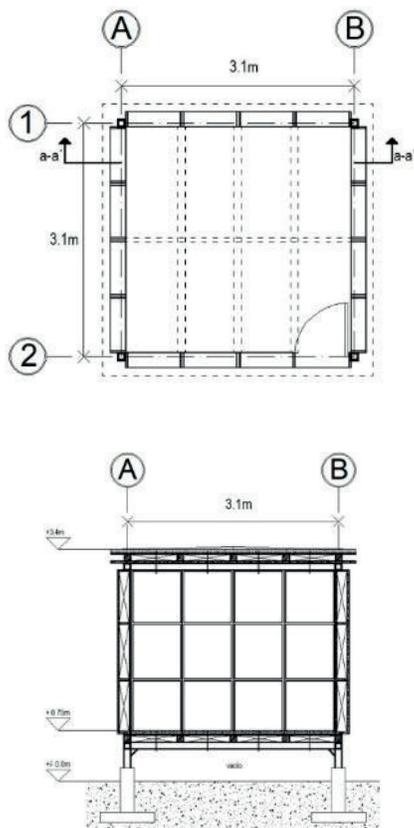
Por su parte el módulo prototipo realizado con bajareque tecnificado cuenta con:

a) cimientos aislados de concreto 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, 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, 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 concreto armado de 0.025 m de espesor; e) muros con estructura de madera, con modulación de 2.4 m x 0.75 m x 0.2 m y secciones de 0.2 m x 0.025, con aplicación de malla de acero, para corral de aves, en cara interior y exterior, para recibir revoques de tierra-paja con 0.05 cm 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, con secciones de 0.1 x 0.1 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 concreto 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.

En la Figura 5 se muestran las características espaciales y constructivas del sistema bajareque tecnificado. Así mismo, se visualiza parte del proceso constructivo: levantamiento de estructura metálica, colocación de paneles de madera para muros, aplicación de primer revoque sobre muros y finalización de la obra.

FIGURA 5

Planta, sección y proceso constructivo de sistema alternativo.



Fuente: Elaboración propia.

El análisis se fundamenta en la cuantificación de materiales, de cada sistema constructivo, para determinar su peso volumétrico m^3 , así como, la energía embebida MJ/kg y las emisiones de dióxido

de carbono en gramos, por cada kilogramo de material constructivo (gCO_2/kg).

El proceso metodológico se divide en seis etapas:

- Inventario de materiales de ambos módulos
- Cuantificación de materiales de cada uno
- Peso volumétrico de materiales
- Cuantificación de la energía incorporada
- Cuantificación de las emisiones de CO_2
- Comparación de sistemas constructivos

Con base en la elaboración de planos se registran todos los componentes del sistema constructivo, así como, sus tipologías y materiales que los constituyen. La cuantificación de los materiales en m^3 se realizó con base en las características y dimensiones de cada componente empleado para cimentación, columnas, vigas, piso, muros y cubierta. 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/m^3 . Esto se obtuvo multiplicando el peso volumétrico de cada material en m^3 por el peso asignado en kg/m^3 , con base en datos de CEMEX (2005).

Una vez que se obtuvo el peso volumétrico de los materiales empleados en los componentes de cada sistema constructivo, se multiplicó por los coeficientes de MJ/g, para determinar la energía incorporada, así como, por los coeficientes de $g CO_2/kg$, para determinar las emisiones de dióxido de carbono. La información fue obtenida del *Centre of Building Performance Research*, de la Universidad Victoria de Wellington, Nueva Zelanda, (Alcorn, 2003) 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 base en la elaboración de tablas, en Microsoft Excel, 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.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

TABLA 1

Tabla de volúmenes, pesos, energía incorporada y emisiones de sistema constructivo convencional.

Componentes	Materiales	Convencional Volumen M3	(CEMEX) Peso Vol. Kg / M3	Convencional Peso Vol. Kg / M3	(Alcorn) Energía E. MJ / Kg	Convencional Energía E. MJ / Kg	(Alcorn) Emisiones g CO2 / Kg	Convencional Emisiones g CO2 / Kg
Cimientos	Concreto	1.72	2300.00	3962.21	0.90	3565.99	106.00	419994.26
	Acero	0.03	7900.00	203.03	31.30	6354.84	1242.00	252163.26
Subtotal		1.75		4165.24		9920.83		672157.52
Columnas	Concreto	0.21	2300.00	485.53	0.90	436.98	106.00	51466.18
	Acero	0.00	7900.00	35.32	31.30	1105.54	1242.00	43868.56
Subtotal		0.22		520.85		1542.52		95334.74
Vigas	Concreto	0.36	2300.00	817.19	0.90	735.47	106.00	86622.14
	Acero	0.00	7900.00	36.87	31.30	1154.01	1242.00	45791.67
Subtotal		0.36		854.06		1889.48		132413.81
Piso	Concreto	0.45	2300.00	1032.42	0.90	929.18	106.00	109436.94
	Acero	0.00	7900.00	8.85	31.30	276.94	1242.00	10989.22
Subtotal		0.45		1041.27		1206.12		120426.16
Muros	Block Concreto	1.82	2300.00	4174.50	0.90	3757.05	106.00	442497.00
	Concreto (juntas)	0.11	2300.00	263.81	0.90	237.43	106.00	27963.86
Subtotal		1.93		4438.31		3994.48		470460.86
Cubierta	Concreto	0.75	2300.00	1728.68	0.90	1555.81	106.00	183240.08
	Acero	0.01	7900.00	43.77	31.30	1370.12	1242.00	54367.18
	Poliestireno	0.58	8.00	4.61	58.40	269.11	2495.00	11496.96
Subtotal		1.33		1777.06		3195.04		249104.22
TOTALES		6.04		12796.79		21748.47		1739897.31

Fuente: Elaboración propia.

TABLA 2

Tabla de volúmenes, pesos, energía embebida y emisiones de sistema constructivo de bajareque tecnificado.

Componentes	Materiales	Bajareque Volumen M3	(CEMEX) Peso Vol. Kg / M3	Bajareque Peso Vol. Kg / M3	(Alcorn) Energía E. MJ / Kg	Bajareque Energía E. MJ / Kg	(Alcorn) Emisiones g CO2 / Kg	Bajareque Emisiones g CO2 / Kg
Cimientos	Concreto	0.48	2300.00	1109.06	0.90	998.15	106.00	117560.36
	Acero	0.01	7900.00	45.25	31.30	1416.36	1242.00	56201.99
Subtotal		0.49		1154.31		2414.52		173762.35
Columnas	Acero	0.01	7900.00	71.10	31.30	2225.43	1242.00	88306.20
Subtotal		0.01		71.10		2225.43		88306.20
Vigas	Acero	0.02	7900.00	170.64	31.30	5341.03	1242.00	211934.88
Subtotal		0.02		170.64		5341.03		211934.88
Piso	Madera	0.45	650.00	291.20	2.80	815.36	-1665.00	-484848.00
	Concreto	0.22	2300.00	514.74	0.90	463.27	106.00	54562.44
	Acero	0.00	7900.00	8.85	31.30	276.94	1242.00	10989.22
Subtotal		0.67		814.79		1555.57		-419296.34
Muros	Madera	0.57	650.00	369.85	2.80	1035.58	-1665.00	-615800.25
	Tierra-paja	2.70	1220.00	3294.00	0.15	494.10	-12.00	-39528.00
	Acero	0.00	7900.00	16.20	31.30	506.90	1242.00	20114.19
Subtotal		3.27		3680.05		2036.58		-635214.06
Cubierta	Madera	0.52	650.00	335.53	2.80	939.48	-1665.00	-558657.45
	Concreto	0.30	2300.00	700.58	0.90	630.52	106.00	74261.48
	Acero	0.00	7900.00	12.01	31.30	375.85	1242.00	14913.94
Subtotal		0.82		1048.12		1945.86		-469482.03
TOTALES		5.28		6939.00		15518.99		-1049989.01

Fuente: Elaboración propia.

Con base en los resultados mostrados en las Tablas 1 y 2, se establecen comparaciones entre el sistema constructivo convencional (SCC) y el sistema de bajareque tecnificado (SBT). Se analizaron pesos, energía embebida y emisiones de dióxido de carbono, por cada componente:

CIMIENTOS

El peso de la cimentación del SBT es menor que la del SCC, con una diferencia de 3010.93 kg, que representa 72.3 %. En tanto, la energía embebida de la cimentación del SBT es menor que la del SCC, con una diferencia de 7506.31 MJ, que representa 75.7 %. Así mismo, las emisiones de dióxido de carbono de la cimentación del SCA son menores que la del SCC, con una diferencia de 498395.17 g CO₂, equivalentes a 0.49 t CO₂, que representan 74.2 %.

COLUMNAS

El peso de las columnas del SCA es menor que las del SCC, con una diferencia de 449.75 kg, que representa 86.4 %. En contraste, la energía embebida de las columnas del SCC es menor que la del SCA, con una diferencia de 682.91 MJ, que representa 30.7 %. En tanto, las emisiones de dióxido de carbono de las columnas del SBT son menores que las del SCC, con una diferencia de 7028.54 g CO₂, equivalentes a 0.007 t CO₂, que representan 7.4 %.

VIGAS

El peso de las vigas del SBT es menor que las del SCC, con una diferencia de 683.42 kg, que representa 80.0 %. En contraste, la energía embebida de las vigas del SCC es menor que las del SBT, con una diferencia de 3451.55 MJ, que representa 64.7 %. Así mismo, las emisiones de dióxido de carbono de las vigas del SCC son menores que las del SBT, con una diferencia de 79521.07 g CO₂, equivalentes a 0.079 t CO₂, que representan 37.5 %.

PISOS

El peso del piso del módulo de Bajareque Tecnificado es menor que el del sistema convencional, con una diferencia de 226.48 kg, que representa

21.7 %. En contraste, la energía embebida del piso del sistema convencional es menor que la del módulo experimental, con una diferencia de 349.45 MJ, que representa 22.5 %. Sin embargo, las emisiones de dióxido de carbono del piso del SBT son menores que las del SCC, con una diferencia de 539722.5 g CO₂, equivalentes a 0.53 t CO₂, que representan 448 % menos.

MUROS

El peso de los muros de Bajareque Tecnificado es menor que el del sistema convencional, con una diferencia de 758.26 kg, que representa 17 %. En contraste, la energía embebida de los muros del SCC es menor que la del SBT, con una diferencia de 1957.90 MJ, que representa 49 %. No obstante, las emisiones de dióxido de carbono de los muros del SBT son menores que las del SCC, con una diferencia de 1105674.92 g CO₂, equivalentes a 1.1 t CO₂, que representan 235% menos.

CUBIERTAS

El peso de la cubierta del módulo de SBT es menor que la del SCC, con una diferencia de 728.94 kg, que representa 41 %. En tanto, la energía embebida de la cubierta del SCA es menor que la del SCC, con una diferencia de 1249.18 MJ, que representa 39.1 %. Así mismo, las emisiones de dióxido de carbono de la cubierta del SCA son menores que las del SCC, con una diferencia de 718586.25 g CO₂, equivalentes a 0.71 t CO₂, que representan 288 % menos.

TOTALES

En general, el peso del módulo de Bajareque Tecnificado es menor que el convencional, con una diferencia de 5857.79 kg, que representa 45.7 %. De la misma manera, la energía incorporada del primero es menor que la del SCC, con una diferencia de 6229.48 MJ, que representan 28.7 %. Por último, las emisiones de dióxido de carbono son menores que las del sistema convencional, con una diferencia de 2789886.32 g CO₂, equivalente a 2.7 t CO₂, que representan 160 % menos.

CONCLUSIONES

El estudio sistematizado de las características de los sistemas constructivos alternativos cuya lógica constructiva se deriva de los saberes históricos y tradicionales, resulta crucial como medio para ponerlos en valor. Una parte importante de la información que existe acerca de la edificación que emplea muros de bajareque, se centra en su importancia como reminiscencia cultural, pero se suele poner poca atención en sus cualidades desde el punto de vista del impacto ambiental (Guerrero, 2017).

La información analizada en el presente artículo permite reconocer, mediante datos duros, la diferencia de tres variables cruciales para las mediciones de impacto ambiental: el peso de los inmuebles, la energía requerida para su elaboración y las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera durante la fabricación de sus materias primas.

Cuando se construyen estructuras de bajareque se generan componentes constructivos flexibles y ligeros que, además de hacerlos altamente resistentes a condiciones sísmicas, se impacta favorablemente a otros factores. Se requiere menor ancho y profundidad de cimentación, así como menor esfuerzo y tiempo de edificación. Además, como se trata de un sistema en el que se desarrollan cargas puntuales, es posible contar con zapatas de cimentación aisladas lo que se traduce igualmente en reducciones de trabajo.

El hecho de contar con un edificio que pesa prácticamente la mitad que una obra convencional (45,7% menos) representa enormes beneficios desde el punto de vista ambiental porque significa un ahorro de recursos equivalentes al mismo porcentaje, pero también, una disminución en la complejidad de los procesos constructivos.

En segundo lugar, el sistema de Bajareque Tecnificado que se evalúa y para el cual se emplearon tanto materiales de origen natural como industrializados, arroja datos energéticos alentadores. La reducción de casi una tercera parte (28,7 %) de la energía necesaria para fabricar sus insumos se vincula con ahorros en las fuentes de energía que

en general provienen de la quema de combustibles o de la electricidad.

Pero evidentemente el dato más impresionante que se deriva del análisis desarrollado deviene de la reducción del 160% en las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera. Esta reducción se explica en parte por el empleo de tierra para el relleno de los muros, la cual se extrae del propio terreno o de sitios cercanos y se manipula sin complejos procedimientos tecnológicos. Pero, sobre todo, el diferencial mayor está asociado al manejo de material vegetal en su construcción. Como se mencionó líneas arriba, los datos derivados de la captura de carbono de la madera y la paja permiten plantear una ecuación en la que el balance final se ve favorecido gracias a los valores con signo negativo de sus emisiones a la atmósfera.

Es importante señalar que los materiales leñosos que se emplean para construir con bajareque tienen un impacto ecológico menor que los de origen industrializado puesto que no se necesitan secciones de gran espesor, dimensión, ni calidad. Además, es posible emplear madera de desperdicio que al reciclarse y protegerse con tierra queda protegida de las afectaciones del entorno, debido que ésta última mantiene estables sus condiciones higrotérmicas, evitándose tanto su pudrición como su degradación (Minke, 2005).

En los momentos actuales en los que se han hecho cada vez más evidentes los estragos provocados por las alteraciones a la atmósfera, el planteamiento de sistemas constructivos que reduzcan de manera tan destacable los indicadores de impacto ambiental genera expectativas promisorias. Es clara la urgencia de tomar medidas drásticas para actuar en contra del cambio climático a partir de la recuperación de selvas y bosques asociada al freno al consumo desmedido de bienes y servicios que está agotando los recursos del planeta.

El desarrollo de sistemas constructivos alternativos como el bajareque tecnificado puede apoyar de manera sustantiva en este esfuerzo global. Se trata de un sistema que puede ser fácilmente adaptado a procesos de autoconstrucción asistida

y que es viable para su empleo tanto en medios rurales como urbanos, consiguiéndose en todo caso los beneficios aquí documentados.

AGRADECIMIENTOS

Al Programa para el Desarrollo Profesional Docente (PRODEP), para el Tipo Superior, por el financiamiento del proyecto de investigación UACOAH-PTC-494, del que forma parte este trabajo. A la Universidad Autónoma de Coahuila, Unidad Torreón, por el apoyo durante las gestiones y por facilitar la edificación de los prototipos experimentales dentro del campus universitario.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta, D. (2009). *Arquitectura y construcción sostenibles: Conceptos, problemas y estrategias*. *Dearq, s/v*, (4), 14-23. <https://doi.org/10.18389/dearq4.2009.02>
- Alcorn, A. (2003). *Embodied energy and CO₂ coefficients for NZ building materials*. Wellington, New Zealand: Victoria University.
- Alcorn, A. (2010). *Global sustainability and the New Zealand house* (doctoral thesis). Victoria University, Wellington, New Zealand.
- Arguello, T. y Cuchi, A. (2008). Análisis del impacto ambiental asociado a los materiales de construcción empleados en las viviendas de bajo coste del programa 10x10 con Techo-Chiapas del CYTED. *Informes de la construcción*, 60 (509), 25-34. <https://doi.org/10.3989/ic.2008.v60.i509.588>
- Banco Mundial (2019). Porcentaje de población urbana mundial. Disponible en: <https://datos.bancomundial.org/indicador/SP.URB.TOTL.IN.ZS>
- Banco Mundial (2020). Emisiones mundiales de CO₂. Disponible en: https://datos.bancomundial.org/indicador/EN.ATM.CO2E.KT?end=2016&name_desc=false&start=1970
- Berge, B. (2009). *The ecology of building materials*. Oxford, United Kingdom: Elsevier.
- CEMEX (2005). *Manual del constructor*. Ciudad de México, México: Talleres de proceso gráfico.
- Ching, F. y Shapiro, I. (2014). *Arquitectura ecológica: Un manual ilustrado*. Barcelona, España: Gustavo Gili.
- CIB (2002). Agenda 21 for sustainable construction in developing countries. Disponible en: <https://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB3150.pdf>
- Guerrero, L. (2017). Pasado y porvenir de la construcción con bajareque. *Revista Gremium*, 4 (8), 69-80. Disponible en: <file:///C:/Users/A/AppData/Local/Temp/Dialnet-PasadoYPorvenirDeLaConstruccionConBajareque-6067557.pdf>
- Guerrero, L. y Soria, F.J. (2018) Traditional architecture and sustainable conservation. *Journal of Cultural Heritage Management and Sustainable Development*, 8 (2), 194-206. <https://doi.org/10.1108/JCHMSD-06-2017-0036>
- GIZ (2016). El libro de la vulnerabilidad. Conceptos y lineamientos para la evaluación estandarizada de la vulnerabilidad. Disponible en: https://www.adaptationcommunity.net/download/va/vulnerability-guides-manuals-reports/giz_sbv_ES_SOURCEBOOK_screen_v171019.pdf
- IPCC (2014). Cambio climático 2014 Informe de síntesis: Resumen para responsables de políticas. Disponible en: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/AR5_SYR_FINAL_SPM_es.pdf
- IPCC (2015). Cambio climático 2014, Mitigación del Cambio Climático: Resumen para responsables de políticas y resumen técnico. Disponible en: https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/WGIIIAR5_SPM_TS_Volume_es.pdf
- Kibert, C. J. (2013). *Sustainable construction: Green building design and delivery*. New Jersey, USA: Wiley
- Kim, J. & Rigdon, B. (1998). Qualities, use and examples of sustainable building materials. Disponible en: <http://www.umich.edu/~nppcpub/resources/compendia/ARCHpdfs/ARCHsbmIntro.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*. New York, USA: Universe Books.
- Minke, G. (2005) *Manual de construcción en tierra*. Montevideo, Uruguay: Fin de siglo.
- Rocha, E. (2011). Construcciones sostenibles: materiales, certificaciones y LCA. *Revista Nodo*, 6 (11), 99-116. Recuperado de: <http://revistas.uan.edu.co/index.php/nodo/article/view/64>

UNEP (2013). Sustainable solutions for social housing: guidelines for project developers.

Disponible en: <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. Disponible en: <https://unhabitat.org/sites/default/files/download-manager-files/Going%20Green.pdf>

World Meteorological Organization (2018). Understanding the IPCC Special Report on 1.5°C. Disponible en: <https://public.wmo.int/en/resources/library/understanding-ipcc-special-report-15%C2%B0C>

World Meteorological Organization (2019). WMO Greenhouse Gas Bulletin. The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2019. Disponible en: https://library.wmo.int/doc_num.php?expl-num_id=10437

