

BAJAREQUE TECNIFICADO. EVALUACIÓN DE AGUA INCORPORADA EN COMPARACIÓN CON LA EDIFICACIÓN CONVENCIONAL

TECHNIFIED BAJAREQUE. EVALUATION OF EMBODIED WATER
COMPARED TO CONVENTIONAL BUILDING

ALLECK J. GONZÁLEZ CALDERÓN

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

LUIS FERNANDO GUERRERO BACA

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

JAIME ANDRÉS QUIROA HERRERA

Universidad Autónoma de Coahuila, Unidad Torreón,
México
<https://orcid.org/0000-0003-1173-9639>

Recibido: 14 de enero del 2024

Aprobado: 31 de mayo del 2024

<https://doi.org/10.26439/limaq2024.n14.6880>

Uno de los grandes retos que enfrenta la humanidad es la conservación de recursos naturales tan valiosos como el agua. Sin embargo, la sobrexplotación motivada por intensos procesos de industrialización compromete la seguridad hídrica para las generaciones futuras. Dado que la industria de la construcción es una de las mayores consumidoras de agua, es necesario diseñar sistemas constructivos que contribuyan a la sostenibilidad hídrica. El objetivo de este trabajo es desarrollar un análisis comparativo entre un sistema constructivo convencional y uno mixto denominado *bajareque tecnificado*, que emplea entramados de tierra, edificado en la Universidad Autónoma de Coahuila, Unidad Torreón, México, con base en un método cuantitativo que evalúa el agua incorporada por componente de cada sistema constructivo. Los resultados indican que el sistema de bajareque tecnificado reduce hasta en 25 % el consumo total de agua en comparación con la edificación convencional.

agua incorporada, estrés hídrico, construcción sostenible, entramados de tierra

One of the great challenges facing humanity is the conservation of natural resources as valuable as water. However, overexploitation motivated by intense industrialization processes compromises water security for future generations. Because the construction industry is one of the largest consumers of water, it is necessary to design construction systems that contribute to water sustainability. The objective of this work is to develop a comparative analysis between a conventional construction system and an mixed one called *Bajareque Tecnificado*, which uses earth frameworks, built at the Autonomous University of Coahuila, Torreón Unit, Mexico, based on a quantitative method that evaluates the embodied water per component of each construction system. The results indicate that the *Bajareque Tecnificado* system reduces total water consumption by up to 25 % compared to conventional buildings.

embodied water, water stress, sustainable construction, wattle and daub

Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

INTRODUCCIÓN

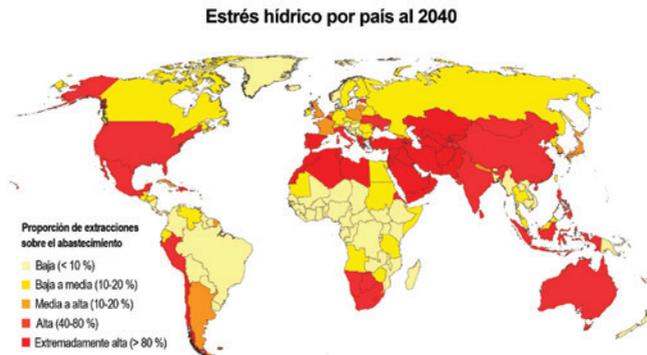
En el 2020, la extracción total de agua dulce fue de 3 895 000 km³ (Banco Mundial, 2020). Actualmente, la agricultura representa el 69 % del consumo de agua a nivel mundial, seguida por la industria con el 19 %, mientras el 12 % corresponde a uso municipal (UN-Water, 2021). Sin embargo, en los últimos cuarenta años, el consumo global de agua ha aumentado 1 % anual y se espera que la demanda crezca al mismo ritmo hasta el 2050, lo que representará un incremento de 30 % por encima del nivel actual, debido principalmente al crecimiento de la demanda en los sectores municipal e industrial (UN-Water, 2019). De continuar con la tendencia de sobreexplotación del agua, es muy probable que en las próximas décadas se experimenten escenarios de estrés hídrico en varias regiones del mundo. En la Figura 1, se muestra la proyección de los países con mayor índice de estrés hídrico para el 2040, entre ellos, están países latinoamericanos como México, Perú, Chile y Ecuador.

En la actualidad, se estima que 3600 millones de personas en todo el mundo viven en áreas con escasez hídrica por lo menos un mes por año, lo que podría afectar de 4800 a 5700 millones de personas para el 2050 (ONU-Agua, 2019).

Figura 1

Proyecciones globales de estrés hídrico para el 2040

Nota. Adaptado de Maddocks et al. (2015).



Cabe mencionar que, entre los sectores industriales que más extraen aguas subterráneas, se encuentran la industria manufacturera, la minería, la del gas y petróleo, la generación de energía eléctrica, así como la de construcción (UN-Water, 2022). Aunque no abunda información sobre el consumo hídrico global relacionado con el sector

de la construcción, algunos datos revelan la gran cantidad de agua consumida durante los procesos de fabricación de materiales.

En el 2012, el consumo de agua para la producción mundial de concreto fue responsable del 9 % del total asociado al sector industrial a nivel global, es decir, aproximadamente el 1,7 % de la extracción mundial. Sin embargo, es probable que para el 2050 el 75 % de la demanda de agua para la producción de concreto ocurra en regiones que experimentarán estrés hídrico (Miller et al., 2018). En cuanto a los procesos de edificación, es muy importante considerar que el agua incorporada a los materiales puede representar la mayor parte del agua consumida durante el ciclo de vida de un edificio; por tal motivo, se deben plantear propuestas innovadoras que tiendan al aprovechamiento eficiente de su consumo en la industria de la construcción, a fin de contribuir a la sostenibilidad hídrica (Crawford, 2022).

Debido a que cada vez habrá menos agua disponible para solventar necesidades como la producción de alimentos, la generación de energía y para la edificación, entre otras, es necesario formular estrategias que ayuden a la sostenibilidad hídrica, pero resulta prioritario hacerlo en lugares con climas áridos, donde se combinará la escasez natural de agua con pronósticos de estrés hídrico para los próximos años.

En el caso de México, más de la mitad del territorio corresponde a climas áridos y semiáridos, con mayor presencia en la región norte del país, donde la mayoría de las cuencas ya experimentan altos índices de estrés hídrico (Smakhtin et al., 2004). En un par de décadas, en la región norte de México y particularmente en la entidad federativa llamada Coahuila, la tercera más grande del país con una superficie de 151 562 km², el agua se convertirá en un recurso escaso, con una gran presión sobre su aprovechamiento. Por ello, es urgente plantear estrategias que promuevan un manejo eficiente entre los sectores de producción que más demandan agua, tales como el agrícola, municipal e industrial, incluyendo de manera prioritaria a la construcción.

Desde las últimas décadas en Coahuila, tanto en zonas rurales como urbanas, se ha intensificado la construcción de viviendas con materiales industrializados como concreto, acero y poliestireno, entre otros, con lo que se ha incrementado el consumo energético y las emisiones de CO₂ (González & Guerrero, 2022). Pero también es de suma importancia evaluar el consumo hídrico o de “agua incorporada” en la construcción de vivienda.

En Coahuila aún persiste una tradición que emplea la tierra como material de construcción que se remonta a varios milenios en los que se han edificado viviendas con tierra amasada, adobe y entramados de tierra, adaptadas a las condiciones climáticas áridas, con lo que se hace un uso racional de los escasos recursos hídricos. Por tal motivo, se considera relevante reinterpretar tales técnicas tradicionales para la construcción de vivienda desde una visión contemporánea y sostenible. En la Figura 2, se muestran dos tipologías constructivas de vivienda urbana en Torreón, Coahuila.

Figura 2

Viviendas con sistema constructivo convencional (derecha).
Viviendas construidas con tierra (izquierda)



Si bien es importante la conservación del agua en territorios áridos donde se pronostican escenarios de estrés hídrico, la construcción de vivienda convencional, edificada con materiales industrializados que contienen altos coeficientes de agua incorporada, no contribuye a la sostenibilidad hídrica. En este sentido, se plantea como hipótesis que los sistemas constructivos mixtos, que combinan componentes industrializados con otros de origen natural como la tierra, la paja y la madera, pueden disminuir el consumo hídrico por metro cuadrado de construcción en comparación con la edificación convencional, y ayudar a la sostenibilidad hídrica.

A partir de lo anterior, se busca responder las siguientes preguntas: ¿qué porcentaje de agua se puede reducir con el empleo de sistemas constructivos mixtos en comparación con la edificación convencional? ¿Cuál es la cantidad de agua incorporada por metro cuadrado de los

sistemas constructivos mixtos frente a los sistemas constructivos de la vivienda convencional? ¿Cuál es el componente de cada sistema constructivo con la mayor y menor cantidad de agua incorporada?

En tanto, el objetivo de esta investigación consistió inicialmente en demostrar la factibilidad constructiva de un modelo experimental de un sistema mixto denominado *sistema de bajareque tecnificado* (SBT), porque reinterpreta la técnica tradicional de bajareque o quincha, edificado en la Universidad Autónoma de Coahuila, Unidad Torreón, México. Finalmente, se estableció un análisis comparativo-cuantitativo para evaluar la sostenibilidad hídrica del SBT frente a un caso que retoma el sistema constructivo de la vivienda convencional, de amplio uso en la región, que emplea materiales industrializados como concreto, acero y poliestireno.

CONSTRUCCIÓN SOSTENIBLE

La construcción sostenible consta de siete principios básicos: reducir el consumo de recursos, reutilizarlos en la medida posible, utilizar componentes reciclables, proteger la naturaleza, eliminar tóxicos, disminuir los costos económicos y elevar la calidad. Los principios deben aplicarse durante todo el ciclo de vida de la edificación con el objetivo de conservar de manera sostenible recursos tales como la materia, la energía y el agua (Kibert, 2013).

En la mayoría de los casos, la sostenibilidad de una edificación se define a partir de la cuantificación del consumo de materia y energía, así como de las emisiones de gases de efecto invernadero generadas durante su ciclo de vida. En pocas ocasiones se evalúa el agua consumida durante los procesos de fabricación de materiales para edificar. Pero los conceptos de huella hídrica y de agua incorporada involucran métodos para cuantificar el consumo de este líquido a lo largo de los procesos productivos y de edificación.

Los procesos de fabricación incluyen distintos coeficientes de agua azul, verde y gris. La huella hídrica azul es un indicador del consumo de recursos hídricos frente a la medida convencional de la extracción de agua que considera el volumen de agua dulce, proveniente de aguas superficiales y subterráneas, consumido para elaborar un producto (Hoekstra et al., 2011). En tanto, el agua incorporada es la cantidad de agua necesaria para crear un producto, considerando todas las

etapas de fabricación, así como los consumos directos e indirectos. Se conoce como *agua directa* a la cantidad de líquido consumido en la elaboración de un determinado producto, mientras que el *agua indirecta* es la utilizada para crear y entregar materiales y recursos del producto principal (Treloar et al., 2004).

Con respecto al agua incorporada en la producción de edificaciones, McCormark et al. (2007) evaluaron diecisiete edificios no residenciales, en los que se evidencian distintos consumos por área edificada. En los resultados, el valor más bajo fue de 5 kL/m², mientras que nueve casos presentaron valores similares con una media de 12 kL/m²; finalmente, el valor más alto fue de 20,1 kL/m². En otro análisis de agua incorporada de una edificación con la misma tipología se encontró un valor superior de 54,1 kL/m² (Crawford & Treloar, 2005). Mientras que en edificaciones residenciales el consumo de agua incorporada en los materiales utilizados durante las etapas de construcción, mantenimiento y reforma de una vivienda con más de cincuenta años de antigüedad puede ser equivalente a 31,3 kL/m² de superficie construida (Crawford & Pullen, 2011).

En estudios más recientes en India, se estima que el promedio de agua consumida en la construcción de edificios es de 17,81 kL/m² por superficie construida. Esto podría representar la demanda operativa de agua de 1233 familias durante todo un año, o bien una demanda operativa promedio de agua durante siete años (Bardhan & Choudhuri, 2016). En otro análisis realizado en el mismo país, se encontró que la huella hídrica media de edificios residenciales de mediana altura con cimientos poco profundos es de 11 kL/m², en edificios residenciales de mediana altura con cimientos profundos es de 18 kL/m², mientras que en edificios residenciales de gran altura con cimientos profundos se obtiene una huella hídrica promedio de 26 kL/m² (Sathya, 2023).

En cuanto a la huella hídrica azul de los materiales de construcción, se indican los siguientes datos: acero sin aleación (11,11 L/kg), cemento Portland (2,17 L/kg), vidrio sodocálcico (5,89 L/kg). Solo en el caso del cemento Portland fue mayor el consumo de agua asociado con el uso de electricidad para la transformación del material (Gerbens-Leenes et al., 2018). Complementariamente, en la Tabla 1 se muestra una serie de coeficientes de agua incorporada por tipo de material empleado en la construcción convencional.

Material	Unidad	Agua incorporada (kL/ unidad)
Acero inoxidable	t	649,6
Acero	t	98,64
Aluminio virgen	t	1084,4
Cemento	t	29,91
Arena	m ³	3,57
Concreto 5 MPa	m ³	7,48
Concreto 15 MPa	m ³	10,13
Concreto 20 MPa	m ³	10,98
Concreto 30 MPa	m ³	12,29
Concreto 40 MPa	m ³	14,62
Mortero	m ³	10,55
Madera dura	m ³	16,28
Madera suave	m ³	20,14
Poliestireno	m ³	14,16

Tabla 1

Datos de agua incorporada por material de construcción

Nota. De: Crawford y Treloar (2010).

Los valores más altos se relacionan con materiales metálicos como el aluminio, el acero inoxidable y el acero, mientras que el concreto y la madera pueden llegar a tener valores similares y muy por debajo en comparación con los primeros. En contraste, la tierra cruda como material de construcción puede tener menores coeficientes de agua incorporada, en parte porque durante la hidratación de las mezclas se incluye la humedad natural del suelo. Durante el proceso de construcción con entramados (bajareque o quincha) se utilizan pequeñas cantidades de agua y poca energía, ya que el trabajo es manual y se hace con recursos locales, cumpliendo así con varios principios de lo que se considera una construcción sostenible (Henneberg, 2014).

Un dato genérico indica que una mezcla óptima para edificar con tierra se encuentra en un rango de 30 a 35 % de agua en relación con un volumen seco de tierra (Neves & Borges, 2011). No obstante, el manejo y la durabilidad de los sistemas constructivos de tierra puede variar radicalmente si se les pone más o menos agua. Si se le

incorpora alrededor de 35 %, adoptará un estado líquido; con 25 % tendrá una condición plástica que, si bien le permite fluir, será capaz de conservar su forma si se coloca en un molde. Sin embargo, si se intentara compactarla dentro de este, no se conseguiría densificarla, por ser demasiado dúctil. La tierra compactada para muros de tapia o para bloques de tierra comprimida (BTC) suele requerir solo 15 % de humedad (Guerrero, 2020). Véase la Figura 3.

Figura 3

Realización del test Carazas, en el que se analiza el comportamiento de distintas mezclas de tierra con diferentes cantidades de agua



De esta manera, se estima que por cada metro cúbico de tierra se requeriría aproximadamente un máximo de 350 litros de agua. Sin embargo, el volumen de agua puede disminuir hasta 150 litros por metro cúbico de tierra, dependiendo de la técnica de construcción empleada. Esto demuestra que los sistemas constructivos de tierra son más eficientes en cuanto a la conservación del agua, debido a que sus coeficientes de consumo hídrico son menores frente a los materiales industrializados. La razón principal es que solo se consume agua durante el proceso de mezclado de la tierra.

No obstante, es muy común mezclar la tierra arcillosa con otros materiales de origen natural para estabilizar las mezclas. En tales casos, también se debe tomar en consideración el agua incorporada del material estabilizante. Algunos datos indican que la huella hídrica azul del trigo es de 342 m³/t. Otros productos orgánicos de referencia son las hortalizas que consumen 300 m³/t, el maíz con 81 m³/t, mientras que los pistachos pueden llegar a consumir hasta 7602 m³/t (Mekonnen & Hoekstra, 2010).

Por tanto, es necesario elegir adecuadamente la materia prima natural; de no hacerlo, se podría tener un efecto indeseado y con ello elevar en demasía el volumen de agua incorporada en una edificación. Sin duda, los sistemas constructivos que implementan únicamente materiales industrializados suelen tener un mayor volumen de agua incorporada en comparación con los sistemas que emplean la tierra y otros insumos naturales. Sin embargo, también existe la posibilidad de diseñar sistemas mixtos en los que se combinan, en menor medida, algunos materiales industrializados con otros de origen natural con la finalidad de reducir el consumo de agua en comparación con la edificación convencional, cumpliendo así con criterios de construcción sostenible.

METODOLOGÍA

A partir de un análisis comparativo, que contempla la variable de agua incorporada, entre dos sistemas constructivos empleados para la edificación de un modelo de 10 m² cada uno, se busca demostrar de manera cuantitativa la sostenibilidad hídrica de un sistema mixto denominado *bajareque tecnificado* (SBT), edificado en la Universidad Autónoma de Coahuila (UAdeC), Unidad Torreón, México. La propuesta reinterpreta la técnica tradicional de bajareque o quincha, con entramados de tierra-madera, incorporando en menor medida acero y concreto en sus componentes estructurales y en la cimentación. Los datos de este modelo se compararon con los de otro modelo de las mismas dimensiones, pero con un sistema constructivo convencional (SCC) de amplio uso en esta región de Coahuila, que emplea concreto, poliestireno y acero como materiales de construcción. En la Figura 4, se muestra la ubicación del módulo de SBT en un terreno colindante con la Escuela de Arquitectura, en la Ciudad Universitaria de la UAdeC, Unidad Torreón.

Figura 4

Ubicación del SBT en la ciudad universitaria de la UAdeC, Unidad Torreón

Nota. Elaborado con Google Maps.



Para el sistema constructivo convencional se consideraron los siguientes datos:

- Cimientos: zapatas corridas de concreto armado, con base de $0,55 \text{ m} \times 0,15 \text{ m}$ y contratrase de $0,55 \text{ m} \times 0,15 \text{ m}$.
- Columnas: concreto armado, con sección de $0,15 \text{ m} \times 0,15 \text{ m}$.
- Vigas: cerramiento de concreto armado, con sección de $0,2 \text{ m} \times 0,15 \text{ m}$.
- Piso: concreto armado, con espesor de $0,05 \text{ m}$.
- Muros: *block* hueco de concreto, con dimensiones de $0,4 \text{ m} \times 0,2 \text{ m} \times 0,15 \text{ m}$.
- Cubierta: reticular de concreto armado, con viguetas de $0,12 \text{ m} \times 0,08 \text{ m}$, capa de compresión de $0,05 \text{ m}$ de espesor, placas de poliestireno de $0,4 \text{ m} \times 0,4 \text{ m} \times 0,1 \text{ m}$.

En la Figura 5, se observan las características espaciales y constructivas del sistema convencional.

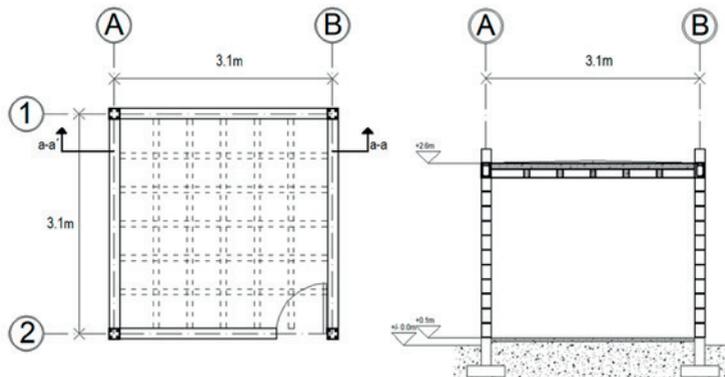


Figura 5

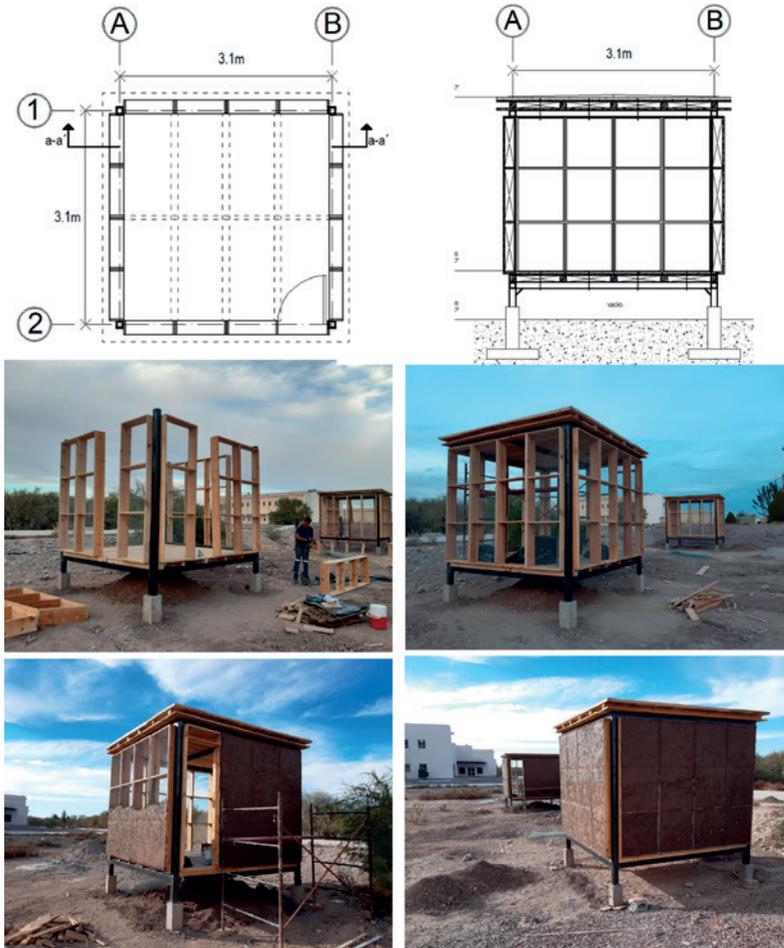
Planta y sección del sistema constructivo de uso convencional en Torreón, Coahuila, México

En tanto, el sistema de bajareque tecnificado cuenta con lo siguiente:

- a. Cimientos: zapatas aisladas de concreto armado, con base de $0,8\text{ m} \times 0,8\text{ m} \times 0,15\text{ m}$ y dado de $0,2\text{ m} \times 0,2\text{ m} \times 0,65\text{ m}$.
- b. Columnas: acero tipo PTR, con sección hueca de $0,1\text{ m} \times 0,1\text{ m}$ y calibre de $0,0019\text{ m}$.
- c. Vigas: acero tipo PTR, con secciones huecas de $0,1\text{ m} \times 0,1\text{ m}$ y calibre de $0,0019\text{ m}$.
- d. Piso: entramado de madera, con secciones de $0,1\text{ m} \times 0,1\text{ m}$ para envigado y secciones de $0,3\text{ m} \times 0,025\text{ m}$ colocadas sobre el envigado, para soportar una placa de concreto armado de $0,025\text{ m}$ de espesor.
- e. Muros: paneles prefabricados de madera, con modulación de $2,4\text{ m} \times 0,75\text{ m} \times 0,2\text{ m}$ y secciones de $0,2\text{ m} \times 0,025\text{ m}$, con aplicación de malla de acero para corral de aves en cara interior y exterior, a fin de recibir un revoque grueso de tierra-paja con $0,025\text{ m}$ de espesor y un revoque fino de tierra-arena con $0,003\text{ m}$ de espesor. La disposición de los revoques genera una cámara ventilada de $0,1\text{ m}$ al interior de los muros.
- f. Cubierta: entramado de madera, con secciones de $0,1\text{ m} \times 0,1\text{ m}$ para envigado y tablas de $0,3\text{ m} \times 0,025\text{ m}$ colocadas en la parte inferior y superior del envigado, que soportan una placa de concreto armado de $0,025\text{ m}$ de espesor. La disposición de una doble cara de madera genera una cámara ventilada de $0,1\text{ m}$ al interior de la cubierta.

En la Figura 6, se muestran las características espaciales y constructivas del sistema de bajareque tecnificado. También se visualiza parte del proceso constructivo: levantamiento de estructura metálica, colocación de paneles de madera para muros, aplicación del primer revoque sobre los muros y finalización de la obra.

Figura 6
Planta, sección y proceso constructivo del sistema de bajareque tecnificado en Torreón, Coahuila



El análisis se fundamenta en la cuantificación de materiales por componente de cada sistema constructivo, para determinar su volumen (m^3) y peso (t), a los que posteriormente se les asignó un coeficiente relacionado con su agua incorporada expresado en kilolitros por cada unidad de medida: kL/t , kL/m^3 .

El proceso metodológico se dividió en las siguientes etapas:

- Inventario y cuantificación de materiales por cada componente
- Cuantificación de volumen (m^3) y peso (t) de materiales por cada componente
- Asignación de coeficientes de agua incorporada por cada componente
- Comparación entre sistemas constructivos por cada componente

El inventario de materiales se realizó con base en el registro y caracterización de cada uno de los componentes que integran cada sistema constructivo, considerando la forma, las dimensiones y los materiales que constituyen la cimentación, columnas, vigas, pisos, muros y cubiertas. Dicha información permitió cuantificar el volumen (m^3) de los materiales por cada componente. Posteriormente, se determinó el peso (t) de los materiales por cada componente al cruzar la información del volumen de cada material con la del peso volumétrico (t/m^3) de materiales de construcción, sugerido por la base de datos de CEMEX (2005).

En la Tabla 2, se observa un ejemplo de la cuantificación de volumen y peso de los materiales empleados en la cimentación del SBT y del SCC. El manejo de los datos en la tabla se ajusta con la unidad de medida requerida para la asignación de los coeficientes de agua incorporada en kilolitros por volumen de material (kL/m^3) y en kilolitros por peso de material (kL/t).

Sistema	Componente	Materiales	Volumen	CEMEX	Peso
SBT	Cimientos	Concreto 20 MPa	0,48 m^3	-	-
		Acero	0,0057 m^3	7,9 (t/m^3)	0,045 t
SCC	Cimientos	Concreto 20 MPa	1,72 m^3	-	-
		Acero	0,025 m^3	7,9 (t/m^3)	0,19 t

Una vez que se ha cuantificado el volumen y peso de los materiales por cada componente, se asignaron los coeficientes de agua incorporada expresados en kL/t y en kL/m^3 , para determinar la cantidad de kL consumida por componente de cada sistema constructivo. Los

Tabla 2

Cuantificación de peso y volumen de los materiales empleados en los cimientos de cada sistema constructivo

Nota. Elaborado a partir de CEMEX (2005).

coeficientes se retomaron del trabajo realizado por Crawford y Treloar (2010), por tratarse de una base de datos reconocida a nivel mundial que incluye un amplio listado de materiales de construcción convencionales usados en la edificación contemporánea. En tanto, para establecer los coeficientes de agua incorporada de la tierra, se retomaron datos referidos en publicaciones internacionales de la Red PROTERRA (Neves & Borges, 2011). Por último, los coeficientes de algunos agregados vegetales, como la paja, se retoman del amplio trabajo realizado por Mekonnen y Hoekstra (2010).

En la Tabla 3, se ejemplifica la asignación de los coeficientes de agua incorporada en los materiales que integran la cimentación del SBT y del SCC.

Tabla 3
Asignación de coeficientes de agua incorporada y consumo total de agua en la cimentación de cada sistema constructivo

Nota. Elaborado a partir de Crawford y Treloar (2010).

Sistema	Componente	Volumen/ peso de materiales	Crawford y Treloar	Crawford y Treloar	Agua incorporada
SBT	Cimientos	0,48 m ³ de concreto 20 MPa	10,98 kL/m ³	-	5,29 kL
		0,045 t de acero	-	98,64 kL/t	4,46 kL
	Total				9,76 kL
SCC	Cimientos	1,72 m ³ de concreto 20 MPa	e	-	18,92 kL
		0,19 t de acero	-	98,64 kL/t	20,03 kL
	Total				38,94 kL

Finalmente, a partir de la elaboración de tablas y gráficos, se analizaron y compararon los resultados de agua incorporada. Esto permitió generar información sobre el consumo total de agua de cada sistema constructivo y de cada componente, así como del consumo hídrico por metro cuadrado de los sistemas analizados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 7, se expresan de manera comparativa los resultados parciales y totales del consumo hídrico por componente de cada sistema constructivo.

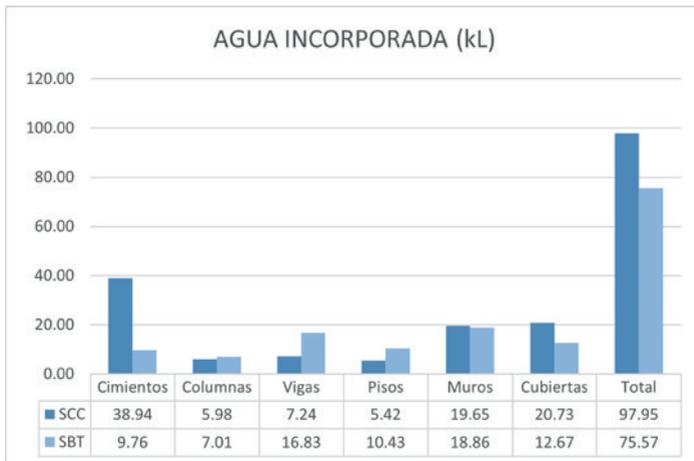


Figura 7

Consumo de agua incorporada (kL) de componentes por cada sistema constructivo

Cimientos

El agua incorporada en la cimentación del SCC es de 38,94 kL, mientras que la del SBT es de 9,76 kL. Esto indica que la cimentación del segundo sistema tiene un consumo hídrico mucho menor que la del primero, con una diferencia de 29,18 kL, que equivale a un consumo de -74,9 %; es decir, consume una cuarta parte de agua. Aunque las dos cimentaciones son de concreto armado, la del SBT tiene un volumen mucho menor debido a que se emplearon cimientos aislados (véase la Tabla 4).

Materiales	SCC (kL)	SBT (kL)
Concreto 20 MPa	18,92	5,29
Acero	20,03	4,46
Total	38,94	9,76

Tabla 4

Agua incorporada en la cimentación por componente de cada sistema constructivo

Columnas

El agua incorporada de las columnas del SCC es de 5,98 kL, en tanto que la del SBT es de 7,01 kL. Aunque con un pequeño margen, las columnas del SCC consumen menos agua que las del SBT, con una diferencia de 1,03 kL, que representa -14,6 %. Si bien el volumen de materiales empleados en las columnas del SBT es mucho menor, existe tal diferencia porque el acero consume más agua que el concreto en su proceso de fabricación (véase la Tabla 5).

Tabla 5

Agua incorporada en las columnas por componente de cada sistema constructivo

Materiales	SCC (kL)	SBT (kL)
Concreto 25 MPa	2,49	-
Acero	3,48	7,01
Total	5,98	7,01

Vigas

El agua incorporada de las vigas del SCC es de 7,24 kL; en contraste, la del SBT es de 16,83 kL. Las vigas del primer sistema tienen menor consumo hídrico que las del segundo, con una diferencia de 9,59 kL, que representa -56,9 %. Así como en el caso de las columnas, aunque el volumen de materiales del SBT es menor, se obtiene un mayor consumo de agua debido a que los procesos de fabricación del acero implican un gasto hídrico más elevado en comparación con el del concreto (véase la Tabla 6).

Tabla 6

Agua incorporada en las vigas por componente de cada sistema constructivo

Materiales	SCC (kL)	SBT (kL)
Concreto 15 MPa	3,6	-
Acero	3,64	16,83
Total	7,28	16,83

Pisos

El agua incorporada del piso del SCC es de 5,42 kL, mientras que la del SBT es de 10,43 kL. Esto revela que el piso del primer sistema consume menos agua, con una diferencia de 5,01 kL, que representa -48 %. La razón es que el entramado de madera que soporta el piso del SBT tiene un mayor volumen de materiales. Aunque ambos componentes poseen el mismo consumo de agua incorporada relacionada con el acero, la diferencia radica en que la madera puede llegar a tener mayores coeficientes de agua incorporada por volumen de material en comparación con el concreto. Sin embargo, el consumo hídrico también podría resultar similar, ya que, si se aumenta la resistencia a la compresión del concreto, también se incrementan sus coeficientes de agua incorporada (véase la Tabla 7).

Tabla 7

Agua incorporada en los pisos por componente de cada sistema constructivo

Materiales	SCC (kL)	SBT (kL)
Concreto 15 MPa	4,55	2,27
Acero	0,87	0,87
Madera	-	7,29
Total	5,42	10,43

Muros

El agua incorporada de los muros del SCC es de 19,65 kL, mientras que la del SBT en el mismo componente es de 18,86 kL. Los datos indican que los muros del segundo sistema consumen un poco menos de agua en comparación con los del primero, con una diferencia de 0,79 kL, que representa -4 %.

Aunque el consumo de agua incorporada en los muros de ambos sistemas constructivos es similar, los datos correspondientes al SBT se podrían reducir de manera significativa cambiando la paja por otro material estabilizante. Puesto que la paja de trigo consume 342 kL/t, podría ser sustituida por otras fibras naturales de menor huella hídrica. Sin embargo, es importante considerar que la paja de trigo empleada para construir es un desecho en la cadena de producción de alimentos. Esto quiere decir que los coeficientes de agua incorporada de la paja podrían ser mucho menores en el contexto de la edificación (véase la Tabla 8).

Material	SCC (kL)	SBT (kL)
Block de concreto	18,44	-
Mortero	1,21	-
Acero	-	1,6
Arena	-	0,39
Madera	-	9,26
Tierra	-	0,69
Paja	-	6,93
Total	19,65	18,86

Tabla 8

Agua incorporada en los muros por componente de cada sistema constructivo

Cubiertas

El agua incorporada en la cubierta del SCC es de 20,73 kL, en tanto la del SBT es de 12,67 kL. Esto apunta a que la cubierta del SBT tiene un menor consumo hídrico en comparación con la del SCC, con una diferencia de 8,06 kL, que representa -38,8 %. La diferencia en este componente resulta menor para el SBT debido a que en mayor medida usa madera para soportar la cubierta, mientras que la del SCC emplea concreto armado. Tal diferencia se explica por el mayor consumo de poliestireno y acero en el SCC, ya que sus coeficientes de agua incorporada pueden llegar a ser hasta cinco veces mayores en comparación con los de la madera (véase la Tabla 9).

Tabla 9
*Agua incorporada
 en las cubiertas
 por componente
 de cada sistema
 constructivo*

Material	SCC (kL)	SBT (kL)
Concreto 20 MPa	8,25	-
Concreto 15 MPa	-	3,09
Acero	4,32	1,18
Poliestireno	8,16	-
Madera	-	8,4
Total	20,73	12,67

Totales

El agua incorporada total del SCC es de 97,95 kL, mientras que la del SBT es de 75,57 kL. Los datos finales indican que el SBT tiene un menor consumo de agua incorporada en sus materiales, con una diferencia de 22,38 kL, que representa $-22,8\%$; es decir que el modelo experimental construido con entramados de tierra consume menos agua en comparación con el sistema constructivo convencional.

Tomando en consideración que el área de cada modelo es de 10 m^2 , se deduce que el SCC, que solo emplea materiales industrializados, consume $9,79\text{ kL/m}^2$. En tanto el SBT, conceptualizado como un sistema mixto que emplea materiales naturales e industrializados, representa un consumo de $7,55\text{ kL/m}^2$. Tal resultado es menor al encontrado por Sathya (2023), que indica un valor de 11 kL/m^2 para edificios residenciales de mediana altura con cimientos poco profundos. Esto justifica la oportunidad que tienen los sistemas mixtos para considerarse como una opción de construcción sostenible.

En cuanto al mayor consumo hídrico por componente del SCC, la cimentación es el elemento con más agua incorporada con 38,94 kL. En contraste, el componente con menor agua incorporada fue el piso, con 5,42 kL, que muestra una diferencia de $-33,52\text{ kL}$, que representa -86% . Si bien ambos componentes están integrados por concreto armado, el volumen de concreto y acero en el piso es mucho menor que en la cimentación, con una diferencia porcentual de $-73,8\%$ y de -96% , respectivamente (véase la Figura 6).

En cuanto al mayor consumo de agua por componente del SBT, los muros son el componente con mayor agua incorporada, con 18,86 kL. Por el contrario, el componente con menor consumo hídrico son las columnas, con 7,01 kL, con una diferencia de $-11,85\text{ kL}$, que representa -62% . Aunque el acero empleado en las columnas tiene un coeficiente

de agua incorporada mayor que el de la madera, la diferencia radica en el mayor volumen de madera, con $0,57 \text{ m}^3$, contra un volumen de $0,009 \text{ m}^3$ de acero. Sin embargo, al hacer una comparación de la huella hídrica entre los muros del *block* de concreto del SCC frente a los muros del SBT, se obtiene una ligera diferencia negativa de $0,79 \text{ kL}$, que representa -4% en favor del SBT (véase la Figura 6).

Finalmente, en la Tabla 10 se observa una comparación del agua consumida por los materiales empleados en cada sistema constructivo. En el caso del SCC, el concreto es el material que más agua consume, con un total de $56,24 \text{ kL}$, mientras que en el SBT el material con más gasto hídrico fue el acero.

Materiales	SCC (kL)	SBT (kL)
Acero	32,34	31,96
Concreto	56,24	10,65
Mortero	1,21	-
Poliestireno	8,16	-
Arena	-	0,39
Madera	-	24,96
Tierra	-	0,69
Paja	-	6,93
Total	97,95	75,57

Tabla 10

Agua incorporada por material de cada sistema constructivo

Si bien el volumen total de los materiales empleados en el SBT es de $4,38 \text{ m}^3$, los industrializados representan un volumen del $26,2 \%$, con $1,15 \text{ m}^3$, con un consumo de $42,6 \text{ kL}$. En cambio, el volumen de los materiales naturales representa $73,8 \%$, con $3,23 \text{ m}^3$, con un consumo de $32,97 \text{ kL}$. Aunque el volumen de los materiales naturales sea hasta tres veces mayor que el de los industrializados en un sistema constructivo mixto, el consumo de agua continúa por debajo del correspondiente a los industrializados. De estos resultados se infiere que un sistema constructivo mixto se puede considerar sostenible cuando el volumen de los materiales industrializados es próximo al 25% del volumen total de los materiales empleados, lo cual puede servir como un indicador de sostenibilidad.

Por otro lado, aunque generalmente se cree que los materiales de origen natural son ecológicos en todo sentido, no siempre es así. Si bien desde la perspectiva energética la madera y la paja tienen coeficientes

negativos de energía incorporada y de emisiones de CO₂, a diferencia de los materiales industrializados que no tienen la cualidad de absorber carbono (González & Guerrero, 2022), desde el plano hídrico el uso excesivo de materiales como la madera y la paja, que consumen agua azul durante su proceso de cultivo, puede resultar insostenible por sus altos coeficientes de agua incorporada, en comparación con otros que solo emplean agua verde o de lluvia.

No obstante, entre los materiales analizados, indiscutiblemente la tierra como material de construcción es el que resulta más sostenible gracias a sus bajos coeficientes de agua y energía incorporada, ya que solo consume 0,35 kL/t de agua (Neves & Borges, 2011) y 0,15 MJ/kg de energía, además de presentar coeficientes negativos de emisiones de dióxido de carbono con -12 g CO₂/kg (Alcorn, 2010, como se citó en González & Guerrero, 2022). Por tanto, en la mayor medida en que se emplee la tierra como material de construcción, mejores serán los beneficios en términos de construcción sostenible.

CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos de la edificación y análisis de un módulo realizado con el sistema de bajareque tecnificado, fue posible evaluar comparativamente el agua incorporada considerando la superficie edificada, de manera que se definió que el sistema convencional consume cerca de 10 kL/m², mientras el SBT 7,5 kL/m². Cabe mencionar que los datos corresponden a edificaciones de tipo habitacional, en obra gris, y que los consumos se podrían elevar según el tipo de acabados interiores y exteriores para pisos, muros y techos. Sin embargo, como se ha demostrado en este análisis, el uso de revoques de tierra como acabado final también tendría como resultado un menor consumo de agua en comparación con los revoques de mortero cemento-arena, ampliamente usados en la construcción convencional.

Tomando como referencia la superficie de una vivienda social de 60 m², se puede inferir que el SCC tendría un consumo hídrico de hasta 600 000 litros, mientras que el SBT tendría aproximadamente 450 000 litros de agua incorporada. Si se toma como referencia una dotación mínima de 100 litros por persona al día, el excedente diferencial consumido por el SCC de 150 000 litros sería equivalente al consumo de agua de una persona hasta por cuatro años o de un año para una familia de cuatro integrantes. En el escenario de la producción agrícola,

tal excedente de agua sería el necesario para cultivar cerca de media tonelada de hortalizas o aproximadamente dos toneladas de maíz.

Si estos datos se relacionan con la cantidad de viviendas que se habrán de edificar en los próximos años, es evidente el destacable potencial de desarrollo que podría tener el uso de la tierra como material constructivo, así como la mejora de sistemas constructivos mixtos como el SBT. Si bien la tierra es un recurso ampliamente disponible en todo el mundo, en el norte de México tiene un valor adicional dada la grave problemática que se espera enfrentar con relación a la escasez de agua en la región. Este recurso puede permitir la construcción de viviendas con comportamientos bioclimáticos muy bien adaptados, edificadas a costos razonables, sin consumir demasiada energía y con bajas emisiones de CO₂, además de un significativo ahorro de agua, tal como se demuestra en este análisis.

En este sentido, el sistema de bajareque tecnificado, por su ahorro de agua, demuestra ser una opción viable para contribuir a la sostenibilidad de los recursos hídricos de países como México y Perú, entre otros de América Latina, que poseen territorios con condiciones climáticas áridas y en los que se pronostican escenarios futuros de estrés hídrico.

Desde otra perspectiva, el SBT puede contribuir a la reducción del déficit habitacional en países donde imperan las prácticas de autoproducción habitacional. La versatilidad, ligereza y costo del sistema constructivo lo hace idóneo para la edificación de nuevas viviendas y para adaptarse técnicamente a las existentes bajo un modelo de progresividad. De esta manera, también se podría ayudar a la reducción de la expansión urbana que acontece en las grandes ciudades de América Latina, a partir un modelo de vivienda que promueve la consolidación de zonas urbanas con bajos índices de densificación.

REFERENCIAS

- Banco Mundial. (2020). *Extracción anual total de agua dulce*. <https://datos.bancomundial.org/indicador/ER.H2O.FWTL.K3?end=2020&start=2014>
- Bardhan, S., & Choudhuri, I. (2016). Studies on virtual water content of urban buildings in India. *Indian Journal of Science and Technology*, 9(6), 1-8. <https://indjst.org/articles/studies-on-virtual-water-content-of-urban-buildings-in-india>
- CEMEX. (2005). *Manual del constructor*. Talleres de Proceso Gráfico.

- Crawford, R. (2022, 1 de diciembre). *Embodied water in construction*. Australian Institute of Architects. <https://acumen.architecture.com.au/environment/water/embodied-water-in-construction/>
- Crawford, R., & Pullen, S. (2011). Life cycle water analysis of a residential building and its occupants. *Building Research & Information*, 39(6), 589-602. <https://doi.org/10.1080/09613218.2011.584212>
- Crawford, R., & Treloar, G. (2005). An assessment of the energy and water embodied in commercial building construction. En *Australian Life Cycle Assessment Conference* (pp. 1-10). https://dro.deakin.edu.au/articles/conference_contribution/An_assessment_of_the_energy_and_water_embodied_in_commercial_building_construction/20548017
- Crawford, R., & Treloar, G. (2010). *Database of embodied energy and water values for materials*. University of Melbourne.
- Gerbens-Leenes, P., Hoekstra, A., & Bosman, R. (2018). The blue and grey water footprint of construction materials: Steel, cement and glass. *Water Resources and Industry*, 19, 1-12. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212371717300458?via%3Dihub>
- 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. <https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i11.177>
- Guerrero, L. F. (2020). El uso de tierra modelada en la intervención de componentes constructivos de adobe. *Intervención*, 2(22), 131-187. <https://doi.org/10.30763/Intervencion.236.v2n22.15.2020>
- Henneberg, A. (2014). Tres pasos para la recuperación de la arquitectura de tierra en el estado Zulia, Venezuela. En F. J. Sandoval & J. L. Sáinz (Coords.), *Construcción con tierra. Investigación y documentación. XI CIATTI 2014. Congreso de Arquitectura de Tierra en Cuenca de Campos* (pp. 235-242). <https://www5.uva.es/grupotierra/publicaciones/digital/libro2015/024henneberg.pdf>
- Hoekstra, A., Chapagain, A., Aldaya, M., & Mekonnen, M. (2011). Manual de evaluación de la huella hídrica. https://www.waterfootprint.org/resources/TheWaterFootprintAssessmentManual_Spanish.pdf
- Kibert, C. J. (2013). *Sustainable construction: Green building design and delivery*. Wiley.
- Maddocks, A., Young, R. S., & Reig, P. (2015, 26 de agosto). *Ranking the world's most water-stressed countries in 2040*. World Resources Institute. <https://www.wri.org/insights/ranking-worlds-most-water-stressed-countries-2040>
- McCormack, C., Treloar, G., Palmowski, L., & Crawford, R. (2007). Modelling direct and indirect water requirements of construction. *Building Research & Information*, 35(2), 156-162. <https://doi.org/10.1080/09613210601125383>

- Mekonnen, M., & Hoekstra, A. (2010). *The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. Volume 1: Main report*. UNESCO-IHE. <https://www.waterfootprint.org/resources/Report47-WaterFootprintCrops-Vol1.pdf>
- Miller, S. A., Horvath, A., & Monteiro, P. J. M. (2018). Impacts of booming concrete production on water resources worldwide. *Nature Sustainability*, 1, 69-76. <https://doi.org/10.1038/s41893-017-0009-5>
- Neves, C., & Borges, O. (Orgs.). (2011). *Técnicas de construcción con tierra*. PROTERRA. https://redproterra.org/wp-content/uploads/2020/05/4a_PP-Tecnicas-de-construccion-con-tierra_2011.pdf
- ONU-AGUA (2019). *Informe de políticas de ONU-AGUA sobre el cambio climático y el agua*. https://www.unwater.org/sites/default/files/app/uploads/2019/12/UN-Water_PolicyBrief_Water_Climate-Change_ES.pdf
- Satthya, A. (2023). A review of water footprint in building construction. *Journal of Research in Infrastructure Designing*, 6(1), 20-24. <https://zenodo.org/records/7820336>
- Smakhtin, V., Revenga, C., & Döll, P. (2004). *Taking into account environmental water requirements in global-scale water resources assessments*. <https://www.iwmi.cgiar.org/assessment/files/pdf/publications/ResearchReports/CARR2.pdf>
- Treloar, G., McCormack, M., Palmowski, L., & Fay, R. (2004). Embodied water of construction. *The Environment Design Guide*, 1-8. <https://www.jstor.org/stable/26149125>
- UN-Water. (2019). *Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2019. No dejar a nadie atrás*. UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000367304>
- UN-Water. (2021). *Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2021. El valor del agua*. UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000378890>
- UN-Water (2022). *Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2022. Aguas subterráneas, hacer visible el recurso invisible*. UNESCO. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380726_spa

