

Hacia una concepción de la **Vivienda y Hábitat** en un ambiente construido

Coordinadores

Raúl Pavel Ruíz Torres
Heidy Gómez Barranco
Luz Cecilia Rodríguez Sánchez



HACIA UNA CONCEPCIÓN
DE LA VIVIENDA Y HÁBITAT
EN UN AMBIENTE CONSTRUIDO

Se agradece al CONAHCYT, por el financiamiento del cual este libro es producto, del Proyecto de Investigación e Incidencia (PRONAI) denominado “Desarrollo de un modelo de producción social replicable de vivienda y hábitat” de número 321260 de la “Convocatoria 2022 Proyectos Nacionales de Investigación e Incidencia para una Vivienda Adecuada y Acceso Justo al Hábitat”. Este proyecto en el marco de los Programas Nacionales Estratégicos (PRONACES) en el eje de vivienda.

HACIA UNA CONCEPCIÓN DE LA VIVIENDA Y HÁBITAT EN UN AMBIENTE CONSTRUIDO



Universidad Autónoma de Chiapas

Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca

COORDINADORES

Raúl Pavel Ruíz Torres

Heidy Gómez Barranco

Luz Cecilia Rodríguez Sánchez

HACIA UNA CONCEPCIÓN DE LA VIVIENDA Y HÁBITAT EN UN AMBIENTE CONSTRUIDO

D.R. © 2023 Raúl Pavel Ruíz Torres
Heidy Gómez Barranco
Luz Cecilia Rodríguez Sánchez

Edición: **Luis Adrián Maza Trujillo**
Diseño editorial, de cubierta, maquetación: **Bernardo O. R. De León**

ISBN UNACH: **978-607-561-183-9**
ISBN UABJO: **978-607-8815-24-1**

D.R. © 2023 Universidad Autónoma de Chiapas
Boulevard Belisario Domínguez km 1081, sin número, Terán, C. P. 29050,
Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.
Miembro de la Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana con número
de registro de afiliación: 3932.
Miembro de la Red Nacional de Editoriales Universitarias y Académicas de
México, Altexto y de la Asociación de Editoriales Universitarias de América Latina
y El Caribe, EULAC.

D.R. © 2023 Universidad Autónoma "Benito Juárez" de Oaxaca
Avenida Universidad s/n, colonia Cinco Señores, C.P. 68120, Oaxaca de
Juárez, Oaxaca, México · Teléfono 951 50 20700 ext. 20148

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación o de la Universidad Autónoma de Chiapas; la información y análisis contenidos en esta publicación son estrictamente responsabilidad de los autores. Se autoriza la reproducción parcial o total de los textos aquí publicados, siempre y cuando se haga sin fines comerciales y se cite la fuente completa. Las imágenes de portada, la composición de interiores y el diseño de cubierta son propiedad de la Universidad Autónoma de Chiapas.

Esta publicación fue evaluada por pares académicos, mediante un proceso a doble ciego.

Hecho en México
Made in Mexico

ÍNDICE

Presentación	15
---------------------------	-----------

La vivienda rural de Colima. Análisis de la calidad del ambiente interior

Carlos Javier Esparza López, Alfonso Cabrera Macedo, Jorge Armando Ojeda Sánchez y Carlos Escobar del Pozo

Resumen	17
Introducción	18
Ubicación de los casos	21
Casos de estudio	24
Materiales e instrumentos	31
Calidad del ambiente interior	33
Temperatura	33
Temperatura de globo negro	35
Dióxido de carbono	38
Conclusiones	40
Referencias	42

Huella de carbono incorporado en la vivienda periurbana de León, Guanajuato, México

Víctor Alberto Arvizu Piña, Luis Arturo Vargas Robles, Edwin Israel Tovar Jiménez y Francisco José Martín del Campo Saray

Resumen	47
Introducción	49
Metodología	53
Casos de estudio	53
Análisis de Ciclo de Vida (ACV)	59
Análisis de inventario	62
Evaluación de impacto	63
Resultados	64
Conclusiones	69
Referencias	72
Anexos	77

Viviendas de interés social en Morelia: características de espacios y materiales pétreos

Marco Antonio Navarrete Serás, Elia Mercedes Alonso Guzmán, Wilfrido Martínez Molina, Hugo Luis Chávez García, Mauricio Arreola Sánchez y Jorge Alberto Borrego Pérez

Resumen	83
Introducción	85
Uso de los materiales pétreos en la región	87
Estadística de la vivienda de interés social y sus espacios	89
Materiales empleados	91
Ubicación	93
Materiales	93
Caracterización física	95
Pruebas al concreto hidráulico	97
Pruebas mecánicas y no destructivas	98

Pruebas en el uso de materiales pétreos	104
Conclusiones.....	107
Referencias	108
Anexos.....	111

Sistema de enfriamiento convectivo en clima cálido subhúmedo en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

Mareny Arredondo Martínez

Resumen	113
Introducción.....	115
Ubicación y región climática del objeto de estudio.....	120
Características de la célula experimental	121
Descripción del proyecto.....	122
Proceso de mediciones térmicas.....	126
Resultados	131
Conclusiones.....	140
Referencias	142

Bloques de tierra compactada y vivienda de producción social: Propuesta experimental desde la academia en Torreón, Coahuila

Jaime Andrés Quiroa Herrera, Gabriel Castañeda Nolasco, Jorge Villanueva

Solís y Alleck J. González Calderón

Resumen	145
Introducción.....	147
Desarrollo	149
Muestras de tierra	150
Estabilización	150
Elaboración de las piezas	152
Edificación	153
Propuesta de vivienda	153

Localización.....	155
Planta arquitectónica.....	155
Alzados.....	156
Proceso constructivo y materiales.....	158
Estructura cimentación.....	158
Conclusiones.....	163
Referencias.....	165

Desarrollo de nuevas tecnologías para fabricación de ladrillos a partir de residuos de gran escala

Pedro Antonio Márquez Aguilar, Marina Vlasova, Abigail Parra Parra y Verónica González Molina

Resumen.....	169
Introducción.....	170
Metodología.....	171
Resultados.....	174
Propiedades de las muestras de la serie 1.....	174
Propiedades de las muestras de la serie 2.....	176
Propiedades de las muestras de la serie 3.....	179
Propiedades de las muestras de la serie 4.....	181
Propiedades de las muestras de la serie 5.....	184
Propiedades de las muestras de la serie 6.....	187
Conclusiones.....	189
Referencias.....	191

Uso de adiciones en morteros para incidir en las prestaciones físico-mecánicas de viviendas en serie, fomentado la economía circular

Mauricio Arreola Sánchez, Wilfrido Martínez Molina, Hugo Luís Chávez García,
Jorge Alberto Borrego Pérez, Marco Antonio Navarrete Serás y Elía Mercedes
Alonso Guzmán

Resumen	193
Introducción	194
Problemática de los aspectos estéticos y de habitabilidad de las viviendas.....	197
Desarrollo de nuevos aditivos eco amigables para morteros base cemento portland (puzolanas)	200
Comportamiento mecánico de morteros con adiciones de origen residual	201
Compresión simple	201
Flexión estática	204
Tensión directa	206
Adherencia	208
Comportamiento físico de morteros con adiciones de origen residual.....	209
Velocidad de pulso ultrasónico	210
Resistividad eléctrica	213
Comportamiento químico de morteros con adiciones de origen residual	216
Ataque de sulfato de sodio anhidro	217
Carbonatación acelerada	221
Conclusiones.....	223
Referencias	225

Estudio de eficiencia térmica, acústica y lumínica de sistemas de ventanas en la vivienda periurbana del valle de México

Aníbal Figueroa Castrejón, Víctor Armando Fuentes Freixanet, Gloria María

Castorena Espinosa, Gerardo Aranda Barajas y Brenda Yazmín Juárez Guerrero

Resumen	231
Introducción	232
Análisis de climático regional	234
Proporción vano-macizo	238
Materiales de perfiles y marcos	238
Tipos de vidrio	239
Áreas de ventilación	240
Sistema de aislante móvil (cortinas y postigos).....	240
Sistema de protección solar.....	241
Orientación	242
Caso de estudio y modelos de análisis	249
Coefficiente de transferencia de calor por conducción	250
Transferencia de calor por radiación	255
Comportamiento acústico	257
Ventilación	262
Conclusiones y vinculación con el proyecto de investigación.....	263
Referencias	265

Propiedades térmicas de materiales tradicionales en el estado de Colima, clima cálido subhúmedo

Jorge Armando Ojeda Sánchez, Carlos Javier Esparza López y Alfonso Cabrera

Macedo

Resumen	269
Introducción	271
Metodología.....	274
Análisis de resultados	278

Conclusiones.....	284
Referencias	285

Estudio de habitabilidad en tres localidades de la mixteca alta de Nochixtlán, Oaxaca

Heidy Gómez Barranco, Raúl Pavel Ruíz Torres, Marco Antonio Hernández

Escampa-Abarca y Luz Cecilia Rodríguez Sánchez

Resumen	289
Introducción.....	290
Problemática actual.....	293
Estudios de caso.....	296
Vivienda modelo.....	296
Termografía digital	301
Estación meteorológica portátil.....	304
Metodologías aplicadas in situ.....	305
Conclusiones.....	309
Referencias	314



PRESENTACIÓN

El fenómeno de la vivienda, relacionado con aspectos de sustentabilidad, se ha convertido para investigadores y profesionales en parte de estudios de manera integral y multidisciplinario, es un gran esfuerzo que representan un avance invaluable hacia lograr el desarrollo sustentable de hábitat de nuestro país.

Este libro cuenta con 10 capítulos, contribuciones seleccionadas y rigurosamente revisadas por invitados expertos en las áreas para el libro *Hacia una concepción del hábitat y materiales en un ambiente construido*.

Se publican artículos científicos, producto de un proyecto a nivel nacional del proyecto “Desarrollo de un modelo de producción social replicable de vivienda y hábitat”, con numero de solicitud 321260, del Proyecto PRONACES-CONACYT, novedoso en las áreas relacionadas con la arquitectura, ciencias del hábitat e ingenierías.

Esperemos que este número cumpla con las expectativas de los autores, y que tenga una buena recepción por parte de los lectores.

Dra. Heidy Gómez Barranco
Dr. Raúl Pavel Ruíz Torres



LA VIVIENDA RURAL DE COLIMA. ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL AMBIENTE INTERIOR

Carlos Javier Esparza López¹
Alfonso Cabrera Macedo²
Jorge Armando Ojeda Sánchez³
Carlos Escobar del Pozo⁴

Resumen

La vivienda rural de Colima ha sido poco estudiada en la actualidad. Los procesos constructivos convencionales han sustituido paulatinamente a los saberes tradicionales bajo la creencia de que son mejores en términos estructurales y estéticos. Este proceso de adopción-sustitución de tecnología ha dado paso al olvido de técnicas adecuadas al contexto donde se implantaban. Esta investigación tuvo como objetivo estudiar los sistemas constructivos de la vivienda rural en tres regiones claramente marcadas del estado con la finalidad de analizar la calidad del ambiente que generan dichas envolventes y su relación con el proceso de autoconstrucción

1 Profesor de Tiempo Completo, Universidad de Colima, cesparza@ucol.mx

2 Profesor de Tiempo Completo, Universidad de Colima.

3 Profesor de Tiempo Completo, Universidad de Colima jojedal@ucol.mx

4 Profesor de Tiempo Completo, Universidad de Colima cescobar@ucol.mx



y producción de la vivienda. Se analizaron 11 casos: 3 en la región centro, llamada a su vez valle, 4 en la región norte, también llamada montaña, y 4 en la región sur–costa. Como variables ambientales se monitorearon la temperatura de bulbo seco, la temperatura de globo negro, la humedad relativa, la velocidad del viento, el ruido, la iluminación y el dióxido de carbono como calidad del aire. Además de las variables ambientales, se realizó un levantamiento de los sistemas constructivos, del partido arquitectónico y se entrevistaron a habitantes de las viviendas para conocer el grado de maduración del conocimiento constructivo-tecnológico de sus edificaciones. Los resultados mostraron que el desempeño interior de los espacios está fuertemente relacionado con el contexto exterior. Respecto a la producción de la vivienda, es notoria la aspiración de cambiar los materiales tradicionales por industrializados como ideal de una mejor calidad de vida.

18

Introducción

El fenómeno de la vivienda ha sido sumamente estudiado por la relevancia que implica esta tipología de arquitectura en varios ámbitos de la vida humana que van desde lo puntual, como un refugio elemental en lo físico y emocional para el ser que la ha-



bita, hasta la unidad básica de algo sumamente complejo como lo es la ciudad y los entornos urbanos.

La vivienda ha sido objeto de estudios que han investigado desde los diversos sistemas constructivos para mejorar su desempeño térmico o su eficiencia energética mediante mejoras en los materiales o propuestas de diseño basadas en técnicas bioclimáticas (Aguillón, 1996; Alba, Herrera y Esparza-López, 2021; García-Solórzano, Esparza-López y Al-Obaidi, 2020; Gómez-Amador, et al., 2017; Portillo, 2008; Rodrigo, et al., 2012) hasta la interrelación que se genera entre los(as) habitantes de la misma entre ellos(as) o con las condiciones ambientales (López-Escamilla, Herrera-Limones y León-Rodríguez, 2022; Esparza-López, et al., 2012).

Empero, lo que resulta innegable, es que la gran mayoría de los estudios que han trabajado a la vivienda se han enfocado en el análisis de la casa urbana dejando de lado a la morada rural. Lo anterior puede obedecer a la facilidad de acceder a un gran número de casos para su estudio, a la posibilidad de generalizar los resultados a partir de una muestra o a la sistematización del análisis de los materiales industrializados contra lo complejo de los vernáculos por la variedad de resultados de la manufactura casi artesanal.

Lamentablemente, dejar de lado a la vivienda rural nos imposibilita para rescatar técnicas de construcción de bajo impacto ambiental y de adaptación al entorno por parte de la edificación y

del o de la habitante. Resulta entonces importante la necesidad de indagar en los diversos saberes constructivos tradicionales, con la finalidad de ponderar su efectividad en diferentes frentes como pueden ser los estructurales, térmicos o estéticos.

En esta investigación se aborda el tema de la vivienda rural, del o de la habitante y de la relación que existe entre ambos con la finalidad de conocer el proceso de construcción, el desempeño ambiental que provee al o a la habitante y la percepción ambiental que genera en el (la) mismo(a). Al ser estudios de caso, es difícil generalizar los resultados para extrapolarlos a la mayoría de las construcciones de este tipo, y más aún, por la diversidad de materiales, sistemas constructivos y climas en los que se encontró dicha vivienda. No obstante, la ausencia de máximas integrales se minimiza por la riqueza en la diversidad de los casos y sus múltiples respuestas de adaptación en la construcción y en el desempeño.

20

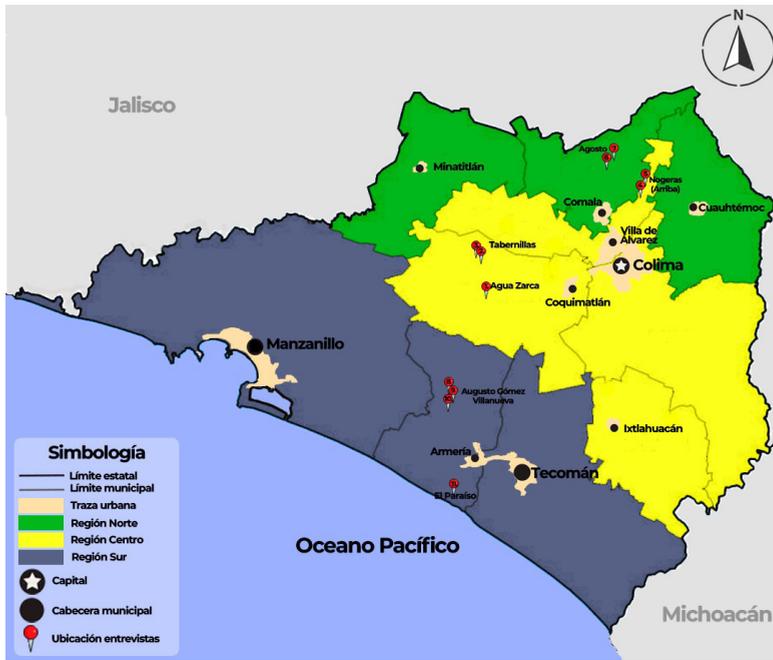
Este estudio fue desarrollado dentro del proyecto 321260 denominado “Desarrollo de un modelo de producción social replicable de vivienda y hábitat”, con apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y se alineó a los objetivos planteados dentro de dicho proyecto.

Ubicación de los casos

A nivel general, el clima de Colima es considerado como Aw que, de acuerdo con Köppen (Kottek, *et al.*, 2006) presented in its latest version 1961 by Rudolf Geiger. A huge number of climate studies and subsequent publications adopted this or a former release of the Köppen-Geiger map. While the climate classification concept has been widely applied to a broad range of topics in climate and climate change research as well as in physical geography, hydrology, agriculture, biology and educational aspects, a well-documented update of the world climate classification map is still missing. Based on recent data sets from the Climatic Research Unit (CRU) es considerado como tropical de sabana, y puntualmente con la adaptación para la República mexicana, se considera como cálido subhúmedo con lluvias en verano (García, 2004).

Sin embargo, debido a las condiciones topográficas de la región, es posible dividirlo en tres grandes regiones con distintos microclimas entre sí: la región norte (montaña), centro (valle) y sur (costa) (ver figura 1).

Figura 1. Mapa del estado de Colima con regiones y ubicación de casos de estudio



Fuente: García Fierro (2023).

22

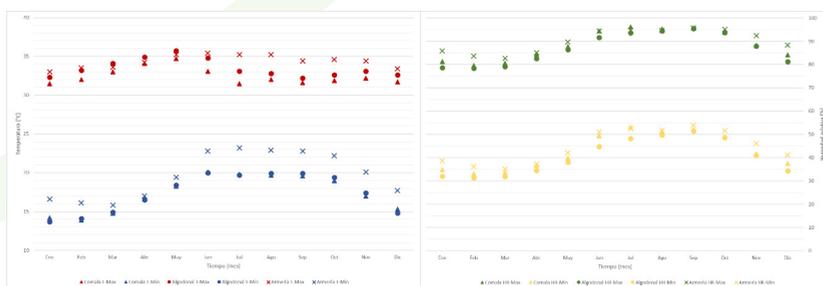
Para esta investigación se analizaron once casos repartidos en diversas localidades rurales de las tres regiones, anteriormente definidas. Los casos para la región del centro fueron tres viviendas, una en la localidad de Agua Zarca (marcador 1) y dos en la zona de Tabernillas (marcadores 2 y 3), ambas en el municipio de Coquimatlán. Para la región de montaña se estudiaron cuatro casos, dos en el ejido de El Jaboncillo (marcadores 4 y 5) en el municipio de Villa de Álvarez y dos en la localidad de Rancho de Agosto (marcadores 6 y 7) en el municipio de Comala. Finalmente, para la región de la

costa, se estudiaron cuatro moradas; tres en la localidad de Augusto Gómez Villanueva (marcadores 8, 9 y 10) y una en la localidad de El Paraíso, todas en el municipio de Armería.

Las características climáticas de cada municipio donde se realizó el estudio se pueden observar en la Figura 2. La información climática se obtuvo de las normales climatológicas reportadas por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2010b, 2010c, 2010a) mientras que las humedades relativas son estimaciones a partir de las temperaturas mediante el método presentado por Tejeda (2007).

Con una equis (X) se pueden ubicar las condiciones para el municipio de Armería, con un círculo (●) para Coquimatlán y con un triángulo (▲) para Comala. En color rojo se identifican las temperaturas máximas, en azul las temperaturas mínimas, en verde las humedades máximas y en amarillo las humedades mínimas.

Figura 2. Temperaturas y humedades relativas para las tres regiones de estudio



Fuente: Elaboración propia.



La región con mayores temperaturas y humedades se encuentra en el municipio de la costa, en Armería. Sus máximas oscilan entre los 33 °C y los casi 36 °C mientras que sus mínimas entre los 16 °C y 23 °C, aproximadamente, siendo los meses de junio a octubre donde se presentan las temperaturas más altas. La región que puede ser considerada como más fresca de las tres que se estudiaron fue la montaña (Comala y el norte del Villa de Álvarez) con máximas que oscilan entre los 31 °C y los 34.5 °C, aunque estas últimas solo se presentan en los meses de marzo, abril y mayo mientras que el resto del año están por debajo de los 32 °C. En términos de humedad, no hay grandes contrastes entre las regiones debido a que sus diferencias no superan el 10 % en ningún mes.

24

Casos de estudio

Caso 1. Agua Zarca. Esta vivienda de aproximadamente 100 m² de construcción, en un solo nivel, sobre un terreno de 300 m², se encuentra ubicada en el cruce de dos calles, por lo que cuenta con dos fachadas hacia las vialidades (ver figura 3-A). Además, de las otras dos fachadas expuestas hacia el interior del solar. Los sistemas constructivos fueron variados encontrándose para las cubiertas una sección de lámina galvanizada, otra con lámina de asbesto y otra con madera, latas, otates y tejas. Para el caso



de los muros, se pudieron encontrar muros de corteza de palma, de tabicón junteado de mezcla de cal-cemento-arena y malla ciclónica. Los pisos identificados fueron de concreto y terreno natural. El partido arquitectónico cuenta con dos habitaciones interconectadas entre sí, un espacio central semiabierto utilizado como comedor estancia, una cocina semiabierta, un baño completo y un espacio de servicios semiabierto. En ella habitan regularmente de 2 a 3 personas. Cuenta con servicios de agua potable, drenaje, energía eléctrica e internet.

Caso 2. Tabernillas 1. Esta vivienda se encuentra inmersa en la sierra (ver figura 3-B). Cuenta con dos habitáculos interconectados por un espacio techado, pero sin muros. En ambos espacios, se encuentran semienterrados debido a las características topográficas del terreno. Cuenta con menos de 40 m² de construcción. Los sistemas constructivos son a base de cubiertas de teja y carpeta asfáltica de reúso sobre estructura de otates y vigas de madera, asentadas sobre horcones como columnas. Como muros encontramos entramados de bajareque, ramas o tocones, corteza de madera de palma y recubrimientos en algunos muros con plástico negro. El firme es terreno natural. El espacio se encuentra ocupado regularmente por una o dos personas. El partido arquitectónico incluye la zona de cocina-comedor-estancia en uno de los habitáculos, el dormitorio en el otro y el sanitario en el espacio intermedio delimitado por plástico negro. No cuenta con servicios.



Caso 3. Tabernillas 2. La segunda vivienda de esta comunidad, ubicada a unos 100 metros de la anterior, también se encuentra inmersa dentro de la sierra por lo que es rústica e inmersa en un terreno de grandes dimensiones (ver figura 3-C). Los sistemas constructivos utilizados fueron una estructura metálica de travesaños y vigas donde se recibe lámina metálica. Los muros son meramente divisorios que no logran la altura del cerramiento a base de bloques de cemento-jal-arena asentados con mortero cal-cemento-arena. En algunas secciones de la vivienda no se cuenta con muros de material durable, sino con malla ciclónica para delimitar y salvaguardar las pertenencias. El partido arquitectónico cuenta con dos habitaciones, un espacio de resguardo para pertenencias, un baño, una bodega independiente de la estructura de la casa y áreas abiertas de cocina y estar. Regularmente se encuentra habitada por dos personas. No cuenta con servicios.

Caso 4. El Jaboncillo 1. Se encuentra sobre una loma al borde de una cañada (ver figura 3-D). Es una edificación de aproximadamente 70 m², construida a base de adobe en sus muros, parcialmente recubiertos con una mezcla de cal. Las cubiertas son de lámina de asbesto asentada sobre una estructura de madera que, a su vez, se asienta sobre los muros de adobe; al centro se encuentra un marco de concreto reforzado donde se asienta el centro de la cubierta. El partido arquitectónico es una habitación al centro rodeada por espacios comunes y la cocina. En ella habita una familia de 5 miembros. No cuenta con servicios.



Caso 5. El Jaboncillo 2. Esta vivienda se ubica a 200 m al sur de la anterior, dentro de un predio agrícola (ver figura 3-E). Es un esquema rectangular de 60 m² donde, al lado norte, se encuentra la cocina, prácticamente abierta en tres de sus orientaciones y con una cubierta de lámina de asbesto. Cuenta con tres pequeñas habitaciones y un pasillo que las interconecta. El sistema constructivo en muros es de tabicón de cemento-jal-arena con lámina de asbesto-cemento, asentada directamente sobre los muros. Se observaron castillos de refuerzo colocados a discreción sin criterio estructural. El firme es de concreto. El baño es el remate del pasillo en la parte sur del espacio. No cuenta con acabados. El agua la colectan en tambos, derivada de una línea de riego con servicio intermitente. No cuentan con energía eléctrica.

Caso 6. Rancho de agosto 1. La vivienda se encuentra dentro de la pequeña población y cuenta con sus cuatro fachadas expuestas (ver figura 3-F). La cubierta es de lámina de asbesto-cemento y descansa sobre una estructura de muros de mampostería de tabique y tabicón en diversos muros y cimientos de mampostería. Se observa relativo criterio estructural en dadas y castillos; el firme es de concreto; el partido arquitectónico incluye una cocina fuera de la vivienda, con cubierta de lámina de asbesto cemento, horcones y travesaños de bambú y adosada a la vivienda; en uno de los costados encontramos un pasillo techado que funciona como estancia. Al interior hay un dormitorio, un baño completo y un área de estar. Cuenta con servicios de agua potable, drenaje y energía eléctrica. La habita una persona mayor.

Caso 7. Rancho de agosto 2. Esta construcción se encuentra por debajo del nivel de calle (ver figura 3-G). Es una edificación de un nivel con 80 m² de construcción, sobre un terreno de 150m², aproximadamente. Cuenta con una cocina, 3 habitaciones, un baño separado del cuerpo principal y un pasillo que funciona como recepción. El sistema constructivo es con cubierta de lámina de asbesto-cemento sobre una estructura de madera asentada en muros de mampostería de tabique. El firme es de concreto. Cuenta con acabados hasta floteado en caras interiores de la vivienda y en algunos muros exteriores. Cuenta con los mismos servicios que la vivienda anterior. La habitan tres personas.

Caso 8. Augusto Gómez Villanueva 1. Ubicada a un costado de un arroyo fluvial, esta vivienda está constituida por dos módulos separados por un patio (ver figura 3-H). Los materiales empleados son horcones de madera, muros de madera de palma con interiores de carpeta asfáltica reusada y cubiertas de lámina plástica tipo teja. El firme es de terreno natural. Los dos módulos se encuentran sin colindancias en ninguna orientación. En el habitáculo oeste se encuentran dos habitaciones sin ventanas; con el área de la cercha superior abierta para iluminación y ventilación. En la construcción principal se encuentra una cocina semiabierta y dos habitaciones más con el mismo criterio de iluminación y ventilación.

Caso 9. Augusto Gómez Villanueva 2. A 200 metros sobre el mismo arroyo en dirección norte, se encuentra la segunda vivienda (ver figura 3-I). Al centro de un terreno de 200 m², se encuentra la vivienda que cuenta con un cuarto que cumple con todas las funciones de esta. Al exterior, adosado al este y semicubierta, se encuentra una estufa rústica de leña y una mesa. El baño se encuentra separado del cuerpo de la vivienda. Los materiales de construcción que se emplean son madera para la estructura de la casa y cubiertas, plástico negro con el que prácticamente se encuentra forrada toda la vivienda y carrizo en algunas secciones como bajareque. Todo el contorno de esta se encuentra rodeada de vegetación nativa de la región.

Caso 10. Augusto Gómez Villanueva 3. La última vivienda de la comunidad, enfrente de la anterior, separadas por una vialidad de terracería, está construida con una estructura de madera y forrada de plástico negro (ver figura 3-J). Al centro se encuentra la cocina rústica, frente a la habitación que cuenta con un único acceso y sin ventanas. De la cocina hacia el norte se accede al baño y hacia el sur a una especie de estancia con una cama como mobiliario. El firme es el terreno natural. Son 40 m² de construcción en un terreno de 150 m², aproximadamente, con la vivienda al centro y las cuatro orientaciones expuestas. En ella habita solamente una persona.

Caso 11. El Paraíso. Esta vivienda se encuentra a un par de cuadras del mar (ver figura 3-K). Está construida en dos cuerpos, uno de ellos, al este, cuenta con un espacio de almacén-taller y establo para un par de caballos; el otro habitáculo cuenta con una habitación principal totalmente cerrada sin ventanas, y otra más en el exterior de esta con solamente la cubierta, un área de cocina con cubierta y sin paredes y el baño completo. El firme en todo el espacio es terreno natural, principalmente arena. La construcción del primer habitáculo es de muros perimetrales de madera de palma y cubiertas de lámina plástica a dos aguas. El segundo es una construcción de palapa con muros perimetrales, también de madera de palma y cubierta de hoja de palma.

Figura 3. Fotografías de viviendas estudiadas A-G



Fuente: Elaboración propia.

Materiales e instrumentos

En la tabla 1 se pueden observar las variables que se registraron en los casos de estudio, así como el instrumento utilizado para su monitoreo.

Tabla 1. Variables monitoreadas y los instrumentos para su medición

#	Variable	Equipo	Características
1	Temperatura de bulbo seco	Datalogger modelo U12-012, marca onset-comp	Puede medir desde cada segundo con valores entre -20 °C y hasta los 70 °C, con una precisión de ± 0.35 °C entre los 0 °C y los 50 °C; así como una resolución de 0.03 °C a los 25 °C (Onsetcomp n.d.)
2	Humedad relativa	Datalogger modelo U12-012, marca onset-comp	Puede medir desde cada segundo con valores entre 5 % y hasta los 95 %, con una precisión de ± 2.5 % entre los 10 % y los 90 % a los 25 °C; así como una resolución de 0.05 % (Onsetcomp n.d.)
3	Temperatura de globo negro	Estación de estrés térmico HD32.2, marca Delta OHM	Sonda de temperatura de globo negro TP3276.2. Rango de medición entre -30 °C y 120 °C (DELTA OHM n.d.)
4	Iluminación	Datalogger modelo U12-012, marca onset-comp	Puede medir desde cada segundo con valores entre 1 a 4500 luxes (Onsetcomp n.d.)

continúa...

5	Ventilación	Estación de estrés térmico HD32.2, marca Delta OHM	Sonda de velocidad de viento AP3203.2, con rango de medición de velocidad de viento desde 0.02 a 5 m/s, y temperatura de 0 a 80 °C (DELTA OHM n.d.)
6	Dióxido de carbono	Monitor de calidad de aire modelo BEYHT001, marca YM	Muestreo cada segundo con rango de 0 a 6000 PPM
#	Variable	Equipo	Características
7	Sonido	Decibelímetro SLM-25 Sound Level Meter	Rango de medición de 30 a 130 dB con una precisión de ± 1.5 dB

Fuente: Elaboración propia.

Para el proceso del levantamiento de datos se utilizaron 5 dataloggers U12-012 colocados en lo más cercano al centro geométrico de los espacios y a una altura de entre 0.50 m a 1.20 m, de acuerdo con la normatividad para el monitoreo ambiental en sitio y a lo observado en la literatura referente al tema (De-dear, Leow y Foo, 1991; ISO 7726, 1998). La estación de estrés térmico HD32.2 y el decibelímetro se colocaron a una distancia de entre 0.60 m a 1.50 m de la persona encuestada en la vivienda, y a una altura de 1.10 m en caso de estar sentada y de 1.40 m en caso de estar de pie. El monitor de calidad de aire se colocó al centro geométrico de los espacios designados para cocinar o donde pudieran existir fuentes de generación de gases o baja calidad del aire y a una altura aproximada de 1.10 m (ver figura 4).

Figura 4. Levantamiento de información en caso de estudio



Fuente: Elaboración propia.

Calidad del ambiente interior

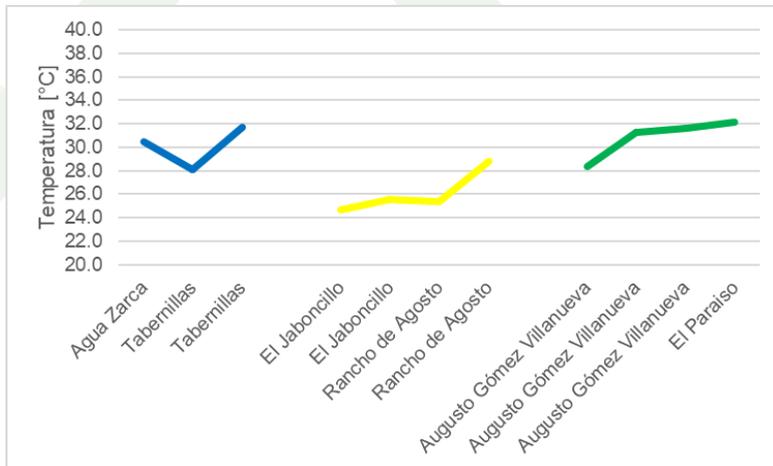
Temperatura

En términos de la temperatura de bulbo seco, se puede observar en la figura 5 el desempeño promedio de las temperaturas de bulbo seco en los 11 casos. En color azul se presentan las viviendas de la región centro, en amarillo la región norte y en verde la región sur. Como situación notable son las temperaturas que se observan en la región norte también llamada montaña.

Como era de esperarse por su configuración y topografía, las temperaturas obtenidas fueron las más bajas de todas las viviendas, con rangos entre los 24 °C y los 29 °C, mientras que las viviendas del centro y de la costa mantienen rangos entre los 28 °C y hasta los 32 °C, que pueden ser considerados como fuera de confort (ANSI - ASHRAE Standard 55, 2017).

Pese a la variedad de los sistemas constructivos adaptados a las condiciones climáticas y al diseño adecuado de igual manera, es evidente que el contexto condiciona fuertemente el desempeño interior de las viviendas, sobre todo en términos de la ventilación natural y la radiación solar. Estas variables son características de este clima y son objetivos del diseño adecuado o bioclimático.

Figura 5. Promedio de temperaturas de bulbo seco en los casos de estudio



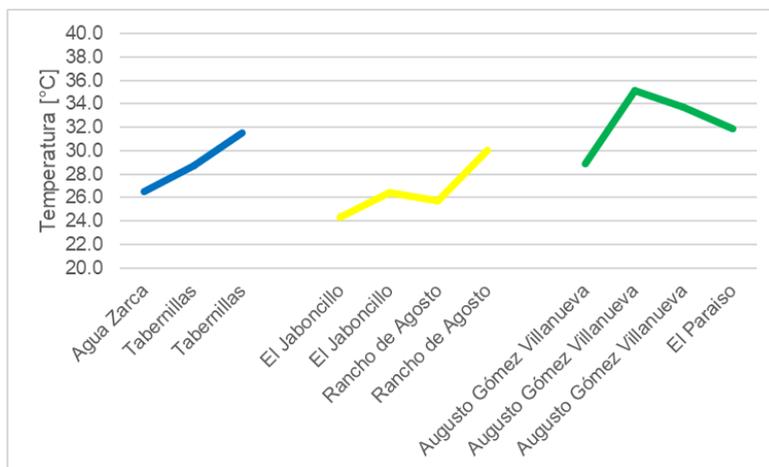
Fuente: Elaboración propia.

Temperatura de globo negro

Para conocer la temperatura que emiten los materiales que rodean al espacio, se utilizó la temperatura de globo negro (ver figura 6). Los resultados en general fueron similares a los que se registraron con la temperatura del aire. Sin embargo, se identificaron tres casos donde el desempeño fue diferente. El caso de Agua Zarca donde la temperatura de globo fue inferior, indicando que los materiales del espacio presentaron temperaturas menores a las temperaturas registradas por el aire que ingresaba a la vivienda.

Los otros dos casos registrados fueron las viviendas número 2 y 3, ubicadas en la comunidad de Augusto Gómez Villanueva. En estos escenarios, la temperatura de globo fue superior a la temperatura del aire por 3.8 °C y 2.1 °C. Analizando los sistemas constructivos de ambos casos, es posible suponer que esta elevación de la temperatura de los materiales de la envolvente que modifica el ambiente interior se debe a la utilización del plástico negro como sistema impermeable. En un clima con alta radiación solar, la utilización de materiales con colores oscuros resulta indebida, ya que se presenta un incremento elevado en su temperatura radiante.

Figura 6. Promedio de temperaturas de globo negro en los casos de estudio



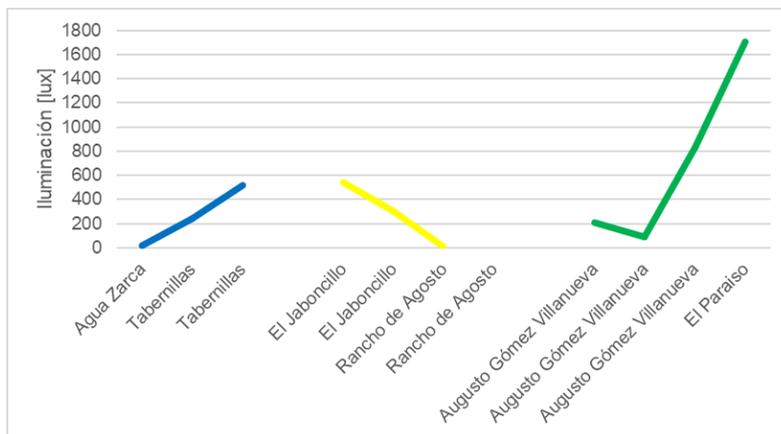
Fuente: Elaboración propia.

36

Iluminación

En el caso de la variable de iluminación, es posible observar en la figura 7 que se puede considerar que casi todos los espacios cumplen con las condiciones mínimas de iluminación, de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana (STPS, 2008).

Figura 7. Promedio de iluminación en los casos de estudio



Fuente: Elaboración propia.

El caso de Agua Zarca y la vivienda 1 en Rancho de Agosto presentaron baja iluminación de manera natural al momento de la encuesta. Por el contrario, la vivienda ubicada en El Paraíso presentó altos grados de iluminación, alcanzando en promedio más de 1700 luxes. Esto se debe a lo abierto de los espacios que no cuentan en su mayoría con muros, por lo que el albedo y el deslumbramiento es elevado al interior de la vivienda.

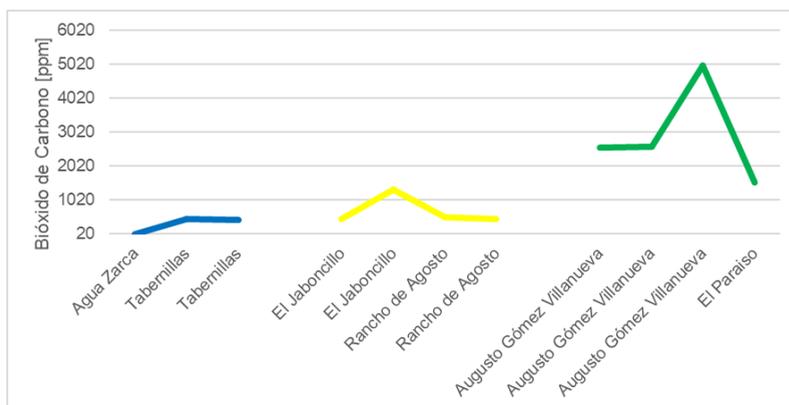
Dióxido de carbono

En el caso de la calidad del aire, se monitorearon las partes por millón (ppm) de dióxido de carbono en los espacios (ver figura 8). Para esta variable, es sumamente importante señalar las altas concentraciones ubicadas en varias de las viviendas analizadas. Prácticamente en todas se identificó la utilización de leña para cocinar los alimentos, por lo que se esperaban altas concentraciones, debido a la quema de la madera. Sin embargo, en los casos de Agua Zarca, Tabernillas 1 y 2, El Jaboncillo 1 y Rancho de Agosto 1 y 2, las concentraciones se mantuvieron por debajo de los 1000 ppm (Norma UNE-EN 13779 Ventilación en edificios no residenciales, 2005). El resto de las viviendas presentaron niveles peligrosamente altos, sobre todo la vivienda 3 en Augusto Gómez Villanueva donde alcanzó las 5000 ppm. Además, es de señalar que las tres viviendas en esta localidad presentaron los índices más altos de ppm, superando los 2500 ppm en promedio.

38

Pese a estar en el clima más cálido, el diseño de estas viviendas es cerrado con poca ventilación, e incluso, con cierto grado de aislamiento al viento por la utilización de los plásticos como envoltura en la vivienda. Los resultados son alarmantes más allá de afectar las condiciones de confort en que se realizan las actividades diarias, sino que pueden afectar situaciones vitales de los(as) habitantes.

Figura 8. Promedio de dióxido de carbono en los casos de estudio



Fuente: Elaboración propia.

Humedad relativa, velocidad del viento y ruido

En los registros para estas variables, al analizar los datos no se encontraron valores sobresalientes entre los diferentes casos por lo que no se presentan gráficas de apoyo. Sin embargo, se reportan los rangos de los valores registrados. Para el caso de la humedad relativa, esta osciló entre el 40 % y el 70 %, mientras que, para las velocidades del viento, éstas variaron entre 0.05 m/s y hasta los 1.1 m/s. Finalmente, para la variable de ruido, este se mantuvo entre los 48 db y hasta los 70 db.

Conclusiones

En este estudio se analizaron las condiciones de siete variables ambientales que condicionan el habitar de las viviendas en tres regiones del estado de Colima. En 11 viviendas repartidas en seis localidades de las tres regiones, se midió la temperatura del aire (temperatura de bulbo seco), humedad relativa, temperatura radiante (temperatura de globo negro), velocidad del aire, iluminación, ruido y la calidad del aire.

Los resultados indicaron que la región del norte del estado, también llamada montaña, es la que permite mantener las condiciones de temperatura dentro de parámetros confortables, con temperaturas promedio por debajo de los 28 °C. Las viviendas del centro y de la costa presentaron temperaturas promedio por encima de este valor, por lo que se pueden considerar fuera de la zona de confort. En términos de la humedad relativa, no se observaron valores fuera de los parámetros de confort. Lo mismo se observó con la velocidad del viento, que, si bien típicamente es una variable errante, mantuvieron valores hasta de 1 m/s.

Los resultados de la temperatura radiante registradas por el sensor de globo negro permitieron indicar que las viviendas que utilizaron materiales con acabados oscuros en el clima cálido, como los plásticos, incrementaron la temperatura interior del espacio al presentar valores por encima de la temperatura de bulbo seco. Por el contrario, el resto de las viviendas con materiales

diversos como palma, madera y láminas plastificadas en diversos colores no presentaron cifras tan diferentes a las del aire.

Para la variable de la iluminación, los espacios abiertos como los que se observaron en la vivienda de El Paraíso fueron fundamentales para incrementar la cantidad de iluminación al interior de los espacios, ya sea de manera directa, difusa o indirecta.

Finalmente, para la variable de calidad del aire, las costumbres o posibilidades que obligan a la utilización de estufas de leña aunado al diseño de los espacios permitieron alcanzar valores preocupantes de partes por millón al interior de las viviendas. Cabe señalar el caso de la vivienda 3, en Augusto Gómez Villanueva, donde se alcanzaron valores superiores a las 5000 ppm, valor fuera de la norma.

Referencias

Aguillón Robles, J. (1996). *Propuesta bioclimática para la vivienda en el estado de San Luis Potosí*. Universidad de Colima.

Alba Gómez, L. K., Herrera Sosa, L. C. y Esparza-López, C. J. (2021). Análisis de costo-beneficio de estrategias de climatización pasiva en vivienda social en Ciudad Juárez, Chihuahua. *Vivienda y Comunidades Sustentables*, (10), 81–91. DOI: <https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i10>

ANSI - ASHRAE Standard 55. (2017). *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. Atlanta, GA. <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standard-55-thermal-environmental-conditions-for-human-occupancy>

Comisión Nacional del Agua. (2010a). *Normal Climatológica Armería, Armería Est. 6001*. https://smn.conagua.gob.mx/tools/RESOURCES/Normales_Climatologicas/Normales8110/col/nor8110_06001.TXT

Comisión Nacional del Agua. (2010b). *Normal Climatológica Comala, Comala Est. 6007*. https://smn.conagua.gob.mx/tools/RESOURCES/Normales_Climatologicas/Normales8110/col/nor8110_06007.TXT

Comisión Nacional del Agua. (2010c). *Normal Climatológica El Algodonal, Coquimatlán Est. 6075*. https://smn.conagua.gob.mx/tools/RESOURCES/Normales_Climatologicas/Normales8110/col/nor8110_06075.TXT

- Dedear, R. J., Leow, K. G. y Foo, S. C. (1991). Thermal Comfort in the Humid Tropics - Field Experiments in Air-Conditioned and Naturally Ventilated Buildings in Singapore. *International Journal of Biometeorology*, 34(4), 259–65. doi: 10.1007/BF01041840. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01041840>
- DELTA OHM (2023, 20 de febrero). *HD32.2 - WBGT Index Measurement*. <https://www.deltaohm.com/product/hd32-2-wbgt-index-measurement-2/>.
- Esparza-López, C. J., Alcántara-Lomelí, A., Gómez-Amador, A. y González-Trevizo, M. E. (2012). Human Adaptive Ability in Social Welfare Housing in Response to Environmental Conditions of a Space. En *Proceedings - 28th International PLEA Conference on Sustainable Architecture + Urban Design: Opportunities, Limits and Needs - Towards an Environmentally Responsible Architecture*.
- García-Solórzano, L. A., Esparza-López, C. J. y Al-Obaidi, K. M. (2020). "Environmental Design Solutions for Existing Concrete Flat Roofs in Low-Cost Housing to Improve Passive Cooling in Western Mexico". *Journal of Cleaner Production* 277. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123992. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652620340373>
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen* (5.ª ed.). UNAM.
- Gómez-Amador, A., González Trevizo, M. E., Esparza-López, C. J., Figueroa Castrejón, A., Marincic Lovriha, I. y Tovar Jiménez, I. (2017). Estudio comparativo de la eficiencia térmica en viviendas de interés social en tres diferentes climas de México. *Estudios de Arquitectura Bioclimática*, XIII(1), 185–200.

ISO 7726. (1998). *7726 - Ergonomics of the Thermal Environment - Instruments for Measuring Physical Quantities*. <https://www.iso.org/standard/14562.html>

Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B. y Rubel, F. (2006). World Map of the Köppen-Geiger Climate Classification Updated. *Meteorologische Zeitschrift*, *15*(3), 259–63. doi: 10.1127/0941-2948/2006/0130. https://www.schweizerbart.de/papers/metz/detail/15/55034/World_Map_of_the_Koppen_Geiger_climate_classificat?af=crossref

Norma UNE-EN 13779 Ventilación de edificios no residenciales. (2005). *Normalización española*. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=norma-une-en-13779-2005-n0034271>

López-Escamilla, A., Herrera-Limones, R. y León-Rodríguez, A. L. (2022, febrero). Evaluation of Environmental Comfort in a Social Housing Prototype with Bioclimatic Double-Skin in a Tropical Climate. *Building and Environment*, *218*. doi: 10.1016/j.buildenv.2022.109119. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132322003560>

Onsetcomp. (2023, 20 de febrero). *Datalogger U12-012*. <https://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/u12-012>.

Portillo, O. (2008). *Análisis térmico de los sistemas constructivos comunes utilizados en techos y muros en vivienda versus la normatividad oficial en el tema, en los diversos bioclimas de México* (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México. <https://repositorio.unam.mx/contenidos/141556>

- Rodrigo, B. G., Sanabria, J. C., Marchamalo, M. y Umaña, M. (2012). Análisis del confort y el comportamiento higrotérmico de sistemas constructivos tradicionales y actuales en viviendas de Santa Ana-Ciudad Colón (Costa Rica). *Informes de la Construcción*, 64(525), 75–84. doi: 10.3989/ic.10.047. <https://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/view/1716>
- Secretaría del Trabajo y Previsión Social. (2008). *Norma Oficial Mexicana NOM-025-STPS-2008. Condiciones de iluminación en los centros de trabajo*. <http://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/>
<https://www.stps.gob.mx/bp/secciones/dgsst/normatividad/normas/nom-025.pdf>
- Tejeda Martínez, A. (2007). On the Evaluation of the Wet Bulb Temperature as a Function of Dry Bulb Temperature and Relative Humidity. *Atmósfera*, 7(3). <https://www.revistascca.unam.mx/atm/index.php/atm/article/view/8370>



HUELLA DE CARBONO INCORPORADO EN LA VIVIENDA PERIURBANA DE LEÓN, GUANAJUATO, MÉXICO

Víctor Alberto Arvizu Piña¹
Luis Arturo Vargas Robles²
Edwin Israel Tovar Jiménez³
Francisco José Martín del Campo Saray⁴

Resumen

Para el año 2050 se espera un crecimiento del 68 % del sector de la vivienda a nivel mundial, donde la construcción informal representaría hasta una tercera parte. Si bien se han implementado

¹ Universidad Iberoamericana CDMX, Académico de tiempo completo, victor.arvizu@ibero.mx

² Universidad Iberoamericana León, Académico de tiempo completo, luis.vargas@ibero-leon.mx

³ Universidad Iberoamericana León, académico de TC, israel.tovar@iberoleon.mx

⁴ Universidad Iberoamericana León, académico de TC, francisco.martindelcampo@iberoleon.mx



acciones para promover la sustentabilidad y eficiencia energética de la vivienda en varios países (incluido México), estas se han centrado en su fase operativa, dejando de lado el resto de su ciclo de vida, más aún para la vivienda irregular. Este trabajo tiene el objetivo de cuantificar la huella de carbono incorporado en los materiales de construcción de la vivienda irregular, en la zona periurbana de León, Guanajuato, para lo cual se han seleccionado cinco casos de estudio de dos comunidades periurbanas de esta ciudad. La metodología del Análisis de Ciclo de Vida (ACV), acotando el estudio a la fase de producción de los materiales (extracción de materia prima, transporte y manufactura de materiales). Se ha utilizado el software One Click LCA y sus respectivas bases de datos, con casos base (o de referencia) para cada vivienda analizada, los cuales han sido conformados según una vivienda unifamiliar de un 'edificio internacional de referencia', de acuerdo con los parámetros de One Click LCA. Los resultados muestran que las viviendas analizadas poseen una menor huella de carbono incorporado, que sus respectivos casos de referencia, teniendo un promedio de 20.67 ton CO_{2 eq}/vivienda, y de 361.9 kg CO_{2 eq}/m²; sin embargo, es necesario considerar el grado de habitabilidad que pueden alcanzar los casos analizados. Se plantea como futura línea de trabajo la necesidad de complementar el estudio, incluyendo, entre otras cosas, la fase operativa de las viviendas.

Introducción

De acuerdo con el último reporte de la Agencia Internacional de Energía y el Programa de Medio Ambiente de las Naciones Unidas (Global ABC/IEA/UNEP (Global Alliance for Buildings and Construction, 2020), actualmente el sector de la edificación es responsable del 36 % del consumo de energía y del 39 % de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) a nivel mundial, lo que lo coloca como el más importante en estos rubros, incluso por encima del transporte y otras industrias. Sólo entre 2010 y 2018, el consumo de energía eléctrica en los edificios aumentó un 19 %, lo que conlleva a un incremento en las emisiones de carbono que se le atribuyen a este sector. La falta de un diseño adaptado a las condiciones climáticas del entorno, el uso de materiales constructivos inadecuados y la falta de conciencia energética al hacer uso de los espacios, son algunas de las causas que llevan a este aumento del consumo energético. De acuerdo con este informe, sólo el sector residencial es responsable del 22 % del consumo energético y del 17 % de las emisiones de CO₂ a nivel mundial (Global ABC/IEA/UNEP [Global Alliance for Buildings and Construction], 2020) (Global ABC/IEA/UNEP [Global Alliance for Buildings and Construction], 2020).

Ante esto, diversas acciones se han implementado en varios países para maximizar la eficiencia energética de los edificios, desde políticas públicas, normatividad, actualización de los reglamentos de construcción, hasta impulsar diversos incentivos

fiscales y económicos, así como la implementación de una gran variedad de sistemas de certificación energética y ambiental. Un ejemplo de esto en Europa es la Directiva de Desempeño Energético de los Edificios.

Esto ha provocado que la eficiencia energética de los edificios haya aumentado, al grado de llegar a la categoría ‘Nearly Zero Energy Building’¹ (NZEB). Así, diversos autores como Passer, Kreiner, y Maydl (2012) han establecido que las medidas de eficiencia energética en edificios han llegado al límite de lo que se puede alcanzar. En este sentido, el resto del ciclo de vida de los edificios ha comenzado a cobrar una mayor importancia relativa, y, por lo tanto, es necesario también implementar acciones para reducir la energía requerida en las etapas previas al uso del edificio: extracción y transporte de materia prima, así como la producción de los materiales. Esto es lo que se conoce como *energía incorporada de los materiales*, y para cuyo análisis se utiliza la metodología del Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

Sin embargo, México es uno de los países más rezagados en la implementación de acciones para reducir la demanda energética de los edificios, no solo la energía incorporada, sino también la operacional (United Nations Environment Programme, 2020). Esto cobra mayor relevancia cuando el planeta se enfrenta a un crecimiento poblacional de 2,400 millones de personas para el año 2050, lo que representa un aumento en la demanda de

¹ Son edificios con un alto grado de eficiencia energética, que demandan muy poca energía, la cual es suplida mediante fuentes renovables.

recursos naturales y energéticos de hasta el 49 %, y donde se espera un aumento del 68 % en edificios de vivienda, y del 70 % de servicios, con respecto al año 2010 (Cuchí, *et al.*, 2014).

Según el Instituto Mundial de Recursos (WRI), el 70 % de la población mundial estará viviendo en las ciudades para el año 2050, especialmente en los países en vías de desarrollo, como México (Becqué, *et al.*, 2015). El Programa de Medio Ambiente de la Organización de las Naciones Unidas establece que la población en estos países está creciendo de dos a tres veces más rápido que en las naciones desarrolladas, donde una tercera parte de este crecimiento se está dando en la construcción informal (UN HABITAT, 2012). Esto refleja la importancia que tiene —y seguirá teniendo— el sector de la vivienda informal, no solo por las condiciones de habitabilidad que puede lograr, sino por la demanda de recursos naturales y su contribución a un sector edilicio más sustentable.

En este sentido, por más de dos décadas se ha buscado, a nivel mundial, un sector de la vivienda más sustentable (Rasoolimanesh, *et al.*, 2011), y se han creado incentivos para desarrolladores de vivienda y fabricantes de materiales, y así procurar esta sustentabilidad (Frischknecht, *et al.*, 2015); sin embargo, el sector de la vivienda informal y su desempeño ambiental ha quedado marginado de estas acciones (Salzer, *et al.*, 2017).

En México, desde hace alrededor de dos décadas se han comenzado a implementar políticas de manera sostenida para impulsar la edificación sustentable, principalmente en el sector de la

vivienda (CCA, 2008). El Programa Nacional de Vivienda definió, desde su versión de 2014-2018, que la vivienda sustentable es aquella que considera, entre otras cosas, toda la cadena de producción asociada a su construcción (CONAVI, 2014), es decir, su ciclo de vida completo. También reconoce que esto no ha sido posible implementarse, ya que “una gran parte de los desarrolladores de vivienda siguen sin considerar aspectos mínimos de sustentabilidad” (SEMARNAT SHF, INFONAVIT y CONAVI, 2011).

Tomando en cuenta que la vivienda de autoconstrucción constituye una parte importante de las actividades de construcción en un país como México, y considerando el crecimiento poblacional al que se enfrenta en los próximos años, resulta necesario realizar un diagnóstico sobre la energía incorporada que conlleva este sector de la vivienda, así como de su respectiva huella de carbono. Al respecto, este trabajo tiene como objetivo cuantificar la huella de carbono que tiene la vivienda de autoconstrucción en México. Para esto, se han tomado como casos de estudio cinco tipologías de vivienda de autoconstrucción en la ciudad de León, Guanajuato, las cuales se describen más adelante.

Este trabajo forma parte del proyecto ‘Desarrollo de un modelo de producción social replicable de vivienda y hábitat’². Los casos de estudio considerados forman parte del diagnóstico elaborado por el Cuerpo Académico Estudios Integrales en

² Convocatoria 2022, de Proyectos de Investigación e Incidencia para una Vivienda Adeuada y Acceso Justo al Hábitat; número de solicitud 321260 ante el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, coordinado por la Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH).

Diseño y Hábitat de la Universidad Iberoamericana (UIA) de León, donde se busca reproducir el trabajo por la institución cede (UNACH) con el fin de ensanchar el panorama de la vivienda rural y periurbana en el país, logrando así una visión más amplia del fenómeno desde la perspectiva del hábitat y su desempeño energético y ambiental.

Metodología

Esta sección se divide en dos partes: (1) descripción de los casos de estudio, y (2) reseña general de la metodología del Análisis de Ciclo de Vida (ACV), y las etapas que la componen, incluyendo una explicación de cómo se han abordado para este estudio en particular.

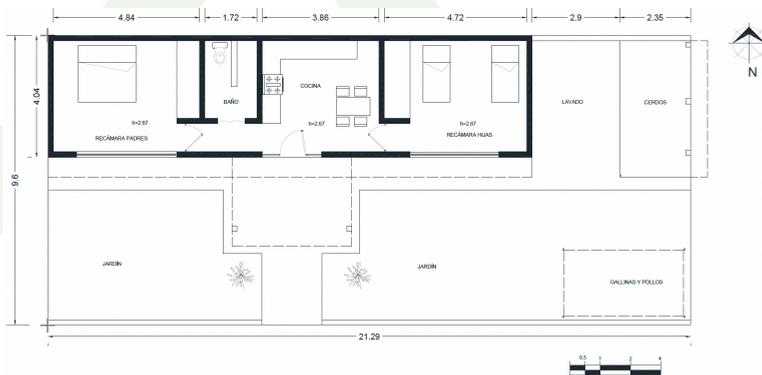
Casos de estudio

El criterio seguido para la selección de las viviendas analizadas, de acuerdo con los objetivos del proyecto general del cual se desprende este trabajo, fue el de pertenecer a un entorno rural o periurbano. Se realizó una búsqueda a través del Centro de Formación y Acción Social (CEFAS) de la UIA León. Fue mediante la obra de las Hermanas del Sagrado Corazón de Jesús (HSCJ) que surgió la posibilidad de colaborar en diversas comunidades vulnerables en el municipio de León. Se determinó que las comunidades que reúnen los criterios de interés

para el proyecto son: Los Sauces, Lomas del Suspiro y Zaragoza, de las cuales, por su accesibilidad, se seleccionaron las dos últimas.

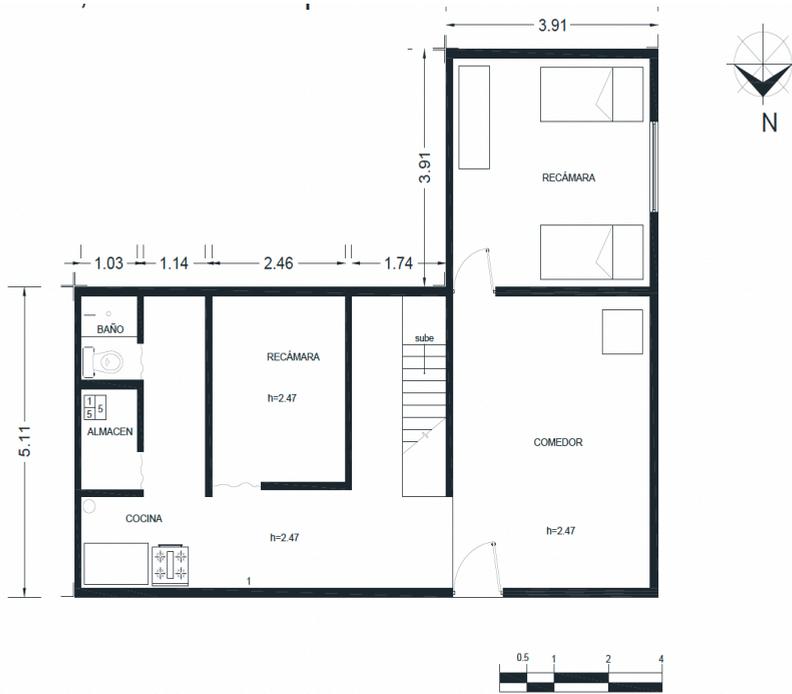
Se eligieron tres viviendas de Lomas del Suspiro y dos de Zaragoza, las cuales han sido construidas por sus mismos(as) habitantes. Los materiales de construcción considerados fueron determinados según las observaciones realizadas en las visitas de campo y los comentarios expresados por los(as) mismos propietarios(as). Se hizo levantamiento de medidas y se modelaron en el software Revit con el fin de poder calcular las superficies de la envolvente y poder cuantificar los respectivos materiales de cada caso (ver figuras 1-10).

Figura 1. Planta arquitectónica de la vivienda Lomas del Suspiro 1 (64.8 m²)



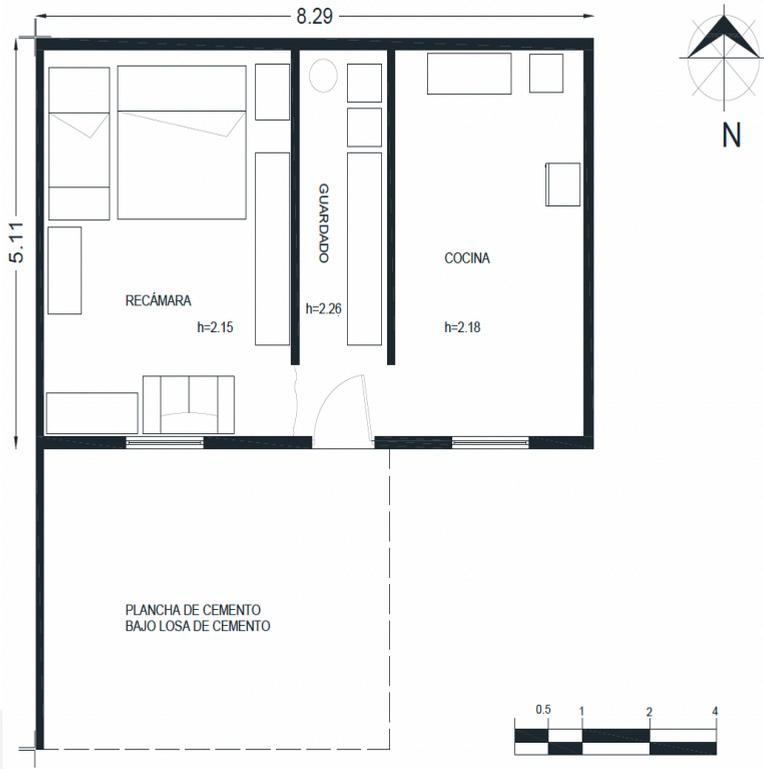
Fuente: Elaboración propia.

Figura 2. Planta arquitectónica de la vivienda Lomas del Suspiro 2 (planta baja, 70 m²)



Fuente: Elaboración propia.

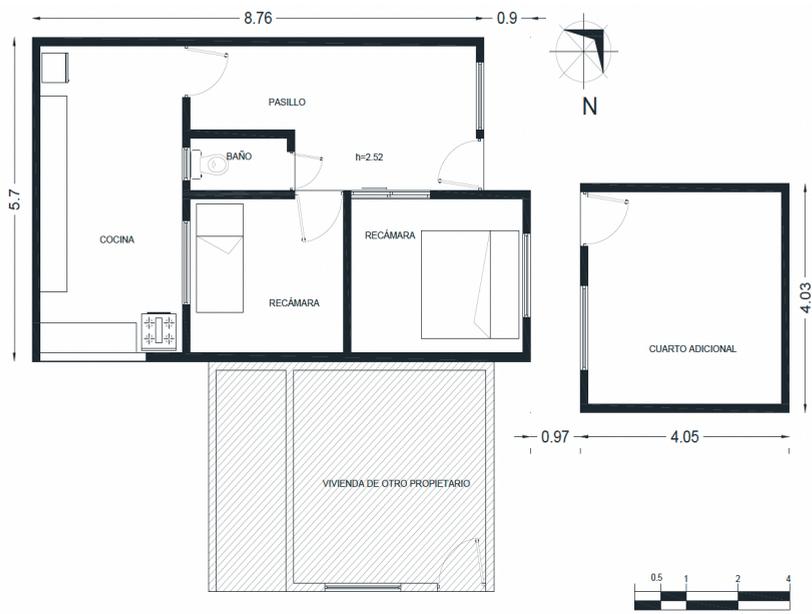
Figura 3. Planta arquitectónica de la vivienda Lomas del Suspiro 3 (42.3 m²)



56

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4. Planta arquitectónica de la vivienda Zaragoza 4 (68.9 m²)



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5. Planta arquitectónica de la vivienda Zaragoza 5 (planta alta, 38.4 m²)



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6. Vistas de las viviendas estudiadas



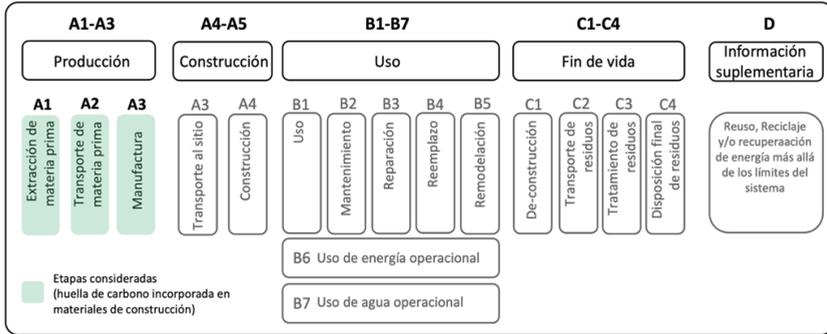
Fuente: Elaboración propia.

Análisis de ciclo de vida (ACV)

Para la cuantificación de la huella de carbono de los casos de estudio se utilizó la metodología del ACV, la cual es ampliamente aceptada por la comunidad científica para la evaluación ambiental de productos y servicios con un enfoque holístico (Bahramian y Yetilmezsoy, 2020; Obrecht, *et al.*, 2021; Ortiz, *et al.*, 2009; Sharma, *et al.*, 2011; Soust-Verdaguer, *et al.*, 2016). Su implementación es regulada por las normas internacionales ISO 14040 y 14044 (ISO, 2006a, 2006b), las cuales definen cuatro etapas generales para el ACV: (1) definición de objetivos y límites del sistema, (2) Análisis de inventario, (3) evaluación de impactos e (4) interpretación de resultados. Para efectos de este documento, las primeras tres fases se describen como parte de la metodología de este trabajo, mientras que la cuarta fase se desglosa en las conclusiones generales.

De acuerdo con la norma europea EN 15978 (European Committee for Standardization, 2011), las etapas del ciclo de vida de un edificio se clasifican en cuatro grandes grupos, cada uno con sus respectivas subetapas: producción (A1-A3), construcción (A4-A5), uso (B1-B7) y fin de vida (C1-C4). Es posible considerar información suplementaria, la cual se denomina etapa D, que se refiere a los beneficios que se podrían obtener más allá de los límites del estudio (ver figura 7).

Figura 7. Etapas del ciclo de vida de un edificio



Fuente: European Committee for Standardization (2011).

Se ha utilizado el software One Click LCA, tomando como principal punto de referencia los procesos de producción de México. La información de los impactos ambientales unitarios, utilizada para los materiales de construcción se basa principalmente en una Declaración Ambiental de Producto (EPD) con un alcance geográfico a México, aunque también se han utilizado fuentes de información de otros países, debido a que la base de datos de este software no contempla todos los materiales considerados en los casos de estudio. Se han utilizado los parámetros de cálculo preconfigurados en One Click LCA. Por ejemplo, para la fase de manufactura (A3) de algunos materiales, se considera la red eléctrica mexicana (a excepción de los materiales cuya información proviene de una EPD con un alcance geográfico diferente a México), y la vida útil de los materiales se asimila a la establecida para las viviendas (60 años), a excepción de materiales cuya EPD especifique algún periodo en particular.

Definición de objetivos y límites del sistema

Esta es la primera etapa de un ACV donde se define el propósito y los alcances del estudio, incluyendo la unidad funcional sobre la que se realiza, para propiciar análisis comparativos entre objetos que puedan cumplir la misma función (ISO, 2006b). El objetivo de este estudio es cuantificar la huella de carbono incorporado de los materiales de cinco tipologías de vivienda de autoconstrucción en la zona periurbana en León, Guanajuato. La unidad funcional utilizada es el metro cuadrado de construcción de una vivienda. Al tratarse de la huella incorporada de los materiales de construcción, este estudio se acota a considerar las fases A1 (extracción de materia prima), A2 (transporte de la materia prima) y A3 (fabricación de materiales) (ver figura 7).

Además de realizar un análisis comparativo entre los diferentes casos de estudio, se han establecido los casos base (*baseline*) de cada tipología, con el fin de establecer un punto de referencia para cada vivienda en particular. Estos *baseline* se han conformado de acuerdo con la tipología de un edificio de vivienda de un solo nivel, bajo la categoría de un *edificio internacional de referencia*, versión 2022.1, según los parámetros y la clasificación del software One Click LCA. Estos casos base implican el cumplimiento de estándares básicos en cuanto a criterios estructurales. La descripción detallada de estos sistemas constructivos se hace en la siguiente sección. Se han dejado fuera del análisis instalaciones hidrosanitarias, eléctricas y equipos de climatización.

Análisis de inventario

En esta fase se cuantifican los flujos de masa y energía que intervienen en el producto estudiado, dentro de los límites del sistema establecido, y de acuerdo con la unidad funcional definida (ISO, 2006b). A partir del cálculo de superficies y la observación de los materiales directamente en sitio, se determinaron los sistemas constructivos de cada caso. En términos generales, las viviendas cuentan con muros de mampostería (ladrillo y tabique de cemento), techo de concreto reforzado en algunos casos, y vigueta y bovedilla en otros, piso de concreto pulido, puertas de hierro y ventanas de vidrio sencillo.

Como criterio general, se han considerado castillos de concreto armado en esquinas, así como cadenas de cerramiento a base de concreto armado en todo el perímetro de las viviendas, el espesor de los muros se ha determinado en 0.15 m y el del piso en 0.12 m. De acuerdo con las observaciones efectuadas en sitio, no todas las viviendas cuentan con acabados en muros, por lo que los materiales asociados a este recubrimiento varían en cada caso.

Los potenciales impactos ambientales unitarios de cada material se han tomado directamente de la base de datos interna de One Click LCA. Para materiales y sistemas constructivos con un alcance geográfico diferente al de México, se han seleccionado los más similares, provenientes de otros países. La cuantificación detallada de cada elemento constructivo para

cada vivienda, y la asimilación de cada uno, de acuerdo con la base de datos de One Click LCA, así como su referencia geográfica puede consultarse en el anexo A.

De igual forma, se han establecido casos base (*baseline*) para cada tipología. Para la conformación de ellos se consideró una vivienda con estructura de concreto colado en sitio con refuerzos verticales a no más de 7.5 m de separación. Para efectos comparativos, se ha considerado la misma superficie de construcción y los mismos elementos constructivos que en los casos reales: cimentación, estructuras verticales y horizontales, muros exteriores e interiores, piso, techo, puertas y ventanas. La cuantificación de los materiales y los sistemas constructivos utilizados para los casos base de los cinco modelos puede consultarse en el anexo B.

Evaluación de impacto

En esta etapa del ACV se evalúan los potenciales impactos ambientales que puede tener el sistema analizado, en función de la escala y del efecto que puede tener. En la siguiente tabla se muestra esta clasificación.

Tabla 2. Potenciales impactos ambientales evaluados en un ACV

ESCALA	EFEECTO
Global	Efecto invernadero
	Adelgazamiento de la capa de ozono
	Consumo de recursos no renovables
Regional	Acidificación
	Eutrofización
	Formación de smog fotoquímico
	Toxicidad crónica
Local	Toxicidad aguda
	Degradación del área
	Disturbios de tipo físico (p. ej. ruidos molestos)

Fuente: Arena (2007).

Para este trabajo se considera solamente la categoría del calentamiento global (efecto invernadero), para lo cual se determinan las emisiones de CO₂ eq.

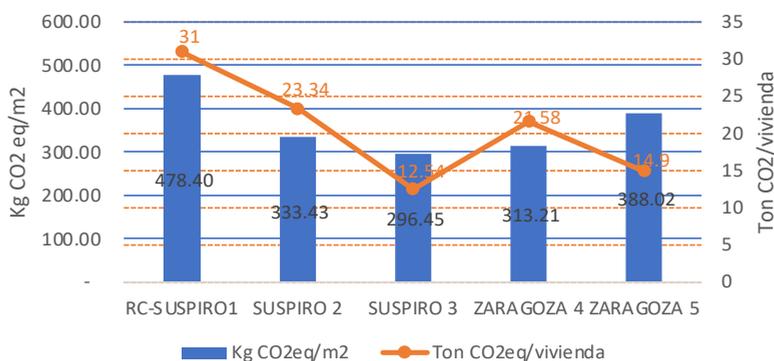
64

Resultados

Respecto a la cantidad total de CO₂ emitido por vivienda, la casa que más emisiones ha generado con sus materiales de construcción es Suspiro 1, con 31 toneladas de CO₂ eq.; después se encuentra Suspiro 2, con 23.3 toneladas de CO₂ eq.; le sigue

Zaragoza 4, con 14.9 toneladas de CO_2_{eq} ; luego Zaragoza 5, con 14.9 toneladas de CO_2_{eq} y, finalmente, Suspiro 3, con 12.5 toneladas de CO_2_{eq} . Sin embargo, con estos resultados no es posible hacer una adecuada comparación entre los casos de estudio, pues influye la superficie de construcción de cada uno. Es por esto que se ha establecido el metro cuadrado de construcción como unidad funcional en los límites del sistema. Aunque en este caso coincide el primero y el último lugar, el resto de las viviendas cambia su posición, quedando de la siguiente manera: en primer lugar, Suspiro 1, con 478.4 kg de $\text{CO}_2_{\text{eq}}/\text{m}^2$, después la vivienda Zaragoza 5, con 388 kg de $\text{CO}_2_{\text{eq}}/\text{m}^2$, le sigue Suspiro 2, con 333.4 kg de $\text{CO}_2_{\text{eq}}/\text{m}^2$, Zaragoza 4, con 313.2 kg de $\text{CO}_2_{\text{eq}}/\text{m}^2$ y, al final, Suspiro 3, con 296.4 kg de $\text{CO}_2_{\text{eq}}/\text{m}^2$ (ver figura 8). La huella de carbono promedio para estas viviendas es de 20.67 toneladas de $\text{CO}_2_{\text{eq}}/\text{vivienda}$, y de 361.9 kg de $\text{CO}_2_{\text{eq}}/\text{m}^2$.

Figura 8. Huella de carbono incorporado en materiales en los casos de estudio



Fuente: Elaboración propia.

Para efectos de visualizar el impacto que tendrían estos resultados, conviene transformarlos en algo más tangible. En la siguiente tabla se puede observar la superficie de bosque que sería necesaria durante un año, para mitigar el CO₂ emitido por cada vivienda. Se considera una absorción de 0.84 toneladas de CO₂ eq por cada acre de bosque durante un año (0.40 has), de acuerdo con datos de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, 2022).

Tabla 3. Superficie de bosque necesaria para mitigar el CO₂

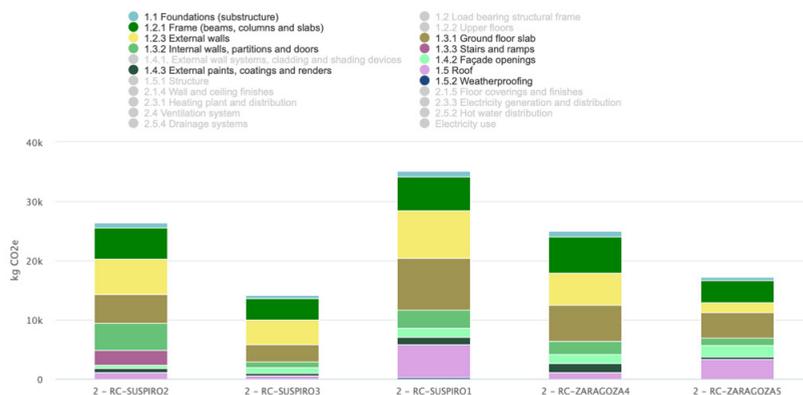
Suspiro 1	Suspiro 2	Suspiro 3	Zaragoza 4	Zaragoza 5
14.8 has	11.1 has	6.0 has	10.3 has	7.1 has

Fuente: Elaboración propia con base en EPA (2022).

Para tener un mayor entendimiento de estos resultados, vale la pena profundizar en el potencial impacto de los elementos constructivos. En la siguiente figura se aprecia que los muros exteriores son los principales responsables de las respectivas emisiones en todos los casos, a excepción de la vivienda Suspiro 1, donde el piso de concreto es el de mayor impacto, seguido de los muros exteriores. El marco estructural (columnas y vigas), y el firme de concreto son los elementos que se ubican en segundo y tercer lugar en la mayoría de los casos. Los muros interiores se ubican como el cuarto elemento de mayor emisión de CO₂, a excepción de Suspiro 1 y Zaragoza 5, donde el techo tiene un peso considerable en términos de emisiones. Cabe recordar

que estas viviendas cuentan con un techo de concreto armado de 0.12 m de espesor. También lo tiene la vivienda Suspiro 3, aunque su superficie es menor, y, por lo tanto, no representa un impacto considerable. El resto de los modelos cuentan con techo de vigueta y bovedilla de poliestireno, que está representando un menor impacto ambiental en esta categoría de calentamiento global. En la figura 9 se muestran los impactos de cada elemento constructivo. Los elementos marcados con texto en gris claro no están considerados en el análisis.

Figura 9. Huella de carbono por elementos constructivos



Fuente: One Click LCA (2023).

Por otro lado, los casos base muestran resultados similares en cuanto al impacto ambiental de cada elemento. Los muros exteriores, el piso de concreto y los techos son los sistemas constructivos con una mayor huella de carbono.



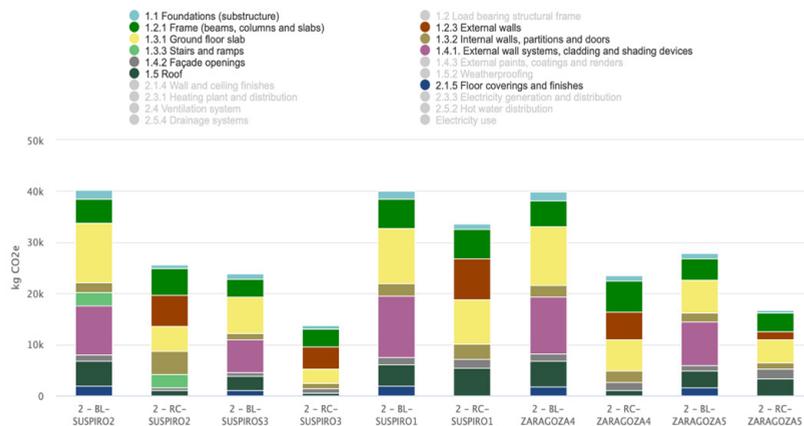
Comparando el impacto de cada vivienda con su respectivo caso base, se tiene que, en todos los casos, las viviendas analizadas tienen una menor huella de carbono. Una posible explicación de esto puede ser que estas viviendas no necesariamente conllevan un diseño y cálculo estructural que posiblemente llevaría a la incorporación de más materiales que garanticen su resistencia estructural y, probablemente, propicien un mejor desempeño térmico. En este sentido, cabe recordar que los casos base contemplan sistemas constructivos de acuerdo con una tipología de vivienda unifamiliar para un contexto internacional, según lo establece One Click LCA. Por ejemplo, los muros exteriores están compuestos por una doble capa de ladrillo de barro con aislamiento térmico intermedio de lana mineral. La cimentación se basa en una gran losa de cimentación de concreto. Los muros interiores se conforman por paneles de yeso con una estructura interna de madera y aislamiento de lana mineral (ver configuración constructiva en anexo B).

68

Por otro lado, los casos reales se conforman de sistemas constructivos más sencillos, por ejemplo, con muros de mampostería reforzados con marcos estructurales de concreto y, en algunos casos, sin acabados finales. En la figura 10 se muestra la comparación entre los casos base y los modelos reales.



Figura 10. Análisis comparativo entre los casos bases y los modelos reales (BL: baseline, RC: real case)



Fuente: One Click LCA (2023).

Conclusiones

El sector de la edificación representa el principal contribuidor de CO₂ a nivel mundial, y se espera que siga creciendo conforme lo hace la población mundial, principalmente en países en vías de desarrollo como México. Si bien se han implementado estrategias y políticas encaminadas a procurar un sector de la vivienda más sustentable y eficiente energéticamente, estas acciones se han centrado en la fase operativa, dejando de lado el resto de su ciclo de vida, más aún, en la vivienda informal. En este trabajo se ha realizado un diagnóstico de la huella de carbono incorporado en

los materiales de construcción de la vivienda periurbana, diseñada y construida desde la informalidad, es decir, sin la guía o el apoyo de especialistas de la edificación.

Se han analizado cinco casos de estudio, los cuales han resultado con una menor huella de carbono que sus respectivos casos base. Es decir, su desempeño ambiental, en términos de su contribución al calentamiento global, es mejor que sus viviendas de referencia. Sin embargo, la conformación de estos referentes, a partir de un prototipo de vivienda unifamiliar bajo un estándar internacional, implica el cumplimiento de aspectos básicos de seguridad estructural, durabilidad y, eventualmente, de confort. Si bien la unidad funcional utilizada en este estudio es el metro cuadrado de construcción, no se ha considerado el factor de la seguridad estructural, o de la eficiencia energética y el confort que podría propiciar la envolvente y la materialidad de las viviendas.

En este sentido, es necesario complementar el estudio incluyendo estas variables de habitabilidad durante su fase operativa. Por ejemplo, determinar la demanda energética durante el uso de las viviendas, asociada a su diseño y construcción. Esto implicaría ampliar el estudio, al menos, a un análisis de ciclo de vida superficial.³

Por otro lado, aun cuando se ha utilizado un software de amplio alcance a nivel internacional (One Click LCA), que cuenta con datos de materiales en el contexto mexicano, no ha sido

³ Un ACV superficial considera la fase de producción (A1-A3) y el consumo energético durante el uso (B6)

posible conocer con detalle las características de la información de estos materiales, debido a la propia configuración del software; sobre todo, respecto a aquellos materiales cuya fuente de información proviene directamente de la “base de datos interna” del software. No así cuando se utilizan las EPD como fuente de información, puesto que estos documentos especifican con suficiente claridad y transparencia, los aspectos técnicos y de alcance geográfico que se consideraron al realizar los respectivos estudios de ACV para esos materiales.

Asimismo, de los 85 materiales/sistemas constructivos utilizados en los cinco casos de estudio, solo el 35 % tiene un alcance geográfico limitado a México, mientras que el resto pertenece a la región de Europa, Estados Unidos, Alemania, España o Francia. Aun cuando estos materiales son, en esencia, los mismos que se utilizan en México, los procesos de producción de cada uno pueden variar significativamente con los procesos de México, y con esto, su huella de carbono. En este sentido, se resalta la necesidad de contar con bases de datos y softwares de ACV para edificios, adaptados a la realidad mexicana.

Esta es precisamente una de las principales barreras que han sido apuntadas por diversos autores para la aplicación del ACV en la región latinoamericana (Arvizu-Piña y Cuchí Burgos, 2017; Güereca, *et al.*, 2015 y Ochoa, *et al.*, 2013).

Otra línea de investigación futura que se plantea es la incorporación de la característica de la vivienda periurbana relacionada con su

ubicación. En este sentido, se recomienda analizar los efectos de la movilidad de los(as) habitantes de estas viviendas, en términos de transporte utilizado para trasladarse a sus centros laborales y/o escolares, incluyendo distancias y tipos de vehículos usados. De esta manera, se estaría en condición de evaluar la huella de carbono de la vivienda periurbana en comparación con una vivienda intraurbana.

Finalmente, cabe resaltar que, si bien se ha obtenido un diagnóstico de la huella de carbono incorporado de los materiales de la vivienda informal en la zona periurbana de León, Guanajuato, es necesario ampliar el estudio con la consideración de la fase operativa (B6), para tener una visión holística de su desempeño ambiental.

Referencias

- 72
- Arena Granados, A. P. (2007). *El Análisis de Ciclo de Vida. Una metodología de evaluación de las consecuencias ambientales de la actividad humana*.
- Arvizu-Piña, V. A. y Cuchi Burgos, A. (2017). Promoting sustainability in Mexico's building sector via environmental product declarations. *International Journal of Life Cycle Assessment*. <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1269-z>
- Bahramian, M. y Yetilmezsoy, K. (2020). Life cycle assessment of the building industry: An overview of two decades of research

- (1995-2018). *Energy & Buildings*, 219, 109917. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109917>
- Becqué, R., Mackres, E., Layke, J., Aden, N., Liu, S., Managan, K., Nesler, C., Mazur-stommen, S., Petrichenko, K. y Graham, P. (2015). *Accelerating Building Efficiency: Eight Actions for Urban Leaders*. 1–160. https://files.wri.org/d8/s3fs-public/16_REP_Accelerating_Building_Efficiency_0.pdf
- CCA. (2008). *Edificación sustentable en América del Norte. Oportunidades y retos*. Departamen.
- CONAVI. (2014). *Programa Nacional de Vivienda (PNV) 2014-2018* (pp. 1–33). Comisión Nacional de Vivienda (Housing National Commission). https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5342865&fecha=30/04/2014&print=true
- Cuchí, A., Arcas-Abella, J., Casals-Tres, M. y Fombella, G. (2014). Building a common home. Building Sector. A Global Vision Report. In *WSB14 Barcelona*. <https://gbce.es/archivos/ckfinderfiles/WSB14/global-vision-report.pdf>
- EPA. (2022). *Calculador de equivalencias de gases de efecto invernadero | US EPA*. <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/calculador-de-equivalencias-de-gases-de-efecto-invernadero#results>
- European Committee for Standardization (CEN). (2011). EN 15978:2011 Sustainability of Construction works-Assessment of environmental performance of buildings-Calculation method. *Sustainability of Construction Works. Assessment of Environmental Performance of Buildings. Calculation Method*. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?-c=N0049397>

Frischknecht, R., Wyss, F., Knöpfel, S. B. y Stolz, P. (2015). Life cycle assessment in the building sector: analytical tools, environmental information and labels. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Section 2. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0856-0>

Global ABC/IEA/UNEP (Global Alliance for Buildings and Construction, I. E. A. and the U. N. E. P. (2020). *GlobalABC Regional Roadmap for Buildings and Construction in Latin America*. https://globalabc.org/sites/default/files/inline-files/2.%20GlobalABC_Regional_Roadmap_for_Buildings_and_Construction_in_Latin_America_2020-2050.pdf

Güereca, L. P., Ochoa, S. R., Gilbert, H. E. y Suppen, R. N. (2015). Life cycle assessment in Mexico: overview of development and implementation. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(3), 311–317. <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0844-9>

ISO. (2006a). *ISO 14040-2006 Environmental Management–Life Cycle Assessment–Principles and Framework*. International Organisation for Standardization. <https://www.iso.org/standard/37456.html>

ISO. (2006b). *ISO 14044-2006 Environmental management–life cycle assessment–Requirements and Guidelines*. International Organisation for Standardization. <https://www.iso.org/standard/38498.html>

Meex, E., Hollberg, A., Knapen, E., Hildebrand, L. y Verbeeck, G. (2018). Requirements for applying lca-based environmental impact assessment tools in the early stages of building design. *Building and Environment*, 133(January), 228–236. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.02.016>

- Obrecht, T. P., Jordan, S., Legat, A., Ruschi Mendes Saade, M. y Passer, A. (2021). An LCA methodology for assessing the environmental impacts of building components before and after refurbishment. *Journal of Cleaner Production*, 327(October). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129527>
- Ochoa, R., Güereca, L. P. y Morillon, D. (2013). LCA of buildings in Mexico: Advances, Limits and Catalysts. *Vth International Conference on Life Cycle Assessment, CILCA*.
- Ortiz, O., Castells, F. y Sonnemann, G. (2009). Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA. *Construction and Building Materials*, 23(1), 28–39. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.11.012>
- Passer, A., Kreiner, H. y Maydl, P. (2012). Assessment of the environmental performance of buildings: A critical evaluation of the influence of technical building equipment on residential buildings. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 17(9), 1116–1130. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0435-6>
- Rasoolimanesh, S. M., Badarulzaman, N. y Jaafar, M. (2011). Achievement to sustainable urban development using city development strategies (CDS): A comparison between cities alliance and the world bank definitions. *Journal of Sustainable Development*, 4(5). <https://doi.org/10.5539/jsd.v4n5p151>
- Salzer, C., Wallbaum, H., Ostermeyer, Y. y Kono, J. (2017). Environmental performance of social housing in emerging economies: life cycle assessment of conventional and alternative construction methods in the Philippines. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1362-3>

SEMARNAT, SHF, INFONAVIT y CONAVI. (2011). *Vivienda sustentable en México*. http://www.conavi.gob.mx/documentos/publicaciones/2b_Vivienda_Sutentable_en_Mexico.pdf

Sharma, A., Saxena, A., Sethi, M., Shree, V. y Varun. (2011). Life cycle assessment of buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 871–875. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.09.008>

Soust-Verdaguer, B., Llatas, C. y García-Martínez, A. (2016, abril). Simplification in life cycle assessment of single-family houses: A review of recent developments. *Building and Environment*, 103, 215–227. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.04.014>

Un Habitat. (2012). Going green: a handbook of sustainable housing practices in developing countries. *Un habitat*. <https://unhabitat.org/books/going-green-a-handbook-of-sustainable-housing-practices-in-developing-countries/>

United Nations Environment Program. (2020). 2020 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-Emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector. In *Global Status Report for Buildings and Construction*. www.iea.org

ANEXO A. Materiales y sistemas constructivos de los casos de estudio

SUSPIRO 1				56.00	m ²
	Sistema/material constructivo	Sistema/material constructivo (Base de datos del software OneClick LCA)	Fuente de información (región/país)	Cantidad	Unidad
Cimentación	Zapatas aisladas de 0.6m x 0.6m (10 unidades)	Footing foundations for hard soils (sand, gravel, silt or clay) per GFA, Includes: point and strip footings	México	3.60	m ²
	Capa de concreto pobre de 5 cms para desplantar firme de concreto	Concrete cleanliness per GFA, C12/C15	México	56.00	m ²
Muros exteriores	Ladrillo de barro (0.7 x 0.14 x 0.27m) 92.36 m ²	Clay brick (One Click LCA)	México	26,246.75	kg
	Mortero de pega para piezas de mampostería	Mortar for masonry use, 1500 kg/m ³ (SNMI)	Francia	3,047.72	kg
	Enjarre cemento-arena, 1 cm	Render finishing, 10 mm	Europe	92.36	m ²
Estructuras verticales	Castillos de concreto con acero de refuerzo 0.25 x 0.25 m	In-situ concrete column, 250 x 250 mm, C30/37, with One Click LCA data	México	35.49	m
	Columnas de madera en pórtico	Construction wood from pine or spruce, 480-500 kg/m ³ , avg. weight 490 kg/m ³ , moisture content 17-22 % (Palsgaard Spær A/S)	Dinamarca	0.21	m ³
Muros interiores	Ladrillo de barro (0.7 x 0.14 x 0.27m) 30.74 m ²	Clay brick (One Click LCA)	México	8,737.27	kg
	Mortero de pega para piezas de mampostería	Mortar for masonry use, 1500 kg/m ³ (SNMI)	Francia	1,014.55	kg
	Enjarre cemento-arena, 1 cm	Render finishing, 10 mm	Europe	30.74	m ²
Estructuras horizontales	Vigas de concreto con acero de refuerzo, 0.35 x 0.40 m	In-situ concrete beam, 350 x 400 mm, C30/37, with One Click LCA data	México	45.36	m
	Viga de madera en pórtico	Construction wood from pine or spruce, 480-500 kg/m ³ , avg. weight 490 kg/m ³ , moisture content 17-22 % (Palsgaard Spær A/S)	Dinamarca	0.15	m ³
Piso	Firme de concreto con acero de refuerzo 0.12 m.	Concrete cast-in-situ floor slab assembly, 120 mm depth, C25/30, for Spain	España	102.00	m ²
Techo	Losa de concreto armado de 0.15m de espesor	Concrete cast-in-situ roof slab assembly, 150mm depth, C 30/37, U-value 0.44 W/m ² K, Climate Zone A, for Spain	España	69.83	m ²
	Lámina de asbesto	Steel sheet roofing, Thickness of assembly 1 mm	México	15.00	m ²
Puertas interiores	Puerta de madera 2.10x0.8 m	Interior door	Europa	3.36	m ²
Puertas exteriores	Puerta de hierro 2.10x0.80 m	External door	Europa	4.09	m ²
Ventanas	Marco de aluminio	Aluminum window frame, 50in x 58in	EUA	5.70	m ²
	Vidrio sencillo	Window glass, single, 7.5 kg/m ²	Alemania	5.70	m ²

continúa...

SUSPIRO 2				70.00	m ²
	Sistema/material constructivo	Sistema/material constructivo (Base de datos del software OneClick LCA)	Fuente de información (región/país)	Cantidad	Unidad
Cimentación	Zapatas aisladas de 0.6m x 0.6m (11 unidades)	Footing foundations for hard soils (sand, gravel, silt or clay) per GFA, Includes: point and strip footings	México	4.00	m ²
	Capa de concreto pobre de 5 cms para desplantar firme de concreto	Concrete cleanliness per GFA, C12/C15	México	56.00	m ²
Muros exteriores	Ladrillo de barro (0.7 x 0.14 x 0.27m) 69.75 m ²	Clay brick (One Click LCA)	México	19,821.97	kg
	Mortero de pega para piezas de mampostería	Mortar for masonry use, 1500 kg/m ³ (SNMI)	Francia	2,301.68	kg
	Enjarre cemento-arena, 1 cm	Render finishing, 10 mm	Europe	69.75	m ²
Estructuras verticales	Castillos de concreto con acero de refuerzo 0.25 x 0.25 m	In-situ concrete column, 250 x 250 mm, C30/37, with One Click LCA data	México	27.50	m
Muros interiores	Ladrillo de barro (0.7 x 0.14 x 0.27m) 50.21 m ²	Clay brick (One Click LCA)	México	14,270.53	kg
	Mortero de pega para piezas de mampostería	Mortar for masonry use, 1500 kg/m ³ (SNMI)	Francia	1,657.06	kg
Estructuras horizontales	Vigas de concreto con acero de refuerzo, 0.35 x 0.40 m	In-situ concrete beam, 350 x 400 mm, C30/37, with One Click LCA data	México	45.00	m
Piso	Firme de concreto con acero de refuerzo 0.12 m.	Concrete cast-in-situ floor slab assembly, 120 mm depth, C25/30, for Spain	España	56.00	m ²
Techo	Vigueta y bovedilla, 0.15m	Floor slab with beams and interjoists from EPS, 22 kg/m ²	Francia	69.83	m ²
Puertas interiores	Puerta de madera 2.10x0.80 m	Interior door	Europa	2.04	m ²
Puertas exteriores	Puerta de hierro 2.10x0.80 m	Steel door, interior, 1 3/4in x 4x8 ft (Total Door Systems)	EUA	2.04	m ²
Ventanas	Marco de aluminio	Aluminum window frame, 50in x 58in	EUA	1.24	m ²
	Vidrio sencillo	Window glass, single, 7.5 kg/m ²	Alemania	1.24	m ²
Otras estructuras	Escaleras de concreto armado	Concrete assembly for stairs and elevator shafts per one metre height	México	2.50	m

continúa...

SUSPIRO 3				42.30	m ²
	Sistema/material constructivo	Sistema/material constructivo (Base de datos del software OneClick LCA)	Fuente de información (región/país)	Cantidad	Unidad
Cimentación	Zapatas aisladas de 0.6m x 0.6m (8 unidades)	Footing foundations for hard soils (sand, gravel, silt or clay) per GFA, Includes: point and strip footings	México	2.88	m ²
	Capa de concreto pobre de 5 cms para desplantar firme de concreto	Concrete cleanliness per GFA, C12/C15	México	29.00	m ²
Muros exteriores	Ladrillo de barro (0.7 x 0.14 x 0.27m) 49.67 m ² ,	Clay brick (One Click LCA)	México	14,116.21	kg
	Mortero de pega para piezas de mampostería	Mortar for masonry use, 1500 kg/m3 (SNMI)	Francia	1,639.14	kg
	Enjarre cemento-arena, 1 cm	Render finishing, 10 mm	Europe	49.67	m ²
Estructuras verticales	Castillos de concreto con acero de refuerzo 0.25 x 0.25 m	In-situ concrete column, 250 x 250 mm, C30/37, with One Click LCA data	México	17.36	m
Muros interiores	Ladrillo de barro (0.7 x 0.14 x 0.27m) 12.29 m ² ,	Clay brick (One Click LCA)	México	3,493.88	kg
	Mortero de pega para piezas de mampostería	Mortar for masonry use, 1500 kg/m3 (SNMI)	Francia	405.70	kg
Estructuras horizontales	Vigas de concreto con acero de refuerzo, 0.35 x 0.40 m	In-situ concrete beam, 350 x 400 mm, C30/37, with One Click LCA data	México	30.64	m
Piso	Firme de concreto con acero de refuerzo 0.12 m.	Concrete cast-in-situ floor slab assembly, 120 mm depth, C25/30, for Spain	España	32.87	m ²
Techo	Vigueta y bovedilla, 0.15m	Floor slab with beams and interjoists from EPS, 22 kg/m2	Francia	32.87	m ²
Puertas exteriores	Puerta de hierro 2.10x0.80 m	External door	Europa	2.04	m ²
Ventanas	Marco de aluminio	Aluminum window frame, 50in x 58in	EUA	3.55	m ²
	Vidrio sencillo	Window glass, single, 7.5 kg/m2	Alemania	3.55	m ²

continúa...



ZARAGOZA 4				68.90	m ²
	Sistema/material constructivo	Sistema/material constructivo (Base de datos del software OneClick LCA)	Fuente de información (región/país)	Cantidad	Unidad
Cimentación	Zapatas aisladas de 0.6m x 0.6m (14 unidades)	Footing foundations for hard soils (sand, gravel, silt or clay) per GFA, Includes: point and strip footings	México	5.04	m ²
	Capa de concreto pobre de 5 cms para desplantar firme de concreto	Concrete cleanliness per GFA, C12/C15	México	68.90	m ²
Muros exteriores	Tabique de cemento de 0.1x.14x.28 m (121.96 m2)	Lightweight concrete masonry units, German average, Nat. aggregates and trass cement, 450 kg/m3, Vollblock leicht (Bundesverband Leichtbeton)	Alemania	29,975.08	kg
	Mortero de pega para piezas de mampostería	Mortar for masonry use, 1500 kg/m3 (SNMI)	Francia	3,109.90	kg
	Enjarre cemento-arena, 1 cm	Render finishing, 10 mm	Europe	121.96	m ²
Estructuras verticales	Castillos de concreto con acero de refuerzo 0.25 x 0.25 m	In-situ concrete column, 250 x 250 mm, C30/37, with One Click LCA data	México	40.32	m
Muros interiores	Tabique de cemento de 0.1x.14x.28 m (11.52 m2)	Lightweight concrete masonry units, German average, Nat. aggregates and trass cement, 450 kg/m3, Vollblock leicht (Bundesverband Leichtbeton)	Alemania	7,324.36	kg
	Mortero de pega para piezas de mampostería	Mortar for masonry use, 1500 kg/m3 (SNMI)	Francia	983.40	kg
	Enjarre cemento-arena, 1 cm	Render finishing, 10 mm	Europe	29.80	m ²
Estructuras horizontales	Vigas de concreto con acero de refuerzo, 0.35 x 0.40 m	In-situ concrete beam, 350 x 400 mm, C30/37, with One Click LCA data	México	47.88	m
Piso	Firme de concreto con acero de refuerzo 0.12 m.	Concrete cast-in-situ floor slab assembly, 120 mm depth, C25/30, for Spain	España	68.90	m ²
Techo	Vigueta y bovedilla, 0.15m	Floor slab with beams and interjoists from EPS, 22 kg/m2	Francia	68.90	m ²
Puertas interiores	Puerta de hierro 2.10x0.80 m	Steel door, interior, 1 3/4in x 4x8 ft (Total Door Systems)	EUA	3.36	m ²
	Marco de aluminio para puerta corrediza de vidrio	Aluminum window frame, 50in x 58in	EUA	2.10	m ²
	Vidrio sencillo para puerta corrediza	Window glass, single, 7.5 kg/m2	Alemania	2.10	m ²
Puertas exteriores	Puerta de hierro 2.10x0.80 m	External door	Europa	4.09	m ²
Ventanas	Marco de aluminio	Aluminum window frame, 50in x 58in	EUA	3.28	m ²
	Vidrio sencillo	Window glass, single, 7.5 kg/m2	Alemania	3.28	m ²

continúa...

ZARAGOZA 5				38.40	m ²
	Sistema/material constructivo	Sistema/material constructivo (Base de datos del software OneClick LCA)	Fuente de información (región/país)	Cantidad	Unidad
Cimentación	Zapatas aisladas de 0.6m x 0.6m (9 unidades)	Footing foundations for hard soils (sand, gravel, silt or clay) per GFA, Includes: point and strip footings	México	3.24	m ²
	Capa de concreto pobre de 5 cms para desplantar firme de concreto	Concrete cleanliness per GFA, C12/C15	México	51.00	m ²
Muros exteriores	Tabique de cemento de 0.1x.14x.28 m (121.96 m ²)	Lightweight concrete masonry units, German average, Nat. aggregates and trass cement, 450 kg/m ³ , Vollblock leicht (Bundesverband Leichtbeton)	Alemania	9,333.54	kg
	Mortero de pega para piezas de mampostería	Mortar for masonry use, 1500 kg/m ³ (SNMI)	Francia	776.42	kg
Estructuras verticales	Castillos de concreto con acero de refuerzo 0.25 x 0.25 m	In-situ concrete column, 250 x 250 mm, C30/37, with One Click LCA data	México	22.59	m
Muros interiores	Tabique de cemento de 0.1x.14x.28 m (11.52 m ²)	Lightweight concrete masonry units, German average, Nat. aggregates and trass cement, 450 kg/m ³ , Vollblock leicht (Bundesverband Leichtbeton)	Alemania	7,067.46	kg
	Mortero de pega para piezas de mampostería	Mortar for masonry use, 1500 kg/m ³ (SNMI)	Francia	587.91	kg
	Enjarre cemento-arena, 1 cm	Render finishing, 10 mm	Europe	39.19	m ²
Estructuras horizontales	Vigas de concreto con acero de refuerzo, 0.35 x 0.40 m	In-situ concrete beam, 350 x 400 mm, C30/37, with One Click LCA data	México	29.79	m
Piso	Firme de concreto con acero de refuerzo 0.12 m.	Concrete cast-in-situ floor slab assembly, 120 mm depth, C25/30, for Spain	España	51.13	m ²
Techo	Losa de concreto armado de 0.15m de espesor	Concrete cast-in-situ roof slab assembly, 150mm depth, C 30/37, U-value 0.44 W/m ² K, Climate Zone A, for Spain	España	47.00	m ²
Puertas exteriores	Puertas de hierro	External door	Europa	4.09	m ²
Ventanas	Marco de aluminio	Aluminum window frame, 50in x 58in	EUA	8.30	m ²
	Vidrio sencillo	Window glass, single, 7.5 kg/m ²	Alemania	8.30	m ²

ANEXO B. Materiales y sistemas constructivos de los casos base (*baseline*)

	Sistema/material constructivo (Base de datos del software OneClick LCA)	Unidad	Fuente de información (región/país)	BL-SUSPIRO1 64.8 m ²	BL-SUSPIRO2 70 m ²	BL-SUSPIRO3 42.3 m ²	BL- ZARAGOZA4 68.9 m ²	BL- ZARAGOZAS 38.4 m ²
Cimentación	Footing foundations for hard soils (sand, gravel, silt or clay) per GFA, Includes: point and strip footings	m ²	México	64.80	70.00	42.30	68.90	38.40
	Concrete cleanliness per GFA, C12/C15	m ²	México	64.80	70.00	42.30	68.90	38.40
Muros exteriores	Painted or stained wood cladding, Wood cladding 20 mm + wooden lathes 12x36 mm	m ²	México	87.00	69.00	47.00	81.00	62.00
	Brick sandwich wall assembly, incl. mineral wool insulation	m ²	Francia	87.00	69.00	47.00	81.00	62.00
Estructuras verticales	In-situ concrete column, 300 x 300 mm, C30/37, with One Click LCA data	m	México	21.00	16.00	14.00	18.00	16.00
	Reinforced concrete shear wall, 200 mm, C30/37, with One Click LCA data	m ²	México	5.00	4.10	2.70	4.70	3.60
Muros interiores	Plasterboard, filled, sanded and painted	m ²	Europe	50.00	52.00	27.00	46.00	43.00
	Wooden stud internal wall assembly, 100 mm, incl. mineral wool insulation, Wooden stud wall 98 mm, incl. mineral wool insulation 100 mm and plasterboard 13 mm on both sides	m ²	Europe	81.00	66.00	43.00	77.00	59.00
Piso	Concrete ground slab assembly Incl. insulation, 550 mm	m ²	México	64.80	70.00	42.30	68.90	38.40
	Parquet flooring, incl. vapourproof membrane	m ²	Europe	35.00	36.00	19.00	32.00	30.00
	In-situ concrete beam, 350 x 400 mm, C30/37, with One Click LCA data	m	México	45.00	37.00	27.00	39.00	33.00
	Vinyl floor covering	m ²	Europe	7.50	7.80	4.10	6.90	6.50
	Ceramic tiles, incl. underlayment membrane	m ²	Europe	7.50	7.80	4.10	6.90	6.50
Techo	Wooden frame roof assembly, U-value 0.13 W/m ² K, 375 mm	m ²	Europe	56.00	70.00	42.30	68.90	38.40
	OSB sheeting board and bitumen membrane	m ²	Europe	67.00	68.00	36.00	74.00	55.00
Puertas interiores	Interior door	m ²	Europa	9.00	7.30	4.80	8.50	6.50
Puertas exteriores	External door	m ²	Europa	1.10	1.10	0.60	1.20	0.92
Ventanas	Triple glazed window, incl. wood-alu frame	m ²	Europa	11.00	11.00	6.00	12.00	9.20
Escaleras	Concrete assembly for stairs and elevator shafts per one metre height	m ²	Europa	-	2.50	-	-	-

VIVIENDAS DE INTERÉS SOCIAL EN MORELIA: CARACTERÍSTICAS Y MATERIALES PÉTREOS

Marco Antonio Navarrete Seras¹
Elia Mercedes Alonso-Guzmán²
Wilfrido Martínez- Molina³
Hugo Luis Chávez García⁴
Mauricio Arreola-Sánchez⁵
Jorge Alberto Borrego-Pérez⁶

Resumen

En México, actualmente la vivienda de interés social se sigue utilizando dentro de sus elementos estructurales de construcción materiales pétreos (grava y arena). Resulta importante conocer el comportamiento físico mecánico del concreto en estado endurecido

1 Profesor e investigador de la Facultad de Ingeniería Civil UMSNH, mnavarrete@umich.mx

2 Profesor e investigador de la Facultad de Ingeniería Civil UMSNH, elia.alonso@umich.mx

3 Profesor e investigador de la Facultad de Ingeniería Civil UMSNH, wilfrido.martinez@umich.mx

4 Profesor e investigador de la Facultad de Ingeniería Civil UMSNH, luis.chavez@umich.mx

5 Profesor e investigador de la Facultad de Ingeniería Civil UMSNH, mauricio.arreola@umich.mx

6 Profesor de la Facultad de Ingeniería Civil UMSNH-CONACYT, jorge.borrego@umich.mx

cuya matriz está formada por los agregados pétreos unidos con un cementante. Las arenas y gravas que se utilizaron para la elaboración de muestras de concreto hidráulico provienen de la región Puruándiro y los fragmentos de roca de diferentes canteras de la región de Morelia y zonas cercanas (Joyitas, Cerritos, Tigre, Cuenembo, Huiramba, Comanja, Maskutan, Melon, AGC y el Colegio). Para conocer las propiedades de los materiales utilizados se realizaron pruebas a las arenas (humedad actual, humedad superficial, humedad de absorción en arenas, densidad de la arena, peso volumétrico seco suelto (P.V.S.S), peso volumétrico seco varillado (P.V.S.V), colorimetría, equivalente de arena, granulometría a las gravas (cuarteo, humedad actual, humedad de absorción, densidad, P.V.S.S., P.V.S.V.) y a los fragmentos de roca (humedad actual, densidad, gravedad específica, absorción, índice de carga puntual $I_{S(50)}$).

Para analizar las propiedades mecánicas, se fabricaron cilindros y vigas de concreto hidráulico, con las cuales se determinó resistencia a compresión simple, módulo de ruptura, flexión en vigas, tensión indirecta y pruebas no destructivas (resistividad eléctrica y velocidad de pulso ultrasónico).

Resulta interesante observar y comparar el comportamiento mecánico del concreto hidráulico y de los fragmentos de diferentes canteras. Por otro lado, la necesidad de crear nuevos espacios dentro de una vivienda hace que se utilicen más los materiales pétreos en la elaboración de concreto hidráulico.

Introducción

En la actualidad, la vivienda, particularmente la de interés social, constituye uno de los ejes más importantes en la planificación urbana de una ciudad. Una vivienda adecuadamente diseñada en función de las características y necesidades de los usuarios, resulta esencial para el desarrollo psicológico social, que favorece la sustentabilidad urbana y contribuye a elevar el bienestar con un menor costo futuro, reduciendo el impacto ambiental. Sin embargo, los modelos para la gestión de la vivienda de interés social que han predominado en América Latina durante las últimas décadas, generan soluciones orientadas hacia los aspectos cuantitativos, mientras que la calidad, en especial la del diseño, es subvalorada (Pérez, 2014).

A nivel internacional, se han realizado diferentes estudios de viviendas sociales. El estudio de la calidad ambiental interior (IEQ) suele verse agravado por las deficientes características de diseño y construcción, tal es el caso de Melbourne (Australia) donde una proporción considerable de las viviendas sociales son edificios de gran altura, se realizaron encuestas a los habitantes de estos edificios donde el parámetro que más influyó en la satisfacción general en la IEQ fue el “ruido” debido a que no pueden abrir las ventanas por el ruido proveniente del exterior (Jara-Baeza, *et al.*, 2023). En Brasil se realizó un estudio que evaluó el acceso urbano de un programa nacional de vivienda social, Mi Casa Mi Vida (Minha Casa Minha Vida, MCMV), y encontraron que, aunque los beneficiarios

del MCMV tienen menos acceso a oportunidades de empleo que los ciudadanos de ingresos medios, el programa puede mejorar sus condiciones, en comparación con individuos con niveles de ingresos similares dentro de las ciudades centrales (Leite, *et al.*, 2022). A partir de los datos de la Encuesta Dinámica de Migrantes de China de 2017, recopilados por la Comisión Nacional de Salud de China, determinaron que los efectos positivos de la vivienda en propiedad y de la vivienda pública sobre la integración social de los inmigrantes se refuerzan significativamente en las ciudades de primer nivel y en las ciudades con estructuras industriales avanzadas y una mayor relación entre el precio de la vivienda y los ingresos (Lin, *et al.*, 2023).

En México existe el Código de Edificación de Vivienda (CEV), en donde, la construcción de vivienda depende en gran medida de las fuerzas del mercado y de las políticas de las fuentes de financiamiento. Las principales características que diferencian a las viviendas son: precio final en el mercado, forma de producción, superficie construida o número de cuartos, entre otros. Por ende, se toma como fundamento el precio y la forma de producción de la vivienda. Según el CEV, la vivienda se clasifica en economía, popular y tradicional, llamadas comúnmente como viviendas de interés social, así como las viviendas media, residencial y residencial plus, construyéndose en conjuntos habitacionales y fraccionamiento (CONAVI, 2010).

Uso de los materiales pétreos en la región

La calidad del agregado pétreo usado en la construcción es de suma importancia, ya que le corresponden aproximadamente tres cuartas partes del volumen del concreto. El agregado no solo puede limitar la resistencia del concreto, sino que sus propiedades pueden afectar enormemente su durabilidad y desempeño.

En un principio, al agregado se le consideró un material inerte, no costoso, disperso en la pasta de cemento para producir un gran volumen de concreto. El agregado no es inerte, sus propiedades físicas, térmicas y, en ocasiones químicas, pueden influir en el desempeño del concreto, por ejemplo, mejorando su durabilidad y estabilidad de volumen sobre los de la pasta de cemento. Económicamente, es ventajoso emplear una mezcla con el mayor contenido posible de agregado y el menor posible de cemento, aunque el costo debe balancearse con las propiedades deseadas del concreto en estado fresco y endurecido.

Los agregados naturales se forman por procesos climáticos y abrasivos, o por molido artificial de una gran masa del material de origen. Muchas características del agregado dependen de las propiedades de la roca original, como lo es la composición química y mineral, la clasificación petrográfica, la gravedad específica, la dureza, la resistencia, la estabilidad química y física, la estructura de poro, el color, etc. Además, el agregado tiene otras propiedades diferentes de las de la roca original: forma

y tamaño de la partícula, textura de superficie y absorción; las cuales pueden influir considerablemente en la calidad del concreto fresco o fraguado.

Aun cuando se conocen todas estas propiedades, es difícil definir lo que es un buen agregado para concreto. Un agregado cuyas propiedades resulten satisfactorias dará por resultado un buen concreto; por lo tanto, es necesario emplear un criterio para el desempeño del concreto. Por ejemplo, una muestra de roca puede resquebrajarse debido al congelamiento, pero no necesariamente sucederá así si está inmersa en concreto. Sin embargo, por lo general, un agregado considerado pobre en más de un aspecto no es deseable para hacer un concreto satisfactorio, por lo que conviene someterlo a prueba para determinar su valor (Neville, 1994).

La arena se define como el conjunto de granos sueltos de estructura cristalina, que pasa por completo por la malla N.º 4 y son retenidos en la malla N.º 200, los cuales resultan de la desintegración y abrasión de las rocas naturales por procesos mecánicos o químicos y que, arrastrados por el aire o agua, se acumulan en lugares determinados. Artificialmente, se obtienen por trituración de las rocas duras (Saavedra-Jacobo, 2008).

La arena que se pretende utilizar para fabricar concreto queda normada, de acuerdo con la especificación y análisis granulométrico de agregado fino; en esta norma se marcan los parámetros de tamaño y graduación de la arena (ASTM-C136, 2014).

Otro parámetro muy importante que debe de cumplir el agregado fino o arena que se pretenda utilizar para fabricar concreto hidráulico es el módulo de finura (ASTM-C136, 2014), MF, el cual queda definido por la especificación (ASTM-C33, 2008) y se pide que esté dentro del rango de 2.3 a 3.2.

La grava se define como el material grueso que es retenido generalmente por la malla N.º 4, que resulta de la desintegración y abrasión natural de la roca o al procesar un conglomerado débilmente ligado. Los tipos de gravas usualmente utilizados en la fabricación de concreto son: natural, triturada, residuos, materiales reciclados y escorias de alto horno.

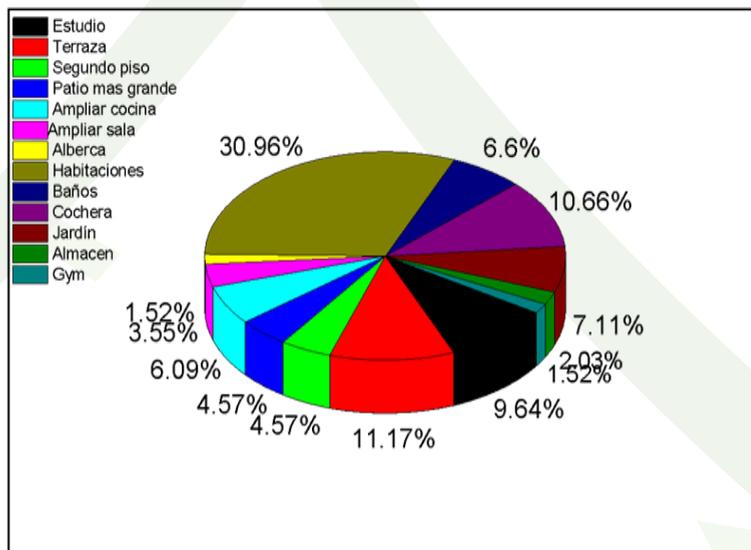
Es deseable que las partículas de los agregados finos y gruesos sean resistentes, densas, durables, limpias y libres de elementos indeseables como arcillas, limos o materia orgánica, si se cumple con estos requisitos ayudamos a que el concreto fabricado sea de mejor calidad (Saavedra-Jacobo, 2008).

Estadística de la vivienda de interés social y sus espacios

Para entender la relación entre los materiales pétreos y la importancia que tienen para la mejora, remodelación o adaptación de espacios en relación con los usos de los habitantes,

en esta investigación se realizaron encuestas en cinco fraccionamientos de Morelia, Michoacán, México, con la intención de conocer el tipo de materiales con el que se encuentran construidas sus viviendas y si los espacios con los que cuenta su vivienda son suficientes para realizar sus actividades. De acuerdo con las encuestas, el 59.6 % de los encuestados desean ampliar su vivienda y 40.4 % no desean ampliar su vivienda. En la figura 1 se muestra que, del 59.6 %, un 30.96 % requieren más habitaciones y en segundo lugar, con 11.17 %, requieren una terraza. Esta gráfica nos habla y demuestra la necesidad de mayor espacio en la vivienda.

Figura 1. Espacios que les gustaría que tuviera la vivienda



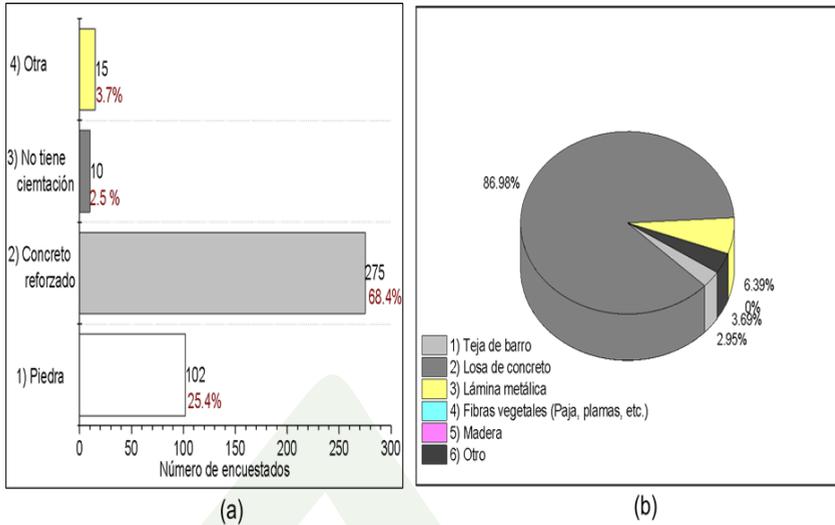
Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la figura 1, en promedio, las viviendas actuales carecen de espacios indispensables para los ocupantes de las mismas, los principales son: habitaciones, terrazas, cochera, estudio, entre otros. Estos resultados se deben considerar como información inicial para la toma de decisiones en nuevos desarrollos habitacionales y construir viviendas con espacios dignos. Además, sirve como parámetro para localidades cercanas en las que se requiere ampliar o remodelar las viviendas.

Materiales empleados

De los materiales empleados, según las encuestas realizadas a los usuarios de viviendas de interés social, 68.4 % mencionaron que se usó concreto reforzado en la cimentación (figura 2a), en relación con las losas, el 90 % de los encuestados mencionó el uso de concreto hidráulico (figura 2b).

Figura 2. Uso del concreto hidráulico: (a) Concreto reforzado y (b) Losa de concreto



Fuente: Elaboración propia.

El estudio se centra en material pétreo y fragmentos de roca provenientes de la región Morelia y Puruándiro, el material pétreo se utilizó en la elaboración de concreto hidráulico del cual se obtuvieron sus propiedades físico-mecánicas y de los fragmentos de roca también se obtuvieron sus propiedades físico-mecánicas, ambos materiales con potencial uso en la construcción de vivienda, con la finalidad de conocer las características físico-mecánicas de los agregados pétreos con los que actualmente se está construyendo la vivienda en Puruándiro y en Morelia.

Ubicación

La ciudad de Puruándiro se sitúa en la parte norte de Michoacán, en las coordenadas 20°05', de latitud norte, y 101°31', de longitud oeste, a una altura de 1 890 metros sobre el nivel del mar. Ocupa una amplia planicie localizada a 33 km del río Lerma y a 25 km del río Ángulo. La separan de la capital michoacana 86 km hacia el noroeste y 392 km en la misma dirección, de la ciudad de México.

Materiales

En general se determinaron las propiedades físicas y mecánicas de 5 arenas de origen volcánico que se ofrecen en la región de Puruándiro, Michoacán, para su uso en construcción; con el fin de diseñar proporcionamientos para la elaboración de concreto hidráulico con mejores características mecánicas, además de conocer las sustituciones posibles de arena en el concreto para que este sea resistente, durable y lo más económico posible. Sin embargo, también se determinó la carga puntual y la densidad de los fragmentos de rocas de bancos de materiales pétreos para conocer sus propiedades físicas-mecánicas, con la finalidad de utilizarlos como alternativa en la elaboración de concreto hidráulico.

Se realizó la recolección de las 5 muestras, directamente de los bancos de arena en estudio, con el propósito de garantizar que las muestras cumplieran con las características representativas del material que ahí se extrae y se vende a los constructores de la región.

La grava utilizada en este estudio, fue grava triturada del banco Tlazazalca, ubicado en Tlazazalca, Michoacán, se eligió este tipo de grava debido a que la grava triturada guarda características ideales para fabricar concreto hidráulico de resistencias altas, debido a su dureza, baja absorción, y alto peso volumétrico, se eligió dicho banco en específico ya que la grava ahí producida tiene una granulometría bien graduada lo cual es esencial para fabricar un concreto denso y con baja porosidad, debido al correcto acomodo y distribución de las partículas de los agregados.

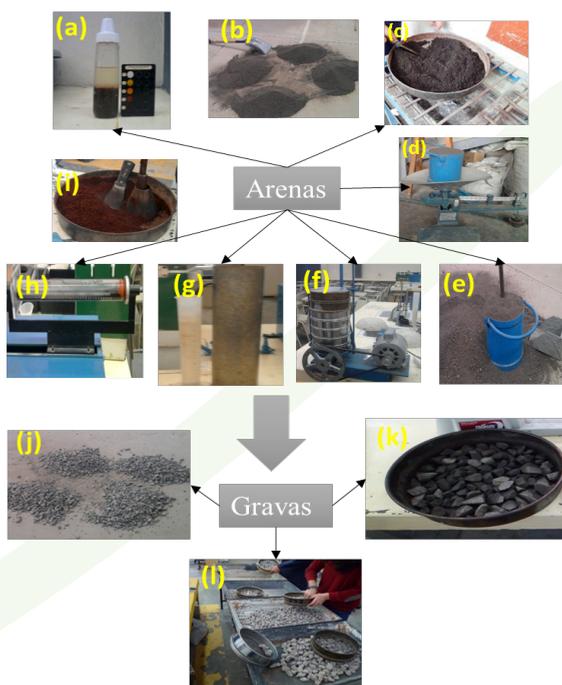
Las mezclas para fabricar los especímenes de concreto (cilindros y vigas) fueron hechas con los agregados mencionados, utilizando para ello agua potable de la red municipal, esto para descartar agentes extraños que pudieran afectar a la resistencia de los especímenes.

Cabe mencionar que en esta experimentación la única variable entre las diferentes muestras fue solo la arena, con esto se garantiza que las diferencias entre los resultados obtenidos sean provocadas por las características de las diferentes muestras de arena (Díaz-Pichardo, 2013, p. 122).

Caracterización física

Determinar las características físicas de las arenas, gravas y fragmentos de roca (figura 3) es una parte crucial en el diseño del concreto hidráulico, ya que de ello depende realizar un buen diseño que se verá reflejado en la calidad del concreto hidráulico en estado endurecido.

Figura 3. Pruebas realizadas a las arenas⁷



Fuente: Díaz-Pichardo (2013).

7 A continuación, se enumeran la nomenclatura: (a) colorimetría, (b) cuarteo, (c) humedad actual, (d) peso volumétrico seco suelto (P.V.S.S.), (e) peso volumétrico seco varillado (P.V.S.V.), (f) granulometría, (g) densidad por medio del picnómetro, (h) equivalente de arena y (i) porcentaje de absorción. Pruebas realizadas a las gravas: (j) cuarteo, (k) porcentaje de absorción y (l) granulometría.

Al realizar las pruebas de densidad, pesos volumétricos, absorción, equivalente de arena, colorimetría y granulometría a las diferentes arenas, se apreciaron claras diferencias entre las muestras, al obtener mejores resultados para las muestras de Chamacuero y Sta. Clara (N), principalmente, y los peores resultados para las muestras de Janamuato y Sta. Clara (R.), la muestra del Armadillo arrojó resultados regulares. Por ejemplo, en la prueba de absorción, la muestra de Chamacuero arrojó un valor de 3.18 %, siendo éste el valor más bajo obtenido; en cambio, la muestra de Sta. Clara (R.) arrojó un valor de 9.32 %, siendo éste el valor más alto de las 5 muestras y por consiguiente dejando ver que esta muestra físicamente es la de peor calidad. En la prueba de densidad la muestra de Chamacuero una vez más obtuvo el mejor valor registrando 2.48 g/cm³; en cambio, la muestra de Janamuato ocupó el valor más bajo, registrando 2.23 g/cm³. Por lo cual queda claro que las muestra que registraron los valores más bajos de absorción y los valores más altos de densidad son las que presentan mejores características para fabricar concreto hidráulico, en cambio a las que presentan resultados inversos, dejan ver claras deficiencias que afectarán al comportamiento mecánico de los especímenes colados con ellas (Díaz-Pichardo, 2013).

En cuanto a la granulometría todas las arenas se comportan diferente debido a que algunas se encuentran dentro de los límites establecidos para las arenas y otras no cumplen con los límites establecidos (tabla 1).

Pero además se realizaron pruebas físicas y mecánicas a los fragmentos de roca (muestreo, humedad actual, densidad,

absorción e índice de carga puntual $I_{s(50)}$, provenientes de la región de Morelia (Cerritos, Huiramba, Joyitas, Comanja, Coenembo, El Tigre, Maskutan, El Melon, AGC y El Colegio). Los datos obtenidos de las pruebas físicas sirven para elaborar un concreto hidráulico que cumpla con los requerimientos que el constructor necesita.

Pruebas al concreto hidráulico

Las pruebas que se pueden realizar al concreto hidráulico son las siguientes: en estado fresco: trabajabilidad; en estado endurecido: a) pruebas no destructivas: velocidad de pulso ultrasónico, resistividad eléctrica, frecuencia de resonancia, densidad, gravedad específica; y, b) pruebas destructivas. Las pruebas nombradas con anterioridad permiten estimar el comportamiento del agregado pétreo dentro de la matriz cementicia, hecho que permite evaluar la calidad del concreto a emplearse en los diferentes elementos estructurales de una vivienda tal como lo demuestran los resultados de las encuestas.

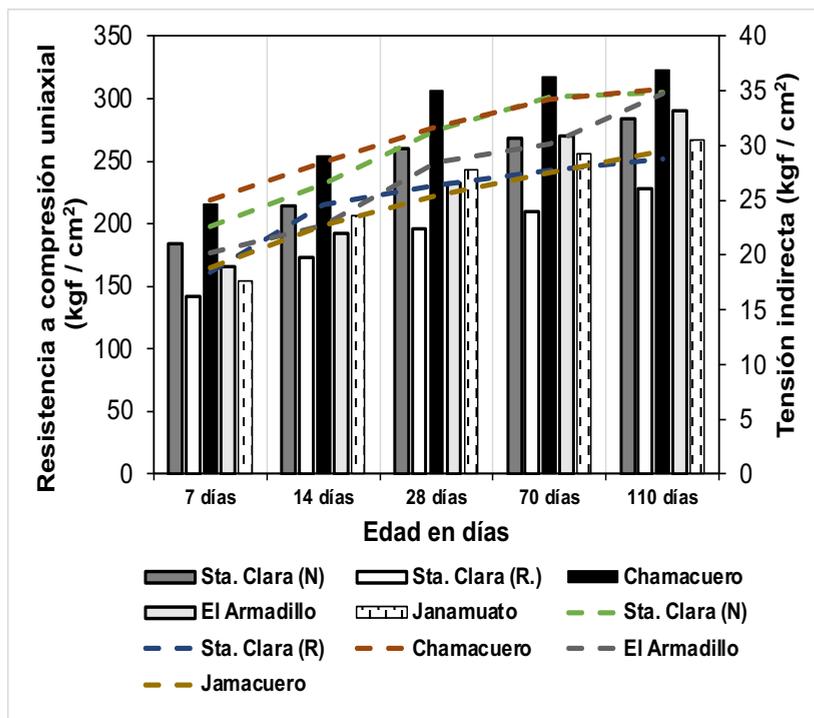
El cálculo de los proporcionamientos utilizados para las 5 mezclas se realizó con el método del American Concrete Institute (ACI). Las diferentes muestras de concreto para fabricar los especímenes se elaboraron en el laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería Civil, con ayuda de una revolvedora eléctrica con capacidad

para revolver un saco de 50 kg de cemento, en cada mezcla se midió el revenimiento, obteniendo valores entre los 10 cm y los 14 cm, lo cual es aceptable, ya que el revenimiento de diseño fue de 12 cm y la norma (NMX-C-156-ONNCCE, 2010, pp. 1-6) permite un margen de ± 2.5 cm para revenimientos mayores a 10 cm.

Pruebas mecánicas y no destructivas

En la figura 4 se observa el comportamiento de los especímenes cilíndricos de 10 cm por 20 cm a compresión, en esta gráfica se realiza una comparativa entre los valores promedio de los cilindros elaborados con las diferentes arenas, estos se probaron a edades de 7, 14, 28, 70 y 110 días siendo la resistencia de diseño de 250 kgf/cm². En general la tendencia de los especímenes fue aumentando conforme a la edad; sin embargo, existen diferencias de resistencia entre los especímenes; las muestras de Chamacuero alcanzan la resistencia de diseño desde los 14 días, lo cual indica una excelente resistencia a edades tempranas del concreto fabricado con esta arena. En cuanto a la tensión indirecta se muestra un comportamiento muy similar comparado con los cilindros probados a compresión, debido a que las muestras de Chamacuero y Sta. Clara (N) adquieren resistencia a la tensión indirecta más alta a edades tempranas; por el contrario, las muestras de Janamuato y Sta. Clara (R.) mostraron resultados de tensión indirecta más bajos.

Figura 4. Gráfica de los valores promedio del esfuerzo a compresión y tensión indirecta



Fuente: Díaz-Pichardo (2013).

Para hacer más evidente la calidad del concreto elaborado con las diferentes muestras de arena y visualizar su incremento de resistencia conforme a la edad, se realizó una comparativa de la resistencia en porcentaje obtenida de los especímenes en las diferentes edades contra lo que marca la norma NMX-C-083-ONNCE, esto se puede apreciar en la figura 5.



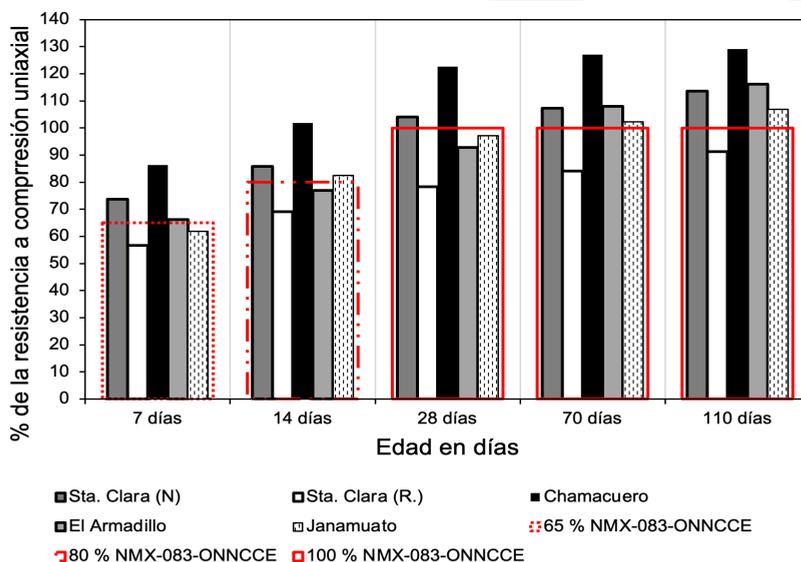
Para la edad de 7 días la norma marca que los cilindros deberán alcanzar un 65 % de resistencia, las muestras de Chamacuero, Sta. Clara (N) y el Armadillo si lo alcanzaron, incluso lo sobrepasaron, registrando resistencias de 86.2 %, 73.74 % y 66.24 % respectivamente, las muestras de Janamuato y Sta. Clara (R.) registrando 61.8 % y 56.63 %, respectivamente. A los 14 días de edad, la norma marca un 80 % de incremento de resistencia, para esta edad nuevamente las muestras de Janamuato y Sta. Clara (R.) quedaron por debajo de este porcentaje de resistencia. A los 28 días las muestras de Chamacuero, Sta. Clara (N), El Armadillo, Janamuato y Sta. Clara (R.) registraron 122.72 %, 104.11 %, 92.89 %, 97.16 % y 78.38 %, respectivamente. Esta edad es la edad referente de diseño, ya que la norma marca que a los 28 días se alcanza el 100 % de la resistencia de diseño; por lo tanto, se pueden hacer 3 observaciones fundamentales. La primera es que las muestras de Chamacuero y Sta. Clara (N), registran un comportamiento muy bueno y estable desde edades tempranas, la segunda es que la muestra del Armadillo, aunque siguió aumentando de resistencia, lo hizo en menor proporción y para esta edad no alcanzó el 100 % de resistencia, y la última es que las muestras de Janamuato y Sta. Clara (R.) nuevamente quedaron por debajo de lo establecido en la norma, siendo la muestra de Sta. Clara (R.) la de comportamiento menos adecuado registrado, ya que incluso a esta edad (28 días), no alcanzó lo previsto en la norma para los 14 días.

100

Para las edades de 70 y 110 días, la norma ya no tiene un mínimo de resistencia establecido, pero sabemos que el concreto seguirá

endureciéndose y obteniendo mayor resistencia con el transcurso del tiempo. A los 110 días de edad, la muestra de Chamacuero registró 29.1 %, más de la resistencia de diseño, la muestra de Sta. Clara (N) registró 13.6 % más, la muestra del Armadillo registró 16.25 % más, la muestra de Janamuato, para esta edad, registro 6.9 % más y la muestra de Sta. Clara (R.) no alcanzó el 100 % de resistencia a ninguna edad del estudio, quedando un 9 % por debajo del 100 % en esta edad, lo que nos indica un comportamiento deficiente a los esfuerzos de compresión (Díaz-Pichardo, 2013, p. 136).

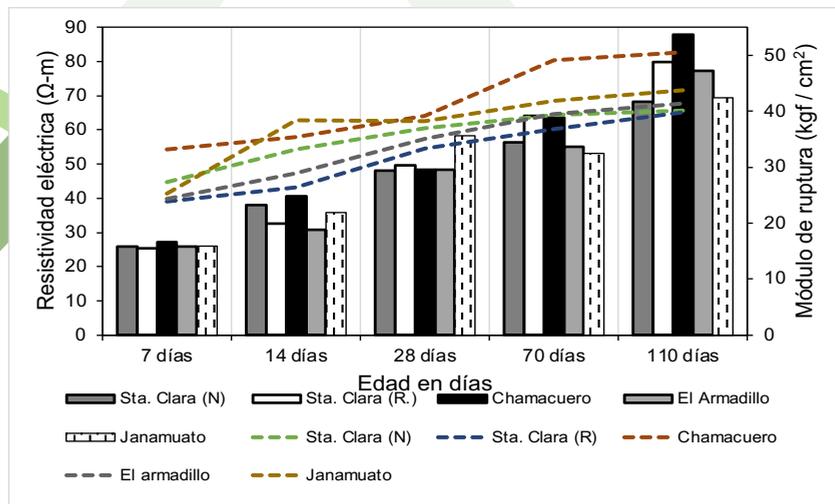
Figura 5. Comparación de la resistencia a compresión en porcentajes comparados con la norma (NMX-C-083-ONNCCE, 2002).



Fuente: Díaz-Pichardo (2013).

La prueba de resistividad eléctrica indica el riesgo a la corrosión del concreto, observando la gráfica de resultados (figura 6), se puede apreciar un comportamiento de ascenso constante de acuerdo al paso de los días. Sin embargo, a la edad de 7 días, hasta la última de 110 días, todas las muestras registraron valores menores a $10 \text{ k}\Omega\text{-cm}$; por lo tanto, aunque existe aumento en la resistividad con el transcurso del tiempo, los diferentes concretos se clasifican como de alto riesgo (DURAR, 1997; NMX-C-514-ONNCCE, 2016). Para el módulo de ruptura se utilizó la norma NMX-C-091-ONNCCE-2004 (2004) la cual indica que la resistencia a la flexión debe ser del 10 % al 20 % de su resistencia a compresión, por lo que se puede observar en la figura 7 que todas las muestras cumplen con este parámetro.

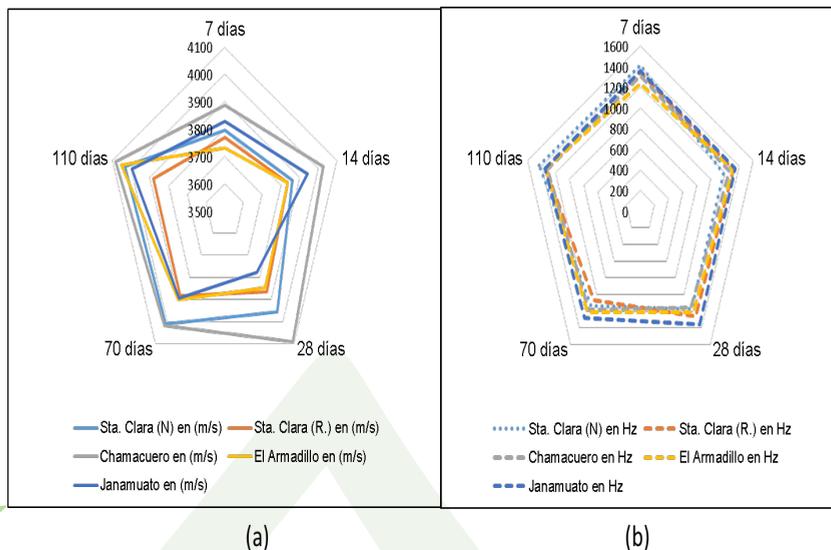
Figura 6. Valores promedio de resistividad eléctrica y módulo de ruptura



Fuente: Díaz-Pichardo (2013).

En la prueba de velocidad de pulso ultrasónico (ASTM-C597, 2016), los valores obtenidos, se comparan con una tabla que publicó Malhotra en el año 1985, de esta manera se obtiene la clasificación del concreto con base en su velocidad ultrasónica. De acuerdo con esta clasificación, se obtuvo que para todas las muestras el concreto es de buena calidad, ya que sus valores de velocidad ultrasónica se situaron entre 3 660 y 4 575 m/s (figura 7-a). Para las pruebas de resonancia magnética se obtuvieron valores muy inestables, registrando los valores más altos a 7 días, después se dio un comportamiento de descenso hasta alcanzar su valor mínimo a los 70 días, y después volvió a incrementar a los 110 días, registrando un valor muy similar al de los 7 días de edad. Esta prueba no deja claro el comportamiento del concreto, por lo cual se recomienda hacer pruebas a edades tardías y correlacionarlas con la resistencia a compresión para tener una idea más clara de la calidad del concreto (Díaz-Pichardo, 2013) (figura 7-b).

Figura 7. Pruebas no destructivas: (a) velocidad de pulso ultrasónico y (b) frecuencia de resonancia magnética



Fuente: Díaz-Pichardo (2013).

Propuesta en el uso de materiales pétreos

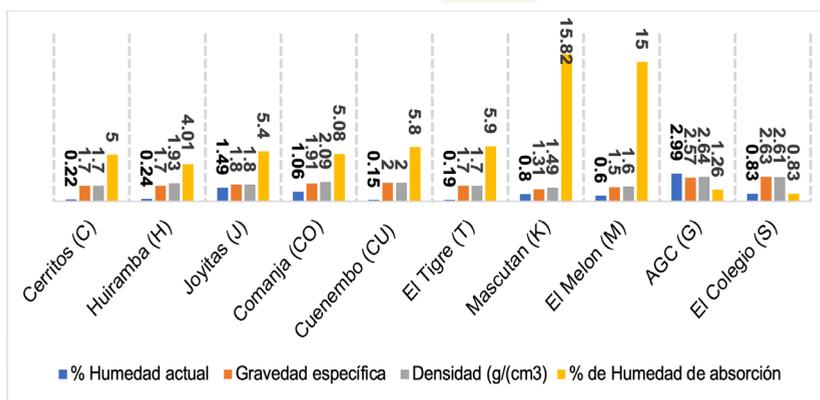
Se analizaron 35 muestras de fragmentos con forma irregular de 10 bancos de materiales pétreos distintos, para los materiales pétreos de origen volcánico sus tonalidades eran rojizas y oscuras.

En la figura 8 se muestran los resultados de las propiedades físicas tales como: humedad actual, porcentaje de absorción, densidad y gravedad específica (D18.12, 2015, pp. 1-7; Navarro, *et al.*,

2011), para los fragmentos de origen volcánico (C, H, J, CO, U, T, K, M) y de origen triturado (AGC y El Colegio). Se aprecia que la absorción de agua es mayor en el caso de los fragmentos de roca volcánica, comparados con los de los fragmentos roca triturada cuya absorción de agua es menor.

Se observa que tanto la densidad como la gravedad específica presentan ligeras variaciones de entre 1 a 2 g/cm³ para rocas volcánicas, y para material pétreo triturado de entre 2 a 3 g/cm³. En cuanto a la gravedad específica, se encuentran en el mismo rango de variación (Navarrete, *et al.*, 2013, pp. 154).

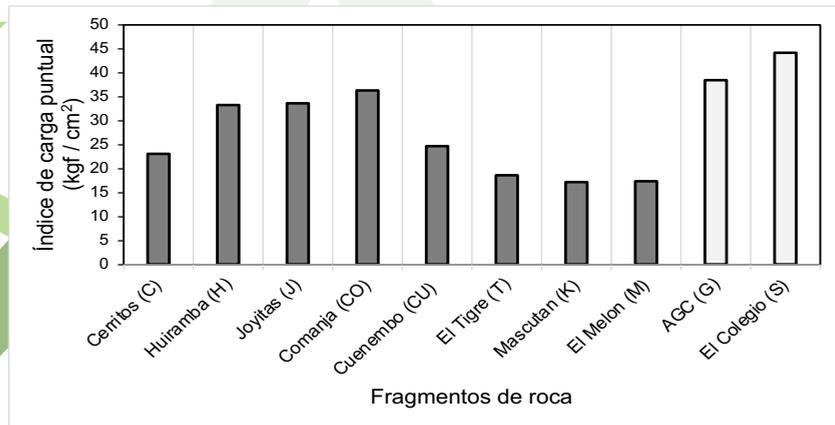
Figura 8. Propiedades físicas de los fragmentos irregulares



Fuente: Navarrete-Seras (2012).

En cuanto a la prueba de carga puntual (Point Load) se observa que el mayor índice ($I_{s(50)}$) se presenta en los bancos AGC y El Colegio (bancos de triturados), mismos que obtuvieron las mayores valores de densidades y la menor absorción; por lo tanto, es posible considerar que sean materiales pétreos compactos aptos para su uso en ingeniería. En contraste, los bancos de materiales no triturados presentan mayores valores de porosidad, lo cual se ve reflejado en menores valores del índice $I_{s(50)}$, asociado con el valor de la resistencia a compresión de la roca (figura 9) (Navarrete, *et al.*, 2013, pp. 143).

Figura 9. Prueba de carga puntual (D18.12, 2016, pp. 1-7)



Fuente: Navarrete-Seras (2012).

Conclusiones

Las arenas de Chamacuero y Sta. Clara (N) son de color negro y las muestras del Armadillo, Janamuato y Sta. Clara (R.) son de color rojizo. Las arenas de color rojizo indican que los minerales de hierro sufrieron oxidación, producto de los flujos hidrotermales, lo cual provoca cambios en su comportamiento físico, tal es el caso de la absorción de agua. En cuanto a los fragmentos tonalidades rojizas (Melon y Maskutan) presentan un comportamiento físico mecánico diferente al resto de las muestras de origen volcánico; por lo tanto, se intuye que este tipo de agregado pétreo se comporta de forma mecánica similar a los concretos en los que se utiliza arena rojiza (Chamacuero y Sta. Clara). Este estudio demuestra que se pueden experimentar otros bancos que posean mejores características físicas y mecánicas, que se vea reflejado en el diseño de mezclas y en el comportamiento del concreto endurecido.

Para el caso de las propiedades de los fragmentos de roca, como la densidad y gravedad específica, existe muy poca variación. El mayor índice de carga puntual se presenta en los bancos de AGC y El Colegio, mismos que tienen las mayores densidades y menores absorciones; por lo tanto, son materiales pétreos que dan mayores resistencias. Por otro lado, se requiere estudiar diferentes bancos de materiales pétreos del país para generar un catálogo de bancos de materiales pétreos por región, y con esto contribuir en la toma de decisiones del constructor, pero dicho catálogo debe contener las propiedades físico-mecánicas. Estos materiales se utilizan para realizar autoconstrucción

de su vivienda sin ningún control de calidad del concreto. Así, se concluye que, de acuerdo a las encuestas, el concreto se sigue utilizando de tal forma que se deben buscar hacia el futuro nuevos materiales que estén a favor del medio ambiente y con ello evitar la sobreexplotación de los agregados pétreos.

Referencias

- ASTM-C136. (2014). *Standard Test Method for. Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates.*
- ASTM-C33. (2008). *Specification for Concrete Aggregates.*
- ASTM-C597. (2016). *Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete.*
- CONAVI. (2010). *Código de edificación de vivienda (2.^a ed.).*
- D18.12, A. S. (2015). *Standard Test Method for Laboratory Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate ASTM C127-04.* American Society for Testing Materials (ASTM).
- D18.12, A. S. (2016). *Standard: D 5731-16. Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock.*
- Díaz-Pichardo, A. (2013). *Evaluación físico-química-mecánica de 5 arenas de la región de Puruándiro, Michoacán, México para su uso en concreto hidráulico [Tesis de licenciatura].* Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH.

- DURAR. (1997). *Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado*. CYTED, Red temática XV.B-durabilidad del hormigón.
- Jara-Baeza, F., Rajagopalan, P. y Andamon, M. M. (2023). A holistic assessment of indoor environmental quality perception in Australian high-rise social housing. *Energy and Buildings*, 284, 112859. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112859>
- Leite, C. C., Giannotti, M. y Gonçalves, G. (2022). Social housing and accessibility in Brazil's unequal cities. *Habitat International*, 127, 102628. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2022.102628>
- Lin, S., Wu, F., Wang, Y. y Li, Z. (2023). Migrants' perceived social integration in different housing tenures in urban China. *Geoforum*, 139, 103693. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2023.103693>
- Malhotra V., M. (1985). *Nondestructive methods for testing concrete*. In *Department of Energy, Mines and Resources*.
- Navarrete-Seras, M. A. (2012). *Evaluación de pétreos sin labrar teniendo como base el método de la carga puntual* [Tesis de maestría]. Facultad de Ingeniería Civil. UMSNH.
- Navarrete, M., Martínez Molina, W., Alonso-Guzmán, E. M., Lara-Gómez, C., Bedolla-Arroyo, J. A., Chávez, H., Delgado, D. y Arteaga, J. C. (2013). Caracterización de propiedades físico-mecánicas de rocas ígneas utilizadas en obras de infraestructura. *Revista ALCONPAT*, 3(2), 129–139. <https://doi.org/10.21041/ra.v3i2.49>
- Navarro, L., Martínez, W. y Espinoza, A. (2011). *Análisis de materiales*. *Manual de análisis de materiales, resistencia de materiales*. FIC-UMSNH.
- Neville, A. (1994). *Tecnología del concreto*. IMCYC.

NMX-C-083-ONNCCE. (2002). *Determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto. "Método de prueba"*.

NMX-C-091-ONNCCE-2004. (2004). *Determinación de la resistencia a la flexión del concreto usando una viga simple con carga en los tercios del claro*.

NMX-C-156-ONNCCE. (2010). *Industria de la construcción-concreto hidráulico-determinación del revenimiento en el concreto fresco-método de ensayo*.

NMX-C-514-ONNCCE. (2016). *Industria de la construcción-resistencia eléctrica del concreto hidráulico-especificaciones y métodos de ensayo*.

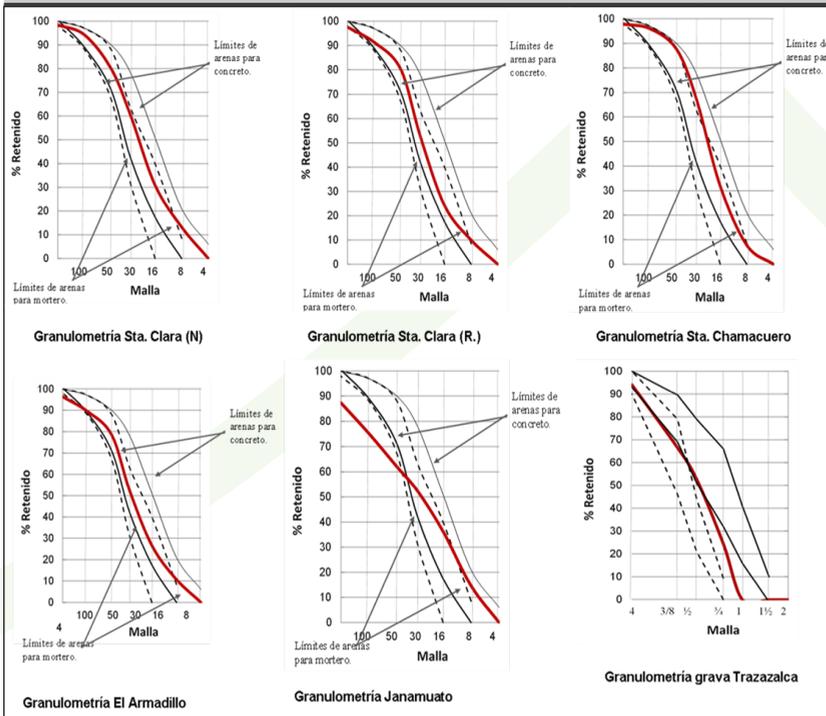
Pérez, P. A. L. (2014). *Bases para el diseño de la vivienda de interés social según las necesidades y expectativas de usuario*. Unisa-
lle.

Saavedra-Jacobo, J. (2008). *Análisis de materiales pétreos del banco "La Calabaza" de Comanja Michoacán, para elaboración de concreto hidráulico* [Tesis licenciatura]. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

ANEXOS

Tabla 1. Caracterización física de los materiales pétreos

Prueba	Sta. Clara (N)	Sta. Clara (R.)	Chamacuero	El Armadillo	Janamutato	Grava
PVSS (g/cm ³)	1.18	1.06	1.26	1.10	1.13	1.60
PVSV (g/cm ³)	1.26	1.08	1.32	1.13	1.24	1.71
Absorción (%)	5.22	9.32	3.18	5.89	7.39	2.38
Densidad (g/cm ³)	2.35	2.27	2.48	2.24	2.24	2.33
Equivalente de arena	91.33	91.55	97.61	90.37	86.48	-----
Módulo de finura	2.78	2.58	2.945	2.58	2.40	-----



Fuente: Díaz-Pichardo (2013).



SISTEMA DE ENFRIAMIENTO CONVECTIVO EN CLIMA CÁLIDO SUBHÚMEDO EN TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS

Mareny Arredondo Martínez¹

RESUMEN

Las condicionantes climáticas de un clima cálido sub húmedo como Tuxtla Gutiérrez (TGZ), con tipo climático Aw, genera altos porcentajes en la demanda de usos de sistemas de climatización artificial para lograr condiciones de confort térmico al interior de las viviendas (Tejeda y Rivas, 2003) que se requeriría un incremento de sistemas de enfriamiento de 100 % a 200 %, para el año 2020 sin considerar el incremento poblacional.

¹ Profesora de asignatura de la Universidad Autónoma de Chiapas mareny.arredondo@unach.mx

Por tal motivo, es importante evaluar una estrategia de refrigeración pasiva, como la de pozos canadienses que, con tubos enterrados, permiten conducir la ventilación natural a través de estos para inducirlo al interior del prototipo experimental, generando en ese recorrido que la temperatura superficial de la tierra (TST) descienda y mejore por debajo de la temperatura superficial de la piel (TSP), además de minimizar los niveles de temperatura interior (TI) y al mismo tiempo mermar el consumo energético permitiendo al usuario afrontar el cambio climático de manera económica y eficiente.

Según los resultados se comprueba que la TST desciende con respecto a la temperatura exterior (TE), pudiendo filtrar aire menos denso al interior del prototipo, aunque este valor para la evaluación no resultó significativo, ya que al medir la temperatura interior la cantidad de aire no fue suficiente para mantener este valor dentro del rango de confort térmico establecido en la investigación. Aunque sí hubo una variación de valor entre la TE y la TI no fue suficiente, deduciendo que al hacer ajustes al sistema propuesto se pueden lograr mejoras significativas y llevar a nuevas preguntas de investigación.

Introducción

La relación de la arquitectura con el medio ambiente se ha vuelto un tema recurrente, sobre todo en los últimos años, tema que se ha abordado desde la antigüedad por todos los cambios de vida y los avances tecnológicos que provocó el uso intensivo e irracional de los recursos naturales en búsqueda de modelos de acelerado crecimiento económico, iniciándose con el deterioro ambiental, destrucción de los recursos naturales (*Declaración de Estocolmo*², 1972), bajos niveles de bienestar social, calidad de vida de los individuos (*Informe Brundtland*³, 1987) y calentamiento global, (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 1988).

En México, el sector residencial ocupa el tercer lugar en el consumo de energía, siendo el uso de electrodomésticos lo que más consume energía en la vivienda, teniendo al refrigerador y los equipos de aire acondicionado los que más se usan, participando inconscientemente con la producción de gases de efecto invernadero (Morillón, 2015).

2 Se desarrolla, con 26 principios encaminados a resolver la preservación ambiental y el mejoramiento físico, mental y social del hombre, (1972, Declaración de Estocolmo)

3 Con el planteamiento de ver el problema ambiental desde una visión global, estableciendo una correlación entre medio ambiente–desarrollo, definiéndose como una relación que satisfaga las necesidades del presente sin comprometer las del futuro (*Informe Brundtland*, 1987).



La frase *calidad ambiental interior*, habla de establecer los recursos para lograr el confort en la vivienda⁴, para el calificativo térmico, se establece conseguirlo a través de la ventilación natural o renovación del aire, materiales adecuados en la envolvente y tratamiento térmico del aire (Morillón, 2007). A pesar de los programas en los que participa México, que tienen como finalidad dar propuestas para mejorar la calidad de vida de los habitantes, en la actualidad, en la rama de la construcción se siguen realizando y adaptando elementos que dan respuesta únicamente a la demanda habitacional, olvidándose de la necesidad de realizar construcciones cómodas térmicamente, recurriendo a la demanda de equipos mecánicos de climatización o realizar modificaciones a la vivienda e incluso aclimatarse al lugar; olvidándose de las estrategias de climatización natural como solución para mejorar los ambientes (CCA, 2008).

La ventilación natural, como estrategia de enfriamiento en el clima cálido subhúmedo, es válida para autores como Víctor Olgyay, en su carta bioclimática y Givoni en sus gráficas psicométricas, al afirmar que la ventilación es el parámetro que se manipula con el fin de extender la zona de confort, donde en lugares de gran humedad, puede lograr un efecto de enfriamiento en la piel, con un incremento de velocidad del aire, por la energía calorífica usada en el proceso de evaporación al que se somete la piel (Olgyay, 1998).

4 Se puede hablar de confort térmico, higrométrico, lumínico, acústico y olfativo (Morillón, 2007).

Temas como el análisis del potencial de la ventilación nocturna para edificios residenciales en clima cálido subhúmedo en Malasia (Hooi y Kubota, 2006), climatización pasiva por conductos enterrados, almacenes L&G para bebidas alcohólicas y gaseosas (Romero, 2010) y la ventilación natural en la vivienda bioclimática VBP-1. Portafolio (Tsoi y González, 2006) son investigaciones revisadas.

Para la primera investigación se observó que la ventilación nocturna era mejor que la ventilación durante el día, observando que la ventilación de noche baja la temperatura máxima del aire en interiores en un 2.5 °C, y también reduce la temperatura nocturna del aire en interiores en 2.0 °C más que la ventilación durante el día. En donde, de acuerdo con el estándar de confort adaptable, la ventilación nocturna proporcionó confort térmico y, sobre todo, durante las horas de la noche (de 9 pm a las 12 del mediodía), siendo mejor la ventilación nocturna que la ventilación durante el día y la ventilación de todo el día. Reduciendo la temperatura del aire en interiores en 2 °C más que la ventilación durante el día.

La segunda investigación parte de realizar pruebas de temperaturas del suelo hasta conseguir una diferencia de 6 °C *menor que la del aire ambiental, para que el sistema sea eficaz, estas excavaciones fueron de 1.00 m, 1.50 m y 2.00 m*, llevando a cabo consecutivamente la construcción del prototipo, realizado con tubos de PVC de 4" y 6", respectivamente, con longitudes de 15.00 m y 30.00 m para cada tubo, con la finalidad de conocer las variaciones en el comportamiento. Consistiendo en hacer pasar la ventilación por los tubos enterrados potencializando el experi-

mento con ayuda de un ventilador para aumentar la velocidad de este componente, disminuyendo hasta 9 °C de la temperatura máxima del aire exterior de 29 °C. Comprobando que la eficiencia de este procedimiento no solo depende de las diferencias de temperatura del aire interior y exterior, sino está en relación directa con la longitud y el diámetro de los tubos, entre menor sea el caudal de aire, disminuye la capacidad de refrigeración y a mayor caudal mayor es el espacio de refrigeración.

En la ciudad de Maracaibo Venezuela se desarrolló una investigación aplicada al estudio de una vivienda prototipo, denominada “Vivienda Bioclimática Prototipo VBP-1”, el cual se diseñó para aprovechar la ventilación natural bajo condiciones de sombra, lo cual se logra con la disposición de aleros, conservando los árboles existentes en la parcela, garantizando la ventilación cruzada al disponer un patio como principal entrada del flujo de aire en dirección de la cual llega el viento, y un segundo patio central que permite el paso del viento por diferencia de presiones.

Teniendo como ventaja sobre los dispositivos mecánicos no producir ruido, al no generar sonidos ni vibraciones que perturben el confort acústico del espacio a ventilar y resaltando una desventaja; el espacio que se necesita para colocar la chimenea, ya que ésta necesita espacio considerable de la fachada en comparación con un dispositivo mecánico de ventilación. Sin embargo, mientras que, la ventilación natural es conceptualmente simple y la más barata opción para enfriar el edificio, es también la más difícil de controlar, ya que las fuerzas motrices, y las tasas de flujo de aire, varían constantemente con el tiempo.

Para tener éxito, la ventilación natural debe ser planificada y no “simplemente suceder”. Su desarrollo implica la forma de los edificios, el entorno y el clima, por eso su importancia debe ser reconocida en las etapas iniciales del proceso de diseño, antes de tomar decisiones que puedan hacerla factible (García y Fuentes, 1995). Los resultados señalan que si bien es cierto que el uso de estrategias pasivas de climatización son producto del mal diseño, la falta de planificación urbana y el empleo de materiales afectan directamente el comportamiento térmico de las viviendas.

El presente trabajo muestra los resultados de evaluar el proceso de enfriamiento del aire con la técnica de pozos canadienses y conocer su viabilidad como estrategia bioclimática que ayude a mejorar el comportamiento térmico interior con ayuda del proceso de convección, para climas cálidos subhúmedo, seleccionando a Tuxtla Gutiérrez como el caso de estudio, con un tipo climático Aw y según la clasificación de W. Koeppen (Ayllón, 1996), es de suma importancia recurrir a alternativas de climatización que ayuden a mejorar las altas temperaturas, al igual lo que advierte la investigación *El bioclima humano en urbes del sur de México* (Tejeda y Rivas, 2003), que advierte que para el año 2020, TGZ requeriría un incremento de sistemas de enfriamiento de 100 % a 200 %, sin considerar el incremento poblacional.

Ubicación y región climática del objeto de estudio

El contexto de análisis se sitúa en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas (TGZ), con una ubicación geográfica de $16^{\circ}45'10''$ latitud norte, $93^{\circ}07'00''$ longitud oeste y una altitud promedio de 570 msnm, con vientos dominantes del norponiente a velocidades de 5 a 10 m/s, con un clima cálido subhúmedo, según lo establecido por las normales climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional 1981- 2000.

Figura 1. Esquematización de localización del contexto estudiado



Fuente: Elaboración propia.

El prototipo de evaluación se localiza al sur poniente de la ciudad, ubicado en una zona alta, arbolada y con una topografía sinuosa, a la que se han adaptado los edificios por medio de terrazas y plataformas. TGZ, en todo el año sobrepasa los 30 °C pudiendo alcanzar en casos excepcionales los 42 °C como temperatura máxima, según lo que establece Koeppen (Ayllón, 1996).

Al usar un objeto ya construido resultó difícil realizar el proceso de experimentación en ella, por lo incomodo de las etapas de ejecución del experimento; por tal motivo, se propuso una célula de evaluación, para realizar el proceso de comprobación, al ser una construcción de la Facultad de Arquitectura, de la UNACH, fue posible tener un acceso fácil a la instalación y permiso para hacer las mediciones in situ.

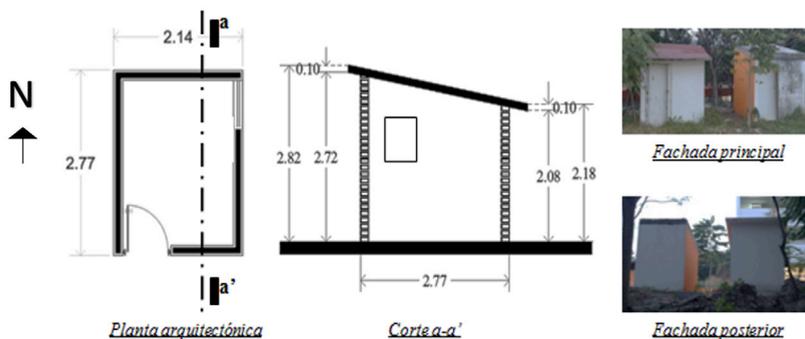
Existen dos prototipos experimentales, de los cuales sólo se dispuso de la célula 1, como se ve en la figura 1, para realizar las mediciones correspondientes, debido a que es el prototipo que no ha sufrido cambio alguno en su tipología constructiva.

Características de la célula experimental

Su dimensión es relativamente pequeña 2.77 m x 2.14 m de superficie, con una altura de 2.72 m de lecho superior y 2.20 m de lecho inferior de losa; es un espacio cerrado con solo una puerta

y una ventana la cual es hermética, manteniéndose de la misma forma durante el proceso de evaluación.

Figura 2. Levantamiento arquitectónico y fotográfico de la célula de evaluación



Fuente: Elaboración propia.

La tipología constructiva corresponde a muros de tabique, losa de cimentación, losa de concreto armado de 10 cm de espesor, recubrimiento de mortero, cemento y arena como acabado final e impermeabilizante, constituyendo una superficie construida de 5.93 m².

Descripción del proyecto

La combinación del proceso de conducción por medio de la técnica de tubos enterrados, convección con la combinación de las partículas

ligeras con las más densas, y extracción para eliminar el aire más denso, dan origen al proceso de evaluación del presente trabajo.

El sistema de tubos enterrados fue el proceso más laborioso e importante, por ser el sistema que actuó como un equipo mecánico para refrescar el espacio, del cual se analizaron tres diferentes profundidades como lo muestran los casos similares del marco referencial, para conocer el comportamiento del subsuelo a ciertas temperaturas y elegir la más conveniente; mientras que el proceso de extracción, funcionó como el transporte al exterior para eliminar el aire viciado interior y agilizar los intercambios de aire.

Para la elaboración de este Sistema de Estrategia Pasiva (SEP) se requirieron elementos como:

- 4 tubos de PVC, de 4"
- 1 tubo de PVC, de 2"
- 6 codos de PVC, de 4"
- 3 reducciones de PVC, de 6" a 4"
- 1 aerosol color negro mate
- 2 tapas de PVC de 6"
- Herramienta menor
- Mano de obra



La etapa de construcción del SEP se inició con el proceso de excavación en el perímetro seleccionado donde se ubica la célula 1, se consideró un área de estudio mayor a la superficie construida de dicha célula, con la finalidad de establecer una relación directa entre tal espacio y el contexto real de la vivienda de interés social, debido a que estas viviendas cuentan con un espacio mínimo al frente, como garaje o jardín, siendo en la mayoría de los diseños el mayor espacio libre, ante esta referencia se determinó que la longitud necesaria de los conductos enterrados fuera de 5 m y así, situarlos dentro del predio.

En la etapa preliminar se realizó una sola excavación, misma que fue rellenada a tres diferentes estratos, desde un nivel del terreno indicado como el nivel 0, se identifica el tubo I a -0.70 m, tubo II a -1.10 m y el tubo III a -1.70 m, colocándose cada uno de los tubos de PVC de 4", según la profundidad correspondiente (revisión del estado del arte para justificar profundidades).

124

El proceso siguiente fue instalar sobre el tubo II y III, un codo y una extensión del tubo para favorecer la entrada de aire para que quedara sobre la superficie libre, a diferencia del tubo I al que únicamente se le agregó la reducción de tubo de 6" a 4" debido a las circunstancias del terreno permitió estar sobre una superficie independiente para captar e inducir la ventilación.

Lo explicado en el párrafo anterior describe una parte de la excavación, ya que para que se pueda completar el proceso de conducción fue necesario, romper un área del firme de concreto



que permitió colocar las extensiones de tubos de 4"; al mismo tiempo, en cada estrato se colocó un tubo de PVC de 2", para corroborar la temperatura superficial de la tierra (TST), teniéndose para el tubo colocado a -1.70 m una longitud de 2.00 m, para el segundo estrato de -1.10 m una longitud de 1.40 m y, finalmente, para el estrato de -0.70, una longitud de 1.00 m, finalizando este paso rellenando la excavación para evitar la infiltración de aire.

Para construir la adaptación a la chimenea solar se abrió un orificio en la parte superior del muro contrario a los vientos dominantes, en este contexto sobre el muro sur, donde se colocó el tubo de PVC de 4", que fungió como el extractor del prototipo experimental, se dirigió con extensiones al exterior, utilizando para su construcción un tramo de tubo de PVC de 4" de 0.70 m, 1 codo de PVC de 4", un tramo más de 1.50 m, todos pintados de color negro para favorecer su calentamiento y agilizar la excitación de las partículas más densas para ser evacuadas del interior.

Para cubrir de las lluvias y del mismo aire exterior, en la parte exterior del tubo se protegió con una cubierta que permitía la extracción del aire, pero no su entrada; de igual forma este elemento se pintó de color negro para favorecer el calentamiento, como se muestra en la figura 3.

Figura 3. Proceso de construcción del sistema de enfriamiento pasivo de tubos enterrados



126

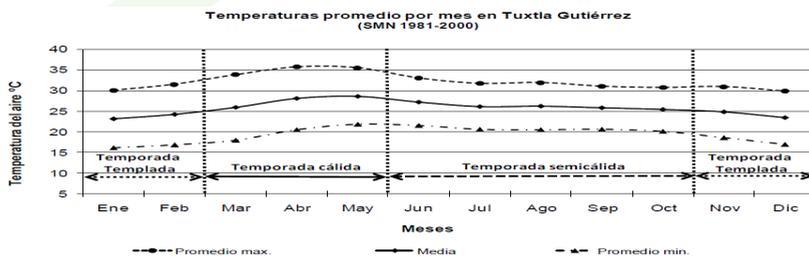
Proceso de mediciones térmicas

Los datos registrados en el interior de la C1 fueron: temperatura de bulbo seco (TBS), temperatura de bulbo húmedo (TBH), temperatura de globo (TG), humedad relativa (HR) y velocidad del viento (VV). Para el monitoreo en interiores se utilizó el equipo de monitor de estrés térmico QUESTemp^o36, el equipo de medición de humedad relativa y temperaturas, modelo HOBO data

Logger, el equipo HOBO U23 Pro v2 Logger y un protector de radiación solar y lluvia M-RSA.

El proceso de medición se inicia con la identificación de la temporada de evaluación, de acuerdo con las temperaturas del aire observadas en un año, identificándose como la temporada cálida (ver figura 4), por observar que durante todo el año se alcanzan temperaturas promedio de máximas por arriba de los 30 °C. Temperatura que se considera límite para que el ser humano no sufra en su metabolismo problemas por estrés térmico, considerando que la temperatura superficial de la piel se mantiene entre los 31 °C y 34 °C (Auliciems, 1997), siendo los meses de marzo a mayo los clasificados como temporada cálida por ser los más críticos de máximo calor, observando que durante el año existen temperaturas consideradas inconfortables para los índices térmicos, seleccionando el mes de mayo como el periodo de estudio.

Figura 4. Temperatura del aire por mes en Tuxtla Gutiérrez y clasificación por temporadas a partir de los datos del SMN (2010)



Fuente: Ruíz (2011).

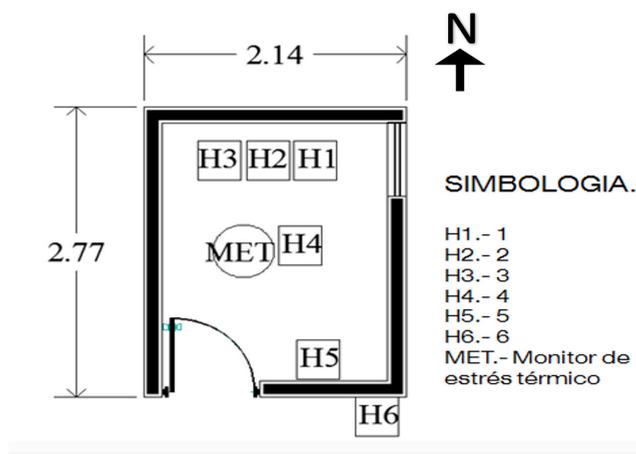


La evaluación duró 15 días consecutivos, del 8 al 24 de mayo de 2013; se realizó dentro y fuera de la célula experimental. Para la primera opción se requirieron 5 equipos de la marca HOBO data Logger, identificados con las siglas H1 al H5, mismos que sirvieron para registrar datos como: la temperatura superficial del subsuelo y la temperatura superficial del aire interior. Para las mediciones interiores también se requirió de los índices registrados por el monitor de estrés térmico y anemómetro omnidireccional, modelo QUESTemp 36, para marcar los registros de velocidad del aire (anemómetro).

La segunda parte se realizó con el equipo HOBO U23 Pro v2 Logger, identificado con las siglas H6, el cual sirvió para registrar la temperatura del aire exterior y tener parámetros de comparación en cuanto a algún aumento o disminución de temperaturas superficiales.

Estos equipos fueron programados para hacer lecturas cada media hora durante el periodo de evaluación descargando las lecturas con el software BoxCar Pro 4.3, Questsuite Professional, que ofrece características adicionales para su representación gráfica, análisis de datos, exportación de datos y la gestión simultánea de múltiples registradores. Los equipos se dispusieron como se muestran en la figura 5.

Figura 5. Localización en planta de los equipos de medición en la célula experimental



Fuente: Elaboración propia.

Los tubos puestos a diferentes estratos se colocaron para conocer cuál de ellos respondía mejor a reducir la temperatura del aire exterior, por tal motivo y para tener una medición de cada uno de ellos, el proceso consistió en tapar la entrada de cada tubo y destapar uno de ellos durante el periodo de medición, finalizado este periodo, se tapó, prosiguiendo con los mismos pasos para los restantes.

El proceso de medición se inició, colocando los equipos H1, H2 y H3, en medio de cada tubo inyector de aire (tubo I, tubo II y tubo III), mientras que el canal externo de cada equipo fue colocado hasta el fondo del conjunto de los tubos de 2", colocados en la misma zanja a diferentes estratos, identificando cada

tubo con números romanos, fue como se prosiguió a tomar las mediciones, iniciándose estas de menor a mayor.

Además de colocar los equipos H1 al H3, se colocó un anemómetro justo en la entrada de aire, mismo que fue cambiándose de lugar dependiendo del tiempo de evaluación de cada tubo.

Para que el anemómetro registrara los datos, se conectó el monitor de estrés térmico, ubicado en el centro del prototipo experimental a 1.20 m de altura por ser la altura alcanzada por una persona cuando está sentada, este equipo permaneció prendido los quince días de evaluación, únicamente cambiándole la pila de 9 volts con duración de 6 días, aproximadamente, y rellenando de agua el recipiente ubicado en la parte superior del monitor, se armó y colocó para iniciar las mediciones.

Al ser un experimento que relaciona los índices de confort térmico, fue necesario conocer los índices registrados por la temperatura superficial del aire interior, mismo que fue medido con el equipo HOBO, identificado como H4; este equipo midió el lapso completo de la experimentación de forma ininterrumpida desde el 8 al 24 de mayo de 2013, colocado a 1.60 m del nivel del piso del prototipo y en el centro de la célula experimental, sujetado desde el techo del prototipo.

Todo este proceso sirvió para registrar los valores de la masa de aire inyectada a la célula experimental, pero el experimento tiene dos etapas, el proceso de inyección de aire y el de extracción

de este, para el cual fue necesario colocar el equipo H5, sobre el tubo de extracción colocado sobre el muro con orientación sur, mientras que el canal externo del mismo fue dispuesto en el otro extremo, quedando al exterior de la célula experimental pero dentro del tubo, para registrar la temperatura que puede alcanzar el aire extraído y se pueda producir el proceso de succión.

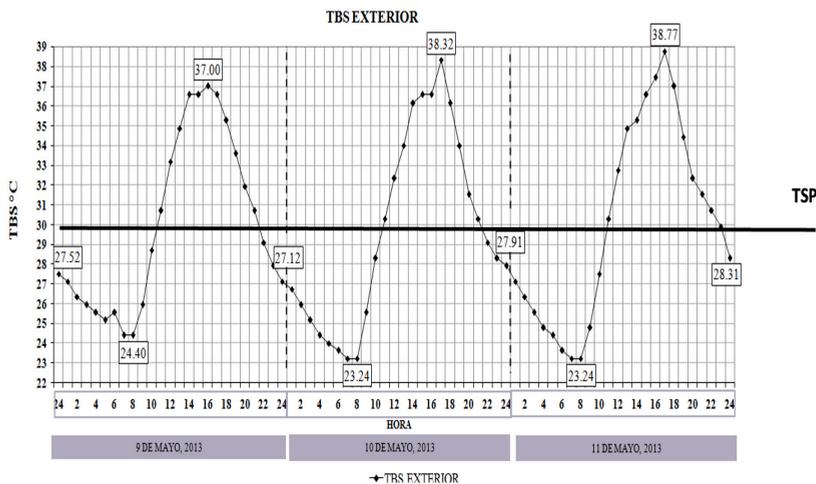
El proceso de medición se realizó colocando los equipos en cada zona especificada a puerta cerrada y abriendo y cerrando estas 2 veces al día como proceso de verificación de los equipos.

Resultados

Para cada una de las mediciones, se procesó la información a través de la teoría de Climatología Dinámica de Vecchia, seleccionando un día representativo de máximo calor de la temporada medida para cada variable (profundidad de los tubos), la cual analizó únicamente la TBS exterior.

En la figura 6 se aprecian las mediciones de tres días consecutivos, del 9 al 11 de mayo de 2013, mediciones que se realizaron a partir de 0 a 24 h para cada día. Estas mediciones registraron temperaturas máximas de 38.77 °C, para las 17:00 h y una mínima de 23.24 °C, para las 7:00 h, con una amplitud térmica (AT) de 15.53 °C.

Figura 6. Comparación térmica, del tubo a -1.70 m de profundidad, la cual midió la TBS del 9 al 12 de mayo de 2013



Fuente: Elaboración propia.

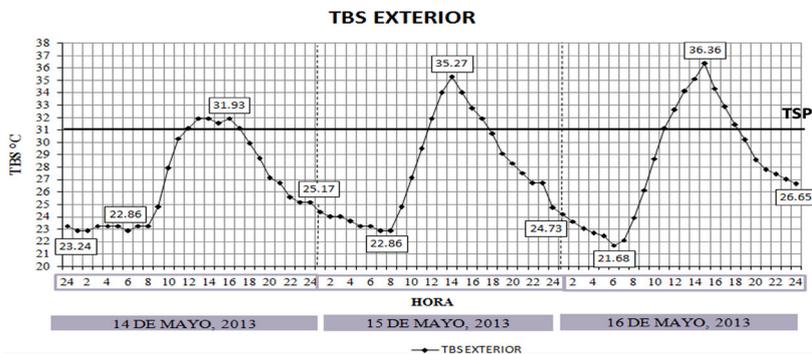
Por la constancia de las temperaturas, como se aprecia en la gráfica, se escogió el día 9 de mayo como el día típico experimental para la variable de -1.70m, por ser quien presentó curvas más definidas, estableciendo con esto que no existió algún fenómeno ocasional que alterara las mediciones, a pesar de que los otros días se registraron temperaturas más altas y se observó que esa disparidad en el rango ocurrió algo que alteró en esas horas la temperatura volviéndose constante después, ya que el comportamiento de los tres días fue muy similar a excepción de las 16:00 h y hasta las 18:00 h.

El día 9 de mayo presentó una temperatura máxima de 37.00 °C para las 16:00 h y una mínima de 24.40 °C entre las 6:00 hasta las 9:00 h, con una amplitud térmica de 12.60 °C, permaneciendo con temperaturas por arriba de la temperatura superficial de la piel, 8 h a partir de las 12:00 h y hasta las 20:00 h, denotando que las horas del día son las que superan los 31°C (temperatura superficial de la piel, TSP) bajando durante la noche y la madrugada a partir de las 22:00 h.

La medición de la variable a -1.10 m de profundidad fue entre el 14 y 16 de mayo de 2013, la cual, como se muestra en la figura 7, presentó variaciones considerables en los rangos, registrándose una TBS exterior máxima de 36.36 °C y una mínima de 21.68 °C, con una amplitud térmica de 14.68 °C, correspondiente al 16 de mayo de 2013.

En dicha gráfica se observa que el único día que se comportó de manera diferente a los restantes de la temporada de evaluación fue el 14 de mayo de 2013, debido a que en esa fecha se presentaron días nublados en la localidad, con lluvias constantes alterando la medición específica; observando que los días restantes se restableció la temporada, alcanzando temperaturas máximas a las 15 h y mínimas a las 7 h, sobrepasando el rango de la TSP a partir de las 12 h, durante un lapso de 4 h, aproximadamente, el día de máximo calor seleccionado fue el 16 de mayo de 2013, por ser el que alcanzó la temperatura más alta.

Figura 7. Comparación térmica del tubo a -1.10 m de profundidad la cual midió la TBS, correspondiente desde el 14 hasta el 16 de mayo, 2013



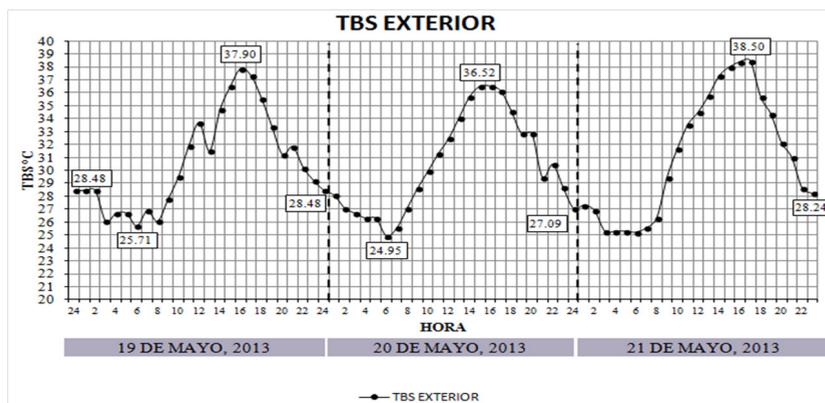
Fuente: Elaboración propia.

La última de las variables medidas fue la profundidad de -0.70 m, la cual registró temperaturas máximas de 38.50 °C y mínimas de 24.95 °C, valores con una AT de 13.55 °C. Como se muestra en la figura 8, las temperaturas máximas para esos tres días oscilaron por arriba de los 36 °C, teniendo 37.90 °C el día 19, 36.52 °C el 20 y 38.50 °C el 21 de mayo de 2013; y temperaturas mínimas de 25.71 °C, 24.95 °C y 25.25 °C respectivamente.

La AT para cada día fue de 12.19 °C, 11.57 °C y 13.25 °C, en comparación con la TSP, los tres días sobrepasan ese rango a partir desde las 10:30 h y hasta las 20 h, siendo un lapso aproximado de 9:30 h al día, con temperaturas que pueden ocasionar estrés térmico a los individuos. Se presenta una gráfica más estable y para observar quien tuvo el índice térmico mayor, y se

escogió el día 21 de mayo como el de excepcional calor para evaluar la variable de -0.70 m.

Figura 8. Comparación térmica, del tubo a -0.70 m de profundidad, la cual midió la TBS, correspondiente desde 19 hasta el 21 de mayo de 2013



Fuente: Elaboración propia.

Para el análisis parcial del comportamiento térmico, se consideraron valores como la TBS exterior, TBS del aire inyectado, TST en comparación con la zona de confort para TGZ, este procedimiento se realizó para los tres estratos evaluados. En el estrato de -1.70 m se observaron considerables variaciones de temperatura, volviéndose notorio que, cuando la TBS exterior se encuentra a 37.00 °C, el aire inyectado al prototipo a través del tubo de PVC reduce su temperatura 6.07 °C, alcanzando una temperatura máxima a las 14:00 h de 30.93 °C y una mínima de

27.11 °C; caso contrario, con las temperaturas mínimas, ya que el aire inyectado a través del tubo es más alto que la TBS exterior, aumentando su temperatura 2.71 °C. La TBS inyectado a la célula experimental 1 permaneció fuera de la zona de confort durante 8 h, desde las 13:00 h hasta las 21:00 h, un lapso similar que la temperatura exterior con la diferencia que la AT entre estos índices fue de 1.93 °C.

Esta gráfica también muestra que la TST, a ciertas profundidades, es menor que la del aire exterior, comprobándose que se mantiene constante durante el día, estando 9.27 °C con la temperatura más baja que la TBS exterior; la TST y la TBS inyectada se mantiene constante durante toda la madrugada, teniendo los mismos índices, manteniendo constante esta temperatura, y modificándose a partir desde las 10 h y hasta las 24 h.

Para el estrato de -1.10 m, se observa que la TBS del aire inyectado reduce 5 °C en comparación con la TBS exterior, con una temperatura máxima de 31.36 °C, para las 15 h y una mínima de 27.01 °C a las 10 h, obteniendo una AT de 4.03 °C en un lapso de 5 horas.

La TBS del aire inyectado en relación con la zona de confort es muy estable, estando la mayor parte del día dentro de sus rangos, sobrepasando sus límites desde las 13:30 h hasta las 19 h, sobrepasando sus límites más de 2 °C. Si bien es cierto que se alcanza un índice por arriba de la zona de confort, el valor no es tan alto y por el valor de este se vuelve imperceptible para provocar afectaciones en el cuerpo humano ya que,

en relación con la TSP, este solo sobrepasa $0.36\text{ }^{\circ}\text{C}$ su límite, percibiéndose un aire agradable.

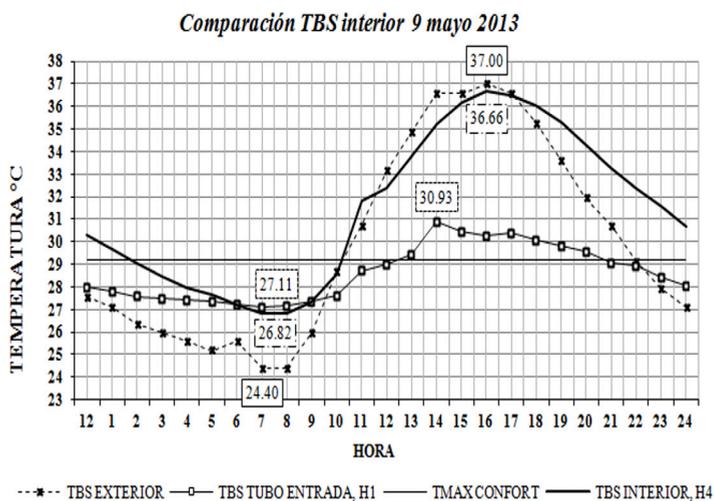
Lo que respecta a la TST se mantiene constante durante el día, alcanzando una temperatura de $28\text{ }^{\circ}\text{C}$, índice que beneficia en cierta medida la reducción de la TBS del aire inyectado, ya que las primeras 11 h del día su temperatura fue de alrededor de $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ menos que la TST, logrando esto con la velocidad del aire que interviene para que el efecto de inercia térmica se presente.

Finalmente, en el estrato de -0.70 m se registran variaciones en las mediciones, mostrando a primera instancia que la TST a esa profundidad sí tiene variaciones, presentándose una temperatura máxima de $28.59\text{ }^{\circ}\text{C}$, para las 17 h y una mínima de $25.33\text{ }^{\circ}\text{C}$ a partir de las 6–8 h del día, teniendo una AT entre ellas de $3.26\text{ }^{\circ}\text{C}$, en un lapso de 11 h.

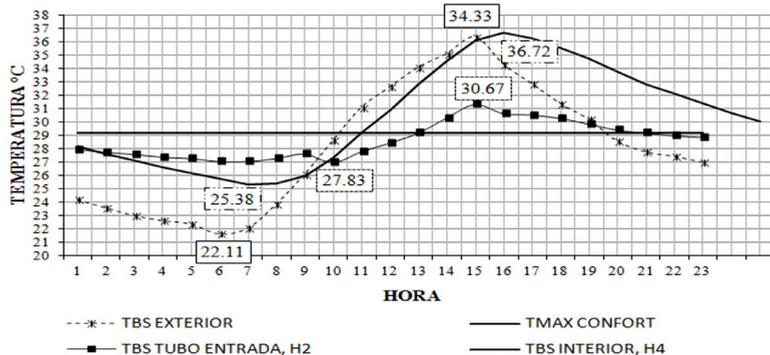
La TBS del aire inyectado, al igual que las variables anteriores, también reduce considerablemente su temperatura en comparación con la TBS exterior, siendo $5.52\text{ }^{\circ}\text{C}$ más baja, en relación con las máximas. Esta alcanza los $32.98\text{ }^{\circ}\text{C}$ a partir de las 16 h y $27.60\text{ }^{\circ}\text{C}$ a las 7 h, teniendo una AT de $5.20\text{ }^{\circ}\text{C}$ en un lapso de 7 h. La gráfica muestra que el aire inyectado a la célula experimental 1 permanece dentro de los rangos de confort a partir de las 23 h y hasta las 10 h del día, quedando las 8 h restantes fuera de estos límites por $3.98\text{ }^{\circ}\text{C}$; todos estos datos se pueden observar en la figura 9.

Por los resultados graficados, se comprueba que la estrategia de tubos enterrados sí funciona, porque mejora los índices térmicos que se introducen a la vivienda y llegan a reducir 6 °C la TBS exterior; de igual forma, se verifica lo estipulado en la bibliografía, que a cierta profundidad se pueden disminuir las cargas térmicas, debido a que los estratos de la tierra no se encuentran bajo los infuljos de la radiación directa; por tal motivo, a cierta profundidad se llega a un momento en que la temperatura se encuentra estable, y por el fenómeno de inercia térmica, es posible enfriar las superficies que estén en contacto con él, ayudando a la pérdida calorífica.

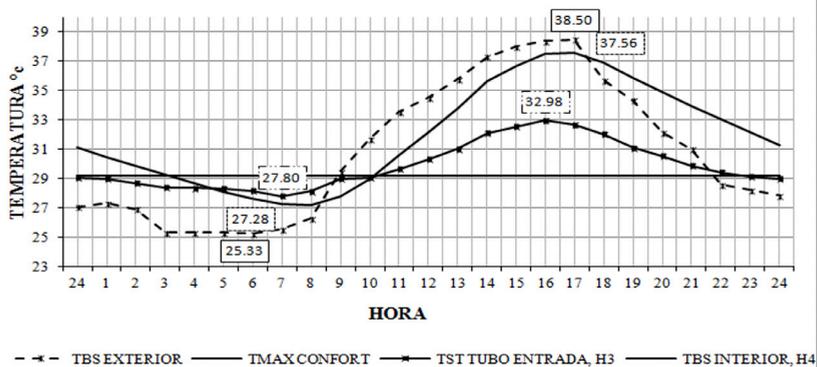
Figura 9. Comparación de índices registrados en los tres estratos evaluados con la TBS interior



Comparación TBS interior, 16 mayo 2013



Comparación TBS interior, 21 mayo 2013



Fuente: Elaboración propia.

Para Tuxtla Gutiérrez, con un tipo de suelo correspondiente a arcilla, es suficiente con realizar una excavación de -0.70 m, ya que como se comprueba en la gráfica, se reducen los índices térmicos desde esa profundidad, siendo más baja en ese nivel que en los estratos más bajos, con diferencia que entre más profundidad la temperatura se va haciendo más estable y continua.

Aunque los resultados parecen muy favorecedores, existieron ciertos detalles que pudieran hacer cambiar la forma de pensar ya que la TBS del aire inyectado es menor, pero no es suficiente el volumen de aire inyectado como para mantener estable la TBS interior de la célula experimental, debido a que en comparación con la TBS exterior, el interior permanece más bajo por 1 °C en los tres casos, volviéndose imperceptible para los usuarios, comportándose de esta forma por 12 h del día, siendo más alta la otra mitad del día, desde las 17 h y hasta las 5 h, estando dentro de la zona de confort por 5 h del día a partir de las 5 h y hasta las 10 h.

140

Conclusión

Determinándose con esto que la cantidad de energía térmica ganada durante el día por la célula de evaluación es mayor, y vuelve insuficiente el volumen de aire ingresado a ella que no permite enfriar o reducir considerablemente las temperaturas

interiores; para lograr propósitos de alcanzar temperaturas interiores dentro de la zona de confort a través de la estrategia de tubos enterrados resultaría muy costoso, pero, si bien es cierto, esta estrategia no se desecha del todo ya que se puede utilizar como un dispositivo adicional a alguna otra estrategia para que sirva de complemento y su funcionamiento sea mejor.

Al ser una estrategia complemento, el sistema de tubos enterrados se puede establecer como un dispositivo de climatización natural, que se puede adaptar, principalmente en las zonas sociales de la vivienda, pudiendo manejar este dispositivo al gusto del usuario abriendo durante el día y cerrando a partir de las 17 h, que es cuando incrementa la temperatura del dispositivo; de esta manera, al colocar estos a la altura de una persona sentada permitirá al instante disminuir los bochornos provocados por las ganancias térmicas, ya que por el fenómeno de adaptación de la personas, se percibirán mejoras sustanciales al estar en contacto directo con la ventilación inyectada que se encuentra a una temperatura menor, refrescando los cuerpos de los usuarios por el efecto de vasodilatación.

Siendo tarea para los arquitectos poder establecer criterios de diseño en los que puedan rescatar las ventajas de las estrategias pasivas de climatización y poderlas adaptar en los diseños de los espacios habitables, para brindar al usuario no sólo espacios bonitos y funcionales, sino al mismo tiempo, espacios cómodos desde el punto de vista social y económicos, sin

discriminar los estratos sociales al tratar de establecer resultados que beneficien a cualquier sector económico.

Referencias

Auliciems. (1997). *Thermal comfort. PLEA: Passive and Low Energy Architecture, Department of Architecture University of Queensland*. PLEA.

Ayllón, T. (1996). *Elementos de meteorología y climatología*. Trillas.

CCA. (2008). *Edificación sustentable en América del Norte* (Informe del secretariado al consejo conforme al artículo 13 del acuerdo de cooperación ambiental de américa del norte).

García Chávez, J. R. y Fuentes Freixanet, V. (1995). *Viento y arquitectura*. Trillas.

Hooi Chyee, D. T. y Kubota, T. (2006). Analysis of night ventilation potential for residential building in hot-humid climate of malaysia. *Plea Quebec*, 6(13), 40–49.

Morillón, D. (2007). *Guía metodológica para uso de tecnologías para el ahorro de energía y agua en la vivienda de interés social en México*. CONAVI.

- Morillón, D. (2015). *Metodología para la sustentabilidad energética de los edificios. Vivienda net zero energy* (1.ª ed.). (978-607-02-6293-7), p. 2.
- Olgyay, V. (1998). *Arquitectura y clima manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas*. Gustavo Gili.

- Romero, L. E. (2010). Climatización pasiva por conductos enterrados. *Hacia las tecnologías apropiadas para viviendas de interes social en latinoamerica*, 375–382.
- Ruíz, T. R. (2011, septiembre). *Confort térmico variable en cálido subhumedo* [Tesis de doctorado]. Colima.
- Tejeda Martínez, A. y Rivas Camargo, D. A. (2003). El bioclima humano en urbes del sur de México para condiciones de duplicación de CO₂ atmosférico. *Redalyc*. 0188-4611(051), p. 47.
- Tsoi, E. y González, E. (2006). La ventilación natural en la vivienda bioclimática VBP-1. portafolio. *Portafolio*, 13, 40–49.



BLOQUES DE TIERRA COMPACTADA Y VIVIENDA DE PRODUCCIÓN SOCIAL: PROPUESTA EXPERIMENTAL DESDE LA ACADEMIA EN TORREÓN, COAHUILA

Jaime Andrés Quiroa Herrera¹

Gabriel Castañeda Nolasco²

Jorge Villanueva Solís³

Alleck J. González Calderón⁴

Resumen

Se expone la experiencia de estabilización de suelo para la fabricación de bloques compactados (BTC), que a su vez se utilizaron para la edificación de un prototipo de vivienda en las

1 Profesor investigador de la Universidad Autónoma de Coahuila, jquiroya@uadec.edu.mx

2 Profesor investigador de la Universidad Autónoma de Chiapas, gabriel.cataneda@unach.mx

3 Profesor investigador de la Universidad Autónoma de Coahuila, jorge.villanueva@uadec.edu.mx

4 Profesor investigador de la Universidad Autónoma de Coahuila, alleck.gonzalez@uadec.edu.mx

instalaciones de la Universidad Autónoma de Coahuila, con el objetivo de comprobar si dicha tecnología es apropiada para la producción social de vivienda, aprovechando uno de los materiales más abundantes y disponibles en la región de Torreón. Con base en el análisis de las siguientes cuatro etapas realizadas: determinar si la tierra de la región es adecuada para la fabricación de BTC, Identificación de las proporciones que posibiliten la mejor estabilización de las arcillas y potencien su mayor resistencia, elaboración de los BTC y, por último, la construcción experimental de la primera etapa del prototipo de vivienda, y así aprovechar el material disponible en la región de Torreón. Los resultados muestran que la tierra de la región tiene características positivas para utilizarse en la fabricación de BTC; después de varios ensayos se determinó la mejor proporción de los componentes para estabilizar al material base; en la etapa de elaboración hubo variación en el número de producción diaria de piezas. En el proceso de edificación de la vivienda experimental no se presentó ningún aporte adicional de conocimiento, pero sí la necesidad de comprender la conveniencia de reducir el volumen de las piezas del BTC comparado con el volumen de las piezas del adobe tradicional utilizado en la región que, al aplicar un proceso constructivo similar al tradicional utilizado ancestralmente y al convencional, se verificó la facilidad de adaptación y utilización de la tierra de la región como material constructivo.

Introducción

De acuerdo con la Comisión Nacional de Vivienda (CONAVI), México tiene un rezago habitacional de 8.4 millones de viviendas, afectando a más de 33 millones de personas (CONAVI, 2021), por lo anterior, dentro del Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024 (PND) en el apartado de Política Social se contempla el programa de Desarrollo Urbano y Vivienda, indicando que la vivienda social será una prioridad (DOF, 2019). Por lo anterior, el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) busca incidir, por medio de los Programas Nacionales Estratégicos, entre los cuales está el que se enfoca a la vivienda (CONACYT, 2022).

Lo anterior evidencia la necesidad de generar soluciones técnico-constructivas que sean viables para la producción social de la vivienda, que sean asequibles y transferibles para poder ser adoptadas y utilizadas. El presente trabajo es la experiencia de actividades realizadas para la edificación de un prototipo de vivienda, construida con bloques de tierra compactada (BTC) en busca de un acercamiento de esta tecnología en la región.

Se pensó en el desarrollo y edificación de un prototipo de vivienda utilizando el BTC, ya que se considera que este material es viable en la vivienda desde una perspectiva económica y físico-constructiva, porque la materia prima se encuentra en el entorno y, al ser un sistema similar a un sistema constructivo convencional, no se requiere de conocimientos adicionales para

utilizarlo, por lo que podría significar algún beneficio en el aspecto económico y en el medio ambiental.

Galindo (2022), en su conferencia, presenta que el bloque de suelo cemento, elaborado en Cinva-Ram, desde sus inicios fue ideado por el ingeniero Raúl Ramírez, del Centro Interamericano de Vivienda (CINVA) para la producción de vivienda de interés social. Entre las ventajas que existen está que es un mecanismo de bajo costo (CINVA, 1957a) y portátil (CINVA, 1957b), permitiendo producir piezas prácticamente en cualquier lugar a donde pueda ser transportado e instalado.

Existen diferentes estudios en que analiza a la tierra como material de construcción; en estos, se menciona que, entre las ventajas de la utilización de la tierra, como material de construcción, está su abundancia y fácil manipulación (Tatiana, *et al.*, 2011). Guerrero Baca, *et al.* (2010) abordan las ventajas de la estabilización con cal en la tierra comprimida para su utilización en vivienda sustentables; también, Bedoya (2018) maneja un enfoque, utilizando el material de las excavaciones para su utilización en BTC para la construcción de vivienda sustentable. Aunado a lo anterior, Brizuela (2020) analiza la utilización del BTC en la mampostería confinada a una estructura convencional y concluye que la utilización de este sistema es competitiva con relación a otros materiales industrializados.

Por todo lo anterior, se tomó la decisión de experimentar con las arcillas del lugar por los argumentos de la literatura consultada y,

utilizando el material abundante y disponible en la región mediante su estabilización y su compactación, correspondiente en forma de bloques (BTC), por ser una tecnología contemporánea que reduce el volumen de material utilizado comparado con el adobe tradicional y, consecuentemente, la mano de obra; lo que posibilita su aceptación social, desde un enfoque técnico- constructivo y económico.

Desarrollo

La intención inicial del proyecto era edificar el prototipo en el lote de alguna familia de la región, en donde la misma participara en el proceso de elaboración y edificación de la vivienda, contando con asesoría técnica durante el proceso.

Así, la vivienda formaría parte del patrimonio de la misma y, de realizarse, esto permitiría evaluar el prototipo en su fase operativa; sin embargo, por las características del financiamiento no fue posible hacerlo, por lo que el prototipo fue edificado en las instalaciones de la Universidad Autónoma de Coahuila.

El proceso descrito en el presente trabajo se divide en diferentes etapas, en cada una de estas se describe desde el enfoque de la utilización de esta tecnología por los mismos usuarios para la producción social de vivienda.

Muestras de tierra

La intención inicial del proyecto era tomar material de la zona en donde se construyó el prototipo de vivienda; sin embargo, esto no fue posible por los permisos requeridos para poder hacerlo. Por lo anterior, se identificaron bancos de materiales de la región y se consiguieron muestras de estos, las opciones fueron arena, tierra para jardín y tierra calichosa. De estas tres opciones, se identificó con mejores características a la tierra calichosa, y a partir de estas se inició el proceso de estabilización. De acuerdo con las muestras analizadas, la tierra de la región se mostró apta para ser utilizada en el sistema constructivo en tierra, la afirmación previa es relevante si se toma en cuenta que el sistema constructivo tradicional utilizado en la región es el adobe.

150

Estabilización

Como se mencionó, se buscaron diferentes bancos de materiales de la región para conseguir muestras de tierra para analizar sus características y, de acuerdo con estas, estabilizar las que cumplieran con las condiciones adecuadas. Para esto se utilizó el método de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2019) para determinar su proporción;

también se utilizó lo recomendado por Rigassi (1985) en el manual de producción de BTC, para la estabilización de las muestras colectadas del material de la región.

De las muestras analizadas, se usó la norma NMX-C036-ONNCCE-2013 para las pruebas de compresión de los bloques y la norma NMX-C-508-ONNCCE-2015 (ONNCCE 2015) para clasificar las piezas, de acuerdo con su resistencia. Se seleccionó la estabilización que en las pruebas dio una resistencia media de 58 kg/cm^2 , la cual se clasificaría como BTC 60.

Las pruebas de resistencia a la compresión de las piezas fueron realizadas por el Laboratorio Nacional de Vivienda, de la Universidad Autónoma de Chiapas. En la figura 1 se pueden observar algunas de las piezas analizadas, elaboradas a partir de las muestras de los bancos de materiales de la región.

Figura 1. Piezas estabilizadas de los diferentes bancos de tierra de la región



Fuente: Elaboración propia.

Elaboración de las piezas

Para la elaboración de piezas, se utilizó una máquina Cinva-Ram, y las medidas de las piezas que se elaboraron con esta máquina son de 28x14x8 cm.

Dentro del proceso de elaboración, se incluía cribar la tierra, adicionar el estabilizante de acuerdo con los porcentajes determinados, así como el agua requerida para que tuviera las condiciones adecuadas para ser compactada en la máquina Cinva-Ram.

Se contabilizó la producción de las piezas diarias, cuando los trabajadores se dedicaban únicamente a hacer piezas, el rendimiento máximo obtenido fue de 140 piezas. Cuando los

trabajadores realizaban otras actividades relacionadas a las fases iniciales de la edificación del prototipo, el rendimiento disminuía hasta 40 piezas, por lo que el rendimiento en este sentido fue variable. Para la edificación del prototipo, se elaboraron 2 700 piezas de BTC. En la figura 2 se pueden observar las piezas elaboradas.

Figura 2. Piezas elaboradas para la edificación del prototipo



Fuente: Elaboración propia

Edificación

Propuesta de vivienda

Para la propuesta de vivienda, se analizaron las medidas más representativas en dimensionamiento de los lotes en la región, y se determinó que el lote de 7 m por 14 m era el más representativo. Una vez definido el lote, se desarrolló una propuesta que

cumpliera con los requerimientos del reglamento de construcción de la ciudad de Torreón, así como los requerimientos mínimos indicados por el INFONAVIT (INFONAVIT, 2006), esto con el objetivo de que la propuesta pueda ser susceptible a algún financiamiento de esta institución.

En la propuesta del prototipo, se respetó y reinterpretó la tipología de vivienda en adobe utilizada en la región. En la figura 3 pueden observarse un par de ejemplos de la tipología de vivienda tradicional en la región.

Figura 3. Tipología de la vivienda tradicional en le región



Fuente: Elaboración propia.

Localización

En la figura 4 se puede observar la localización del prototipo edificado, este se encuentra en Ciudad Universitaria, al lado oriente de la ciudad de Torreón, Coahuila. El prototipo fue edificado entre la Escuela de Arquitectura y la Facultad de Ingeniería.

Figura 4. Localización del prototipo edificado, en Ciudad Universitaria, al lado oriente de la ciudad



Fuente:

Localización de Ciudad Universitaria, de la Universidad Autónoma de Coahuila en Torreón Coahuila (Google Maps, 2019).

Planta arquitectónica

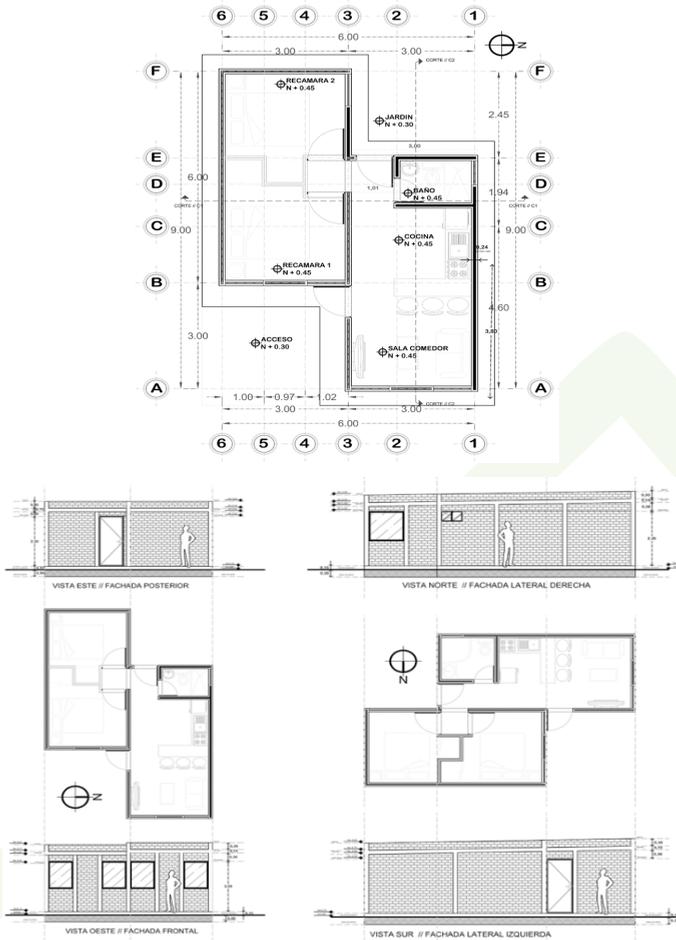
La propuesta inicial en planta tiene un área construida de 42 m², y se pensó en la posibilidad de la progresividad del prototipo, por lo que la posibilidad de crecimiento de la vivienda es de 54 m² de construcción en una sola planta. En la planta arquitectónica se puede observar que

son dos módulos desfasados que permiten la construcción de espacios adicionales, como puede observarse en la figura 5.

Alzados

La vivienda tiene una altura máxima de 3 m. Si se pretende edificar una segunda planta, la losa debe ser plana; en el caso de este estudio, se dejó una inclinación del 10 %, pensando en el escurrimiento para la captación de agua o en caso de instalar una cubierta verde en el prototipo. Cada uno de los espacios está iluminado y ventilado naturalmente y las medidas de las ventanas y puertas propuestas son las que están estandarizadas en el mercado.

Figura 5. Planta arquitectónica y alzados del prototipo de vivienda edificado



Fuente: Díaz de León (2018).

Proceso constructivo y materiales

Estructura-cimentación

La estructura utilizada en el prototipo de vivienda es convencional, por lo que las columnas y trabes son de concreto armado. Aunque Torreón no es zona sísmica, se debe garantizar la resistencia estructural de esta; por tanto, se utilizó losa de cimentación, porque el lugar en donde se edificó el prototipo lo requería, en un caso real, la cimentación y estructura utilizadas dependerán también de las características del terreno. Se utilizó una estructura y cimentación convencionales, pensando en que, en un caso real, al ser sistemas utilizados comúnmente, no representaría ninguna complicación en esta etapa por el conocimiento que se tiene de los mismo. En la figura 6 puede observarse la cimentación y parte del proceso de la estructura utilizada.

158

Figura 6. La estructura y cimentación utilizadas en el prototipo son convencionales



Fuente: Elaboración propia.

Cubierta

En este caso, el sistema utilizado fue la losa encasetonada, esta es el sistema más común en la región; además, fue el más económico de las opciones analizadas, por lo que este fue el principal parámetro utilizado para su utilización. Al ser uno de los sistemas más utilizados en la región, tampoco significó ningún inconveniente durante el proceso de utilización/edificación en el prototipo, como se muestra en la figura 7.

Figura 7. Losa encasetonada, utilizada en el prototipo



Fuente: Elaboración propia.

Muros

En los muros se utilizaron bloques de tierra compactada (BTC) elaborados en el sitio en donde se edificó el prototipo, esta es una de las recomendaciones al utilizar esta tecnología, ya que facilita los procesos, además de ser la materia prima con la que más se cuenta en la región, teniendo como una de sus principales ventajas de un sistema similar a los convencionales, lo que permite que no se requiera ningún tipo de capacitación para ser utilizado. En la figura 8 puede observarse el acabado aparente de los muros de BTC.

Figura 8. Muros de BTC del prototipo



Fuente: Elaboración propia.

Si bien se recomienda utilizar un mortero con composición similar al utilizado en la estabilización de las piezas BTC que se utilizaron, en este prototipo, las piezas de los muros fueron juntadas con una mezcla convencional de cemento y arena, esto para facilitar este proceso y conocer si con el transcurso del tiempo se presentaba algún tipo de afectación. De igual forma, los recubrimientos utilizados corresponden a una mezcla convencional para probar experimentalmente la adherencia de estos a esta tecnología, buscando facilitar el proceso de apropiación y aplicación de este sistema constructivo a la autoproducción. En la figura 9 pueden observarse pruebas para las juntas de las piezas; en este caso se seleccionó una convencional ya que en las pruebas realizadas presentó un comportamiento adecuado. Hasta este momento no se ha presentado ningún tipo de afectación al utilizar mortero y recubrimiento convencional en los muros de BTC.

Figura 9. Pruebas de diferentes morteros para identificar el más adecuado



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 10 puede observarse el estado actual del prototipo, el cual ya cuenta con recubrimiento convencional. Actualmente, el prototipo continúa en proceso de construcción y evaluación. El siguiente aspecto para evaluar son las características térmicas del mismo, de acuerdo con el clima de la región.

Además, también se instalarán celdas solares, así como un sistema de captación de agua, ambos con fines académicos y de investigación. También, esta edificación se habilitará como laboratorio vivo experimental para conformar parte de la infraestructura del Laboratorio del Ambiente Construido para Zonas Áridas (LACZA), ya que en esta zona de la Universidad también se han construido celdas experimentales de diferentes materiales constructivos como: tradicionales, convencionales y alternativos utilizados en la región para su evaluación.

Figura 10. Estado actual del prototipo de vivienda



Fuente: Elaboración propia con los resultados obtenidos.

Conclusiones

Durante el proceso de diseño de piezas y edificación del prototipo de vivienda, se identificaron varias situaciones para ser tomadas en cuenta y así mejorar el proceso y facilitar la utilización de esta tecnología para la producción social de vivienda.

Una de las ventajas del BTC es la utilización de la tierra del lugar, por lo que esto representa una reducción en el costo de producción, a diferencia de si se utiliza material de los diferentes bancos de materiales de la región. Al respecto, se considera necesario analizar más opciones de estabilización para disminuir la cantidad de estabilizante y subir la resistencia de las piezas de BTC.

En este sentido, es recomendable caracterizar las muestras del lugar en laboratorio, pues de esta forma se optimizará el uso de estabilizante y se incrementará la resistencia de la pieza.

En el proceso de fabricación de las piezas, como ya se describió, fue muy variable dependiendo de las actividades que realizaban los trabajadores. En este aspecto, se considera que la producción aún puede incrementarse una vez optimizados los procesos con la práctica adquirida.

En lo referente a la cimentación, estructura y cubierta no representó ninguna dificultad al utilizarse sistemas convencionales. Una de las ventajas es que la región de estudio no se localiza en una

zona sísmica, por lo que estos elementos variarán de acuerdo con las características del terreno en donde se edificará la vivienda.

En el proceso de los muros, el sistema presentó la ventaja de ser similar al tradicional y al convencional, utilizados en la zona, por lo que este no representó dificultad alguna al utilizar el BTC. El material también presentó un comportamiento adecuado al usar mortero y recubrimiento convencional, lo que supone otra ventaja adicional en este sentido.

Por lo anterior, y de acuerdo con los resultados obtenidos en cada una de las etapas del proceso, se concluye que por las características de la tierra en la región, por el comportamiento a la compresión de las piezas utilizadas y de su similitud a las tecnologías convencionales y tradicionales, que la construcción con bloques de BTC se presenta como una tecnología que debe tenerse en cuenta en la producción social de la vivienda en la región de estudio; y que, de acuerdo con la experiencia presentada, esta permite que los usuarios puedan participar en cada parte de los procesos sin requerir conocimientos técnicos profesionales complejos de la misma, además de las ventajas que pueda representar su uso en el aspecto técnico-constructivo, económico y ambiental.

Referencias

- Bedoya, C. M. (2018). Construcción de vivienda sostenible con bloques de suelo cemento: del residuo al material. *Revista de Arquitectura*, 20(1), 62-70. <http://www.javegraf.com.co/index.php>
- Brizuela, E. E. (2020). Mampostería de bloques de suelo cemento inter trabados confinada en una estructura de hormigón armado. *Arquitek*, 17, 32-41. Acceso 24 de febrero de 2023 de <https://doi.org/10.47796/ra.2020i17.356>
- CINVA (1957a). *The cinva-ram prototype low cost soil cement block making machine*. Centro Interamericano de Vivienda.
- CINVA (1957b). *Cinva-Ram: máquina portátil para fabricar bloques de Tierra estabilizada*. Centro Interamericano de Vivienda.
- CONACYT. (2022). *Programas Nacionales Estratégicos*. <https://conacyt.mx/pronaces/>
- CONAVI. (2021). *Actualización del rezago habitacional 2020*. <https://www.gob.mx/conavi/documentos/actualizacion-del-rezago-habitacional>
- Diario Oficial de la Federación. (2016, 13 de abril). *ONNCCE 2018-NMX-C-508-ONNCCE-2015 - Industria de la Construcción-Bloques de Tierra Comprimida Estabilizados con Cal-Especificaciones - Métodos de Ensayo*.
- Diario Oficial de la Federación. (2013, 3 de julio). *ONNCCE 2013-NMX-C-036-ONNCCE-2013 - Industria de la Construcción – Mampostería – Resistencia a la compresión de bloques, tabiques o ladrillos y tabicones y adoquines – Método de Ensayo*.

- Díaz de León A. (2018). *Análisis experimental del comportamiento térmico del Bloque de Tierra Comprimida (BTC) como material alternativo aplicado en la vivienda social, en Torreón Coahuila, México* [Tesis de licenciatura], Escuela de Arquitectura, Universidad Autónoma de Coahuila.
- FAO. (2019). 6. *Textura del suelo*. 1-16. http://www.fao.org/tempref/FI/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/!33791!x6706s06.htm
- Galindo Díaz, J. A. (2022, 18 de noviembre). *El legado del CINVA en la construcción de la vivienda de interés social en América Latina (1951-1972)*. Conferencia Magistral. Escuela de Arquitectura Unidad Torreón, Universidad Autónoma de Coahuila.
- Google Maps. (2019). Consultado el 15 de junio de 2019. <https://www.google.com.mx/maps/@25.5283089,-103.3309691,15>
- Guerrero Baca, L. F., Roux Gutiérrez, R. S. y López, S. (2010). Ventajas constructivas del uso de tierra comprimida y estabilizada con cal en México. Palapa. *Revista de Investigación Científica en Arquitectura*, 5(1), 45–57. <http://revistasacademicas.ucol.mx/index.php/palapa/article/view/120/106>
- INFONAVIT. (2006). Dimensiones mínimas de vivienda de acuerdo a disposiciones y Reglamentos Oficiales. *INFONAVIT*. http://www.infonavit.org.mx/infonavit_ampliado/calidad_vida/reglamentos.pdf
- Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024* (2019, 12 de julio) https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5565599&fecha=12/07/2019#gsc.tab=0

- Quiroa Herrera, J. A. (2018). *Análisis y evaluación de prototipo de vivienda social, construida con materiales alternativos en la ciudad de Torreón Coahuila*. Reporte Técnico (inédito).
- Rigassi, V. (1985). *Compressed Earth Blocks: Manual of Production, I*. Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien.
- Tatiana, K., Medina, A. y Humberto, Ó. (2011). Bloque de tierra comprimida como material constructivo. *Revista Facultad de Ingeniería*, 20(31), 55–68. <http://www.scielo.org.co/pdf/teclo/v21n43/2256-5337-teclo-21-43-00135.pdf> ó <https://doi.org/10.19053/01211129.1421>



DESARROLLO DE NUEVAS TECNOLOGÍAS PARA FABRICACIÓN DE LADRILLOS A PARTIR DE RESIDUOS DE GRAN ESCALA

Pedro Antonio Márquez Aguilar¹

Marina Vlasova²

Abigail Parra Parra³

Verónica González Molina⁴

Resumen

En el presente trabajo se analizan las perspectivas de uso de residuos de vidrio de gran escala, tezontle (basalto), de lodos residuales activados (biosólidos) y material de empaque de poliestireno expandido

1 Profesor investigador del Instituto de Investigación en Ciencias Básicas y Aplicadas, Centro de Investigaciones en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, pmarquez@uaem.mx

2 Profesora investigadora del Instituto de Investigación en Ciencias Básicas y Aplicadas, Centro de Investigaciones en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, mvlasova@uaem.mx

3 Profesora investigadora del Instituto de Investigación en Ciencias Básicas y Aplicadas, Centro de Investigaciones en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, abigail.parra@uaem.mx.

4 Profesora por horas en el Instituto de Investigación en Ciencias Básicas y Aplicadas, Centro de Investigaciones en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, veronica.gonzalez@uaem.mx

esférico (EPS) para la producción de ladrillos, a partir de arcillas rojas y altas en sílice dentro de la tecnología tradicional de producción masiva y artesanal. Para implementar un proceso tecnológico de ahorro de energía y agua, se establece que cambiando la relación de los componentes de las mezclas arcilla-vidrio-tezontle-agua-biosólidos-EPS, durante la sinterización en aire a 1000 y 800 °C, durante 8-12 horas, es posible obtener ladrillos con distinta porosidad. La sinterización en condiciones de deficiencia de oxígeno permite reducir la emisión de CO, CO₂ a la atmósfera y favorece la formación de cerámicas carbonizadas que, junto a las propiedades estructurales del ladrillo, presentan una serie de características de cerámicas funcionales.

Introducción

170

El reto actual en la producción de ladrillos con arcilla roja es reducir el costo de producción mediante: 1. Disminución del consumo de energía (gas/electricidad); durante el proceso de sinterización del ladrillo; 2. Disminución de agua en la fase de preparación de las piezas mediante moldeo plástico, debido a la escasez de recursos hídricos; 3. Disminución del uso de arena, debido al empobrecimiento de los yacimientos de la calidad requerida; 4. ampliando la clasificación de los minerales arcillosos utilizados tradicionalmente para fabricar ladrillos (hasta los de alto contenido en sílice); 5. Fabricando productos de ladrillo con

propiedades que amplíen significativamente sus aplicaciones tradicionales como material de construcción; 6. Introducción de aditivos en la composición de la arcilla que mejoren las propiedades y características del ladrillo.

Basándose en los requisitos de la fabricación moderna de ladrillos, es decir: simplicidad del proceso tecnológico, bajo costo del producto final, reducción de las emisiones de CO, CO₂ a la atmósfera, el objetivo del presente estudio es desarrollar una tecnología de fabricación de ladrillos de arcilla roja mediante la adición de residuos a gran escala, tales como desperdicio de vidrio, productos de procesamiento de basalto, material de embalaje de poliestireno expandido esférico (EPS), biosólidos de las plantas de tratamiento de aguas residuales. Los aditivos seleccionados deben garantizar la preparación de piezas en bruto mediante moldeo plástico, reducir el tiempo de sinterización, obtener ladrillos de diferente porosidad con buenas propiedades de resistencia; así como sinterizar en condiciones de deficiencia de oxígeno para obtener cerámicas carbonizadas con propiedades adsorbentes.

Metodología

La preparación de ladrillos de manera tradicional se realiza en el estrecho intervalo de temperaturas $T_{\text{sint}} = 1000-1050$ °C durante 26-70 h, y el tiempo de combustión es de aproximadamente 10-12 h. Para

reducir el tiempo de sinterización se introdujo en la arcilla polvo de vidrio (residuo de botellas trituradas) con $T_{\text{fus}} \sim 700\text{-}800\text{ }^{\circ}\text{C}$ (similar al del feldespato). Los productos de la transformación del tezontle (polvos) se utilizaron como aditivos. El tamaño de las partículas de vidrio y tezontle es de $60\text{ }\mu\text{m} \leq d \leq 250\text{ }\mu\text{m}$. Se utilizaron como formadores de poros productos incinerados de biosólidos y EPS con $d \sim 1\text{-}3\text{ mm}$. Como plastificante se utilizó agua (tecnología estándar) o biosólidos que contienen agua. Ladrillos de laboratorio moldeados plásticamente con tamaños de $120 \times 60 \times 20\text{ mm}$ se sinterizaron en el rango de temperaturas de $800\text{-}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 1, 2, 4, 6, 8, 12 y 48 h. La sinterización se llevó a cabo en aire y en condiciones de deficiencia de oxígeno en los hornos (10^{-2} mm Hg). La tabla 1 muestra la composición de las mezclas y sus condiciones de sinterización; los porcentajes de los componentes se indican en las tablas y figuras correspondientes.

Tabla 1. Composición de las mezclas, condiciones de sinterización y tipo de cerámica

Serie	Composición inicial	Régimen de sinterización	Medio gaseoso	Tipo de cerámicos	Ref.
1	Arcilla roja, vidrio, tezontle, agua	1000 °C 8 h, 12 h	Aire	De construcción	1, 2
2	Arcilla roja, vidrio, tezontle, biosólidos	1000 °C 8 h, 12 h	10 ⁻² mm Hg	Funcionales y de construcción	1, 2
3	Arcilla alta silíceo, arena, vidrio, agua	800 °C 8 h	Aire	De construcción	3
4	Arcilla alta silíceo, arena, vidrio, agua	800 °C 8 h	10 ⁻² mm Hg	Funcionales y de construcción	4
5	Arcilla roja, vidrio, partículas de EPS, agua	1000 °C 8 h	Aire	De construcción	5
6	Arcilla roja, vidrio, partículas de EPS, agua	1000 °C 8 h	10 ⁻² mm Hg	Funcionales y de construcción	5

Fuente: Elaboración propia.

Los productos sintetizados se investigaron mediante difracción de rayos X (DRX) en radiación Cu K α (un difractor DRON-3M). Las mediciones SEM y EDS se realizaron con un microscopio electrónico de barrido LEO 1450 VP. La absorción de agua se determinó mediante la fórmula $W: \% = 100 - [(P1 - P0)/P0] \cdot 100$, donde P0 es el peso inicial de una probeta y P1 es el peso de la probeta después de la absorción de agua. Los ensayos de compresión y fractura se realizaron mediante técnicas

estándar. Las muestras con las mejores características sirvieron de base para sinterizar ladrillos de tamaño 250 x 120 x 65 mm.

Resultados

Propiedades de las muestras de la serie 1

Tanto la composición de fases como las propiedades de las muestras cerámicas preparadas a partir de diferentes mezclas (tabla 2) vienen determinadas por el contenido de componentes en las mezclas iniciales, dependen de la temperatura ($T_{\text{sint.}}$) y del tiempo ($t_{\text{sint.}}$) de sinterización de las muestras. El rasgo característico de las mezclas binarias y ternarias que contienen tezontle es un cambio sustancial en el contenido de fases de silicato, cuarzo y cristobalita, lo que permite suponer que, en los sistemas vidrio-tezontle y vidrio-tezontle-sillimanita, se forman fusiones eutécticas a 1000 °C y que, en el enfriamiento, los silicatos tienen una composición similar. La dependencia de las propiedades mecánicas de las cerámicas de la composición de la mezcla inicial y de los regímenes de sinterización permitirán elegir el tratamiento y preparación de cerámicas en forma de ladrillo para diferentes aplicaciones: para paredes exteriores e interiores de edificios, en forma de baldosas cerámicas (ladrillos clinker) y para el filtrado de suspensiones acuosas.

Tabla 2 . Propiedades de ladrillos obtenidos con uso de agua a una $T_{\text{cint.}} = 1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Tipos de mezclas % de peso	t, h	$F_{\text{comp.}}$ kg/cm ²	$F_{\text{flex.}}$ kg/cm ²	Absorción %	Aplicación
Arcilla roja (standard)	48-70	75-300	14-44	3-7	Diferentes tipos de ladrillos
70 arcilla roja + 30 vidrio	8	64	46	7	Ladrillo de pared
	12	223	56	4	Ladrillo de pared
50 arcilla roja + 50 vidrio	8	103	62	5.6	Ladrillo de pared
	12	227	73	4.4	Ladrillo de pared
40 arcilla roja + 60 vidrio	8	120	70	3	Ladrillo tipo clinker
	12	586	80	1.6	Ladrillo de pared
70 arcilla roja + 30 tezontle	8	252	52	3	Ladrillo de pared
	12	408	75	1.3	Ladrillo tipo clinker
50 arcilla roja + 50 tezontle	8	100	40	3	Ladrillo de pared
	12	166	62	2	Ladrillo de pared
40 arcilla roja + 30 vidrio + 30 tezontle	8	81	70	2	Ladrillo de pared
	12	301	70	1.5	Ladrillo tipo clinker
25 arcilla roja + 25 vidrio + 50 tezontle	8	87	44	2	Ladrillo de pared
	12	347	115	1	Ladrillo tipo clinker
15 arcilla roja + 25 vidrio + 60 tezontle	8	153	20	1.6	Ladrillo de pared
	12	199	30	1	Ladrillo de pared

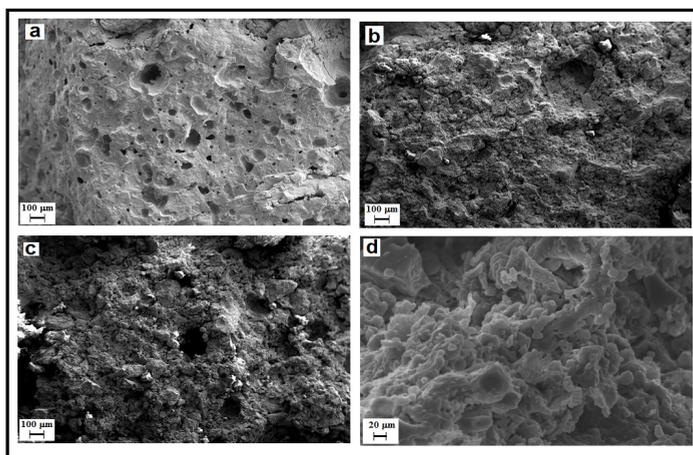
Fuente: Adaptado de Vlasova (2018).

La investigación demuestra que la adición de vidrio (con bajo punto de fusión) a la arcilla roja puede reducir significativamente el tiempo de sinterización de los productos de ladrillo, manteniendo, al mismo tiempo, sus propiedades de resistencia. Este resultado es importante no sólo para la industria del ladrillo de gran tonelaje, sino también para las pequeñas empresas (artesanales).

Propiedades de las muestras de la serie 2

La composición de fases de las muestras sinterizadas preparadas a partir de diferentes mezclas con uso de biosólidos es en realidad un conjunto de fases características de las muestras obtenidas con el uso de agua. Los resultados de SEM indican que, independientemente de la composición de las mezclas iniciales, las muestras cerámicas son altamente porosas (figura 1). Como puede observarse en la tabla 3, el uso de biosólidos, como sustituto de agua, en la preparación de piezas en bruto mediante moldeado plástico puede, con un determinado contenido de componentes, utilizarse para producir ladrillos altamente porosos, así como filtros cerámicos.

Figura 1. Micrografía de una muestra fracturada obtenida a partir de las mezclas.



Fuente: Adaptado de Vlasova (2018).

El 40 % en peso de arcilla roja - 60 % en peso de vidrio (a); 70 % en peso de arcilla roja - 30 % en peso de tezontle (b); 30 % en peso de arcilla roja - 30 % en peso de vidrio - 40 % en peso de tezontle (c); 25 % en peso de arcilla roja - 25 % en peso de vidrio - 50 % en peso de tezontle (d). $T_{\text{sint.}} = 1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{sint.}} = 8 \text{ h}$. Los 40 g de biosólidos se añadieron en mezclas

Los estudios demuestran que la adición de vidrio (de bajo punto de fusión) a la arcilla roja puede reducir significativamente el tiempo de sinterización de los productos de ladrillo y que el uso de biosólidos con alto contenido en humedad puede eliminar por completo el uso de agua en el proceso. Este resultado es especialmente importante para las pequeñas empresas (artesanales),

ya que indica la posibilidad de utilizar aguas residuales de diversos tipos para el moldeo plástico de piezas en bruto.

Tabla 3. Propiedades de ladrillos obtenidos con uso de biosólidos a $T_{\text{ sint. }} = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$

Típos de mezclas % en peso	t, h	$F_{\text{comp.}}$ kg/cm ²	F_{flex} kg/cm ²	Absorción %	Aplicación
Arcilla roja (estándar)	48-70	75-300	14-44	3-7	Diferentes tipos de ladrillos
70 arcilla roja + 30 vidrio	8	33.14	30	13	Ladrillos para filtración
	12	64	40	11	Ladrillos de paredes
50 arcilla roja + 50 vidrio	8	35	30	10	Ladrillos de paredes
	12	227	40	6	Ladrillos de paredes
40 arcilla roja + 60 vidrio	8	60	34	5	Ladrillos de filtración
	12	258	70	1	Ladrillos tipo clinker
70 arcilla roja + 30 tezontle	8	115	50	5.2	Ladrillos de paredes
	12	131	70	4.3	Ladrillos tipo clinker
50 arcilla roja + 50 tezontle	8	94	20	1	Ladrillos de paredes
	12	156	40	0.2	Ladrillos tipo clinker
40 arcilla roja + 30 vidrio + 30 tezontle	8	59	30	5.5	Ladrillos de paredes
	12	100	70	2	Ladrillos tipo clinker
25 arcilla roja + 25 vidrio + 50 tezontle	8	66	30	4	Ladrillos de paredes
	12	260	30	1.6	Ladrillo de paredes
15 arcilla roja + 25 vidrio + 60 tezontle	8	118	20	3	Ladrillos de paredes
	12	150	30	1.5	Ladrillo de paredes
					Ladrillos tipo clinker

Nota: $P_{\text{biosólido}} = 40\text{ g}$.

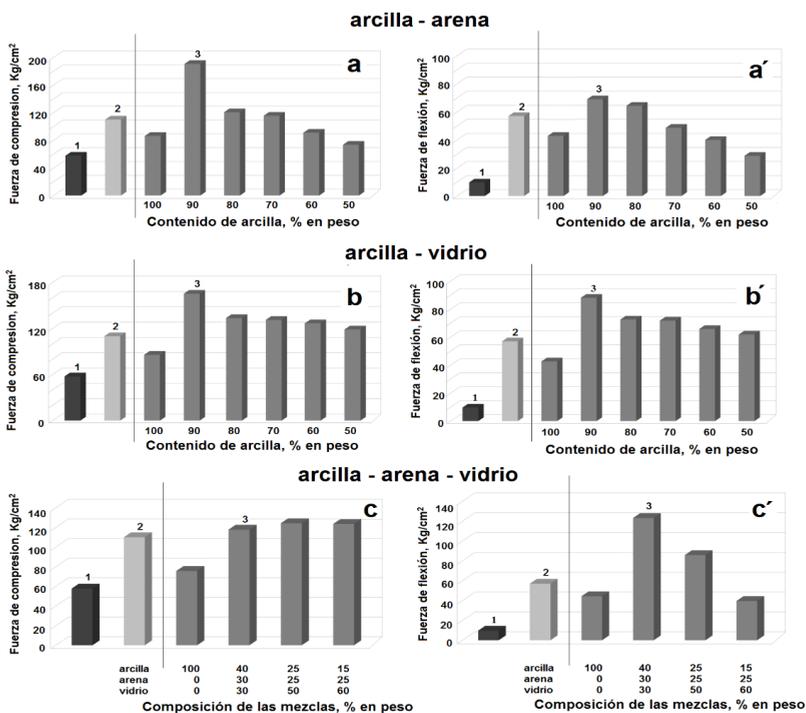
Fuente: Adaptada de M. Vlasova (2018).

Propiedades de las muestras serie 3

En esta serie se utiliza arcilla y arena del poblado de Ajuchitlán del Progreso, en el estado de Guerrero. Estas muestras se caracterizan por un bajo contenido de montmorillonita, que es el mineral principal de la arcilla roja y favorece el moldeado plástico de las piezas. Por esta razón, el proceso de fabricación de los ladrillos difiere fundamentalmente del proceso tradicional de sinterización de la arcilla roja. Los ladrillos se fabrican a alta presión (hasta 80 MPa) y se sinterizan a 1200 °C. Cabría suponer que la adición de una pequeña cantidad de arcilla roja, facilita la conformación plástica de los ladrillos, así como la introducción de vidrio (de bajo punto de fusión) no sólo permite una transición al proceso tradicional de sinterización de ladrillos, sino que, también posibilita la sinterización a baja temperatura. Como fuente adicional de arcilla roja se seleccionó una arena con bajo contenido en montmorillonita. Esta investigación demuestra que la sinterización a $T_{\text{sint}} = 800 \text{ °C}$ y $t_{\text{sint}} = 8 \text{ h}$ da lugar a ladrillos con buenas propiedades de resistencia (figura 2). Dependiendo de la composición de las mezclas iniciales, la porosidad/absorción de agua varía ampliamente entre el 16 % y el 3 % (figura 3).

Los resultados indican que esto es una forma de reducir la temperatura de sinterización de las arcillas altamente silíceas hasta 800 °C, al utilizar el proceso tradicional de moldeado plástico mediante la adición de vidrio (de bajo punto de fusión) y una pequeña cantidad de arcilla roja. Esto es especialmente importante en regiones pobres en arcilla roja, pero con una gran demanda de producción de ladrillos de bajo costo.

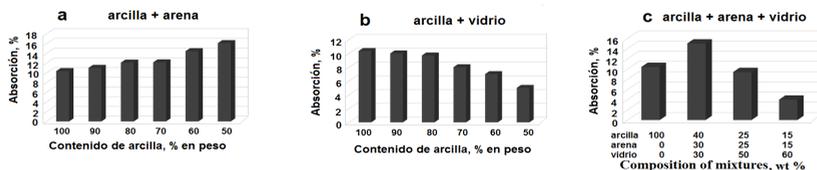
Figura 2. Cambio en la resistencia a la compresión (a-c) y a la fractura (a'-c') de probetas con la composición de las mezclas iniciales. $T_{\text{sint.}} = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{sint.}} = 8\text{ h}$.



Fuente: Adaptado de Vlasova (2020).

La columna 1 corresponde a la norma del estado de Guerrero; la columna 2 a la norma de México y la columna 3 a datos experimentales.

Figura 3. Variación de la capacidad de absorción de agua en muestras cerámicas de diferente composición. La cerámica se obtuvo a $T_{\text{ sint. }} = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante $t_{\text{ sint. }} = 8\text{ h}$



Fuente: Adaptado de Vlasova (2020).

Propiedades de las muestras de la serie 4

La sinterización de composiciones similares a las muestras de la serie 3, pero en condiciones de deficiencia de oxígeno, da lugar a cerámicas porosas (figuras 4 y 5). El tamaño de los poros y las propiedades de resistencia dependen significativamente del contenido de vidrio en las mezclas. Por consiguiente, las muestras muy porosas pueden utilizarse como filtros cerámicos y/o muros aislantes; por otra parte, las cerámicas con buenas propiedades de resistencia pueden utilizarse como ladrillos estructurales o portantes.

Los resultados de la sinterización de materiales cerámicos, “mejorados” de alto contenido en sílice en hornos de cocción con deficiencia de oxígeno, muestran que variando la composición del medio gaseoso se puede producir una amplia gama de productos de ladrillo como material de construcción (desde cerámicas poco porosas hasta cerámicas espumosas).

Figura 4. Cambio en la estructura porosa de las muestras cerámicas con un gran contenido de arena (a), vidrio (b) y arena + vidrio (c) en las mezclas iniciales $T_{\text{sint.}} = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{sint.}} = 8\text{ h}$

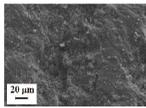
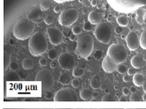
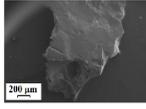
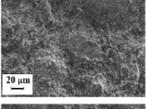
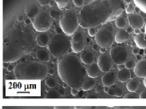
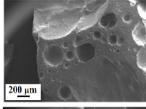
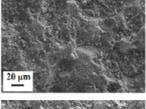
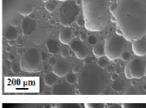
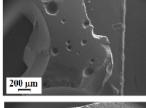
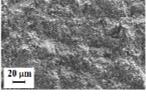
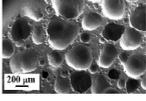
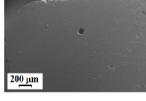
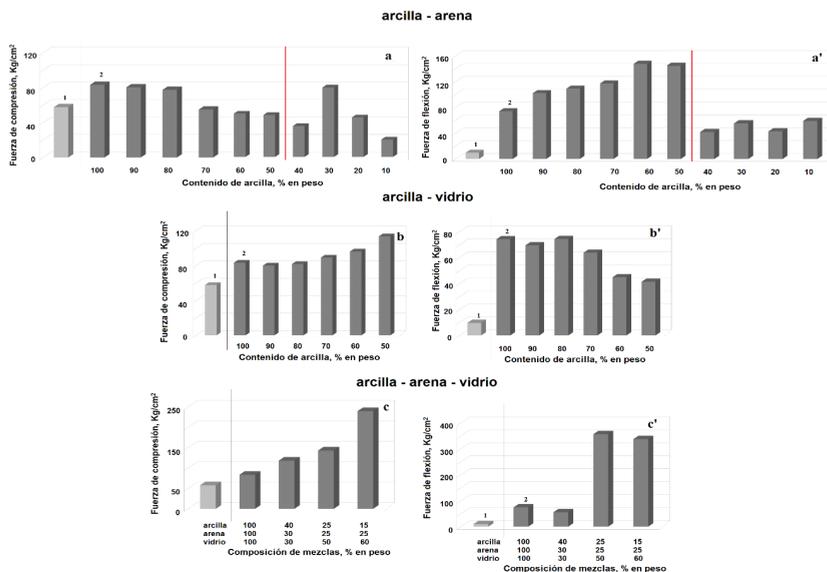
a. x% en peso de arcilla + y% en peso de arena	b. x% en peso arcilla + z% en peso vidrio	c. x% en peso arcilla + y% en peso arena + z% en peso vidrio
50% arcilla + 50% arena 	50% arcilla + 50% vidrio 	
40% arcilla + 60% arena 	40% arcilla + 60% vidrio 	40% arcilla + 30% arena + 30% vidrio 
30% arcilla + 70% arena 	30% arcilla + 70% vidrio 	25% arcilla + 25% arena + 50% vidrio 
20% arcilla + 80% arena 	20% arcilla + 80% vidrio 	15% arcilla + 25% arena + 60% vidrio 
10% arcilla + 90% arena 	10% arcilla + 90% vidrio 	

Figura 5. Variación de la resistencia a la compresión (a-c) y a la fractura (a'-c') de las probetas con la composición de las mezclas iniciales.



Fuente: Adaptado de Márquez (2021).

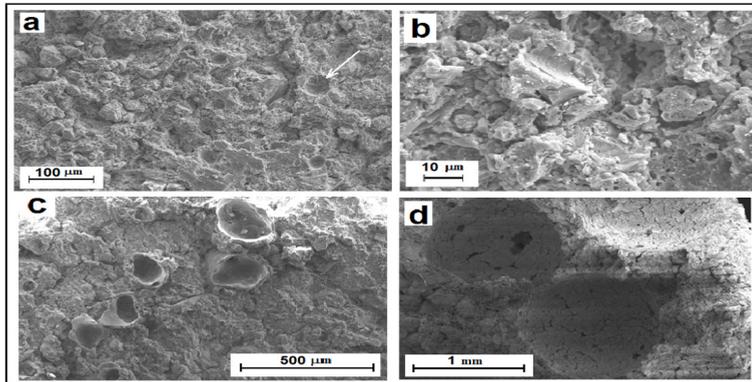
Sinterización a $T_{\text{sint.}} = 800 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{sint.}} = 8 \text{ h}$ en condiciones de deficiencia de oxígeno. La columna 1 corresponde a la norma del estado de Guerrero, en México, la columna 2 corresponde a los datos experimentales.

Propiedades de las muestras de la serie 5

Para minimizar la cantidad de productos nocivos de la degradación térmica del EPS, liberados en el intervalo de temperaturas de 300-500 °C, el tratamiento térmico de las muestras se lleva a cabo en dos etapas. En la primera se realiza el calentamiento de 24 °C a 200 °C. En la segunda, estas muestras se introducen en un horno precalentado en el que la temperatura se incrementa de 850 a 1000 °C.

De acuerdo con el análisis de difracción de rayos X (DRX), la cerámica sinterizada en aire consta de las siguientes fases cristalinas: sillimanita, cristobalita y cuarzo. Todos los picos están situados en un amplio halo, lo que indica la presencia de una fase amorfa; a saber, una fase vítrea. En las imágenes SEM se puede observar la estructura porosa del cuerpo cerámico.

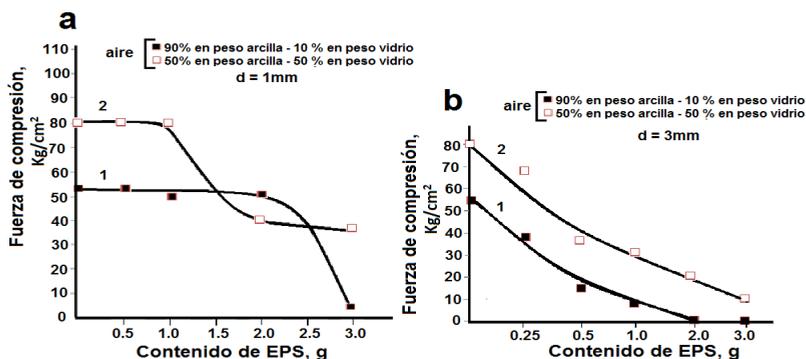
Figura 6. Micrografías de una fractura de la cerámica porosa a diferentes aumentos (a-d)



Fuente: Adaptado de Moreno (2020).

A pesar de la estructura porosa gruesa del material (véanse las figuras 6 y 7), los ladrillos de baja porosidad son adecuados como material de construcción. La resistencia del material viene dada por el vidrio fusible triturado e introducido en la arcilla roja. Estas cerámicas tienen propiedades de aislamiento térmico y acústico (figuras 8 y 9).

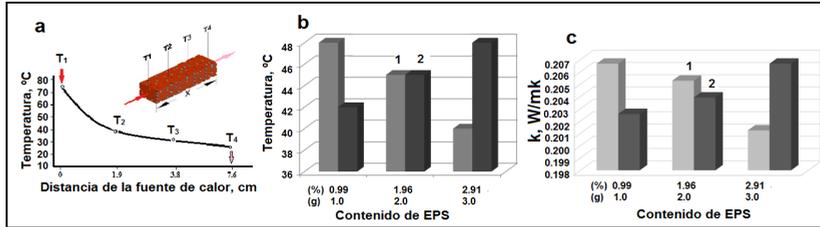
Figura 7. Variación de la resistencia a la compresión de las muestras cerámicas con la variación del contenido de EPS y vidrio en las mezclas iniciales y del diámetro de las partículas de EPS.



Fuente: Adaptado de Moreno (2020).

En (a), el diámetro del EPS es de 1 mm; mientras que en la (b), el diámetro del EPS es de 3 mm.

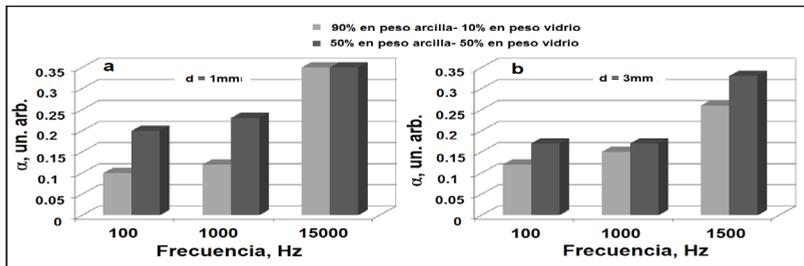
Figura 8. Carácter generalizado del cambio de temperatura en la cerámica



Fuente: Adaptado de Moreno (2020).

La porosa (a); temperatura de las muestras de diferente composición a una distancia de 1,9 cm de la fuente de calentamiento (b), y coeficiente de conductividad térmica (c). (1) para mezclas de 90 % en peso de arcilla + 10 % en peso de vidrio; (2) para mezclas de 50 % en peso de arcilla + 50 % en peso de vidrio. El diámetro de las partículas de EPS es de 1 mm y el tiempo de calentamiento es de 60 minutos.

Figura 9. Variación del coeficiente de absorción acústica



Fuente: Adaptado de Moreno (2020).

La gráfica (α) son las muestras cerámicas de diferente composición con distinto diámetro de poro. La cantidad de EPS en la mezcla es de 1 g.

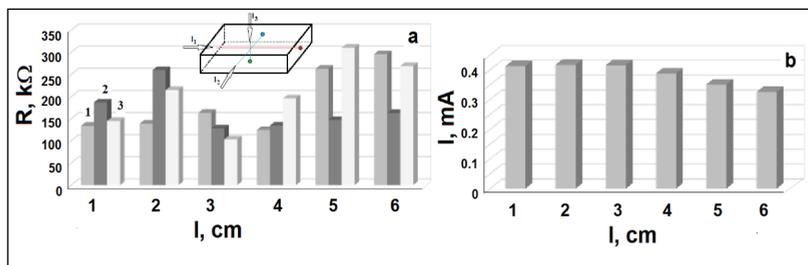
Los estudios demuestran que el uso de arcilla roja con la adición de vidrio (con bajo punto de fusión) y partículas de EPS de material de embalaje reciclado sinteriza ladrillos con propiedades mejoradas. Teniendo en cuenta la gran cantidad de residuos de EPS, el modo desarrollado de tratamiento térmico de las mezclas abre una amplia vía de reciclaje de este tipo de residuos.

Propiedades de las muestras de la serie 6

Sinterizando las mismas composiciones que en la serie 5, pero en condiciones deficientes de oxígeno, se obtiene una cerámica porosa carbonizada con propiedades de resistencia desde 60 Kg/cm² hasta 115 Kg/cm².

La presencia de carbono en las cerámicas porosas modifica las propiedades electro-físicas de las muestras. La cerámica adquiere las propiedades de un material resistente (figura 10) y evoluciona hacia una cerámica funcional con aplicaciones específicas en función del contenido de carbono (como resistencias de alto ohmio, elementos calefactores, etcétera).

Figura 10. Cambio en la conductividad eléctrica



Fuente: Adaptado de Moreno (2020).

En la columna (a) en lugares locales de cerámica carbonizada con un diámetro de poro $d \sim 1$ mm y en la corriente (b) en la dirección I_1 (ver diagrama en a).

Los resultados demuestran que la sinterización de mezclas de arcilla roja y EPS en condiciones de deficiencia de oxígeno amplía sustancialmente el campo de aplicación del material carbonizado poroso. Además de sus buenas propiedades de resistencia como material de construcción, adquiere las propiedades de una cerámica funcional.

Conclusiones

Para responder a las exigencias de la producción moderna de ladrillos, además de la arcilla roja y la arcilla con alto contenido en sílice, se seleccionaron grandes cantidades de residuos, como desecho de vidrio, biosólidos procedentes de plantas de tratamiento de aguas residuales y material de embalaje (EPS).

Sobre la base de mezclas de arcilla roja, vidrio y residuos, se desarrolló una tecnología de sinterización para productos de ladrillo de resistencia estándar a 1000 °C durante 8-12 horas. El tiempo real de sinterización para la técnica estándar es de 40 horas.

El uso de vidrio de bajo punto de fusión, que provoca la formación de fundidos eutécticos, de baja temperatura durante el tratamiento térmico de las mezclas iniciales, da como resultado un cuerpo cerámico de alta resistencia con temperaturas (más bajas) y tiempos (más cortos) de sinterización, lo que garantiza una tecnología de ahorro de energía y, por tanto, productos más baratos.

El uso de biosólidos con un alto contenido en agua (hasta el 60 %) permite eliminar la introducción de agua en la fase de moldeo plástico de piezas en bruto. Así, se ha realizado una tecnología de ahorro de agua que reduce significativamente el precio del costo de los ladrillos.

La sinterización de mezclas que contienen biosólidos y/o partículas esféricas de EPS permitió sintetizar cerámicas de distinta porosidad con propiedades estructurales-funcionales de diversos fines.

La sinterización de las mezclas en condiciones de deficiencia de oxígeno permitió obtener cerámicas porosas carbonizadas, lo que reduce considerablemente las emisiones de CO_2/CO a la atmósfera, y permiten su uso como materiales de construcción y filtrado.

La introducción de pequeñas cantidades de arcilla roja en la arcilla altamente silíceo permite pasar a la tecnología normalizada de moldeo de plástico, y evitar la fase de prensado a alta presión de las piezas. La presencia de vidrio con bajo punto de fusión permite reducir la temperatura de sinterización de $1200\text{ }^\circ\text{C}$ a $1000\text{ }^\circ\text{C}$ en 8 horas.

En conclusión, esta investigación permite considerar los materiales de desecho a gran escala que se utilizan, y que están disponibles en toda la república mexicana, como una valiosa materia prima para la producción de materiales de construcción con un conjunto de propiedades requeridas, utilizando tecnología similar a la convencional, pero a bajo costo. La implementación de esta tecnología está disponible no sólo para las ladrilleras de gran escala, sino también para las pequeñas industrias artesanales. Así como es adaptable a arcillas de distintas regiones del país (como es el caso del estado de Guerrero).

Referencias

- Moreno Bernal, E., Vlasova, M., Márquez Aguilar, P.A. Kakazey, M. y Guardian Tapia, R. (2020). Synthesis and properties of porous ceramics obtained with the use of spherical expanded polystyrene particles of packaging material. *Science of Sintering*, 52, pp. 25-39. <https://doi.org/10.2298/SOS2001025B>
- Vlasova, M., Parra Parra, A., Márquez Aguilar, P. A., Trujillo Estrada, A., González Molina, V., Kakazey, M., Tomila, T. y Gómez-Vidales, V. (2017). Closed Cycle of Recycling of Waste Activated Sludge. *Waste Management*, 71, pp. 320-333. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.10.051>
- Vlasova, M., Márquez Aguilar, P. A., González Molina, V., Trujillo Estrada, A. y Kakazey, M. (2018). Development of an energy- and water-saving manufacturing technology of brick products, *Science of Sintering*, 50, Iss.3, pp. 275-289. <https://doi.org/10.2298/SOS1803275V>
- Flores Nicolas, M., Vlasova, M., Márquez Aguilar, P. A., Kakazey, M., Chávez Cano, M. M., Arroyo Matus, R. y Pi Puig T. (2020). Development of an Energy-Saving Technology for Sintering of Bricks from High-Siliceous Clay by the Plastic Molding Method, *Construction and Building Materials*, 242, pp. 118142. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118142
- Márquez Aguilar, P. A., Flores Nicolas, M., Kakazey, M., Guardian Tapia, R., Chávez Cano, M. M., Arroyo Matus, R., Pi Puig, T., Serrano Nava, M. E. y Vlasova M. (2021). Low-temperature sintering of high-siliceous clay under conditions of oxygen deficiency, *Science of Sintering*, 53(2), pp.137-1153. <https://doi.org/10.2298/SOS2102137A>



USO DE ADICIONES EN MORTEROS PARA INCIDIR EN LAS PRESTACIONES FÍSICO MECÁNICAS, FOMENTANDO LA ECONOMÍA CIRCULAR

Mauricio Arreola Sánchez¹

Wilfrido Martínez Molina²

Hugo Luis Chávez García³

Jorge Alberto Borrego Pérez⁴

Marco Antonio Navarrete Seras⁵

Elia Mercedes Alonso Guzmán⁶

Resumen

El presente capítulo es una investigación sobre la factibilidad del uso de diferentes puzolanas, de origen residual, como adiciones y sustitutos parciales del cemento Portland, para disminuir los

1 Profesor e investigador de la Facultad de Ingeniería Civil UMSNH, mauricio.arreola@umich.mx

2 Profesor e investigador de la Facultad de Ingeniería Civil UMSNH, wilfrido.martinez@umich.mx

3 Profesor e investigador de la Facultad de Ingeniería Civil UMSNH, luis.chavez@umich.mx

4 Profesor e investigador de la Facultad de Ingeniería Civil UMSNH, jorge.borrego@umich.mx

5 Profesor e investigador Facultad de Ingeniería Civil UMSNH, mnavarrete@umich.mx

6 Profesor e investigador Facultad de Ingeniería Civil UMSNH, elia.alonso@umich.mx



GEI, reducir el consumo de CP, reusar residuos de otros procesos, incrementar la durabilidad, modificar las prestaciones mecánicas de estos materiales cementicios, favorecer la economía en autoconstrucción. Los materiales estudiados son cenizas de origen orgánico: bagazo de caña (CBC) y carbón vegetal (CV) y mineral, ceniza de elaboración de ladrillo (CEL). Se diseñaron y elaboraron morteros con la finalidad de mejorar, mediante diversas dosificaciones, sus propiedades físico-mecánicas. Los morteros se sometieron a pruebas destructivas en estado endurecido: compresión, tensión directa, flexión y adherencia; así como no destructivas en estado endurecido: velocidad de pulso y resistividad eléctrica. Las edades de prueba fueron 14, 28, 45, 90, 180 y 360 días. El presente capítulo demuestra la factibilidad técnica de implementar las puzolanas de origen residual como aditivos para morteros en la edificación.

194

Introducción

Para lograr que la humanidad garantice su permanencia en nuestro planeta con el nivel de desarrollo tecnológico y bienestar social actual, se están enfocando gran cantidad de esfuerzos en el desarrollo e implementación de la economía circular (EC).

Según lo descrito por Morseletto (2023), el comercio, los mercados y los sistemas económicos han existido en todas las

civilizaciones antiguas, ya que las economías rudimentarias tomaron forma al principio de las sociedades humanas (Earle, 1997; Finley, 1973). Así pues, las soluciones de la EC se remontan a tiempos tan lejanos como los propios seres humanos. En la prehistoria nuestros antepasados reutilizaron, repararon y mejoraron artefactos, al tiempo que se reciclaban varios materiales (Megarry, 1995). En la Edad de Bronce se volvía a fundir el cobre, mientras que en siglos posteriores se fundieron objetos metálicos de cualquier tipo para crear otros nuevos, como monedas o armas. El vidrio es otro caso antiguo de reciclaje; incluso la madera, uno de los materiales más abundantes, se reutilizaba ampliamente. Por ejemplo, la madera de buena calidad procedente de barcos se reutilizaba en edificios. Además, los ladrillos recuperados son probablemente los elementos de construcción más reutilizados de la historia (Smil, 2013).

La EC se materializa a través de diversas soluciones y aplicaciones industriales y empresariales, y los investigadores las han clasificado dando preferencia a las denominaciones que empiezan por la letra R (más concretamente, RE, sufijo que significa repetición). Esta tendencia deriva de las iniciales 3R (reducir, reutilizar y reciclar), una fórmula que surgió entre los ecoactivistas estadounidenses en los años 60, y que se institucionalizó progresivamente en las prácticas de gestión de residuos (Lounsbury, 2005). En la conceptualización gradual de la EC, las 3R evolucionaron hasta abarcar la reparación, rehuso, replanteamiento, reacondicionamiento, rediseño, recuperación, reutilización y re-fabricación, por mencionar algunas (Reike, *et al.*, 2022).

Por su parte Morseletto (2023) menciona que para la plena realización de la CE se requiere pasar por la facilitación y difusión de soluciones circulares, para lo cual propone tres rutas denominadas *disminuir, compartir o distribuir y valorizar*.

Diversos estudios han demostrado que el paso a una economía más circular aumenta el crecimiento económico, conduce a una creación moderada de empleo y reduce las emisiones de CO₂ (Aguilar-Hernandez, *et al.*, 2021; Berry, *et al.*, 2022; Bianchi y Cordella, 2023; Boonman, *et al.*, 2023; Cantzler, *et al.*, 2020; Haas, *et al.*, 2020; Morseletto, 2020; Sehnem, *et al.*, 2019). Por otra parte, un estudio de la Comisión Europea y la Dirección General de Medio Ambiente, demuestra que para el caso concreto del impacto de la economía circular en el mercado laboral de la UE, es probable que haya efectos negativos en sectores concretos (especialmente en los sectores de la construcción, la electrónica de consumo y la agricultura), lo que significa que las políticas de economía circular solo pueden ser socialmente aceptables si se complementan con otras políticas de redistribución (Boonman, *et al.*, 2023; Philipp, 2016).

Por su parte, la industria de la construcción es responsable del 40 % de las emisiones de dióxido de carbono en todo el mundo, los residuos de construcción y demolición representan el 40 % de los residuos sólidos en Estados Unidos. Además de que es la mayor consumidora de materias primas (Ghisellini, *et al.*, 2018; Philipp, 2016; Pomponi y Moncaster, 2017). Actualmente, existen diferentes investigaciones y desarrollo de proyectos para

tratar de implementar la economía circular en esta industria, proponiendo metodologías para determinar la circularidad de las casas habitación (Cottafava y Ritzen, 2021) o la factibilidad de las edificaciones por demoler como bancos de material para la propia edificación (Copeland y Bilec, 2020), por mencionar algunos ejemplos.

El presente trabajo se centra en demostrar, técnicamente, que existen materiales considerados desechos en procesos agroindustriales que pueden ser implementados como materiales de construcción en casas habitación, tanto en serie como de autoconstrucción.

Problemática de los aspectos estéticos y de habitabilidad de las viviendas

La infraestructura de vivienda representa un gran desafío para la humanidad, debido a que la vivienda está reconocida como un derecho humano fundamental y forma parte de las necesidades básicas para el bienestar de la sociedad (Doyal y Gough, 1984; Max-Neef, 1991; Rao y Min, 2018; zu Ermgassen, *et al.*, 2022). Un estudio de la International Energy Agency Paris (IEA, 2017) estima que para 2060 se habrán construido aproximadamente 230 billones de m² de superficie para vivienda, adicionales a los ya existentes en la actualidad; esto equivale a construir la superficie de Japón cada año. Los impactos ecológicos de esta

expansión de infraestructura serán considerables (Laurance, *et al.*, 2015; Müller, *et al.*, 2013; zu Ermgassen, *et al.*, 2022).

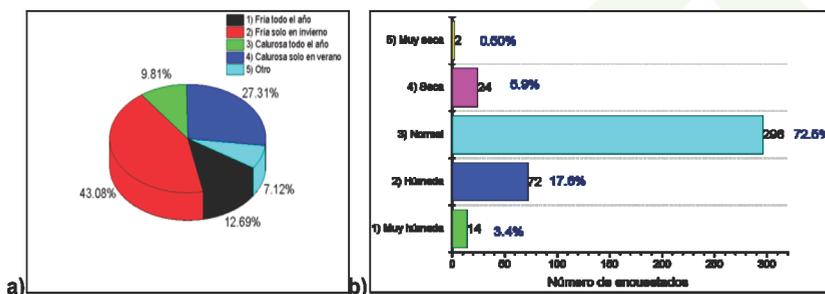
Respecto a la operatividad de la infraestructura de vivienda existente, esta genera grandes gastos energéticos a nivel mundial. Se estima que el 40 % de la energía mundial es utilizada por los edificios, dicho consumo procede principalmente de calefacción, refrigeración, iluminación y ventilación de los mismos (Agathokleous, *et al.*, 2019; Németh, *et al.*, 2023). En nuestro país, se está desarrollando un proyecto nacional de vivienda (PRONACES-321260, 2022), en el cual se aplicaron encuestas a diversos desarrollos habitacionales de interés social.

La figura 1 muestra los resultados respecto de la percepción térmica de los usuarios de dichas viviendas, se observa que (figura 1a) el 22.5 % de los encuestados manifestaron que sus viviendas están frías o cálidas durante todo el año y otro 70.39 % manifestaron que sus viviendas esta frías o cálidas durante la respectiva estación de invierno y verano (cabe resaltar que en la ciudad de Morelia no se usan sistemas de control climático en las viviendas). Lo cual comprueba que la infraestructura actual no cuenta con ningún criterio de diseño bioclimático, y en el caso del 22.5 % de los encuestados tendrían que absorber los gastos energéticos necesarios para mantener un nivel de confort mínimo durante todo el año.

La sensación de humedad dentro de la vivienda se muestra en la figura 1b, en dichos resultados, nuevamente se constata

que el 21 % de los encuestados perciben sus viviendas de húmedas a muy húmedas. El problema de humedad puede ser atribuido a mala iluminación y ventilación de la misma o también a mala calidad en los materiales o procesos constructivos. Incluso puede deberse a que la vivienda no está totalmente terminada; es decir, solo se construyen los elementos estructurales (muros de carga y losas) quedando pendientes los aplanados y pintura (acabados) por cuestiones de solvencia económica del usuario, esto último es un problema típico en todo el país.

Figura 1. Percepción de confort térmico (a) y humedad (b) dentro de la vivienda



Fuente: Elaboración propia.

Existen diversas líneas de investigación e investigadores a nivel mundial desarrollando soluciones a los problemas de confort térmico en las viviendas y en los desarrollos habitacionales. Algunas de dichas soluciones son un diseño urbano o del desarrollo habitacional que cree microclimas al exterior de la vivienda, de

tal forma, que el interior no presente grandes variaciones térmicas (Sun, *et al.*, 2023).

Para abordar el problema desde el interior de la vivienda o edificación, se están desarrollando los materiales de cambio de fase (PCM, por sus siglas en inglés), los cuales se incorporan en los materiales de construcción como el concreto o los morteros y yesos de aplanados. Dichos PCM permiten mejorar la capacidad térmica de dichos materiales de construcción, confiriéndoles la capacidad de almacenar o liberar energía térmica procedente del ambiente (Lachheb, *et al.*, 2017; Németh, *et al.*, 2023).

En este sentido, existen materiales (puzolanas) de origen residual, generados por la industria y la agroindustria, que presentan grandes posibilidades de implementación como materiales de construcción que podrían igualmente mejorar las propiedades térmicas sin disminuir su comportamiento físico-mecánico de las estructuras edificadas con ellos.

A continuación, se presentan los resultados de tres diferentes investigaciones realizadas por los presentes autores. Con dicho análisis se comprueba la factibilidad técnica para su implementación y su potencial servicio ecológico como captadores pasivos de CO₂.

Desarrollo de nuevos aditivos eco amigables para morteros base cemento portland (puzolanas)

Comportamiento mecánico de morteros con adiciones de origen residual

Para incrementar la resistencia mecánica de los morteros base cemento portland, normalmente se recurre al uso de aditivos químicos comerciales, como fluidificantes, reductores de agua, etc. Pero desde hace varios años se investiga la aplicación de diferentes aditivos de origen residual que permitan mejorar dichas características mecánicas en diferentes intensidades. En el presente capítulo se presentan algunos resultados de diferentes investigaciones que permiten demostrar las mejoras conferidas por dichos aditivos.

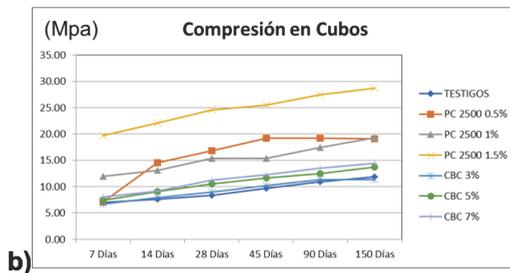
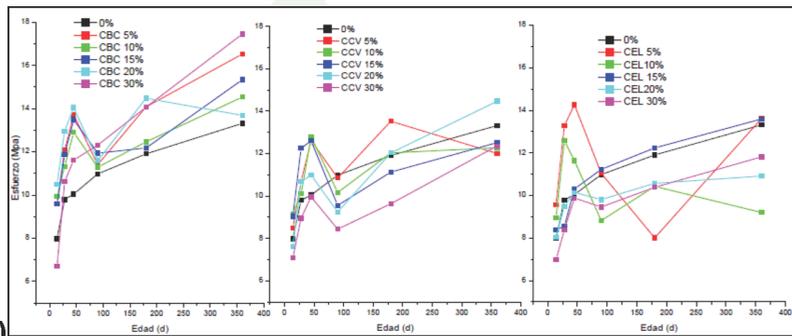
Compresión simple

Desde el punto de vista de resistencia a compresión, para incrementar dicha prestación, se recurre, por lo general, a aditivos multipropósito que funcionan como reductores de agua y, simultáneamente, como plastificantes, garantizando con ello una alta resistencia y buena trabajabilidad de las mezclas.

En la figura 2b, se muestran los resultados de la resistencia a compresión de morteros base cemento portland con la incorporación de un aditivo reductor de agua y de una puzolana de origen residual, bagazo de caña de azúcar (CBC).

En esta (figura 2b), se puede comprobar cómo se incrementa considerablemente la resistencia a compresión de los morteros al usar 1.5 % de adición del aditivo reductor de agua, dicho incremento se debe a que la relación agua cemento se redujo de 1.01 en el mortero testigo hasta 0.5 en el mortero con 1.5 % de aditivo reductor de agua. En el caso de la adición de CBC, solo se logra una ligera mejora en la resistencia, pero no se altera la relación a/c con respecto al testigo.

Figura 2. Puzolanas como sustitutos parciales (a) y adición de PC 2500 y una puzolana (b) en morteros



Fuente: Arreola-Sánchez (2013) y Rodríguez-Méndez (2013).

Otra investigación (figura 2a) que incorpora CBC y otras dos cenizas más, pero ahora como sustitutos parciales del cemento portland, revela que es posible incrementar la cantidad de puzolana incorporada a un mortero, sin afectar su resistencia a compresión e incluso mejorándola sustancialmente. En la figura 2a se muestran los resultados de la incorporación de CBC, ceniza de carbón vegetal (CCV) y ceniza de elaboración de ladrillo (CEL); incorporadas en diferentes porcentajes de sustitución. Cabe mencionar que ambas investigaciones (figura 2) se desarrollaron simultáneamente con el mismo tipo y origen de las respectivas puzolanas, árido y cemento, por lo cual los resultados son directamente comparables entre sí.

En la figura 2a se puede comprobar que en el caso de la CBC es posible incorporar hasta un 30 % en sustitución del cemento portland y lograr mejoras significativas en la resistencia a compresión. En el caso de CEL, el 15 % de sustitución se comporta en forma paralela al testigo, y ligeramente superior; y para la CCV, las incorporaciones del 5 % y 20 % muestran comportamientos cercanos o similares al testigo.

Si comparamos la figura 2, es posible comprobar que en el caso de la CBC se alcanza una resistencia similar para el 7 % de adición y el 10 % de sustitución, aproximadamente 15 MPa, pero se requiere el doble de edad al usar la ceniza como un sustituto parcial del cemento que como un aditivo o cementante adicional. Lo anterior es atribuible a que la reacción puzolánica tarda alrededor de 90 días en aportar resistencia mecánica, y si además

se quita cemento Portland, le toma aún más tiempo restituir la resistencia mecánica de la porción de cemento sustituida.

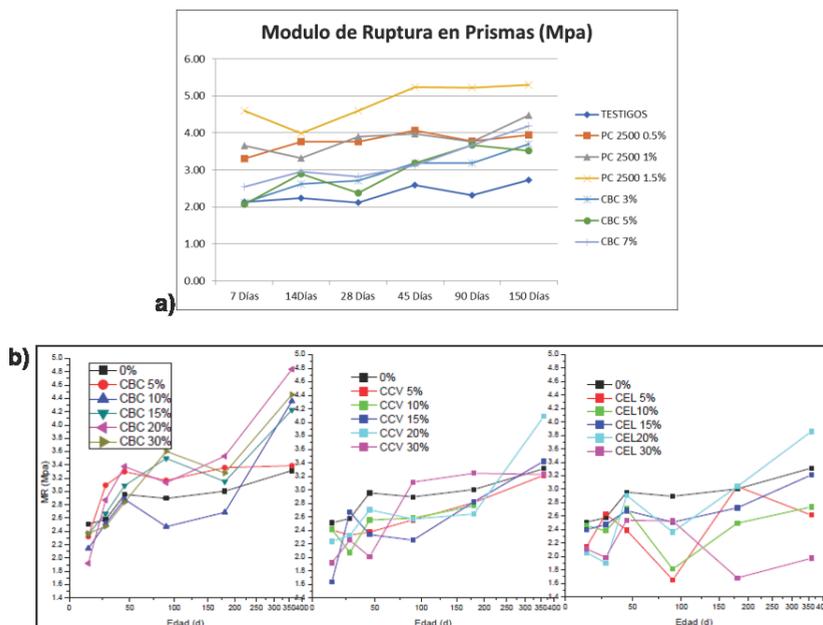
Flexión estática

La resistencia a la flexión, o módulo de ruptura (MR), de morteros y concretos base cemento Portland está directamente relacionado con su resistencia a compresión. De hecho, se estima como un porcentaje de la resistencia a compresión que, de acuerdo con la literatura, oscila entre de 0.7 a 0.8 veces la raíz cuadrada de la resistencia a compresión en megapascales (Kosmatka, Steven H., 2004), lógicamente al usar aditivos para incrementar la resistencia a compresión también se incrementará el módulo de ruptura de los morteros y/o concretos en cuestión.

204

En la figura 3a, se muestran los resultados de la adición de un reductor de agua comercial (PC 2500) y una puzolana (CBC). Dichos resultados muestran que la adición de 1.5 % de PC 2500 presenta el mayor MR, pero en este caso la diferencia entre el 1.5 % de PC 2500 y el 7 % de CBC no es tan distante a la de la prueba de resistencia a compresión, principalmente a la edad de 150 días.

Figura 3. MR en morteros con adición de puzolana y PC 2500 (a) y sustituciones parciales de cemento portland por puzolanas (b)



Fuente: Arreola-Sánchez (2013) y Rodríguez-Méndez (2013).

De forma complementaria, en la figura 3b se muestran los resultados de flexión en las mezclas que incorporan puzolanas como sustitución parcial del cemento portland. En este caso la CBC con un 20% de sustitución logra un MR de 4.8 MPa, resultado bastante cercano a los 5.3 MPa del aditivo reductor de agua al 1.5 %; pero que al igual que la prueba de compresión, le tomó a dicha mezcla con sustitución hasta los 360 días de edad desarrollar dicha resistencia.



Respecto a las dos cenizas restantes, en la figura 3b se muestra un comportamiento consecuente con la prueba de resistencia a compresión. Solo que, para la prueba de flexión, su comportamiento es inferior al testigo en casi todas las edades y porcentajes de sustitución, siendo solo CEL20 % la mezcla que logra superar al testigo en las edades tardías de 180 y 360 días. Para la CCV, todos los porcentajes de sustitución logran igualar o superar al testigo solo en la edad de 360 días. Dicho comportamiento, de las cenizas incorporadas en los morteros, ante la prueba de flexión puede ser atribuido a sus respectivas formas de partícula, ya que, en el caso de la CBC, tiene forma alargada y fibrosa favoreciendo el MR mientras que la CEL y CCV muestran formas angulosas (Arreola-Sánchez, 2013).

206

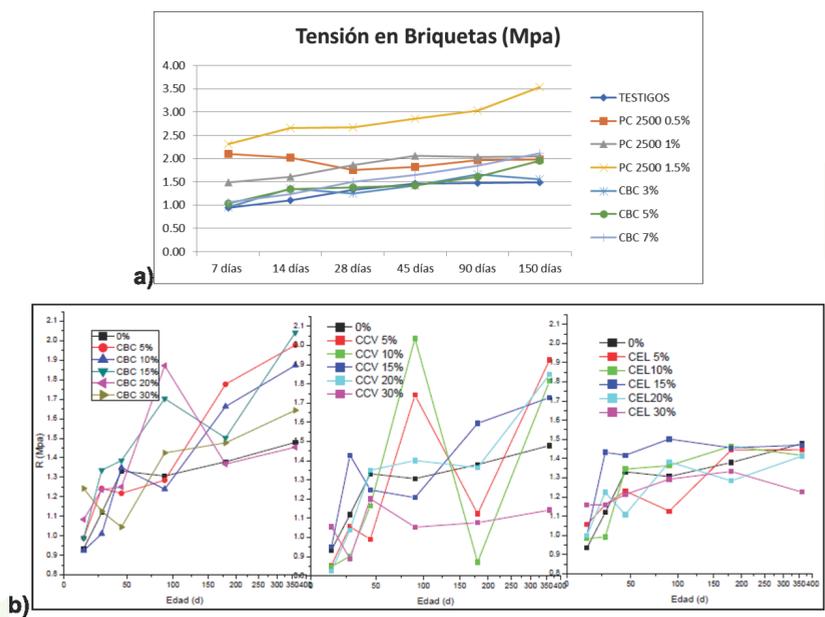
Tensión directa

Al igual de la flexión, la resistencia a la tensión directa también está relacionada con la resistencia a compresión y generalmente se estima como un porcentaje de la misma; dicho porcentaje oscila entre el 8 % y el 12 % (Kosmatka, Steven H., 2004).

En la figura 4a, se observan los resultados de la adición del aditivo reductor de agua comercial y la puzolana CBC. Nuevamente, la mezcla con el mayor valor de resistencia a la tensión,

es la mezcla que adiciona el 1.5 % de PC 2500 debido a la reducción de la relación agua-cemento. Destaca el 7 % de adición de CBC que logra superar tanto al testigo como a las adiciones de 0.5 y 1 % del aditivo químico, pese a la reducción de la relación agua-cemento de 0.7 y 0.6, respectivamente.

Figura 4. Tensión directa en morteros con adición de CBC y PC 2500 (a) y sustituciones parciales de puzolanas (b)



Fuente: Arreola-Sánchez (2013) y Rodríguez-Méndez (2013).

Para el caso de la incorporación de puzolanas como sustitutos parciales del cemento Portland, se presentan los resultados de la prueba de tensión directa en la figura 4b. En dicha figura, se comprueba nuevamente que se puede sustituir hasta el 30 % de cemento por ceniza CBC sin tener disminución en su resistencia a la tensión, es necesario poner énfasis, nuevamente, en el hecho de que se requiere el doble de edad (en el caso de las sustituciones parciales de CBC) para lograr el mismo valor de tensión del 7 % de CBC a los 150 días.

Para el caso de la CCV se observa (figura 4b) que las sustituciones de 15 y 20 % muestran tendencias muy similares al testigo, logrando superarlo claramente a partir de los 180 días de edad. De igual manera las mezclas con sustituciones parciales de CEL10 % y CE15 % muestran tendencias similares al testigo, superándolo a partir de los 50 días de edad.

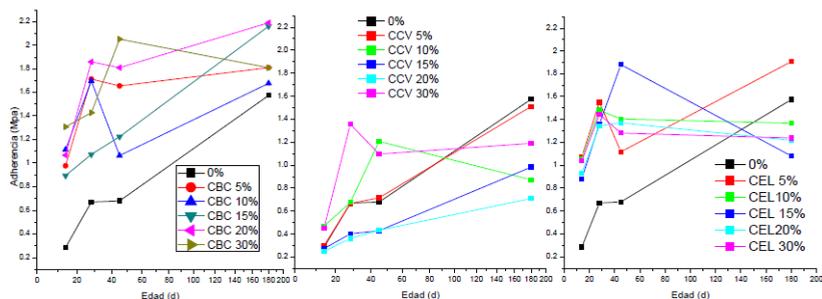
208

Adherencia

Para el caso de la resistencia a la tensión por adherencia solo se tienen resultados de las mezclas con sustituciones parciales de puzolanas de origen residual. En la figura 5, es posible comprobar que la CBC siga superando ampliamente a la mezcla testigo en todos los porcentajes de sustitución y en todas las edades de prueba, siendo la sustitución del 20 % de CBC la

mezcla que presente los mayores valores de adherencia. El 5 % de sustitución de CCV la mezcla que muestra un comportamiento prácticamente igual al testigo en todas las edades y en el caso la CEL, la mezcla con el 5 % de sustitución presenta un comportamiento paralelo al testigo, pero con valores mayores al mismo en todas las edades de prueba.

Figura 5. Adherencia en morteros con sustituciones parciales de puzolanas



Fuente: Arreola-Sánchez (2013).

Comportamiento físico de morteros con adiciones de origen residual

Dentro del comportamiento físico, se presentan resultados de dos pruebas no destructivas, velocidad de pulso ultrasónico (VPU) y resistividad eléctrica (RE). Estas pruebas nos permiten conocer la homogeneidad (en el caso de VPU) de los morteros

o materiales de estudio, con lo cual se puede estimar de forma indirecta la calidad de la elaboración de los especímenes de estudio, la adecuada distribución de los aditivos incorporados, la densidad y la durabilidad de los materiales.

En el caso de la RE, nos permite estimar de forma indirecta la porosidad efectiva presente en los materiales de estudio y con ello también se puede estimar la durabilidad de los materiales en cuestión. Existen gran variedad de trabajos de investigación de estas pruebas indirectas, principalmente de la resistividad eléctrica, ya que son pruebas no destructivas (no dañan las muestras o elementos de análisis), se pueden ejecutar tanto en campo como en laboratorio y son útiles tanto para el diseño de mezclas como para la supervisión de estructuras de concreto simple y reforzado, así como morteros de restauración y diversos materiales cerámicos.

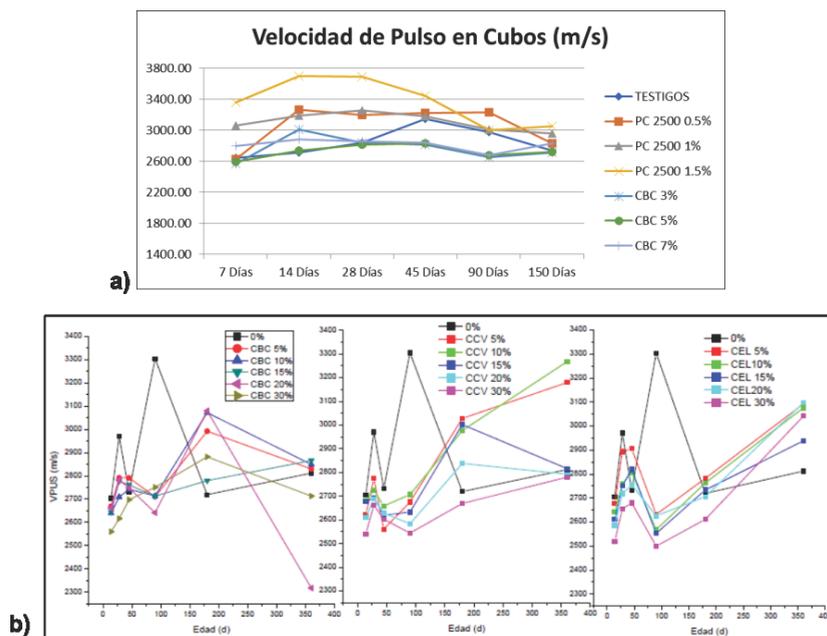
210

Velocidad de pulso ultrasónico

En la figura 6a, se observa el comportamiento de la adición tanto del reductor de agua comercial (PC 2500) como de la puzolana (CBC), aunque en las edades tempranas se observan valores superiores al testigo en las mezclas con PC 2500, en las edades tardías se muestran pendientes negativas en dichas mezclas lle-

gando a valores muy cercanos al testigo. Mientras que las mezclas con adición de CBC muestran valores inferiores al testigo y mayor variabilidad de los datos, logrando igualar y superar dicho testigo en la edad de 150 días.

Figura 6. VPU en morteros con adición de PC 2500 y CBC (a) y en morteros con sustituciones parciales de puzolanas (b)



Fuente: Arreola-Sánchez (2013) y Rodríguez-Méndez (2013).

En la figura 6b, se muestran los resultados de los morteros con sustituciones parciales de cemento portland por puzolana. En este caso, al igual que en la incorporación de CBC como

adición (CBC), se observa variabilidad en los resultados, dicha variabilidad puede ser atribuible a una distribución irregular de la puzolana en la matriz del mortero, o a defectos de fabricación en el caso del mortero testigo, lo que afecta la homogeneidad de la misma. En el caso de la CBC, se puede observar que la sustitución del 10 % no presenta variabilidad y su desempeño es igual o superior al testigo, sobre todo en las edades tardías.

Es importante notar que también en esta prueba las sustituciones de CBC requieren el doble de tiempo de las adiciones para lograr resultados similares. En el caso de la ceniza de CCV (figura 6b), se observa menor variabilidad y tendencias marcadamente al alza, sobre todo en edades mayores a los 90 días, destacando las sustituciones de 5 y 10 % de CCV. Las mezclas con sustituciones de CEL muestran tendencias uniformes y paralelas entre sí, aunque con pendientes negativas entre las edades de 50 y 90 días. En esta ceniza todos los porcentajes de sustitución superan al testigo en la edad de 360 días.

Los límites de calificación de concretos y morteros base cemento portland según su valor de VPU, son los siguientes (Feliú y Andrade, 1992):

- Concreto durable: $VPU > 4000$ m/s.
- Concreto de alta calidad: VPU de 3001 a 4000 m/s.
- Concreto de calidad normal: VPU de 2001 a 3000 m/s.
- Concreto de calidad deficiente: $VPU < 2000$ m/s.

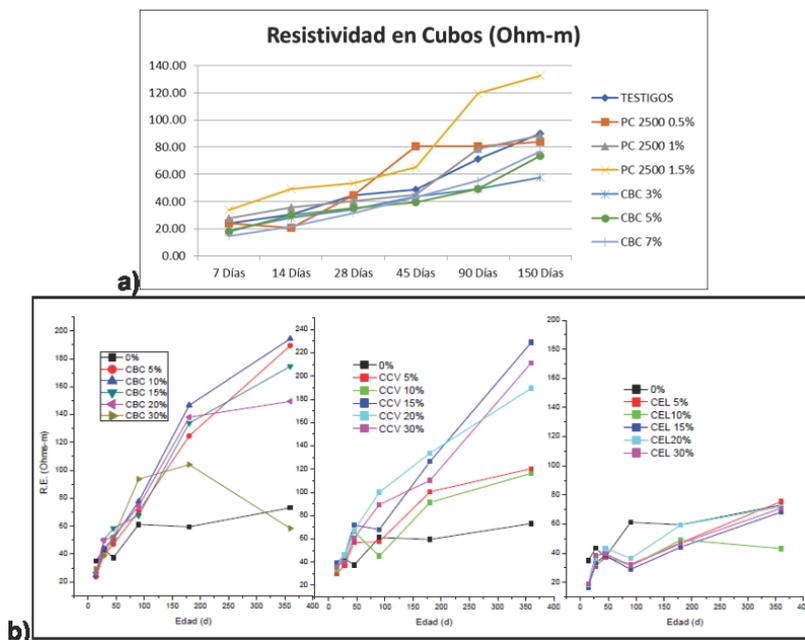
Según los resultados mostrados en la figura 6, ninguna de las mezclas de análisis superó los 4000 m/s y, por tanto, no entran en la clasificación de “durables”, todos los morteros analizados se clasifican entre calidad normal a alta, destacando la mezcla con sustitución parcial de 10 % de CCV con los valores más altos a la edad de 360 días.

Resistividad eléctrica

Como ya se mencionó al inicio del presente capítulo, la RE nos indica de forma indirecta la porosidad efectiva del material en cuestión y por ende la facilidad para que transiten a través de dicho material los agentes degradantes tanto química como, electroquímicamente.

En la figura 7a, se muestra los valores de RE obtenidos por los morteros con adiciones de CBC y PC 2500. En esta prueba solo la mezcla con adición de 1.5 % logra superar al testigo en todas las edades, para el caso de la CBC ninguno de los porcentajes de adición logra igualar ni superar la mezcla testigo. Lo anterior implica una alta porosidad y una baja durabilidad de dichos morteros.

Figura 7. RE en morteros con adición de PC 2500 y CBC (a) y con sustituciones parciales de puzolanas (b)



Fuente: Arreola-Sánchez (2013) y Rodríguez-Méndez (2013).

En el caso de los morteros con sustitución de cemento por puzolanas se observan mejores resultados (figura 7b), ya que en el caso de la CBC todos los porcentajes de sustitución muestran comportamientos muy por encima del testigo, excepto CBC 30 % en la edad de 360 días. El mismo comportamiento se observa en todos los porcentajes de sustitución de CCV, siendo la sustitución de CCV 15 % la que logra los valores más altos en edades tardías. En el caso de la ceniza CEL ningún

porcentaje de sustitución logra superar al testigo en su desempeño, solo CEL 5 % logra igualarlo a la edad de 360 días.

Si comparamos los valores de RE mostrados en la figura 7 con los límites de clasificación de la RE, podemos comprobar que los morteros analizados están en el rango de concreto o mortero con porosidad efectiva considerable y posibles velocidades de corrosión de moderadas a altas. Lo anterior es atribuible a la relación agua-cemento de 1.01 que es mucho mayor que el 0.4 recomendado por la literatura para garantizar una adecuada durabilidad de morteros y concretos base cemento Portland (Neville, 2010). Es importante resaltar que la mezcla con adición de 1.5 % de PC 2500 queda en la misma clasificación de durabilidad, siendo que en las pruebas mecánicas mostro un desempeño evidentemente mayor a cualquiera de las mezclas analizadas restantes, con lo que se comprueba que el hecho de garantizar un elevado desempeño mecánico no garantiza una adecuada durabilidad.

La calidad de concretos y morteros base cemento Portland, según su RE se clasifican de la siguiente manera (NMX-C-514-ONNCCE, 2019, p. 10):

Para valores de RE de entre 1000 y 2000 Ω -m o mayores: El concreto es muy denso, por lo que su porosidad interconectada es extremadamente baja al igual que el transporte de agentes agresivos hacia el acero de refuerzo. La velocidad de corrosión del acero es muy baja.

Para valores de RE de entre 500 y 1000 Ω -m: El concreto tiene una porosidad interconectada baja, dificultando el transporte de agentes agresivos hacia el acero de refuerzo. La velocidad de corrosión es baja.

Para valores de RE de entre 100 y 500 Ω -m: El concreto tiene una porosidad interconectada de consideración, permitiendo el transporte rápido de agentes agresivos hacia el acero de refuerzo. Las velocidades de corrosión son moderadas o altas.

Para valores de RE de entre <200 Ω -m: El concreto tiene una porosidad interconectada excesiva, permitiendo que el transporte de agentes agresivos sea extremadamente rápido hacia el acero de refuerzo. Las velocidades de corrosión son muy altas.

216

Comportamiento químico de morteros con adiciones de origen residual

Para analizar la estabilidad química de los morteros que incorporan puzolanas de origen residual se presentan los resultados de la prueba de ataque por sulfato de sodio anhidro y la prueba de carbonatación acelerada. Dichas pruebas nos permiten conocer el comportamiento de las matrices cementicias de los morteros analizados ante el ataque químico (ataque por sulfatos) y

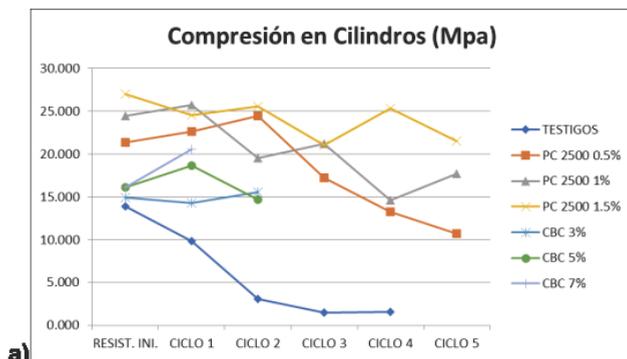
su facilidad de reacción con el dióxido de carbono presente en la atmosfera (carbonatación acelerada); para con ello, estimar sus respectivos impactos en las propiedades físico-mecánicas de dichos morteros.

Ataque por sulfato de sodio anhidro

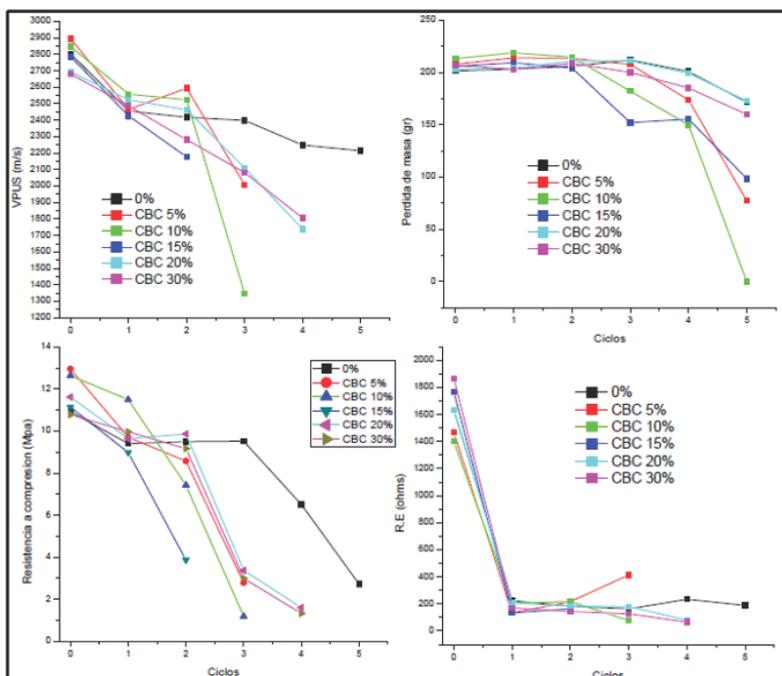
Para el caso de la prueba de ataque por sulfatos, solo se presentan los resultados de la adición y sustitución parcial de la ceniza CBC debido a las múltiples pruebas realizadas para determinar el comportamiento de las mezclas bajo ataque.

En la figura 8a se muestra la pérdida de resistencia mecánica ocasionada por el ataque de sulfato de sodio anhidro. Al igual que en todas las pruebas físico-mecánicas, la adición de PC 2500 al 1.5 % es la que muestra la menor pérdida de resistencia, debido a que esta mezcla tiene una relación agua-cemento de 0.5 lo que le confiere *per se* mayor estabilidad química. En el caso de las adiciones de CBC, ninguna de ellas logra llegar al quinto ciclo de ataque debido a que los especímenes se redondean (figura 9b) y no es posible seguir determinando su resistencia a compresión por las técnicas tradicionales.

Figura 8. Pérdida de resistencia por ataque de sulfato en morteros con PC 2500 y CBC (a) y morteros con sustitución parcial de CBC (b)



a)



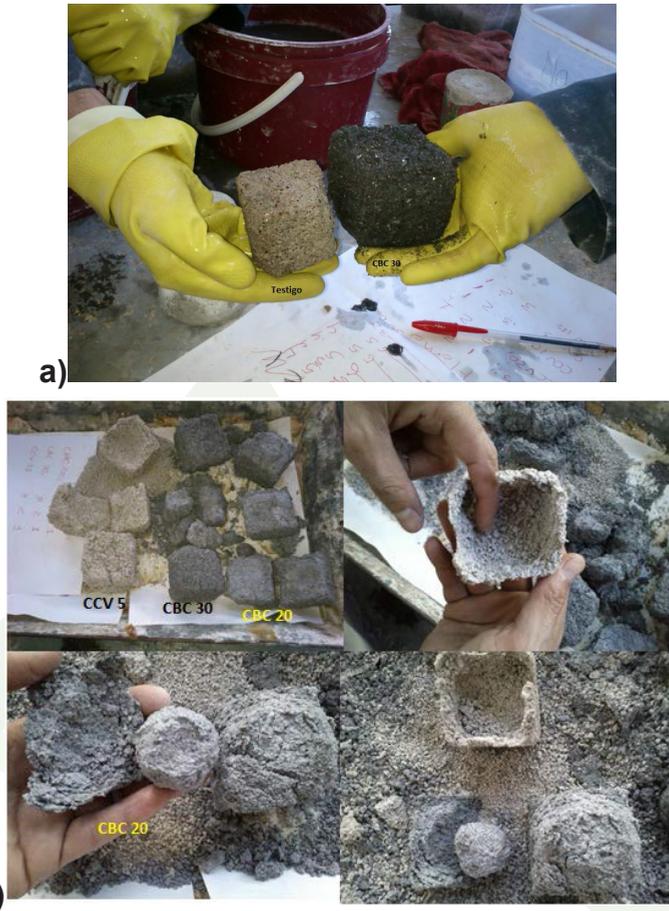
b)

Fuente: Arreola-Sánchez (2013) y Rodríguez-Méndez (2013).

En la figura 8b, se muestra el comportamiento de las sustituciones parciales de CBC. Como se puede observar, los porcentajes que mostraron mayor resistencia al ataque por sulfatos fueron el 20 y 30 %, estos porcentajes lograron llegar hasta el 4.º ciclo en la resistencia mecánica, además de mostrar un comportamiento más estable en la VPU y la pérdida de masa es igual a la del testigo para el 20 % y ligeramente inferior para el 30 %; lo que nos deja como porcentaje óptimo el CBC 20 %. Cabe mencionar que, aunque el 20 y 30 % de sustitución, fueron los porcentajes que desarrolló las mejores características tanto en comportamiento mecánico como la prueba de durabilidad.

También presentaron fuertes cambios de volumen durante los ataques por sulfato de sodio (figura 9a), aspecto que tendría que ser analizado en investigaciones futuras. Una peculiaridad de las cenizas de origen residual (CBC, CCV y CEL) durante el ataque por sulfato de sodio, fue la forma que presentó la pérdida de masa, ya que, para el caso de la CCV, aparentemente, el efecto de degradación fue más fuerte en la parte interna de los especímenes, mientras que en la superficie externa mostro una mayor estabilidad (figura 9b). Caso contrario ocurrió con las CBC, ya que esta ceniza fue afectada inicialmente desde la parte superficial y la pérdida de masa fue gradual hasta quedar el espécimen en forma esférica (figura 9b).

Figura 9. Cambios volumétricos de morteros con sustituciones de CBC (a) y pérdida de masa en sustituciones parciales de cenizas de origen residual (b), bajo ataque por sulfatos



Fuente. Arreola-Sánchez (2013).

Carbonatación acelerada

La reacción de carbonatación es una reacción química entre el CO_2 presente en la atmósfera y el hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) presente en los morteros y concretos elaborados con cemento Portland como subproducto de la reacción de hidratación del cemento. Se le llama reacción de carbonatación por que el producto resultante es un carbonato de calcio (CaCO_3), el cual queda embebido en la matriz cementicia, reduciendo el pH de la misma e incrementando su resistencia mecánica en la zona carbonatada.

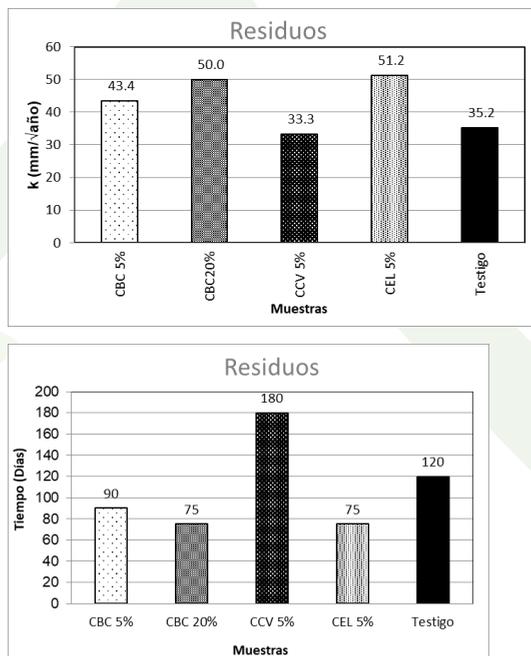
La figura 10 muestra el tiempo necesario para que las muestras de mortero se carbonataran hasta una profundidad de 25 mm, que es la profundidad de recubrimiento típica del acero de refuerzo en estructuras de concreto, al llegar la carbonatación a la superficie de la varilla y reducir el pH del medio detona la reacción de corrosión que es la principal patología de las estructuras de concreto reforzado desde el punto de vista de la durabilidad.

Los resultados de la figura 10 muestran que las sustituciones de CBC y CEL se carbonatan más rápidamente que el testigo, mientras que las sustituciones de CCV se hacen con más lentitud, requiriendo 60 días más que el testigo para llegar a la misma profundidad de carbonatación. La figura 10 muestra los valores del coeficiente de carbonatación “k”, en los cuales se ratifica lo mostrado en la figura 10 ya que las muestras con menor tiempo de carbonatación (CBC y CEL) son las que presentan los mayores valores de “k”.

En el caso de la CCV, presenta los menores valores de “k”, ligeramente menor que el testigo, pero con una diferencia no tan marcada como en la figura 10.

Si comparamos los resultados de carbonatación (figura 10) con la prueba de resistividad eléctrica (figura 7), podemos constatar que los resultados son consistentes ya que la ceniza con mayor RE fue CCV y es también la ceniza con menor coeficiente de carbonatación y con el mayor tiempo para llegar a los 2.5 cm de análisis.

Figura 10. Constante k de carbonatación para CBC; y tiempo crítico para alcanzar los 25 mm de frontera de carbonatación



Fuente: Martínez-Molina, et al. (2021)

Conclusiones

Los morteros y concretos base cemento Portland son unos de los materiales de construcción más utilizados en México y en el mundo. Se emplean en todo tipo de construcción civil, desde obras de infraestructura hasta edificación habitacional, tanto en serie como de autoconstrucción. El uso de compósitos a base cemento Portland es tan extendido en la edificación que, actualmente, existe gran cantidad de personas especializados en ello, a nivel de oficios (albañiles), teniendo especial diversificación, o a nivel de especialización en el área de acabados. Existen personas dedicadas a la albañilería a lo largo y ancho del territorio nacional, desde las grandes urbes hasta las comunidades más pequeñas y marginadas. Dichas personas se dedican a este noble oficio por ser bien remunerado y con poca preparación técnica inicial, de hecho, en muchas ocasiones es un oficio heredado por generaciones y facilita el autoempleo de familias enteras, permitiéndoles ingresos suficientes para una vida digna de todos sus integrantes.

Como se comentó, dentro de las actividades de edificación de vivienda, tanto de autoconstrucción como en serie, una de las áreas de mayor diversificación es el área de acabados. Los acabados otorgan parte del sentido estético de la vivienda y desde el punto de vista constructivo, brindan protección a los elementos estructurales de la degradación ambiental y antropogénica, permitiendo a la vivienda tener la vida útil para la que fue planeada y cumplir con los requisitos de funcionalidad o habitabilidad.



El presente trabajo muestra que existen materiales que actualmente son considerados, dentro de la cadena global de producción, como residuos; pero que tienen características útiles dentro de la industria de la construcción. En el caso concreto de las puzolanas aquí analizadas, se demostró que pueden aportar capacidad resistente desde el punto de vista mecánico o que pueden ser incorporadas en ciertos porcentajes (CCV de un 5 a 10 %, CBC hasta un 20 % y CEL en un 10 %), incluso los porcentajes de sustitución del 15 % de CEL y CCV muestran mejoras en la resistencia a tensión y los porcentajes de 5 % de CCV y CEL mejoraron la fuerza de adherencia, lo que aportaría mayor estabilidad de morteros de aplanados en viviendas.

Desde el punto de vista medioambiental, la incorporación de las puzolanas de origen residual como materiales de construcción impactaría de forma directa en la disminución de la contaminación del suelo por disposición final de dichos residuos. Adicionalmente, si analizamos los resultados de carbonatación podemos notar que las cenizas de CEL y CBC se carbonatan rápidamente lo que impactaría, a largo plazo, en la fijación de CO_2 del ambiente, sobre todo en zonas industriales y urbanas. Otro aspecto importante del presente trabajo, es que demuestra que su implementación a nivel de morteros de recubrimiento no implica ningún cambio tecnológico en la industria de la construcción; requiere un cambio de perspectivas dentro de los actores de dicha industria e implica posibles mejoras de tipo social, ambiental y económico. Aportando conocimiento técnico-científico que permitirá a la industria de la construcción adoptar de forma paulatina los principios de la economía circular.

Referencias

- Agathokleous, R., Barone, G., Buonomano, A., Forzano, C., Kalogirou, S. A. y Palombo, A. (2019). Building façade integrated solar thermal collectors for air heating: experimentation, modelling and applications. *Applied Energy*, 239, 658–679. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.020>
- Aguilar-Hernández, G. A., Días Rodríguez, J. F. y Tukker, A. (2021). Macroeconomic, social and environmental impacts of a circular economy up to 2050: A meta-analysis of prospective studies. *Journal of Cleaner Production*, 278. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123421>
- Arreola-Sanchez, M. (2013). *Actividad puzolánica de materiales (sustitutos parciales del cemento), para mejorar la durabilidad de morteros para reparación y/o construcción de estructuras de concreto*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Berry, B., Haverkamp, J., Isenhour, C., Bilec, M. M. y Lowden, S. S. (2022). Is Convergence Around the Circular Economy Necessary? Exploring the Productivity of Divergence in US Circular Economy Discourse and Practice. *Circular Economy and Sustainability*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s43615-022-00199-1>
- Bianchi, M. y Cordella, M. (2023). Does circular economy mitigate the extraction of natural resources? Empirical evidence based on analysis of 28 European economies over the past decade. *Ecological Economics*, 203, 107607. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2022.107607>

- Boonman, H., Verstraten, P. y van der Weijde, A. H. (2023). Macro-economic and environmental impacts of circular economy innovation policy. *Sustainable Production and Consumption*, 35, 216-228. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.10.025>
- Cantzler, J., Creutzig, F., Ayargarnchanakul, E., Javaid, A., Wong, L. y Haas, W. (2020). Saving resources and the climate? A systematic review of the circular economy and its mitigation potential. *Environmental Research Letters*, 15(12). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abbeb7>
- Copeland, S. y Bilec, M. (2020). Buildings as material banks using RFID and building information modeling in a circular economy. *Procedia CIRP*, 90, 143-147. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.122>
- Cottafava, D. y Ritzen, M. (2021). Circularity indicator for residential buildings: Addressing the gap between embodied impacts and design aspects. *Resources, Conservation and Recycling*, 164, 105120. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105120>
- Doyal, L. y Gough, I. (1984). A theory of human needs. *Critical Social Policy*, 4(10), 6-38. <https://doi.org/10.1177/026101838400401002>
- Earle, T. K. (1997). *How chiefs come to power: the political economy in prehistory*. Stanford University Press.
- Feliú, S. y Andrade, C. (1992). *Manual de inspección de obras dañadas por corrosión de armaduras* (2.ª ed.). PINI.
- Finley, M. I. (1973). *The ancient economy*. University of California Press.
- Ghisellini, P., Ripa, M. y Ulgiati, S. (2018). Exploring environmental and economic costs and benefits of a circular economy approach to the construction and demolition sector. A literature re-

- view. *Journal of Cleaner Production*, 178, 618–643. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.207>
- Haas, W., Krausmann, F., Wiedenhofer, D., Lauk, C. y Mayer, A. (2020). Spaceship earth's odyssey to a circular economy - a century long perspective. *Resources, Conservation and Recycling*, 163, 105076. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105076>
- IEA, I. E. A. (2017). *Towards a zero-emission, efficient, and resilient buildings and construction sector: global status report 2017*. International Energy Agency Paris.
- Kosmatka, Steven H., et al. (2004). *Diseño y Control de Mezclas de Concreto* [Boletín]. PCA Serial núm. 2797.
- Lachheb, M., Younsi, Z., Naji, H., Karkri, M. y Ben Nasrallah, S. (2017). Thermal behavior of a hybrid PCM/plaster: A numerical and experimental investigation. *Applied Thermal Engineering*, 111, 49–59. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.09.083>
- Laurance, W. F., Peletier-Jellema, A., Geenen, B., Koster, H., Verweij, P., Van Dijck, P., Lovejoy, T. E., Schleicher, J. y Van Kuijk, M. (2015). Reducing the global environmental impacts of rapid infrastructure expansion. *Current Biology*, 25(7), R259–R262. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2015.02.050>
- Lounsbury, M. (2005). Institutional variation in the evolution of social movements: competing logics and the spread of recycling advocacy groups. *Social Movements and Organization Theory* (pp. 73–95). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511791000.006>
- Martínez-Molina, W., Chávez-García, H. L., Pérez-López, T., Alonso-Guzmán, E. M., Arreola-Sánchez, M., Navarrete-Serás, M. A., Borrego-Pérez, J. A., Sánchez-Calvillo, A., Guzmán-Torres,

J. A. y Pérez-Quiroz, J. T. (2021). Effect of the addition of agribusiness and industrial wastes as a partial substitution of Portland cement for the carbonation of mortars. *Materials*, 14(23). <https://doi.org/10.3390/ma14237276>

Max-Neef, M. A. (1991). *Human scale development: conception, application and further reflections*. The Apex Press.

Megarry, T. (1995). *Society in prehistory: The origins of human culture*. New York University Press.

Morseletto, P. (2020). A new framework for policy evaluation: Targets, marine litter, Italy and the Marine Strategy Framework Directive. *Marine Policy*, 117, 103956. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2020.103956>

Morseletto, P. (2023). Sometimes linear, sometimes circular: States of the economy and transitions to the future. *Journal of Cleaner Production*, 390, 136138. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136138>

Müller, D. B., Liu, G., Løvik, A. N., Modaresi, R., Pauliuk, S., Steinhoff, F. S. y Brattebø, H. (2013). Carbon Emissions of Infrastructure Development. *Environmental Science & Technology*, 47(20), 11739–11746. <https://doi.org/10.1021/es402618m>

Németh, B., Ujhidy, A., Tóth, J., Ferencz, M., Kurdi, R., Gyenis, J. y Feczko, T. (2023). Power consumption of model houses with and without PCM plaster lining using different heating methods. *Energy and Buildings*, 284. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112845>

Neville, A. M. (2010). *Concrete Technology*. Pearson.

Philipp, G. A. R. S. C. C. R. (2016). *Council of the European Union, 2018. Directive (eu) 2018/851 of the European Parliament and*

of the Council of 30 May 2018 amending directive 2008/98/ec on waste. Off. J. Eur. Union, 109–140.

- Pomponi, F. y Moncaster, A. (2017). Circular economy for the built environment: A research framework. *Journal of Cleaner Production*, 143, 710–718. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.055>
- PRONACES-321260, CONAC. (2022). *Desarrollo de un modelo de producción social replicable de vivienda y hábitat*.
- Rao, N. D. y Min, J. (2018). Decent Living Standards: Material Prerequisites for Human Wellbeing. *Social Indicators Research*, 138(1), 225–244. <https://doi.org/10.1007/s11205-017-1650-0>
- Reike, D., Vermeulen, W. J. V. y Witjes, S. (2022). *Conceptualization of Circular Economy 3.0: Synthesizing the 10R Hierarchy of Value Retention Options* (pp. 47–69). https://doi.org/10.1007/978-3-030-94293-9_3
- Rodríguez-Méndez, Y. (2013). *Análisis Físico-Mecánico de Morteros de Cemento Portland con Adiciones de Bagazo de Caña y Aditivo Reductor de Agua de Alto rango*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Sehnm, S., Vázquez-Brust, D., Pereira, S. C. F. y Campos, L. M. S. (2019). Circular economy: benefits, impacts and overlapping. *Supply Chain Management*, 24(6), 784–804. <https://doi.org/10.1108/SCM-06-2018-0213>
- Smil, V. (2013). *Making the modern world: materials and dematerialization*. Wiley.
- Sun, R., Liu, J., Lai, D. y Liu, W. (2023). Building form and outdoor thermal comfort: Inverse design the microclimate of outdoor space for a kindergarten. *Energy and Buildings*, 284, 112824. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112824>

Zu Ermgassen, S. O. S. E., Drewniok, M. P., Bull, J. W., Corlet Walker, C. M., Mancini, M., Ryan-Collins, J. y Cabrera Serrenho, A. (2022). A home for all within planetary boundaries: Pathways for meeting England's housing needs without transgressing national climate and biodiversity goals. *Ecological Economics*, 201. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2022.107562>



230

ESTUDIO EFICIENCIA TÉRMICA, ACÚSTICA Y LUMÍNICA DE SISTEMAS DE VENTANA EN LA VIVIENDA PERIURBANA DEL VALLE DE MÉXICO

Aníbal Figueroa Castrejón¹
Víctor Armando Fuentes Freixanet²
Gloria María Castorena Espinosa³
Gerardo Aranda Barajas⁴
Brenda Yazmin Juárez Guerrero⁵

Resumen

El objetivo de este capítulo es analizar el papel que tienen los sistemas de ventana en la vivienda periurbana de la zona metropolitana de la Ciudad de México, revisando sus características

¹ Profesor investigador de la Universidad Autónoma Metropolitana-unidad Azcapotzalco, fca@azc.uam.mx

² Profesor investigador de la Universidad Autónoma Metropolitana-unidad Azcapotzalco, ffva@azc.uam.mx

³ Profesora investigadora de la Universidad Autónoma Metropolitana-unidad Azcapotzalco, gmce@azc.uam.mx

⁴ Profesor investigador de la Universidad Autónoma Metropolitana-unidad Azcapotzalco, aranda@azc.uam.mx

⁵ Profesora investigadora de la Universidad Autónoma Metropolitana-unidad Azcapotzalco, byjuarezq@gmail.com

formales, físicas y constructivas. En general, se les ha dado poca importancia a los sistemas de fenestración en el diseño de viviendas progresivas o de bajo costo, sin embargo, es un elemento importante en el comportamiento térmico, lumínico y acústico al interior de los espacios. En la norma mexicana NMX-R-060-SC-FI “ventanas: clasificaciones y especificaciones” no se incluyen a las ventanas construidas con materiales ferrosos tubulares o angulares que son las que mayoritariamente son usadas en la vivienda periurbana y rural.

Introducción

La vivienda periurbana en la zona metropolitana de la CDMX es básicamente progresiva, es decir, se desarrolla inicialmente en un cuarto redondo y posteriormente se le van añadiendo otros espacios. Es una vivienda cuyo crecimiento con frecuencia es primero horizontal en una planta y, posteriormente, vertical en dos o más plantas. La primera etapa constructiva se techa con materiales ligeros disponibles y de bajo costo como lámina de asbesto o metálica, la cual será sustituida por una losa de concreto armado.

El proceso constructivo es de autoconstrucción o con la ayuda de un maestro de obras local.

En su fase inicial las habitaciones cuentan con una o dos ventanas rectangulares con marcos de madera, fierro estructural o tubular. La superficie transparente generalmente es de vidrio de 3 mm, aunque también se emplean láminas de fibra de vidrio, plásticos o policarbonato. Dado que muchas viviendas en sus fases iniciales no tienen revoques, las ventanas presentan infiltraciones en su marco.

El sistema de ventana es un elemento que cumple con muchas funciones: vista, asoleamiento, iluminación natural, control acústico, seguridad, privacidad, ventilación y control de insectos, entre otros. Debido a estos factores también es el punto más débil de una edificación, por lo que tiene que ser diseñada cuidadosamente.

Existen numerosos estudios recientes sobre los vidrios selectivos para uso arquitectónico, pero la vivienda periurbana progresiva no puede acceder a ellos por falta de oferta accesible y costo. En la zona metropolitana de la Ciudad de México en febrero del 2023, el precio del metro cuadrado de ventana con vidrio sencillo de 3 mm era de \$1 260.00 pesos, mientras que el metro cuadrado de una ventana con cristal doble de 3-12-3 mm de baja emisividad es de \$3 990.00 pesos, más de tres veces el costo de una ventana simple.

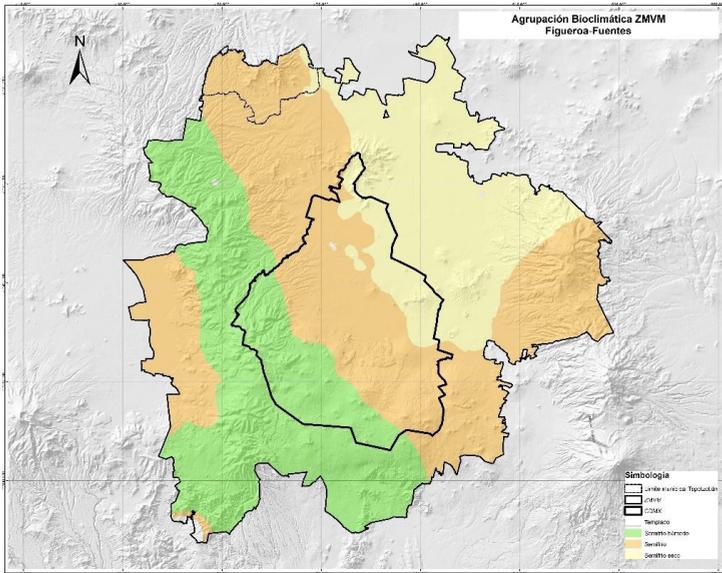
Análisis de climático regional

El caso de estudio se ubica en el municipio de Tepetzotlán, en el estado de México, que se considera conurbado con la zona metropolitana en su borde Norte-Noroeste. La cabecera municipal está ubicada en la latitud $19^{\circ}42'47''$ y longitud de $99^{\circ}13'19''$. Su altitud es de 2 292 msnm. Es un área de transición entre un contexto rural en la zona poniente y un contexto periurbano e industrial en la zona Oriente.

Adicionalmente, en la cabecera municipal y algunos puntos del municipio se encuentran edificios históricos de gran valor, catalogados por el Instituto Nacional de Bellas Artes (INBA) y el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), como el Museo Nacional del Virreinato y el Acueducto de Arcos del Sitio. La población del municipio de Tepetzotlán aumentó 67 % en los últimos veinte años.

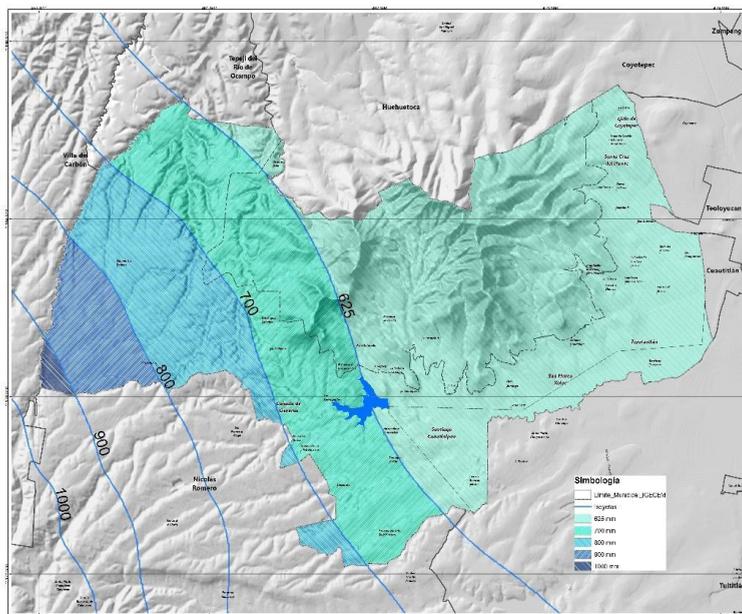
La zona metropolitana del Valle de México presenta varias condiciones climáticas. En el Norte y Poniente el clima es más frío y húmedo, mientras que al Oriente predomina un clima más cálido y seco. También se presenta el fenómeno de islas de calor en diferentes áreas de la zona central.

Figura 1. Mapa de bioclimas en la zona metropolitana del Valle de México



Fuente: Datos interpolados a partir de las estaciones climáticas del SMN en el programa ArcGis.

Figura 2. Mapa Tepetzotlán de isoyetas

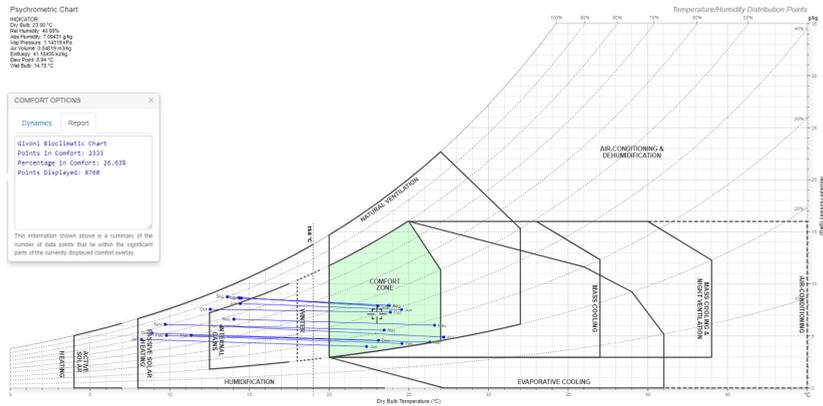


236

Fuente: Datos interpolados a partir de las estaciones climáticas del SMN en el programa ArcGIS.

La precipitación anual total es de 705.4 mm, aun cuando existen variaciones importantes en las isoyetas del territorio municipal con la porción Oriente más seca por debajo de los 625 mm y la porción Poniente más húmeda con hasta 900 mm. El mes con mayor precipitación es julio, con 154.2 mm y el mes más seco es diciembre, con 8.4 mm.

Figura 3. Carta psicrométrica de Tepozotlán



Fuente: Datos de archivo EPW procesados con Meteonorm graficados con el programa Psychrometric Chart de Andrew Marsh.

Al tratarse de un clima semifrío, las estrategias básicas son de calentamiento todo el año sobre todo en las mañanas y el invierno, que incluye ganancias internas y solares pasivas. Para todas ellas, las ventanas juegan un papel importante ya que es el sistema de captación solar directa, y también puede ser el elemento de mayores pérdidas durante la noche o en las mañanas frías. Por ello, es que debido al clima semifrío se evitan o reducen al máximo de tamaño las ventanas con orientación norte.

Proporción vano-macizo

En los casos analizados encontramos que en la tipología del lugar en la fachada al Sur domina la masa sobre los vanos en una proporción de 9:1. Las habitaciones suelen tener ventanas en dos de sus lados. Esto significa que son ventanas pequeñas, que apenas cumplen con el mínimo de un 17.5 % de la superficie de los locales indicado en el *Reglamento de Construcciones*. Las ventanas generalmente tienen una proporción ligeramente rectangular de 1.2:1.0

En los edificios más antiguos, los muros son masivos con adobe o tepetate y en las construcciones contemporáneas de tabicón (12 cm), bloque de concreto (14 cm) o tabique de barro recocido (12 cm). En su etapa inicial el acabado es aparente o con solamente pintura sin aplanados.

238

Materiales de perfiles y marcos

El material dominante de los perfiles y marcos es de ángulo estructural de hierro. Los claros para el vidrio suelen ser pequeños para reforzar la seguridad, lo que produce que el porcentaje del área de perfiles y marcos sea del 13.5 % en promedio. En el caso de ventanas de madera este porcentaje se incrementa hasta el

25 %. Las ventanas con herrería tubular o de ángulo estructural tienen un sellado deficiente del marco con una alta permeabilidad al aire, por lo que se clasifican como Clase 2 con una tasa de infiltración de entre 9 y 27 m³/h/m². Las ventanas de producción industrial de aluminio, PVC o madera ofrecen niveles menores de infiltración. Para mejorar la resistencia a la infiltración del marco se deben realizar juntas de mortero con aditivos hidrófugos.

Tipos de ventana

El tipo de ventana en general es abatible de giro lateral en dos de sus hojas o de proyección; en las ventanas hacia la calle se instalan barras de seguridad. Un porcentaje menor tiene ventanas de carpintería abatibles o aluminio con un fijo y una hoja deslizante.

Tipos de vidrio

Los acristalamientos, generalmente, son de vidrio sencillo. En las vidrierías locales están disponibles vidrios de 3 mm, 4 mm y 6 mm claros, así como Filtrasol en 6 mm. No hay vidrios dobles (duovent), ni vidrios selectivos (Low E) disponibles localmente. Los más comunes son vidrios sencillos de 3 mm y 4 mm por su bajo costo de \$350/m² y \$380/m², respectivamente (costes consultados en febrero de 2023).

Áreas de ventilación

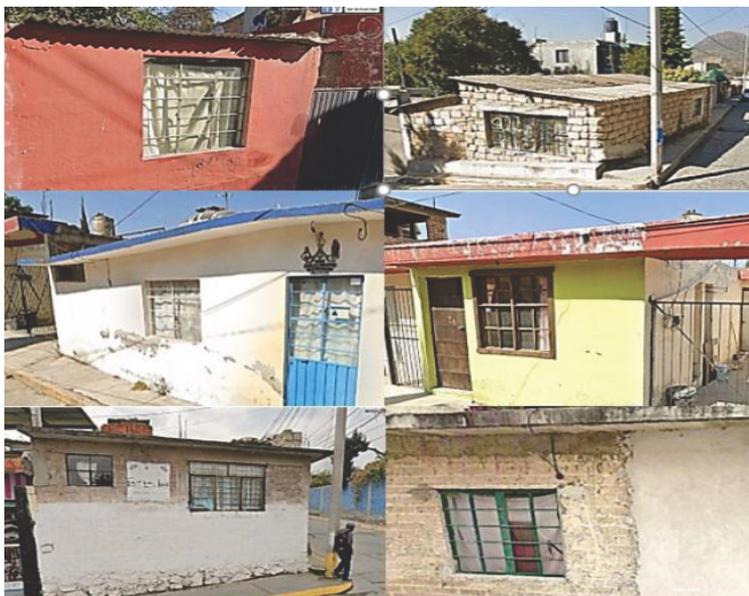
Las áreas de ventilación son variables en cada caso, pero la mayoría tienen una hoja fija y una abatible, por lo que el porcentaje de ventilación promedio de los casos analizados es el 29 % del área de ventana.

Sistemas de aislante móvil (cortinas o postigos)

Las ventanas en general tienen cortinas interiores de tela para control de asoleamiento y privacidad. En algunos casos, estas son solamente plástico sobrepuesto.

En los casos analizados no se encontraron contraventanas o postigos, aun cuando estos dispositivos estaban presentes en todas las construcciones históricas de la zona.

Figura 4. Ventanas con volados de losa



Fuente: Elaboración propia.

Sistemas de protección solar

En la mayoría de los casos la losa de la azotea tiene de volado de 20 a 40 cm con una extensión más allá de los límites de la ventana, formando un alero que protege parcialmente al muro y a la ventana de la lluvia y el asoleamiento. Casi siempre, la ventana se encuentra al centro del muro en el sentido longitudinal

y en el tercio superior en altura, aun cuando se presentan ejemplos en que llega hasta el cerramiento.

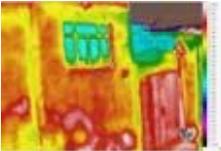
De acuerdo con lo indicado en la NOM-020-ENER-2011, esto produce un factor de corrección de sombreado exterior de 0.90 hacia el Sur, 0.88 al Norte y 0.93 al Este y Oeste.

Orientación

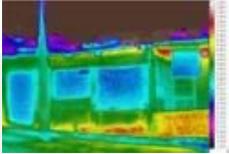
La topografía del municipio ocasiona que las calles se alineen, en general, con las curvas de nivel, teniendo por resultado orientaciones muy diversas. Debido a las condiciones climáticas locales los habitantes buscan orientar sus ventanas preferentemente en el rango Este-Sur-Oeste.

242

Figura 5. Tipologías de ventanas en vivienda rural y periurbana

Dirección	Imagen	Imagen termografías	Datos
<p>Colonia Flores Magón, Municipio Tepetzotlán, C.P.54608, Estado de México</p>			<p>Porcentaje de ventana: 12.00 % Área total de ventana: 1.47m² Área total de fijo: 0.98 m² Área de ventilación: 0.27 m² Área de manguete: 0.22m² Ubicación de mangueta: centro del muro Material de manguete: herrería Material acristalado: vidrio Aislamiento interior: cortina de tela Área de local: 19.90 m² Volumen : 48.75m³ Dispositivo de control exterior: losa sobresale 40 cm Orientación: Sur</p>

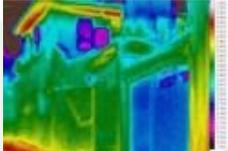
continúa...

Dirección	Imagen	Imagen termografías	Datos
<p>Calle Hidalgo Colonia Paseo de los Virreyes Municipio Tepetzotlán, C.P. 54608, Estado de México</p>			<p>Porcentaje de ventana: 9.78 % Área total de ventana: 1.64 m² Área total de fijo: 1.06 m² Área de ventila: 0.29 m² Área de manguete: 0.29 m² Ubicación de manguete: centro del muro Material de manguete: herrería Material acristalado: vidrio Aislamiento interior: cortina de tela Área de local: 18.75 m² Volumen: 47.44 m³ Dispositivo de control solar exterior: lamina sobresale 25 cm Orientación: Sureste</p>

continúa...

Dirección	Imagen	Imagen termografías	Datos
<p>Calle El Pedregal. Colonia Flores Magón, Municipio Tepetzotlán, C.P 54607. Estado de México</p>			<p>Porcentaje de ventana: 13 % Área total de ventana: 1.43 m² Área total de fijo: 0.90 m² Área de ventilación: 0.35 m² Área de manguete: 0.18 m² Ubicación de manguete: centro del muro Material de manguete: herrería Material acristalado: vidrio Aislamiento interior: cortina de tela Área de local: 23.40 m² Volumen: 50.07 m³ Dispositivo de control solar exterior: lámina sobresale 10 cm Orientación: Sur</p>

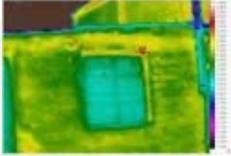
continúa...

Dirección	Imagen	Imagen termografías	Datos
<p>Calle El Pedregal. Colonia Flores Magón. Municipio Tepetzotlán, C.P. 54607. Estado de México</p>			<p>Porcentaje de ventana: 20.6 % Área total de ventana: 2.38 m² Área total de fijo: 1.32 m² Área de ventila: 0.78 m² Área de manguete: 0.28 m² Ubicación de manguete: centro del muro Material de manguete: herrería Material acristalada: vidrio Aislamiento interior: cortina de tela Área de local: 13.20 m² Volumen: 26.40 m³ Dispositivo de control solar exterior: losa sobresale 0.40m Orientación: Sur</p>

continúa...

Dirección	Imagen	Imagen termografías	Datos
<p>Cerrada Rosario Castellanos. Colonia Flores Magón. Municipio Tepetzotlán. C.P 54607. Estado de México</p>			<p>Porcentaje de ventana: 4.37 % Área total de ventana: 0.99 m² Área total de fijo : 0.55 m² Área de ventilación: 0.29 m² Área de manguete: 0.15 m² Ubicación de manguete: centro del muro Material de manguete: aluminio Material acristalada: vidrio Aislamiento interior: cortina de tela Área de local: 19.18 m² Volumen: 60.60 m³ Dispositivo de control solar exterior: lamina sobresale 0.20m Orientación: Sur</p>

continúa...

Dirección	Imagen	Imagen termografías	Datos
<p>Calle 20 de Noviembre. Colonia Flores Magón, Municipio Tepotzotlán. C.P. 54607. Estado de México</p>			<p>Porcentaje de ventana: 10.69 % Área total de ventana: 1.90 m² Área total de fijo: 0.85 m² Área de ventilación: 0.85 m² Área de manguete: 0.20m² Ubicación de manguete: centro del muro Material de manguete: herrería Material acristalada: vidrio Aislamiento interior: cortina de tela Volumen: 14.8 m³ Área de local: 7.40 m² Dispositivo de control solar exterior: sin dispositivo Orientación: Sur</p>

Caso de estudio y modelos de análisis

Se tomó como caso de estudio una de las viviendas analizadas que ha crecido progresivamente. En su proceso de consolidación, las láminas iniciales ya han sido sustituidas por una losa maciza de concreto de 8 cm de espesor. Se han dejado las varillas de los refuerzos verticales para futuras etapas de crecimiento. La fachada principal da hacia la calle con una orientación Sur y tiene espacio para un patio o cochera descubierta hacia el este que permite abrir ventanas en esta orientación.

Actualmente, consiste en una habitación de tabicón de 4.20 m por 4.70 m con una altura de 2.40 m, con dos ventanas, una orientada hacia el Sur, de 1.20 m x 1.00 m, y otra al Este de 1.80 m x 1.00 m, con marco y perfiles de fierro estructural de 1" y vidrio sencillo de 3 mm. Los vanos están ubicados al centro del muro y separados 20 cm de la losa. La losa se proyecta 30 cm hacia afuera formando un pequeño volado corrido en ambas fachadas.

Comportamiento térmico

Térmicamente los sistemas de ventana deben ser evaluados en sus flujos de calor por conducción/convección que dependen del coeficiente de transferencia de calor del sistema (valor U) y por otra parte por su factor de ganancia solar que considera la

transferencia de energía por radiación a través de las porciones transparentes o translúcidas.

Coefficiente de transferencia de calor por conducción

Los acristalamientos son una película muy delgada con un alto coeficiente de transferencia de calor.

Los datos del desempeño de los vidrios proporcionados por los fabricantes incluyen varios parámetros. El primero es el espesor de vidrio expresado en milímetros para los vidrios monolíticos, o en tres números separados por guiones, como 6-12-6, para los cristales dobles (tipo Duovent) que representan el espesor del vidrio exterior, el espacio entre las dos capas de vidrio y el espesor del vidrio interior.

Otro parámetro importante es la transmitancia, es decir la cantidad de luz visible que se transmite a través de vidrio en un ángulo normal y que se complementa con la reflectancia o la cantidad de luz visible que se refleja.

Existen varios factores para medir la capacidad de sombreado de un vidrio, entre estos están el factor de sombreado (Shading Factor o SF) y el factor de ganancia de calor solar (Solar Heat Gain Coefficient o SHGC) que es la cantidad de calor radiante

incidente en la ventana que pasa al interior. Adicionalmente, se proporciona el coeficiente de sombreado (o Shading Coefficient SC) este es un coeficiente de reducción de la transmisión de calor radiante en relación con un vidrio claro de 3 mm. Todos estos parámetros determinan la capacidad de un vidrio para transmitir energía radiante.

Tabla 1. Desempeño de vidrios monolíticos

Espesor	Luz visible			Energía solar			Valor U			LS G
	Transmitancia	Reflectancia		SF EN-410	SHG C	SC	Invierno- NFRC (W/m ² K)	Verano- NFRC (W/m ² K)	EN-673 (W/m ² K)	
		Ext	Int							
(mm)	%	%	%							
3	90	9	9	0,85	0,86	0,99	5,90	5,32	5,80	1,05
4	90	9	9	0,84	0,84	0,97	5,88	5,31	5,80	1,07
5	89	9	9	0,83	0,83	0,95	5,86	5,28	5,80	1,07
6	89	8	9	0,82	0,82	0,94	5,82	5,27	5,70	1,08
6+12+6	79	15	15	0,70	0,70	0,81	2,70	2,85	2,80	1,13

Fuente: Vitro Architectural Glass (s.f.), Glass Performance Tables for International Markets.

Adicionalmente, encontramos el coeficiente global de transferencia de calor o valor U, que determina las pérdidas o ganancias por conducción a través de un vidrio o un sistema constructivo. Este parámetro varía ligeramente en función de la dirección del flujo de calor entre el invierno y el verano. La normativa europea (EN-673) establece un solo valor para todo el año.

Al emplear vidrio sencillo, no se observan diferencias significativas para diferentes espesores entre 3 y 6 mm, ya que en todos los casos en el Coeficiente Global de Transferencia de Calor (valor U) que es de $5.80 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ (Norma Europea, EN-637). De manera comparativa un muro de block de concreto aplanado tiene un coeficiente de transmisión U de $1.26 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, lo que implica que por cada metro hay 4.6 veces más transferencia de calor por conducción en una ventana que en un muro.

En comparación, un vidrio Duvent con vidrio 6mm-12mm de aire-vidrio 6mm, el coeficiente de transmisión U es de $2.80 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. Por lo tanto, el vidrio claro conduce dos veces más energía.

Adicionalmente, hay que considerar que los perfiles y marcos de materiales metálicos crean puentes térmicos debido a su alta conductividad, por lo que es importante considerar un valor U de todo el sistema de ventana (marco y vidrio).

En los sistemas de ventana de fierro y aluminio disponibles en la zona no existen elementos que rompan ese puente térmico, ya que tienen una construcción monolítica simple.

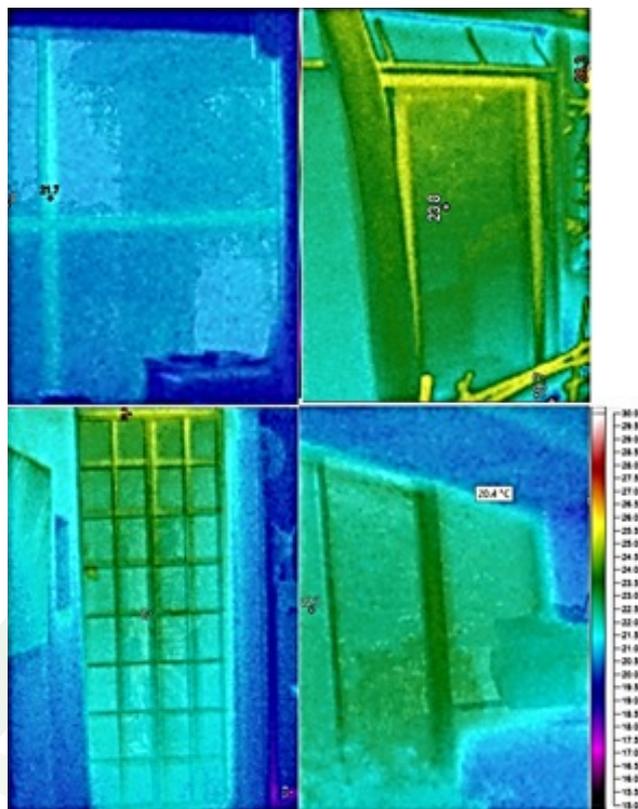
Tabla 2. Propiedades térmicas de ventanas (vidrio más marco)

Vidrio	Marco	U W/m²·K
Vidrio claro	Metálico	7.32
Duovent	Metálico	4.71
Vidrio claro	No metálico	4.99
Duovent	No metálico	2.95

Fuente: Carmody, J. y Haglund, K. (2012).

De los datos anteriores, se concluye que el material que compone al marco tiene un efecto significativo sobre el comportamiento térmico total de la ventana. Se observa que una ventana metálica, aún con un vidrio Duovent, tiene valores muy cercanos a una ventana con marco de material no metálico y vidrio claro monolítico. Los materiales no metálicos incluyen el PVC y la madera.

Figura 6. Termografía de ventanas en Tepotzotlán con marcos metálicos



Fuente: Elaboración propia.

En la zona analizada, los edificios históricos tenían en su totalidad marcos de madera; sin embargo, en la mayoría de los casos han sido sustituidos por marcos metálicos. En las viviendas contemporáneas existen pocos casos que usen ventanas con marcos de madera o PVC.

En la figura 6 se observan termografías diurnas tomadas en Tepotzotlán en el mes de febrero, a las 15:40 horas, de cuatro tipos diferentes de ventanas. En las imágenes se aprecia que en todos los casos la transmisión de energía es mayor en los perfiles y marcos que en el vidrio, formando puentes térmicos. Esto quiere decir que el material, densidad y distribución de los manguetes en una ventana alteran las propiedades térmicas de todo el sistema y su efecto en el valor U. Por lo que es muy importante considerar los materiales y el área de perfiles y marco, y no solamente el coeficiente de transmisión de energía del vidrio.

Transferencia de calor por radiación

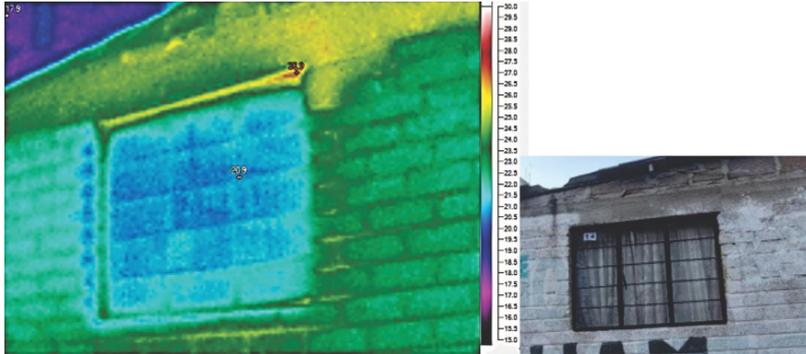
Todos los vidrios claros entre 3 y 6 mm tienen un coeficiente de sombreado cercano a 1 (de 0.94 a 0.99), mientras que un vidrio Duovent tiene un valor de 0.81.

El coeficiente de ganancia de calor solar para un vidrio simple varía entre 0.82 y 0.85 mientras que para un vidrio Duovent es de 0.70; lo que implica una reducción del 18 % entre ambos coeficientes.

El acristalamiento tiene un efecto en la ganancia directa instantánea de la radiación solar, mientras que el valor U de toda la

ventana se relaciona con las ganancias y pérdidas conductivas a lo largo del día y la noche.

Figura 7. Termografía de ventana, muro y volado



Fuente: Elaboración propia.

La figura 7 es una termografía nocturna de una ventana típica de la zona periurbana de Tepetzotlán, con una dimensión de 1.20 m x 1.50 m, con perfiles y marcos de fierro estructural de 1", y vidrio sencillo de 3 mm. Se observa claramente la pérdida de calor por puentes térmicos. Notamos que el área de la ventana está hasta 5 °C más fría que el muro, el cerramiento y la cubierta. Esto se debe a la transferencia de calor del vidrio y el acero que forman la ventana. También percibimos las pérdidas por infiltración entre la ventana y el muro, que corresponden a las juntas constructivas de la mampostería de tabicón.

Comportamiento acústico

El ruido ambiental de la zona está compuesto principalmente por el tráfico de automóviles y motocicletas, así como por aparatos electrónicos reproductores de música, lo que genera un nivel de presión sonora durante el día de hasta 80 dBA.

El acristalamiento sencillo de 3 mm tiene una reducción para tráfico de 25 dBA, reduciendo la presión sonora a 55 dB con las ventanas totalmente cerradas, sin considerar rendijas o ventanas abiertas. Por lo tanto, el sellado de las juntas constructivas entre marco y muro también tiene importancia desde el punto de vista acústico.

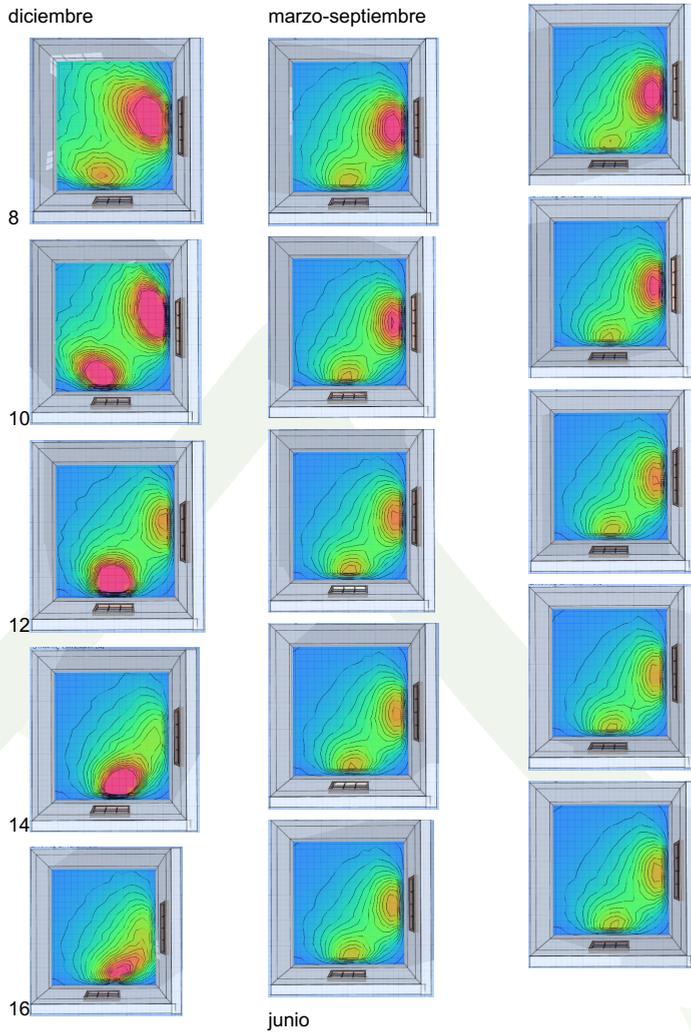
Como se aprecia en la tabla 3, la diferencia entre el vidrio flotado de 3 mm y el arreglo Duovent es de apenas 4 dBA. Existen vidrios acústicos con mayor reducción de ruido, pero por su precio no se justifican y tampoco están disponibles en la zona.

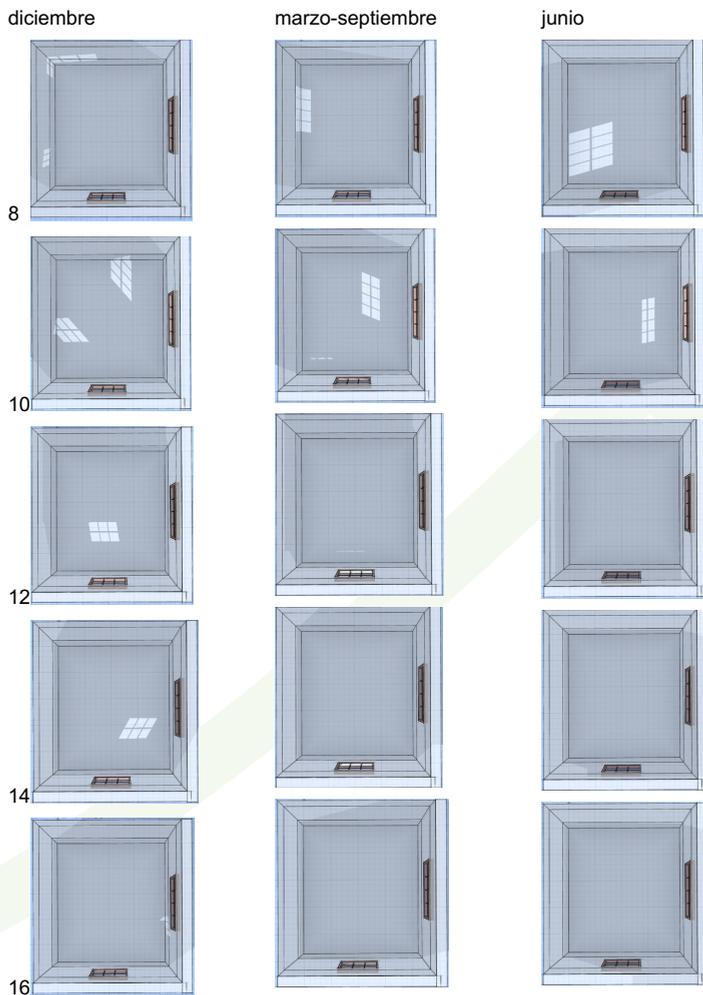
Tabla 3. Comportamiento acústico de vidrios

	Espesor (mm)	Índice ponderado de reducción sonora	Frecuencias medias y altas		Reducción por ruido de tráfico	
		RW (dB)	C (dB)	(dB)	Ctr (dB)	(dB)
Vidrio flotado	3	29	28	-1	26	-3
	4	30	28	-2	28	-2
	6	32	31	-1	30	-2
Duovent	4+12+6	34	33	-1	29	-5
	6+12+6	33	32	-1	30	-3

Fuente: Saint-Gobain (s.f.).

Figura 8. Comportamiento lumínico y de asoleamiento del caso de estudio en diferentes fechas y horas





Fuente: Andrew Marsh Dynamic Daylighting con datos climáticos de un archivo EPW de Tepotzotlán.

Los parámetros utilizados para la simulación correspondieron a la vivienda analizada. Los muros interiores y el plafón se consideraron en color blanco con una reflectancia de 0.85. El sistema de marco y ventana tiene un espesor de 25 mm y el vidrio es monolítico claro de 3 mm.

En los resultados, debemos notar que aun cuando las ventanas tienen el área mínima solicitada por el reglamento de construcción, el análisis del comportamiento lumínico muestra que la distribución de luz es uniforme a lo largo del año con un promedio de 428 lux, que resulta adecuado para las tareas que se desarrollan en el espacio.

En cuanto al asoleamiento por las ventanas, la ubicada al Sur tiene solo un pequeño volado de 30 cm, pero éste es muy efectivo para controlar la incidencia del sol al interior, permitiendo la radiación en el invierno y evitándola a partir del mes de marzo hasta septiembre, en concordancia con las estrategias de climatización que indican ganancia solar directa en invierno.

Del mismo modo la ventana ubicada al Este recibe sol durante las mañanas de todo el año, cuando la temperatura exterior es baja. La penetración solar directa se controla con cortinas interiores cuando así se requiere.

Ventilación

Los cálculos de ventilación se hicieron para el mismo local con las fórmulas de ASHRAE. Se consideró que las aperturas de ventilación están ubicadas en la parte superior de la ventana con una dimensión de 1.2 m x 0.4 m al Sur y 1.8 m x 0.4 m al Este. La velocidad media promedio de viento considerada fue de 1.8 m/s dirección Sur.

De acuerdo con el reglamento de construcciones, el área mínima de ventilación requerida es de 0.98 m² y el local tiene un área de ventilación sumando las dos ventanas de 1.2 m², por lo que cumple con la normatividad vigente.

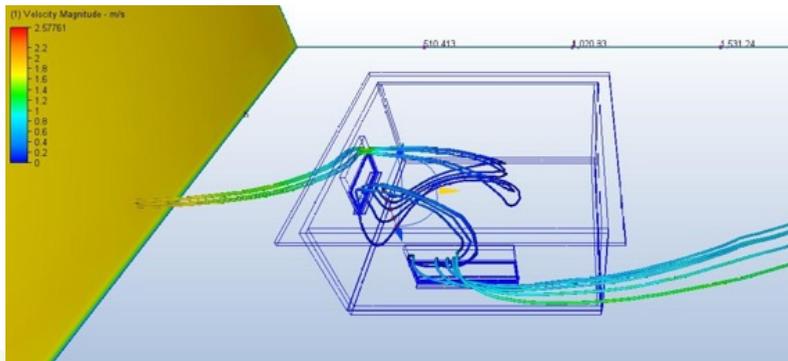
El cálculo de renovación se hizo con cuatro personas, sentadas con trabajo ligero y la tasa de ventilación mínima requerida es de 148.8 m³/h que corresponde a tres cambios de aire por hora.

Considerando la ventilación cruzada entre ambas ventanas y la velocidad de viento de 1.8 m/s, la ventilación máxima del local puede ser de hasta treinta y dos cambios de aire por hora. Esto es muy superior a los seis cambios de aire por hora que pide el reglamento. Las ventilas son operables por los usuarios; las pueden regular cuando así se requiera.

Aun cuando no están en lados opuestos de la habitación, las ventanas permiten un flujo de ventilación cruzada, renovando

adecuadamente el aire de la habitación. Como se demuestra en los análisis de flujo, se logra un barrido del aire en todo el interior. Asimismo, se observa que en la entrada de la ventana de barlovento se tienen velocidades de entre 0.8 y 1.0 m/s, y las velocidades interiores oscilan entre 0.3 y 0.2 m/s, que son correctas para renovar el aire y disipar el calor de la habitación con velocidad comfortable.

Figura 9. Flujo de viento en el interior del caso de estudio analizado



Conclusiones y vinculación con el proyecto de investigación

La vivienda periurbana de autoconstrucción comprende cerca del 57.3 % de todos los espacios de vivienda y se da mayoritariamente en la periferia de los grandes núcleos urbanos como un producto del crecimiento poblacional y los movimientos de migración e inmigración.

Siempre es una vivienda progresiva, que inicia con la construcción de una sola habitación para todas las funciones y gradualmente se va ampliando con el transcurso de los años y las posibilidades de cada familia.

Las ventanas son un punto crítico de la construcción, y con frecuencia representan uno de los elementos más costosos, por lo que las familias seleccionan los materiales más económicos y accesibles.

En la norma NMX-R-060-SCFI “Ventanas: Clasificaciones y Especificaciones” los materiales ferrosos no están considerados, a pesar de ser los más empleados en la vivienda de autoconstrucción periurbana.

En los climas semifríos, como es el caso de estudio, se requiere calentamiento directo a través de las ventanas, pero estas también pueden ocasionar pérdidas por conducción durante

la noche, sobre todo si no están correctamente selladas presentan puentes térmicos o carecen de aislante móvil como cortinas.

Al mismo tiempo, pueden generar sobrecalentamiento si están orientadas al oeste, sobredimensionadas o no cuentan con protección solar.

En las viviendas periurbanas analizadas domina el muro sobre el vano, colocando solamente el área de ventana mínima requerida. Esta estrategia de diseño permite reducir las ganancias o pérdidas de calor a través de la envolvente, facilitando el calentamiento interior, y reduciendo simultáneamente el costo.

Todas las construcciones analizadas tienen un pequeño volado perimetral que ayuda a proteger al muro de la lluvia y en el caso analizado, controla adecuadamente el asoleamiento.

Las termografías mostraron la existencia de puentes térmicos a través de los perfiles y marcos ferrosos, lo que confirma la necesidad de reducir al máximo el área de ventana cuando se emplean estos materiales. Sin embargo, los perfiles y marcos pueden reducir significativamente el área efectiva para iluminación y asoleamiento.

En la determinación del coeficiente global de transferencia de calor (valor U) de un sistema de ventana, es importante tomar en cuenta no solamente el valor del vidrio, sino también el de los marcos y perfiles. También, es importante considerar los coeficientes de atenuación sonora de los vidrios, marcos y perfiles.

Los tipos de ventana más utilizados son con hojas abatibles o de proyección, si existe la ventilación cruzada se puede obtener una adecuada renovación del aire.

Podemos concluir que, en el caso de estudio, la ubicación y orientación de las dos ventanas es muy adecuada, ya que producen niveles lumínicos más que suficientes para la mayoría de las actividades domésticas, demostrando que hay un conocimiento empírico en la construcción periurbana.

Referencias

- AEA Asociación Española del Aluminio y Tratamientos de Superficie. (2017). Determinación de la importancia de los factores de influencia de una ventana en la demanda energética de un edificio. https://www.asoc-aluminio.es//support/pdf/Estudio_Tecnalia2.pdf. Consulta 16/02/2023
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2017). *ASHRAE HANDBOOK – Fundamentals*.
- Asociación Española de Normalización (2007). Norma UNE-EN 14220:2007. *Madera y materiales derivados de la madera para ventanas exteriores, hojas de puertas exteriores y cercos de puertas exteriores-requisitos y especificaciones*. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?-c=N0038947>. Consulta 04/09/2023
- ASOVEN, Asociación de Ventanas PVC. (2019). *Carpintería de PVC, ahorro energético, sostenibilidad y salud*. <https://www.asoven.com/publicaciones-asoven/> Consulta 4/09/2023

- Barrios Rodríguez, P. (2001). *Contribución al estudio del Comportamiento Térmico del Vidrio Plano utilizado en México como envolvente en las Edificaciones* [Tesis de maestría]. UAM.
- BS EN 12464-1:2011 (2011). *Light and lighting – Lighting of workplaces*. BSI Standards Publication.
- BS EN 12758:2011 (2011). *Glass in Building – Glazing and airborne sound insulation – Product description and determination of properties*. BSI Standards Publication.
- Carmody, J. y Haglund, K. (2012). *measure guideline: energy-efficient window performance and selection*. U.S. Department of Energy. Energy Efficiency & Renewable Energy.
- Escobar, S. (2021). *El 57.3% de la vivienda en México ha sido autoconstruida: Sedatu*. INMOBILIATE – Construcción. <https://inmobiliare.com/el-57-3-de-la-vivienda-en-mexico-ha-sido-autoconstruida-sedatu/>
- Guardian Glass (2022). *Aluminio, PVC o madera... ¿Qué material es mejor para mis ventanas?* <https://www.guardiansun.es/tipos-de-ventanas-y-cristales/ventanas-pvc-aluminio-o-madera>
- ISO/DIS 9050:2014. (2014). *Glass in Building – Determination of light transmittance, solar direct transmittance, total solar energy transmittance, ultraviolet transmittance, and related glazing factors*.
- Marsh, A. (2023). Software. Dynamic Daylighting. <https://andrew-marsh.com/software/daylight-box-web/>
- Marsh, A. (2023). Software. Psychometric Chart. <https://andrewmarsh.com/software/psychro-chart-web/>

- Neri, Y. (2003). *El uso del Vidrio como elemento arquitectónico en un clima templado, caso de estudio la Ciudad de México* [Tesis de maestría]. Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco.
- NOM-024-2012 *Características térmicas y ópticas del vidrio y sistemas vidriados para edificaciones, etiquetado y métodos de prueba*. (2012). https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5273553&fecha=18/10/2012#gsc.tab=0
- Norma Mexicana NMX-R-060-SCFI-2013. *Ventanas Y Productos Arquitectónicos para el Cerramiento Exterior de Fachadas-Clasificaciones y Especificaciones*. (2013, 24 de julio). <https://issuu.com/amevec/docs/nmx-r-060-scfi-2013/106>
- Norma Oficial Mexicana NOM-008-ENER-2001. *Eficiencia Energética en Edificaciones, envolvente de Edificios no Residenciales*. (2001, 25 de abril). https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=767644&fecha=25/04/2001#gsc.tab=0
- Norma Oficial Mexicana NOM-020-ENER-2011. *Eficiencia Energética en Edificaciones. Envolvente de Edificios para Uso habitacional*. (2011, 21 julio). https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5203931&fecha=09/08/2011#gsc.tab=0. Consulta 04/09/2023
- Saflex (s.f.) *Acoustical Guide*. Solutia Inc.
- Saint-Gobain. (s.f.). *Acoustic calculator*. <https://techhub.uk.saint-gobain-building-glass.com/acousticcalculator>
- Servicio Meteorológico Nacional. (2022). *Normales climatológicas por estado*. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/normales-climatologicas-por-estado>
- Vitro Architectural Glass. (s.f.). *Glass performance tables for international markets*. <https://www.vitroglazings.com/technical-information/performance-data-tables/>



PROPIEDADES TÉRMICAS DE MATERIALES TRADICIONALES EN EL ESTADO DE COLIMA, CLIMA CÁLIDO SUBHÚMEDO

Jorge Armando Ojeda Sánchez¹
Carlos Javier Esparza López²
Alfonso Cabrera Macedo³

Resumen

Ante los cambios de temperatura, provocados por el denominado cambio climático, se han registrado valores medidos cada vez más extremos, lo que provoca que, en climas cálidos, estos sean altos, con una mayor sensación térmica. En climas cálidos subhúmedos, como el del estado de Colima, los materiales

1 Profesor de Tiempo Completo en la Universidad de Colima, jojeda1@ucol.mx

2 Profesor de Tiempo Completo en la Universidad de Colima, cesparza@ucol.mx

3 Profesor de Tiempo Completo en la Universidad de Colima, cabrera_macedo@ucol.mx

tradicionales permiten generar condiciones de retraso térmico, mitigando la ganancia de calor en sistemas constructivos y su consecuente transferencia al interior de los espacios, considerando que una de las condiciones de una vivienda digna es la habitabilidad. Una de las principales características físicas de estos materiales tradicionales es la conductividad térmica, debido a que es la propiedad involucrada en el proceso de transferencia de calor por conducción. El componente con mayor uso tradicional es el adobe que, en combinación con otros materiales orgánicos, como el bagazo de caña, fibras y en un compuesto en combinación con aceite de coco, en configuraciones geométricas simples, permiten generar un sistema constructivo que presenta una mayor resistencia térmica. Los materiales compuestos obtenidos, presentan condiciones de baja conductividad térmica o de retraso en el incremento de la temperatura interior que, en las condiciones climáticas del estado de Colima, son deseables, como parte de estrategias pasivas de mitigación que, en conjunto con otras soluciones, basadas en principios físicos básicos, permiten generar soluciones para la adaptación y resiliencia. La determinación de las propiedades de estos materiales se obtuvo mediante el equipo experimental analizador de propiedades térmicas KD2PRO, con diferentes sensores, especializados para cada tipo de material. En el presente capítulo se desarrollan los principios de análisis, propuestas y los resultados de la medición de las propiedades termofísicas, como la conductividad térmica, difusividad, entre otros.

Introducción

En el estado de Colima, la tradición constructiva se compone de dos elementos: el urbano y el rural, en el entorno citadino, predomina la influencia extranjera en las formas y sistemas constructivos; en cambio, en el medio rural prevalece el uso de materiales tradicionales de diverso origen (Alcantara y Gómez, 2000). Las manifestaciones constructivas del estado de Colima se presentan en tres diferentes entornos geográficos: montaña, valle y lomeríos, llanura costera; en donde los diferentes materiales utilizados responden a las condiciones medio ambientales de temperatura. En zona de montaña, el promedio anual de temperatura es de 29.6 °C, con una temperatura extrema de 32 °C, mínima de 16 °C, extrema mínima de 14.2 °C, los materiales constructivos son el adobe, bahareque, marcos de madera para muros, teja y techumbre de zacate (Gómez-Amador, 2016). Para zonas de valle y lomeríos, se presentan temperaturas de 37 °C, extrema de 39° C, con temperaturas mínimas de 15 °C; los sistemas constructivos predominantes son adobe, bajareque, teja, block y concreto, con recubrimientos de cal-arena con uso de puertas de varas de otate o madera. Por otro lado, para la zona de llanura costera, con 33 °C máxima y mínima de 25 °C, donde predomina el uso de materiales como el ladrillo rojo, madera, tablonés de madera, palapa (Gómez-Amador, 2016).

Los materiales utilizados en los sistemas constructivos de tres zonas del estado de Colima, el sistema de bajareque consiste

en una estructura de varas o cañas, que bien puede ser complementado con barro que, al secarse adquiere la resistencia necesaria para realizar construcciones (Armando, *et al.*, 2017; Elizondo-Mata, *et al.*, 2015). El adobe está compuesto por arcilla en un 30 %, aproximadamente, arena y fibras orgánicas secas, de tal forma que una vez seca, la mezcla, el material resultante permite obtener una rigidez suficiente para generar un sistema constructivo (Solís-Guzmán, *et al.*, 2020). Por otro lado, el ladrillo rojo, material abundante en la zona norte de Colima (Comala y en Armería) se distingue por estar compuesto por arcilla con silicatos hidratados de aluminio fino, material cuya rigidez se alcanza con un procesos de cocción en horno (De Pablo, 1964).

Los sistemas constructivos, por sus características físicas, condicionan el ambiente interior. Los materiales reportados por Gómez-Alcántara (2016), enlistan las características arquitectónicas de casas habitación de la zona y el correspondiente desempeño térmico de dichos sistemas constructivos. Los denominados materiales compuestos son aquellos que combinan dos o más elementos. En sistemas constructivos, son parte de la actividad humana; por ejemplo, bloques de arcilla reforzados con fibras orgánicas como la paja, la combinación de materiales disimilares, con el fin de obtener propiedades físicas adecuadas (Callister, 2010).

En este sentido, la combinación de materiales como el poliestireno con concreto, permite generar un material ligero, con una baja conductividad térmica (Reyez, 2018). El uso de fibras

vegetales, generalmente consideradas como desecho orgánico, se ha utilizado con fines de construcción, como sustrato, junto con fibra de coco, en muros verdes (Esparza, *et al.*, 2020), en combinación con el concreto con una proporción de mortero cemento-arena-cascarilla de arroz, 1:3:4; dicho material presentó una reducción del 11 % en el valor de conductividad térmica en comparación con la conductividad del concreto (Ojeda y Esparza, 2016). En combinación con el adobe, se reporta una disminución del 10 % en el valor de la conductividad térmica un 10 % de cascarilla de arroz, comparado con la muestra de adobe solo. Otro uso de las fibras orgánicas es la fibra de bagazo de caña, producto que es desperdicio en el ingenio azucarero del Grupo Beta San Miguel (BSM, 2022), en el poblado de Quesería, municipio de Cuauhtémoc, al Noreste del estado de Colima. La presencia del bagazo de caña incrementa las propiedades mecánicas en muestras experimentales de adobe (Robles, *et al.*, 2021), presentando una reducción de la conductividad térmica a un porcentaje de 50 % a un 10 % en proporción de fibra de bagazo de caña, con respecto al adobe (Cano, Venegas, Cabrera, Ojeda, 2022).

En el estado de Colima, el aceite de coco es abundante, debido a la presencia de la palma de coco, que brinda la palapa, la madera, el coco, el aceite de coco. Este último, utilizado como material de cambio de fase, cuya característica permite mitigar las ganancias térmicas y utilizarlo como almacenador de energía

térmica, en el clima tropical de Indonesia (Silalahi, *et al.*, 2017) y como regulador de la temperatura en casas en climas tropicales (Wonorahardjo, *et al.*, 2019). En este sentido, la combinación de un bloque adobe con intersticios con recipientes de aceite de coco, permite una reducción de hasta 3 °C y un retraso térmico de 2 horas en un módulo experimental con un sistema constructivo adobe-aceite de coco (Solís-Guzmán, *et al.*, 2020).

Este estudio fue desarrollado dentro del proyecto 321260, denominado “Desarrollo de un modelo de producción social replicable de vivienda y hábitat”, con apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), alineado a los objetivos planteados dentro de dicho proyecto.

274

Metodología

La determinación de la conductividad térmica de los diferentes materiales se realizó en el Laboratorio de Arquitectura, de la Facultad de Arquitectura y Diseño, de la Universidad de Colima, con el equipo Analizador de Propiedades Térmicas KD2PRO, de Decagon Devices (Decagon Devices, 2013). Este dispositivo cuenta con cuatro sensores para diversos materiales, como roca, concreto, líquidos, compuestos granulares y polvos. El principio de funcionamiento está basado en la medición por aguja que, una vez insertada en la muestra

de material, se genera un pulso de calor. Los sensores de tipo aguja opera bajo las siguientes normas ASTM, para determinación de la conductividad de suelo y roca suave por medio del procedimiento de aguja (ASTM-D5334-08, 2008) y la medición de la resistividad térmica en suelos y materiales de relleno (IEEE-Std-442-198, 2017). El data logger y los sensores presentan un rango de temperaturas de operación de 0-50 °C y de -50 a 150 °C, respectivamente. Las características técnicas se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 1. Características técnicas de los sensores del Analizador de Propiedades Térmicas KD2PRO

Sensor	Tipo	Tamaño	Rango	Exactitud	Propiedades	Adecuado
KS-1	Aguja	L= 60 mm	0.02-2.00 W/mk 50 - 5000 °Ccm/W	+/- 5% de 0.2-2 W/mK +/- 10% de 0.02-0.2 W/mK	Conductividad térmica Resistividad térmica	-Líquidos de baja/alta viscosidad -Materiales aislantes
TR-1	Aguja	D=2.4 mm L=100 mm	0.1-4.00 W/mk 25-1000 °Ccm/W	+/- 10% de 0.2- 4 W/mK +/- 0.2 W/mK de 0.1-0.2 W/mK	Conductividad térmica Resistividad térmica	-Suelo seco/húmedo -polvos -materiales granulares
SH-1	Doble aguja	D=1.3 mm L=30 mm 6 mm de espacio	0.02-2.00 W/mk 50 - 5000 °Ccm/W 0.1-1 mm^2/s 0.5-4 mJ/m^3K	+/- 10% de 0.2- 2 W/mK +/- 10% para > 0.1 W/mK	Conductividad térmica Resistividad térmica Difusividad Calor específico volumétrico	Difusividad térmica
RK-1	Aguja	D=3.9 mm L=60 mm	0.1-6.0 W/mk 17- 1000 °Ccm/W	+/- 10% de 0.2-6 W/mK	Conductividad térmica Resistividad térmica	-concreto -roca

Fuente: Decagon Devices (2013).

En la tabla 1, la columna que corresponde al tamaño, se refiere a la longitud (L) y al diámetro (D) de la aguja, en casos particulares, el espaciamiento entre agujas, como es el caso del sensor SH-1. El equipo analizador de propiedades térmicas

permite realizar mediciones en campo o bien mediante probetas de material, recomendando que la probeta sobre la que se realizará la perforación sea de una pulgada cuadrada, 6.54 cm^2 y al menos el largo de la aguja que corresponda al sensor. Una vez realizada la perforación, se utiliza una grasa térmica a base de silicona con el objetivo de permitir un mejor contacto entre la aguja y el material constructivo. Los diferentes sensores y sus principales características se pueden apreciar en la figura 1.

Figura 1. Sensores y equipo Analizador de Propiedades Térmicas, KD2PRO



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 2, se puede apreciar la implementación de una medición con el sensor de doble aguja en una muestra de concreto con cascarilla de arroz.

Cabe mencionar que la principal variable a medir es la conductividad térmica, propiedad del material fundamental para los procesos de transferencia de calor por conducción, que es descrita por la Ley de Fourier (Yunus y Afshin, 2011). El sensor de doble aguja, SH-1, permite una medición de la difusividad térmica del material, generalmente descrita como en $[m^2/s]$, y que puede ser calculada a partir de la densidad y la capacidad térmica específica, y está dada por la siguiente relación $[m^2/s]$.

Figura 2. Medición con el sensor de doble aguja SH-1



Fuente: Elaboración propia con base en los resultados (Ojeda y Esparza, 2016).

En este sentido, la determinación de la densidad, que es la relación entre la masa y el volumen de la muestra, nos permite obtener la capacidad térmica específica de manera indirecta. En

el presente trabajo se muestran las mediciones de la conductividad térmica de diversos elementos constructivos tradicionales, y sistemas compuestos, que han sido propuestos y desarrollados en el Laboratorio de Arquitectura, por el Cuerpo Académico de Arquitectura y Medio Ambiente (UCOL-CA25).

La metodología aplicada es la siguiente: una vez que se tienen las muestras con las proporciones o características requeridas, por cada muestra se realizan al menos 25 tomas de datos programadas en el equipo KD2PRO. Cada toma de datos se realiza cada 15 minutos, considerando un tiempo entre eventos para la estabilización de la temperatura. Por cada evento de medición, se evalúa un error que está inicialmente configurado por el equipo que consiste en la comparación entre el dato de conductividad y un modelo matemático teórico de la conductividad en función de la temperatura, si este indicador es menor a 0.01, se considera que el dato obtenido es correcto. El manual recomienda tiempos largos de medición para minimizar los errores por contacto.

278

Análisis de resultados

En esta sección se muestran los resultados de los diferentes materiales analizados en el Laboratorio de Arquitectura, de la Facultad de Arquitectura y Diseño de la Universidad de Colima.

Las mediciones realizadas con el equipo KD2PRO han contribuido en trabajos de tesis, capítulos de libro y conferencias. El desempeño térmico de dichas soluciones se reporta en la respectiva referencia, en el presente trabajo presentamos una de las características físicas fundamentales de un sistema constructivo que es la conductividad térmica. El primer material analizado es el ladrillo rojo, con tres especímenes de diferentes zonas del estado de Colima, Comala y Armería. La producción de dichos ladrillos se realiza de la manera tradicional, por cocción de la arcilla, propia del lugar, principalmente de Comala. Las muestras de ladrillo de cada región fueron seleccionadas de la zona central del horno de cocción. El tamaño de la muestra es de 14 x 28 x 10 cm.

La medición se realizó con el sensor RK-1, con la perforación con el diámetro correspondiente, de tal forma que la aguja tuviera contacto con las paredes internas de la perforación. En este sentido, el uso de la grasa térmica o grasa disipadora de calor permite minimizar posibles fuentes de error. Si bien la pasta térmica recomendada por el equipo KD2PRO es de una base de silicón sintético con alúmina, puede ser sustituida por grasa disipadora de calor, utilizada comúnmente en la instalación de procesadores de equipos de cómputo.

Figura 3. Medición de conductividad térmica de ladrillo rojo, de Comala, Colima



Fuente: Elaboración propia.

Cualitativamente, las características del ladrillo de Comala son que es más ligero, con una textura más firme; en cambio, el espécimen de Armería se percibe menos ligero y con una sensación arenosa. Los valores de la conductividad térmica se resumen en la tabla 2. Por otro lado, un material tradicional analizado es el bajareque, en una configuración mortero/tierra/paja/cal, en una proporción 10:4:1 y bambú de la especie *Guada Angustifolia Kunt*, abundante en el estado de Colima, y un acabado con arena de cal.

Figura 4. Sistema de bajareque con bambú, arcilla y cascarilla de arroz



Fuente: Elaboración propia con base en los resultados (Elizondo-Mata, *et al.*, 2015).

La conductividad térmica de cada una de las principales capas de material se puede consultar en la tabla 2. La conductividad térmica del bambú es cercana a la reportada por Hidalgo, cuyo valor de conductividad térmica es del mismo orden que el de la madera, [W/mK] (López, 2003).

Por otro lado, la combinación de materiales permite obtener valores de las propiedades, la combinación de adobe con cascarilla de arroz modifica la conductividad térmica, permitiendo una disminución del 10 %. Los datos obtenidos de la conductividad térmica del adobe son de [W/mK]. En este sentido, el aceite de coco se clasifica como un material de cambio de fase que, por efectos del calor latente, el material líquido cambia de fase a sólido. En climas cálidos tropicales, se reporta la combinación

del aceite de coco como reservorio almacenador de calor, permitiendo un retraso térmico en la temperatura interior, mitigación de ganancias térmicas (Wonorahardjo, *et al.*, 2019).

Por otro lado, se reporta el diseño de las estructuras internas verticales, llenas de aire, de tal forma que presenten una alta resistencia térmica y mecánica de manera simultánea (Lorente y Bejan, 2002) thermal insulation and mechanical strength. The wall is a composite of solid material (e.g., brick. Basados en estas dos ideas señaladas, se generó un sistema constructivo de adobe con intersticios de aceite de coco, determinando las respectivas conductividades térmicas.

En este punto es importante mencionar que los efectos de calentamiento-enfriamiento del aceite de coco debido a la carga térmica del muro, genera procesos de transferencia de calor por conducción y convección. Estos efectos conjuntos, provocan una disminución en la temperatura interior de un módulo experimental de 3 °C y un retraso térmico de, aproximadamente, dos horas (Solís-Guzmán, *et al.*, 2020). En la figura 5, se muestra la configuración básica del sistema propuesto.

Figura 5. Sistema propuesto de bloque de adobe con aceite de coco



Fuente: Elaboración propia.

El sistema propuesto es una primera aproximación a la aplicación de materiales abundantes en la región, los problemas asociados a esta configuración como estructura interna, fugas del recipiente del aceite de coco, son situaciones que se resolvieron con el objetivo de determinar la influencia de estos materiales ante una condición de carga térmica en muros. En la tabla 2, se pueden apreciar los valores de la conductividad térmica de materiales medidos con el equipo Analizador de Propiedades Térmicas KD2PRO. Las mediciones de conductividad térmica de componentes, como el ladrillo o adobe, varían debido a que dependen de los elementos de origen, cuya conformación generalmente no presentan un control estricto en las proporciones.

La conductividad térmica del aceite de coco se midió en condiciones experimentales de temperatura estable, de tal forma

que dicho valor de la conductividad, al igual que la viscosidad, varían en función de la temperatura. Por lo anterior, la interacción de materiales ante una ganancia térmica exterior, genera condiciones de difusión en el fluido encerrado, donde el aceite de coco se somete a procesos de calentamiento-enfriamiento.

Tabla 2. Tabla de mediciones de conductividad térmica de diversos materiales

Material	Conductividad térmica [W/mK]	Material	Conductividad térmica [W/mK]
Ladrillo rojo (Armería)	0.407	Adobe	0.433
Ladrillo rojo (Comala)	0.338	Adobe + cascarilla de arroz 1%	0.58
Guadua Angustifolia Kunt	0.157	Adobe + cascarilla de arroz 10%	0.52
Mortero/ tierra/paja/ cal	0.331	Adobe+ bagazo de caña	0.199
Mortero/cal/ arena	0.165	Cemento-arena-cascara de arroz	0.195
Mortero/ cemento/ arena	0.515	Aceite de coco	0.158

Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

En el presente trabajo se presentaron diferentes materiales y propuestas de sistemas constructivos con elementos que

generalmente son considerados desechos, como las fibras orgánicas. Como se puede apreciar en los resultados, el uso y combinación de materiales tradicionales permiten generar sistemas compuestos de materiales con baja conductividad térmica, el desempeño térmico de estos materiales puede ser consultado en las respectivas referencias. Estas características físicas nos permiten generar propuestas contextualizadas con diseños razonados que, mediante análisis numérico, teórico y experimental, definen soluciones para evitar las ganancias térmicas en muros y losas. El desarrollo de soluciones constructivas, por medio de la producción social, desde la dimensión de ganancia-consumo energético, además de la apropiación cultural, por medio de los materiales locales, está ligado invariablemente al derecho de una vivienda digna con condiciones de habitabilidad, seguridad, diseño con instalaciones e infraestructura de calidad.

Referencias

Alcantara Lomelí, A. y Gómez Amador, A. (2000). Tradición Constructiva de Colima. *Anuario de Estudios de Arquitectura*, Febrero. <https://www.uam.mx/difusion/editorial/anuario2000.html>

ASTM-D5334-08. (2008). *Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure*. <https://www.astm.org/d5334-08.html>

- BSM. (2022). *BSM Beta San Miguel*. Ingenio Queseria. <https://www.bsm.com.mx/queseria.html>
- Callister, W. D. (2010). Composites. In Wyley (Ed.). *Materials Science and Engineering: An introduction* (8.^a ed.). John Wiley & Sons. <https://www.wiley.com/en-us/9781119405498>
- Cano, M., Venegas, R., Cabrera, A. y Ojeda, J. A. (2022). *Agregados de fibras de bagazo de caña en adobe y su efecto en sus propiedades térmicas*. Reporte de Investigación (inédito). Universidad de Colima.
- Decagon Devices. (2013). *KD2 pro - Thermal Properties Analyzer: Owner Manual*. https://library.metergroup.com/Manuals/13351_KD2%20Pro_Web.pdf
- De Pablo, L. (1964). Las arcillas. I. Clasificación, identificación, usos y especificaciones industriales. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 27(2), 49–91. <http://www.jstor.org/stable/44173956>
- Elizondo-Mata, M., Esparza-López, C. J., Ojeda-Sánchez, J. A., González-Trevizo, M. y De Loza, J. R. G. (2015). Modular rural housing of low cost , low environmental impact and self- buildable made of BAMBOO WATTLE & DAUB & DAUB in Colima , Mexico . *PLEA Bologna: Architecture in (R)Evolution, September*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4340.016>
- Esparza, C., Rios, I. y Ojeda, J. A. (2020). Rice husk and coconut fiber to improve heat capacity in green wall substratum. *PLEA 2020 A CORUÑA Planning Post Carbon Cities, Septiembre*. <https://www.plea-arch.org/>
- Gómez-Amador, A. A.-L. A. (2016). Desempeño ambiental de la tradición constructiva rural de Colima. *Desempeño ambiental comparado de la tradicion constructiva de Colima*. Universidad

- de Colima. <https://medioambiente.ulibros.com/desempeno-ambiental-comparado-de-la-tradicion-constructiva-de-colima-j8lpp.html>
- IEEE-Std-442-198. (2017). *IEEE Guide for Thermal Resistivity Measurements of Soils and Backfill Materials*. <https://lib.ugent.be/catalog/ebk01:4100000005061693>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). *Summary for Policymakers*. In *Climate Change 2013 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1-30). Cambridge University Press.
- López, O. H. (2003). *Bamboo: The gift of the gods*.
- Lorente, S. y Bejan, A. (2002). Combined 'flow and strength' geometric optimization: internal structure in a vertical insulating wall with air cavities and prescribed strength. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45(16), 3313–3320. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(02\)00052-2](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(02)00052-2)
- Ojeda y Esparza. (2016). Análisis de propiedades termofísicas de cemento-arena-cascarilla de arroz, aplicado a muros en de viviendas de interés social en un clima cálido subhúmedo. *6to Congreso Nacional de Investigación en Cambio Climático, octubre*. https://www.researchgate.net/publication/309313369_Analisis_de_propiedades_termofisicas_de_cemento-arena-cascarilla_de_arroz_aplicado_a_muros_en_de_viviendas_de_interes_social_en_un_clima_calido_sub_humedo
- Ojeda, J. A.; Mata, F. (2017). *Criterios e indicadores en edificaciones turísticas sustentables, como oportunidad de adaptación y mitigación del cambio climático*. Universidad de Guadalajara.

- Reyez, E. (2018). *Determinación de la conductividad térmica de un block de concreto poliestireno con agregados de poliestireno a diferentes proporciones* [Tesis de licenciatura]. Universidad de Colima.
- Robles Rojo, A., Arceo Díaz, S., Ri-cardo Moreno Peña, J. y Zuleica Chávez Pérez, D. (2021). Análisis de la resistencia mecánica ante compresión de bloques de adobe con agregados de fibra de bagazo de caña. *Revista Ingeniantes*, año, 8(2). [https://citt.itsm.edu.mx/ingeniantes/articulos/ingeniantes8no2vol1/8 Análisis de la resistencia mecánica ante compresión de bloques de adobe.pdf](https://citt.itsm.edu.mx/ingeniantes/articulos/ingeniantes8no2vol1/8_Análisis_de_la_resistencia_mecánica_ante_compresión_de_bloques_de_adobe.pdf)
- Silalahi, A. O., Sukmawati, N., Sutjahja, I. M., Kurnia, D. y Wonorahardjo, S. (2017). Thermophysical Parameters of Organic PCM Coconut Oil from T-History Method and Its Potential as Thermal Energy Storage in Indonesia. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 214(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/214/1/012034>
- Solís-Guzmán, C., Ojeda Sánchez, J. A. y Bojórques Morales, G. (2020). *Material constructivo compuesto para muros con criterios sostenibles*. Un Mundo Sostenible en el siglo XXI, 1–11. <http://www.investigacionyposgrado.uadec.mx/publicacion/un-mundo-sostenible-en-el-siglo-xxi-alternativas-para-el-rescate-del-planeta/>
- Wonorahardjo, S., Sutjahja, I. M. y Kurnia, D. (2019). Potential of Coconut Oil for Temperature Regulation in Tropical Houses. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 92(1), 80–88. <https://doi.org/10.1007/s10891-019-01909-7>

ESTUDIO DE HABITABILIDAD EN TRES LOCALIDADES DE LA MIXTECA ALTA DE NOCHIXTLÁN, OAXACA

Heidy Gómez Barranco¹

Raúl Pável Ruíz Torres²

Marco Antonio Hernández Escampa-Abarca³

Luz Cecilia Rodríguez Sánchez⁴

Resumen

El presente trabajo es un estudio de habitabilidad para la incidencia al hábitat de las viviendas de tres comunidades del distrito de la Mixteca Alta, Nochixtlán, Oaxaca. De dichas localidades fueron seleccionadas viviendas de autoproducción de programas

1 Profesora de la Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca e integrante del Cuerpo Académico "Tecnología y Sustentabilidad", arq.heidy.gb@gmail.com

2 Profesor de tiempo completo de la Universidad Autónoma de Chiapas, raul.ruiz@unach.mx

3 Profesor de la Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca e integrante del Cuerpo Académico "Tecnología y Sustentabilidad", escampa.ubajo@gmail.com

4 Profesora de la Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca e integrante del Cuerpo Académico "Tecnología y Sustentabilidad", cecil.rs@gmail.com

federales o estatales, siendo en los municipios de San Miguel Chichahua, El Fortín Alto y Santiago Amatlán donde se aplicaron encuestas a los(as) pobladores(as), al personal dedicado a la construcción y a los(as) observadores(as). Se llevó a cabo una fase diagnóstica con estudios en el sitio, pruebas no destructivas a las viviendas mixtecas y sus materiales de construcción, con cámara termográfica, estación de meteorología portátil y hobos, para dar a conocer la habitabilidad de la vivienda.

Introducción

El estado de Oaxaca tiene un alto índice de migración y ocupa el quinto lugar en el país, y la región Mixteca se ubica en el tercer sitio de la entidad (INEGI, 2022). Esta situación se refleja en cambios culturales que se manifiestan en diversos ámbitos, uno de ellos está relacionado con la forma en que los(as) migrantes construyen sus viviendas.

Para el acceso y el trabajo a las comunidades se contactó a un representante técnico de la Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU). Dicha Secretaría no cuenta con una representatividad en el estado de Oaxaca, siendo la Comisión Nacional de Vivienda (CONAVI) la que demuestra su trabajo en las comunidades oaxaqueñas. Con el representante técnico

se llevó a cabo el recorrido a las comunidades seleccionadas con las viviendas que han sido autoproducidas y beneficiadas con programas de construcción o reconstrucción de viviendas por parte de instituciones de gobierno federal o estatal; sin embargo, no fueron apoyadas con ningún programa de gobierno; solo la Asociación Civil Ayú A. C., quien ha apoyado a la Mixteca oaxaqueña, Puebla y Guerrero, promueve el desarrollo de las poblaciones; las visitas fueron llevadas a cabo el 29 de octubre del 2022 y el 7 de febrero del 2023. Se realizaron los estudios a 20 viviendas: 13 en San Miguel Chicahua, 4 en Santiago Amatlán y 3 en Fortín el Alto, con el apoyo de estudiantes y prestadores(as) de servicio social de la Facultad de Arquitectura “5 de mayo”.

En este capítulo se encontrará la metodología cuantitativa y cualitativa aplicada a las viviendas modelo, teniendo indicadores que permitieron diagnosticar, estudiar y analizar el comportamiento de los habitantes ante situaciones de fenómenos sociales, climatológicas, políticas y económicas: etapa 1. Evaluación preliminar: a) Aplicación de la entrevista: Análisis de encuestas, b) Revisión de archivos; mapeo y localización y aplicación de la metodología etnográfica, c) Pruebas no destructivas a las viviendas.

En las experiencias obtenidas por el estudio realizado *in situ*, se encontró la pérdida de sistemas constructivos locales, que no representa una identidad arquitectónica, no cuentan con todos los servicios y las tecnologías inadecuadas que son parte constitutiva a la problemática nacional, permitiendo identificar, de igual

forma, los obstáculos que existen o pueden generarse en la habitabilidad de las comunidades que presentan incidencia al hábitat.

La habitabilidad debe ser considerada como parte fundamental del desarrollo sustentable de cualquier comunidad, ya que, esta es una condición que articula a los subsistemas social y ecológico, donde el ser humano pueda desenvolverse a plenitud de manera individual y colectiva. La *habitabilidad* es una categoría esencial del espacio habitable, llámese lugar o escenario, interior o exterior, de escala urbana o doméstica, que amalgama los aspectos físicos, psicológicos y sociales, y que no pierde de vista su interacción con los procesos medioambientales (Garfías, Gúzman, Carf y Garf, 2018).

La relación entre el espacio habitado y el edificado es una relación que se ha abordado tradicionalmente desde el paradigma de la habitabilidad. Para México se ha convertido en una condición sustantiva de investigación, como resultado de la producción de vivienda social basada en esquemas espaciales que no han favorecido la vida digna e inclusiva de amplios grupos de población en el país (CONEVAL, 2018). El diseño se ha sujetado a restricciones de índole normativo imperante en las disposiciones a nivel estatal y local, así como las propias del Plan Nacional de Vivienda (PNV) y las políticas públicas habitacionales de México por más de 60 años.

Problemática actual

La mixteca oaxaqueña es una de las regiones más pobres y marginadas del país, está conformada por 155 municipios, de los cuales 46 presentan un grado muy alto de marginación, 48 grados de marginación alto, 59 grado de marginación medio y solamente dos municipios presentan grado de marginación considerado como bajo; es decir, que poco más del 60 % de los municipios de la Mixteca presentan un grado de marginación entre alto y muy alto (Ramales, Coronado y García, 2014). Por la falta de vivienda digna y de servicios básicos (ver tabla 1); existen asociaciones civiles que han apoyado para el mejoramiento a las viviendas de esta región, como es el caso de la Fundación Ayú. A. C. (AYU, 2023), quienes implementaron proyectos para las comunidades (ver tabla 2), que comprende desde la entrega de recursos, entrega y distribución de materiales, reunión de asambleas y asistencia técnica, así como el registro de avance y término de obra, lo cual forma parte de su programa de vivienda rural, el cual benefició a las comunidades de Santiago Amatlán, El Fortín Alto y San Miguel Chichahua.

Tabla 1. Total de viviendas y servicios

	Santiago Amatlán	El Fortín Alto	San Miguel Chichahua
Viviendas habitadas	134	214	71
Electricidad	97.76 %	93.46 %	97.18 %
Agua	100 %	87.38 %	97.18 %
Excusado o sanitario	34.33 %	32.71 %	30.99 %
Internet	5.22 %	26.64 %	12.68 %

Fuente: INEGI (2020).

Tabla 2. Total de habitantes

	Santiago Amatlán	El Fortín Alto	San Miguel Chichahua
Total habitantes	392	796	284
Mujeres	209	441	142
Hombres	183	355	142
Hablantes de una lengua indígena	0.77 %	70.23 %	60.92 %

Fuente: INEGI (2020).

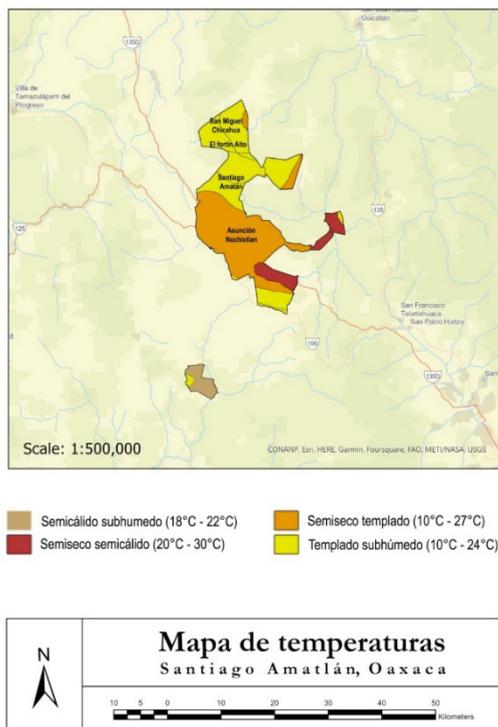
La elección de estas comunidades formó parte de los proyectos que elabora la Fundación y los(as) representantes técnicos(as), por los niveles migratorios de población y por las características con las cuales cumple y apoya la Fundación Ayú, quien construyó, de manera masiva, viviendas modelo. Con la aplicación de la metodología se encontraron las problemáticas que enfrentan los(as) habitantes de estas casas, así como los servicios básicos de los cuales carecen. Dentro de las problemáticas se enlista la mala planeación y ejecución de las viviendas modelo.

La cabecera distrital de Asunción Nochixtlán, Oaxaca, que también es la cabecera municipal, forma parte de los 570 municipios que conforman al estado de Oaxaca; los municipios estudiados fueron: San Miguel Chichahua (del náhuatl: Chichahua “Cerro Fuerte”), con una altura de 2 080 msnm, dentro de la región mixteca. Su cabecera es la localidad homónima. Además, cuenta con dos agencias municipales, El Fortín Alto y la Corregidora Tierra Colorada. Su clima es templado subhúmedo con lluvias en verano en el 96 % de su territorio, y semiseco templado en el 4 % restante. El rango de temperatura promedio es de 14 °C a 16 °C, la mínima

promedio es de 4 °C a 5 °C y la máxima es de 26 °C a 28 °C. El rango de precipitación media anual es de 600 a 800 mm y los meses de lluvias van desde noviembre hasta mayo (INEGI, 2023).

Santiago Amatlán está situado en el municipio de Asunción Nochixtlán, a 2 305 metros de altitud (INEGI, 2023); con una temperatura promedio de 19 °C; una máxima de 27 °C, una velocidad del viento de 10.7 km/h (ver figura 1).

Figura 1. San Miguel Chichahua y las localidades Santiago Amatlán y El Fortín Alto



Fuente: ArcGIS (2023).

La herramienta empleada para el diagnóstico virtual fue un análisis geográfico para determinar extensión y límites territoriales, superficie, localización por medio del programa ArcGIS 2022.

Para que la vivienda y su entorno posea habitabilidad, tendrá que ser sustentable, esto con el fin de promover el uso eficiente de los recursos y, poder disfrutar de un ambiente que tenga capacidad de satisfacer las necesidades, enfocadas a una búsqueda de mejoramiento de sus condiciones de vida.

Estudios de caso

Los estudios que se realizaron durante la visita *in situ* el 29 de octubre del 2022 y 7 de febrero del 2023 en diferentes viviendas y zonas que conforman las localidades de los municipios de Santiago Amatlán y San Miguel Chicahua así como una de sus agencias que es El Fortín Alto, monitoreando 20 viviendas: 13 de San Miguel Chicahua, 4 de Santiago Amatlán y 3 del Fortín el Alto, permitieron obtener los siguientes resultados:

Vivienda modelo

Como menciona Martínez Luna (2010) la comunalidad es un modo de vida organizativa de los pueblos originarios sobre

su autonomía y autodeterminación, y su modelo de organización sociopolítica. Durante los recorridos *in situ*, se recolectaron diversos datos, como la revisión de archivos, observación, entrevistas y reporte fotográfico; se observó el prototipo del modelo de vivienda (ver figuras 2 y 3), se visualizó que no había estudios de sitio por parte de los constructores, en los criterios técnicos para una vivienda adecuada como lo menciona la CONAVI (2019), el cual aclara criterios de diseño arquitectónico, especificaciones por zona climática y la sustentabilidad no cumple con los requerimientos mínimos como son I. Características de diseño de una vivienda adecuada: espacios habitables, especificaciones por zona climática y espacios habitables. II. Seguridad estructural de la vivienda adecuada y III. Sustentabilidad en la vivienda. La pérdida del patrimonio vernáculo; las actuales son denominadas vivienda modelo o prototipo muchas de ellas derivadas de programas sociales gubernamentales, en el caso de esta comunidad, es por parte de la Fundación Ayú, ya que son replicadas de manera masiva en comunidades catalogadas como marginadas, en la gran mayoría del estado de Oaxaca (ver figuras 2, 3, 4, 5 y 6).

Figura 2 y 3. Prototipo: planta arquitectónica y fachada de la vivienda



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4. Fachada e interior de las viviendas



Fuente: Elaboración propia.

La imagen (a) es la fachada de la primera vivienda en Santiago Amatlán; b) Interior de la primera vivienda en Santiago Amatlán; c) Fachada poniente de la segunda vivienda en Santiago Amatlán; d) Interior de la segunda vivienda en Santiago Amatlán.

Figura 5. Vivienenda en Fortín Alto



Fuente: Elaboración propia.

La imagen (a) es la vista norte de la primera vivienda en El Fortín Alto; (b) Vista este de la segunda vivienda en El Fortín Alto; (c) Vista oeste de la tercera vivienda en El Fortín Alto; y (d) Interior de la tercera vivienda en El Fortín Alto.

Figura. 6 Vivienda en San Miguel Chichahua



Fuente: Elaboración propia.

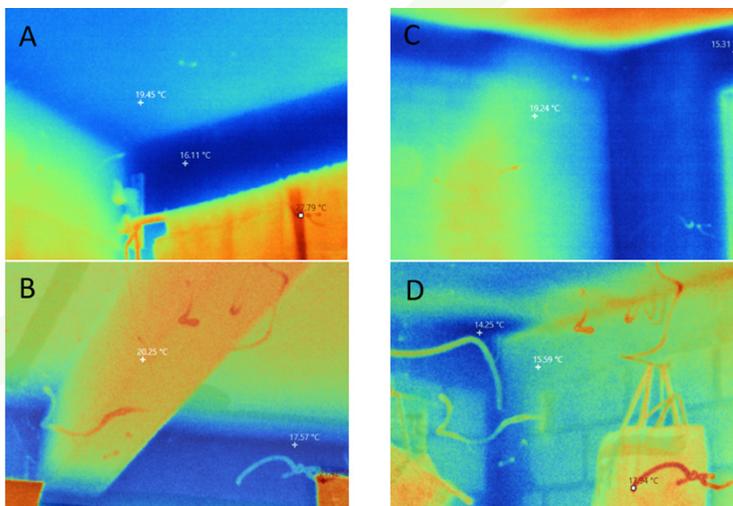
300

La imagen (a) es la vista oeste de la primera vivienda en San Miguel Chichahua; b) Interior de la primera casa visitada en San Miguel Chichahua; c) Fachada de la cuarta vivienda en San Miguel Chichahua; d) Interior de la cuarta vivienda en San Miguel Chichahua.

Termografía digital

Para el estudio termográfico, se tuvo el apoyo de una cámara termográfica Fluke FLK-Ti400 9Hz, donde se identificó, mediante radiación infrarroja, la temperatura de los elementos estructurales de las viviendas modelo, aplicando el estudio en su interior y exterior, permitiendo obtener resultados que se muestran en las siguientes figuras 7, 8 y 9. Todas las viviendas fueron construidas con tabicón pesado, elaborado en la comunidad; se realizaron fichas técnicas de la envolvente de la vivienda en muros y cubiertas, determinando las propiedades termo físicas de los materiales de construcción.

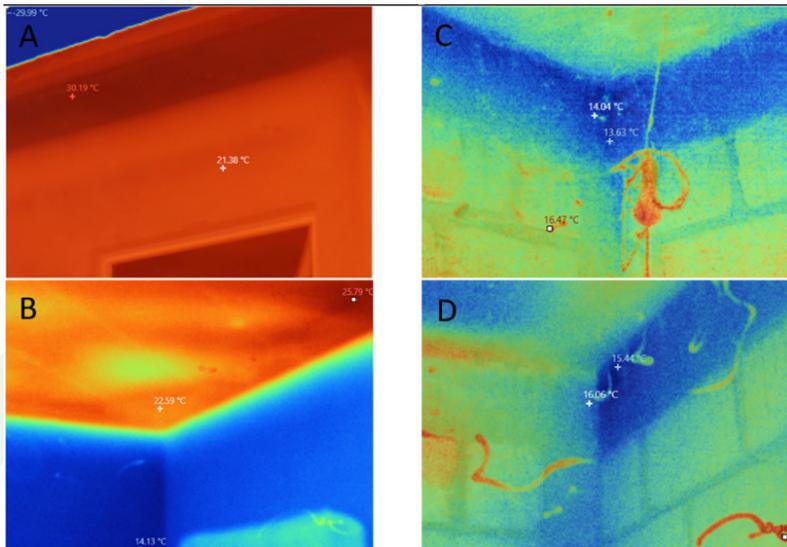
Figura 7. Comunidad San Miguel Chicahua



Fuente: Elaboración propia.

En la imagen (a) se muestra en la termografía en la segunda vivienda muro sur, temperatura promedio de 19.45° C; en la (b) Termografía en la tercera vivienda muro oriente temperatura promedio de 20.25° C; por su parte, en la (c) es la termografía en la cuarta vivienda muro oriente, temperatura promedio de 19.24° C; por último, en la (d) aparece la termografía en la primera vivienda muro poniente, temperatura promedio de 15.59°

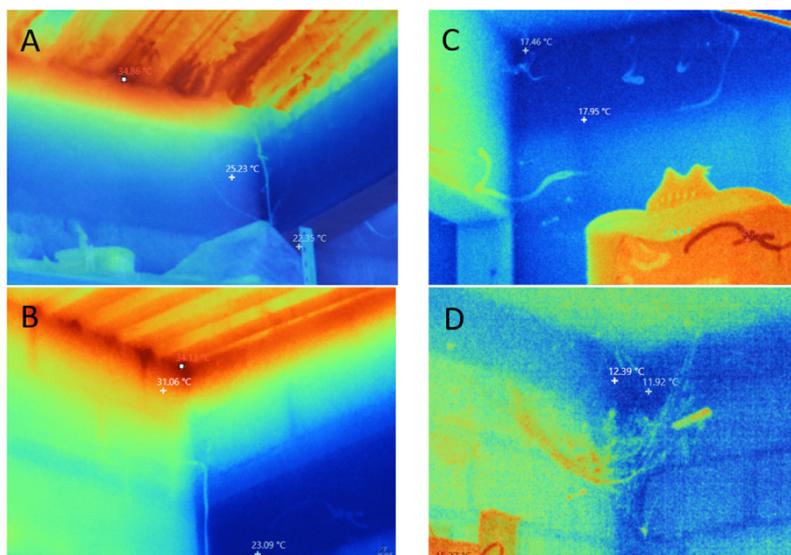
Figura 8. Comunidad El Fortín Alto



Fuente: Elaboración propia

En la imagen (a) se muestra la termografía en la segunda vivienda muro oriente, temperatura promedio de 21.38° C; (b) Termografía en la segunda vivienda interior de cubierta, temperatura promedio de 22.59° C; (c) Termografía en la primera vivienda muro oriente, temperatura promedio de 14.04° C; (d) Termografía en la primera vivienda muro poniente, temperatura.

Figura 9. Comunidad de Santiago Amatlán



Fuente: Elaboración propia.

La primera imagen muestra la termografía en la primera vivienda muro oriente, temperatura promedio de 25.23° C; b) Termografía en la primera vivienda muro norte, temperatura promedio de

23.09° C; c) Termografía en la segunda vivienda muro sur, temperatura promedio de 17.95° C; d) Termografía en la segunda vivienda muro poniente, temperatura promedio de 13.29° C

Estación meteorológica portátil

Se llevó a cabo un estudio climático del lugar para determinar las variables de ambiente interior de una vivienda de autoproducción, construidas de muros de tabicón y losa de concreto y solo una vivienda de cubierta de lámina y losa de concreto, que se presentan en la zona de estudio, tomando en cuenta las normales climatológicas de Asunción Nochixtlán, Oaxaca, y los datos obtenidos por el estudio con estación meteorológica portátil (Thermo-Anemometer with Light) y se programó e instalaron dispositivos HOBO data logger temp RH2 ext channels por medio del software HOBOWare los días de visita y durante las horas vespertinas, son los mostrados en la tabla 3. El viento en las zonas de estas localidades es variable, derivado de las diferentes alturas sobre el nivel del mar.

Tabla 3. Datos obtenidos con estación meteorológica portátil

LOCALIDAD	TEMPERATURA	HUMEDAD	VELOCIDAD DEL VIENTO	BULBO HÚMEDO	SENSACIÓN TÉRMICA
DATOS OBTENIDOS EL 29 DE OCTUBRE DEL 2022					
Santiago Amatlán	20.7° C	56.0 %RH	3.3 MPH	15.5° C	21.1° C
El Fortín Alto	22.1° C	54.6 %RH	5.1 MPH	16.4° C	21.8° C
San Miguel Chicahua	25.1° C	47.0 %RH	2.5 MPH	14.8° C	25.1° C
DATOS OBTENIDOS EL 07 DE FEBRERO DEL 2023					
Santiago Amatlán	26.0° C	20.0 % RH	1.8 MPH	12.7° C	26.4° C
El Fortín Alto	26.2° C	23.2 %RH	4.0 MPH	13.4° C	22.3° C
San Miguel Chicahua	29.4° C	22.1 %RH	3.2 MPH	13.2° C	22.3° C

Fuente: Elaboración propia con base en datos proporcionados por estación meteorológica, 2022.

Metodologías aplicadas *in situ*

Dentro de las metodologías de manera presencial, se realizaron dos visitas de campo, el 29 de octubre de 2022 y el 7 de febrero de 2023, a las tres localidades, para identificar sus condiciones socioambientales y ambientales, aplicando el método etnográfico (Restrepo, 2016), se aplicaron encuestas elaboradas por el modelo de desarrollo de un modelo de producción social replicable de vivienda y hábitat, como técnica para la concentración de información, lo que permitió conocer las condiciones y características de las viviendas modelo o también llamadas de autoproducción. En esta se etapa se recopiló la información obtenida *in situ*, siendo

el responsable el Dr. Raúl Pavel Ruíz Torres, de la Facultad de Arquitectura, de la Universidad Autónoma de Chiapas

La concentración de la información obtenida en las guías aplicadas para los diferentes rubros, permiten conocer las deficiencias que actualmente se viven dentro de las comunidades, favorablemente permite realizar los análisis respectivos para la habitabilidad y técnicas constructivas. En las siguientes gráficas se muestran los valores obtenidos después de ser aplicadas las guías en las diferentes comunidades.

En la comunidad de Santiago Amatlán, se entrevistaron a los habitantes de 4 viviendas conformadas; la primera vivienda con un total de 4 personas; la segunda con 3 personas, la tercera con 3 personas y la cuarta con 5 personas, señalaron lo siguiente:

- El 100 % manifestó contar con servicio de agua.
- Las personas que habitan las 4 viviendas manifestaron contar con energía eléctrica.
- A la comunidad no se le brinda el servicio de recolección de basura, provocando que se dé la quema de residuos sólidos.
- Solamente 2 viviendas cuentan con acceso a internet.
- Las viviendas carecen de un sistema de drenaje.
- El 50 % de las personas que habitan las 4 vivienda considera que los servicios con los que cuentan son de calidad y el otro 50 % opina que no lo son, ya que aún carecen de servicios indispensables.
- El 100 % de las personas entrevistadas considera que los precios por los servicios de electricidad y agua son accesibles.

- Las personas que habitan 2 viviendas accedieron a un préstamo por parte de la Fundación Ayú y las que residen en las otras 2 viviendas no requirieron ningún préstamo para construir su casa.
- 2 viviendas se encuentran escrituradas y las otras 2 aún no.

Para la comunidad de El Fortín Alto, fueron entrevistados los habitantes de 3 viviendas conformadas cada una por mamá, nuera y nieto(as) se obtuvo la siguiente información:

- Las personas de las 3 viviendas manifestaron contar con el servicio de agua.
- El 100 % de las viviendas dispone del servicio de energía eléctrica.
- Ninguna de las 3 viviendas cuenta con los servicios de drenaje, recolección de basura e internet.
- Las personas que habitan 2 viviendas consideran que los servicios a los cuales tienen acceso son de calidad y en 1 vivienda consideran que no lo son.
- Las personas que habitan 1 vivienda consideran que los servicios son accesibles económicamente y aquellas que habitan 2 viviendas manifiestan que no lo son.
- Las personas que habitan 1 vivienda accedieron a un préstamo por parte de la Fundación Ayú para construir su vivienda y, las otras 2 casas no lo hicieron.
- 1 vivienda se encuentra escriturada y 2 no lo están.

En la comunidad de San Miguel Chichahua fueron entrevistadas las personas que habitan 13 viviendas, de las cuales, en cada vivienda vive una familia considerada de 4 personas, donde los resultados fueron:

- El 100 % señaló que cuenta con el servicio de agua en su vivienda.
- El 100 % cuenta con energía eléctrica.
- Solo 2 viviendas cuentan con el servicio de drenaje y las once restantes, cuentan con fosa séptica o letrina.
- El 61.5 % de las personas entrevistadas (8 viviendas) indicó contar con el servicio de internet.
- Las viviendas cuentan con el servicio de recolección de residuos, 7 de estas utilizan dicho servicio y las 6 viviendas restantes optan por quemarlos.
- Solamente las personas que habitan 8 viviendas consideran que los servicios que tienen son de calidad y aquellas que viven en las otras 5 consideran que no lo son.
- Las personas que habitan 8 viviendas consideran que sus servicios son accesibles económicamente, y aquellas que habitan las otras 5 viviendas consideran que no son accesibles, debido a los altos precios que pagan.
- Únicamente las personas que habitan 3 viviendas recibieron el apoyo de la Fundación Ayú y aquellas que habitan las 10 viviendas restantes no fueron beneficiadas
- 4 viviendas cuentan con escrituras y 9 restantes no tienen este documento.

Conclusiones

La fase de diagnóstico, las fotografías y videos grabados evidenciaron lo observado en las comunidades durante las diversas visitas y actividades que se llevaron a cabo. Los instrumentos diseñados por el proyecto “Desarrollo de un modelo de producción social replicable de vivienda y hábitat”, para las respuestas se utilizó la escala de valoración Likert, encontrándose la no habitabilidad en los espacios que fueron diseñados para las viviendas de autoproducción.

Los resultados obtenidos de la etnografía en campo son los siguientes:

Territorio: Infraestructura carretera principal pavimentada con vías principales y secundarias de concreto, las vías terciarias son de terracerías. Las viviendas tradicionales son casi nulas; las que existen están construidas con adobe, y algunas entremezcladas con adobe y concreto. El paisaje territorial muestra características rurales, pues se observa una gran cantidad de terrenos con siembra de maíz.

Cultural: Hablantes del idioma mixteco y de la vestimenta tradicional de las mujeres, y pérdida de esta en los hombres. Artesanía de palma y tejidos en telar de cintura. La religión que prevalece es la católica y tienen un culto ritual cosmológico. Las fiestas en la comunidad se enmarcan en el calendario religioso católico. Los valores presentes: comunalidad,

tequio, guelaguetza, ayuda mutua y colaboración.

Social y económica: Los fondos de remesas son una parte de la economía de estas poblaciones, el autoconsumo de su agricultura, animales de crianza y los bordados forman parte de su economía. Las áreas de comercio son pocas, teniendo el día de tianguis de Asunción Nochixtlán para surtirse de los víveres.

Ambiente: No carecen de agua potable en las poblaciones, ya que en su vegetación predominan los árboles como las cactáceas, oyameles, pastizales, frutales y ocote; teniendo disponibilidad de bancos de materiales para la construcción.

Vivienda: Las viviendas vernáculas o tradicionales han sido reemplazadas por casas de autoproducción o estilo americano como es el caso de la población de Fortín el Alto de hasta dos niveles de construcción. Del total de viviendas de autoproducción, el 40 % se utiliza para la crianza de los animales y el porcentaje restante se usan solo para habitar, sin confort y habitabilidad.

Las personas que habitan las comunidades tienen un alto nivel de migración y emigración a las ciudades, por la falta de empleos que carecen las localidades. Los apoyos económicos que perciben son de los(as) migrantes para obras en beneficio a sus comunidades, así como en México y Centroamérica, los países donde acontecen conflictos de tipo armado,

religioso, de lucha por los recursos naturales: “el necropoder destierra a los migrantes y los pobres a espacios diferentes que transforman el proyecto de vida, volviéndola invivible o inviable en el nivel individual y social” (Estevez, 2018).

En las comunidades de El Fortín el Alto y San Miguel Chichahua se encontró que la temperatura promedio mínima es de 4 °C a 5 °C y la máxima de 26 °C a 28 °C; en cambio, en Santiago Amatlán la temperatura promedio mínima es de 5 °C. temperatura máxima 27 °C. Las temperaturas máximas mensuales apenas alcanzan la zona de confort en los meses de marzo y mayo, la temperatura mínima mensual se presenta todo el año por debajo de la zona de confort. Con los datos obtenidos a través de la cámara termográfica se ubican a las localidades con un bioclima semifrío, cuyas características son días muy frescos con poco porcentaje de confort, descendiendo en las noches a temperaturas frías.

El clima frío de alta montaña registra condiciones térmicas muy similares durante todo el año, por lo que podría considerarse que cuenta con una temporada climática templada y otra fría, donde el promedio anual de temperatura es de 13 °C, aproximadamente; las temperaturas máximas se mantienen en los 20 °C, y las temperaturas bajas pueden ubicarse cerca de los 5 °C. Con lo anterior se define que, en esta región, la oscilación térmica puede ser mayor a los 10 K (10 °C) (Servicio Meteorológico Nacional, 2021).

Las posibles estrategias para mayor habitabilidad de las viviendas de autoproducción con muros de tabicón deberían ser: muros de adobe con configuración compacta y ganancias internas para evitar fugas excesivas de energía, y así conservar la temperatura en los espacios interiores, además de una buena protección contra la lluvia y vanos menores al 50 % del área total del muro, los cuales se recomienda que sean horizontales y que las techumbres sean ligeras y aisladas, de acuerdo con la información que aportó la CONAVI en el 2020 en el manual *Estrategias de diseño arquitectónico con enfoque bioclimático. Criterios técnicos para una vivienda adecuada*. En los estratos arbóreos del Noroeste y Norte se deben incluir especies arbóreas caducifolias que cubran la construcción con su follaje en meses que pudieran ser cálidos y permitan el paso del asoleamiento el resto del año (CONAVI, 2020) (ver figura 10).

Figura 10. Materiales adecuados para clima frío

Materiales naturales				
Sistemas constructivos		Adecuado	Condicionado	No recomendado
Muros	Masivo	Súper adobe - Tierra apisonada - Adobe - Cob - Tapia	Piedra	
	Ligero	Paja arcilla - Madera	Bahajareque - Paneles de paja	Bambú - Celosía
	Aislante	Fibras naturales		
Cubiertas	Masivo	Terrados		
	Ligero	Teja de barro rojo recocido	Madera	Palapa
	Aislante	Fibras naturales		
Pisos y entresijos	Masivo	Tierra apisonada - Tierra mejorada con cal	Piedra	
	Ligero	Adoquín - Loseta de barro rojo recocido - Terrado	Madera	Bambú
	Aislante			
Acabados		Aplanados de tierra y paja - Loseta de barro rojo recocida - Pintura de cal - Textiles	Aplanados de cal - Impermeabilizante de jabón y alumbre - Madera - Enlucidos de cal	

Fuente: CONAVI 2020.

Se realizaron las entrevistas a constructores(as), además de encuestas a los(as) habitantes y guía de observación para conocer las deficiencias que se tienen y viven dentro de las comunidades.

La recopilación que se obtuvo en Santiago Amatlán fue que la calidad de las viviendas es regular debido a que la mayoría presenta problemas de asoleamiento durante el día, la comunidad

carece de los servicios de drenaje y recolección de residuos que causa la quema de estos, los servicios con los que sí cuentan deben mejorarse.

En El Fortín Alto la calidad de las viviendas es buena debido a que los(as) habitantes no presentan problemas dentro de las viviendas y las consideran seguras, en Santiago Amatlán carecen de los servicios de drenaje y recolección de residuos y, por el contrario, consideran que los servicios con los que cuentan son buenos.

En San Miguel Chicahua, la mitad de los(as) habitantes considera la calidad de su vivienda regular y la otra mitad buena, pese a encontrarse en una zona contaminada o en peligro, los problemas dentro de la vivienda son de asoleamiento y temperatura. La mayoría de las personas están de acuerdo en utilizar materiales que se encuentran en la localidad para la construcción de sus viviendas y recibir asesoramiento técnico.

314

Referencias

- AYU, F. (2023, 22 de febrero). *Fundación Ayú*. fundacionayu.org.mx
- CONAVI. (2020, 19 de febrero). *Estrategias de diseño Arquitectónico con enfoque bioclimático. Criterios Técnicos para una vivienda adecuada*. <https://siesco.conavi.gob.mx/doc/tecnicos/disenol/Estrategias%20de%20Dise%C3%B1o%20Arquitectonico.pdf>

- CONEVAL. (2018). *Principales retos en el ejercicio del derecho a la vivienda digna y decorosa*. Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo. chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcgclclefindmkaj/https://www.coneval.org.mx/Evaluacion/IEPSM/Documents/Derechos_Sociales/Dosieres_Derechos_Sociales/Retos_Derecho_Vivienda.pdf
- Estevez, A. (2018). *Biopolítica y necropolítica: ¿constitutivos u opuestos?*, 25. *Espiral, Estudios sobre Estado y Sociedad*. <https://doi.org/10.32870/espiral.v25i73.7017>
- Garfías, A., Guzmán, A., Carf, G. y Garf. (2018). *Metodología para el análisis de la habitabilidad urbana.*, XXXIX. *Arquitectura y Urbanismo*. <https://www.redalyc.org/journal/3768/376858935007/html/>
- INEGI. (2022, 12 de febrero). <https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/ccpv/>
- INEGI. (2022, 12 de febrero). *Compendio de información geográfica municipal, San Miguel Chichahua Oaxaca* https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/20/20264.pdf
- Luna, J. (2010). *Eso que llaman comunalidad*. CONACULTA. <chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcgclclefindmkaj/https://kuxtikotxokotxikitutik.files.wordpress.com/2018/07/eso-que-llaman-comunalidad.pdf>
- Ramales, M. C., Coronado, M. A. y García, R. (2014). Pobreza multidimensional y derechos humanos: situación actual en la mixteca oaxaqueña en el contexto de la política económica nacional. *Contribuciones a las Ciencias Sociales*, 1. <https://www.eumed.net/rev/cccss/29/mixteca.html>

Restrepo, E. (2016). *Etnografía: alcances, técnicas y éticas*. Pontificia Universidad Javeriana. chrome-extension://efaidnbmnnnibpca-pcgklclefindmkaj/https://www.ram-wan.net/restrepo/documentos/libro-etnografia.pdf

Servicio Meteorológico Nacional. (2021, 19 de febrero). *Normales climatológicas por estado*. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/normales-climatologicas-por-estado>

HACIA UNA CONCEPCIÓN DE LA VIVIENDA Y HÁBITAT
EN UN AMBIENTE CONSTRUIDO

se terminó de editar en diciembre de 2023

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México



Este LIBRO publica artículos científicos producto de un proyecto a nivel nacional del Proyecto “Desarrollo de un modelo de producción social replicable de vivienda y hábitat” con numero de solicitud 321260 del Proyecto PRONACES-CONACYT, novedoso en las áreas relacionadas con la arquitectura, ciencias del hábitat e ingenierías. El fenómeno de la vivienda relacionado con aspectos de sustentabilidad se ha convertido para los investigadores y profesionales parte de estudios de manera integral y multidisciplinario, es un gran esfuerzo que representan un avance invaluable hacia lograr el desarrollo sustentable de hábitat de nuestro país.

