

## Del agave a la arquitectura en tierra. Aprovechamiento de fibras naturales de los desechos de la agroindustria en la fabricación del adobe biocompósito

Mauricio Ruiz Serrano, Héctor Serrano Barquín, Andrés Ruiz Serrano

**Resumen:** El adobe es resistente a cambios súbitos de temperatura y al fuego, actuando como una eficaz barrera térmica y acústica en la construcción de viviendas. Este artículo investiga las propiedades térmicas, de resistencia, compresión, plasticidad y absorción del adobe biocompósito, proponiendo que la combinación de adobe con bagazo de agave mejora significativamente su eficiencia en comparación con los bloques compuestos de zacate, fibra de agave y tierra. El estudio se realizó en una zona productora de mezcal y adobe tradicional en el Estado de México, en línea con los principios de la economía circular. Los resultados indican que el adobe enriquecido con bagazo de agave presenta varias mejoras en sus propiedades físicas y mecánicas, lo que reduce su impacto ambiental. Esta investigación resalta la importancia del adobe como elemento fundamental en la revaloración de la arquitectura de tierra, contribuyendo al fomento de la identidad patrimonial edificada.

**Palabras clave:** adobe biocompósito, arquitectura de tierra, edificación sustentable, bagazo de agave

### From agave to earthen architecture. Use of natural fibers from agro-industrial waste in the manufacture of biocomposite adobe

**Abstract:** Adobe is resistant to sudden temperature changes and fire, acting as an effective thermal and acoustic barrier in construction. This article investigates the thermal, resistance, compression, plasticity and absorption properties of biocomposite adobe, proposing that the combination of adobe with agave bagasse significantly improves its efficiency compared to blocks composed of zacate, agave fibers and soil. This study was conducted in a mezcal and traditional adobe producing area in the State of Mexico, in line with the principles of circular economy. Results indicate that adobe enriched with agave bagasse presents several improvements in its physical and mechanical properties, which reduces its environmental impact. This research highlights the importance of adobe as a fundamental element in the revaluation of earthen architecture, contributing to the promotion of heritage identity.

**Keywords:** biocomposite adobe, earthen architecture, sustainable building, agave bagasse

### Do agave à arquitetura em terra. Aproveitamento de fibras naturais dos resíduos da agroindústria no fabrico do adobe biocompósito

**Resumo:** O adobe é resistente a mudanças súbitas de temperatura e ao fogo, atuando como uma eficaz barreira térmica e acústica na construção de habitações. Este artigo investiga as propriedades térmicas, de resistência, compressão, plasticidade e absorção do adobe biocompósito, propondo que a combinação de adobe com bagaço de agave melhora significativamente a sua eficiência em comparação com os blocos compostos de zacate, fibra de agave e terra. O estudo foi realizado numa zona produtora de mezcal e adobe tradicional no Estado do México, em linha com os princípios da economia circular. Os resultados indicam que o adobe enriquecido com bagaço de agave apresenta várias melhorias nas suas propriedades físicas e mecânicas, o que reduz o seu impacto ambiental. Esta investigação destaca a importância do adobe como elemento fundamental na revalorização da arquitetura em terra, contribuindo para o fomento da identidade patrimonial construída.

**Palavras-chave:** adobe biocompósito, arquitetura em terra, edificação sustentável, bagaço de agave

## Introducción

La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha reconocido que la vivienda es un espacio que debe brindar bienestar y confort a todo ser humano, estableciendo que todo individuo requiere de un ambiente digno, que le ayude a su crecimiento integral, emocional, físico y mental (WHO 2018). La vivienda es un espacio trascendental para el ser humano, ya que en ella realiza diversas actividades que le son de gran significado, tanto social como económico. Es por ello que la vivienda debe representar un espacio habitable, cómodo, seguro, asequible y sobre todo sustentable.

El concepto de sustentabilidad se funda en el reconocimiento de los límites y potenciales de la naturaleza, inspirando una nueva comprensión del mundo para enfrentar los desafíos de la humanidad (Alem 2003). Es así como la definición de sustentabilidad promueve una alianza entre la naturaleza y la cultura, fundando un nuevo marco teórico para la economía moderna: la economía circular. En esencia, la economía circular es un sistema económico que pretende minimizar los residuos y aprovechar al máximo los recursos. Implica repensar y rediseñar productos y procesos para mantener los materiales en su máxima utilidad y valor a lo largo de su ciclo de vida (Murray, Skene & Haynes 2017). Al reutilizar residuos en nuevos procesos de manufactura, como el bagazo de agave y al mantener su utilidad incorporándolo a un material de construcción duradero como el adobe, se asegura el desarrollo y la continuidad de una economía circular en la construcción de viviendas.

La bioconstrucción es indudablemente la solución para la edificación sustentable. De acuerdo con Pinas et al. (2020), es imprescindible considerar las técnicas bioclimáticas para proporcionar un ambiente térmico confortable en el interior de las viviendas. En su estudio, estos autores analizaron la conductividad térmica de algunos elementos que componen las viviendas, incluyendo adobe y tierra, y realizaron simulaciones de intercambio térmico entre dichos componentes. Concluyeron que el adobe mostró un desempeño térmico y mecánico favorable. En otro estudio, Salih et al. (2020) observaron que el ladrillo de adobe mejorado tiene un mejor desempeño cuando se le agrega una combinación de aditivos residuales, es decir, el uso de materiales de desecho.

La elaboración de viviendas basada en el conocimiento de la arquitectura de tierra se remonta a tiempos prehispánicos. Sin embargo, dichos saberes se fueron diluyendo a través del tiempo, y con ello, las tradiciones indígenas en la construcción. El conocimiento etnopedológico (Gama-Castro et al. 2012) y la suma de estos saberes ancestrales muestran un amplio dominio sobre el entorno ambiental, uso y manejo del suelo, clasificación y modificación de materiales de construcción. En la transformación de los materiales del suelo, el constructor indígena se basaba en la adición de un conjunto de compuestos de origen

litológico, incluso orgánico, denominados desgrasantes. A través de la manipulación y estabilización de propiedades como la plasticidad, adhesividad, compactación, porosidad y fundente, los constructores indígenas mejoraban los bloques de adobe con la incorporación de materiales orgánicos. Este proceso subraya la importancia de la arquitectura como un elemento crucial del patrimonio cultural e identitario (Gama-Castro et al. 2012). De este modo, el adobe fue incorporando diversos elementos para su mejora en la edificación.

La arquitectura de tierra, apropiada para las condiciones climatológicas de la mayoría de países en vías de desarrollo, consume menos energía en su producción comparada con el uso de cemento y otros materiales de construcción modernos. Su eficiente uso destaca su estética y refuerza la identidad cultural de las comunidades que la adoptan (José 2002). Además de contribuir a la preservación de aspectos culturales e identitarios, este tipo de arquitectura y técnica de construcción es sumamente sustentable, dada la abundancia de tierra como recurso renovable. La escasa divulgación del conocimiento empírico sobre la arquitectura de tierra ha oscurecido las ventajas del adobe en la construcción moderna, a menudo obstaculizando el desarrollo de nuevos paradigmas para resolver problemas específicos relacionados con materiales que usan el suelo y la tierra como materia prima (Gama-Castro et al. 2012).

El resurgimiento y reevaluación de la arquitectura vernácula mexicana y sus materiales de construcción ha sido notable en las últimas décadas. A diferencia de la arquitectura High Tech, la arquitectura popular gira entorno a la sustentabilidad, la estética, las propiedades térmicas y acústicas del adobe, características asociadas con la arquitectura Low Tech. Este tipo de arquitectura exalta la tradición, la identidad local, las habilidades artesanales de construcción y la continuidad histórica mediante el uso del adobe.

Si bien las fachadas que muestran el uso del adobe se identifican en muchos pueblos típicos, la mayoría lo ocultan bajo aplanados, revestimientos y pintura. Esto contrasta con la dominante arquitectura modernista del siglo XX y principios del XXI, la cual favorece materiales como el concreto, el vidrio, el aluminio y la cerámica, alejándose de los valores vernáculos. Esta tendencia eclipsó los valores identitarios locales, dando lugar a una nueva tipología formal en la arquitectura global a partir de los años cincuenta (de Anda Alanís 2006). Sin embargo, actualmente se observan edificaciones que combinan elementos nacionales e internacionales utilizando el adobe como material principal.

El creciente interés por lo vernáculo y nacional se refleja en la designación de 177 Pueblos Mágicos en México, un aumento significativo desde los 11 registrados entre 2000-2003. Esta tendencia ha impulsado el turismo, incrementando anualmente en un 8% el Valor Agregado Censal Bruto de los destinos nombrados Pueblos Mágicos.

Dicho reconocimiento de la arquitectura vernácula mexicana, en su mayoría construida con adobe, ha elevado su valor a nivel nacional e internacional (Revista Digital de la Secretaría de Turismo 2023). La aplicación del adobe en la construcción habitacional en Pueblos Mágicos y conjuntos residenciales refuerza la identidad arquitectónica patrimonial y promueve el turismo. No obstante, existen prejuicios sobre su resistencia y durabilidad en comparación con el concreto armado y otros materiales modernos, los cuales demandan altos niveles de energía en su producción. Esta investigación busca revalorizar las cualidades culturales y sustentables inherentes del adobe en la edificación como elemento identitario de nuestras comunidades y poblaciones (Castillo Levicoy y Pérez Lira 2020).

Es importante destacar que el adobe es un material reciclable por naturaleza, es decir, cuando las viviendas son abandonadas, su material se convierte nuevamente en tierra, se reintegra al ecosistema o, si dichas estructuras están parcialmente dañadas pueden ser restauradas con facilidad. Debido a que el adobe ha sido un componente esencial en la evolución de la vivienda humana, desde sus formas más primitivas hasta la actualidad, siendo una opción sustentable y a escala humana (Domínguez Vega 2010), esta investigación busca contribuir a la legitimación de la arquitectura de tierra.

Además de sus múltiples beneficios, el adobe tiene un papel crucial en la preservación del patrimonio arquitectónico. El empleo de la tierra en la restauración y mantenimiento de viviendas se alinea con la tendencia contemporánea hacia la conservación sustentable de bienes patrimoniales y culturales, lo cual implica el uso de materiales apropiados en las intervenciones. Este enfoque se basa en la importancia y el alcance histórico-cultural de estos bienes, a pesar de los desafíos que presenta su conservación (Liberotti y Daneels 2012).

La calidad de la vivienda es un factor determinante en la comprensión de la pobreza energética, ya que la eficiencia térmica de su diseño y materialidad influye en su capacidad para proteger a sus ocupantes de las condiciones ambientales y en la demanda energética necesaria para mantener temperaturas saludables y confortables. Calvo *et al.* (2020) sostienen que las normativas o estándares de calidad de la envolvente térmica de la vivienda pueden garantizar una mejor calidad de vida, por lo que es esencial incentivar a los usuarios a optar por viviendas energéticamente eficientes. Sin embargo, la información sobre la calidad de la envolvente térmica es limitada por dos razones. En primer lugar, una vivienda de alta eficiencia energética tiene altos costos iniciales, lo que dificulta su accesibilidad para la mayoría de los hogares. En segundo lugar, los elevados costos del suelo en las ciudades latinoamericanas, especialmente en la vivienda social, representan un obstáculo adicional. Sin embargo, la producción y el uso del adobe biocompósito pudiese aminorar dichas problemáticas.

El empleo de fibras vegetales, como en el caso del adobe, persiste en la construcción actual, similar a su uso en biocompósitos. Las fibras vegetales son valoradas como

un recurso cultural y económico, debido a su bajo costo de transformación y su uso en el patrimonio artesanal y cultural. La reinterpretación de la cultura, comprendida como una herencia, se manifiesta a través de un patrimonio natural y social en la relación entre naturaleza y ser humano. El adobe encarna valores de identidad en Latinoamérica. De acuerdo con Vázquez-García y Munguía-Lino (2015), estos valores pueden constituirse en temas socioculturales, económicos o tecnológicos, inscritos en una dinámica ambiental que los hace sustentables *per se*. Como parte esencial de los materiales de construcción, las fibras vegetales han contribuido a la identidad y durabilidad del patrimonio cultural y artesanal a través del paso del tiempo (Islas 2014). Estas fibras poseen excelentes propiedades mecánicas y físicas, compitiendo con fibras derivadas de fuentes no renovables como el petróleo.

### Consideraciones técnicas del adobe y fibras de cohesión

Los sistemas constructivos se definen como los procedimientos técnicos y prácticas culturales que facilitan la creación de espacios edificados (Spengler y Ratto 2020). Se pueden identificar tres tipos fundamentales: monolíticos, como la técnica del tapial, de mampostería, utilizando piedra y materiales cerámicos, y mixtos. El saber ancestral prehispánico en la construcción con adobe, tapial, bahareque y pared de mano (muro monolítico de tierra enriquecido con abundante paja en estado plástico), o con caña y guadúa (*Guadua angustifolia*), ha llevado a que estos se clasifiquen como materiales alternativos en la arquitectura contemporánea (Ceballos 1992). Spengler y Ratto (2020) afirman que la inclusión de fibras vegetales y otros elementos en el adobe puede estar influenciada por el entorno natural del lugar de producción. Teniendo en cuenta los argumentos previos, la abundante presencia del agave en México y los principios de la economía circular, se sugiere la utilización de un adobe enriquecido con bagazo y fibra de agave.

Históricamente, se han incorporado fibras naturales al adobe para proporcionar cohesión y estructura. Recientes investigaciones han explorado la diversidad de fibras disponibles en diferentes regiones en Latinoamérica, con el objetivo de mitigar el impacto ambiental generado por el uso de fibras sintéticas en la producción de materiales compuestos tradicionales. Por ejemplo, en Colombia, Sánchez-Cruz, Capote-Rodríguez y Patiño-Quiazua (2023) diseñaron y caracterizaron materiales compuestos alternativos utilizando dos tipos de fibras: *Arundo donax* L. (Caña Brava) y *Guadua angustifolia* Kunth (Guadua), distribuyendo dichas fibras aleatoriamente en una matriz polimérica de aceite de ricino. Los autores concluyen que, a pesar de las ventajas de estos materiales en la construcción, es necesario determinar en profundidad el efecto de los parámetros de diseño en su desempeño mecánico.

En un estudio realizado por Sánchez-Cruz, Capote-Rodríguez y Cárdenas Pulido (2020), los investigadores exploraron el uso de fibras de bambú y su variante *Guadua*, en la producción de materiales de construcción. Sus resultados

revelan que los tratamientos superficiales pueden subdividir la microestructura de las fibras de bambú en microfibras, alterando su morfología, composición química y cristalinidad. Este hallazgo es relevante, ya que la resistencia a la tensión de las fibras se redujo aproximadamente un 20% tras la aplicación de un tratamiento alcalino en la superficie de las mismas.

En Brasil, se ha experimentado con fibras locales como la Curaua, las cuales presentan buenas propiedades mecánicas, un bajo costo de producción y baja densidad, sin embargo, suelen presentar una baja compatibilidad con polímeros no nativos y son térmicamente estables hasta aproximadamente 200° Celsius (Castro, Frollini, Marini y Ruvolo 2013). En Ecuador, se ha destacado la necesidad de buscar componentes adicionales para mejorar las propiedades mecánicas del adobe debido a su relativa fragilidad y baja resistencia a los sismos, a pesar de ser un material de construcción antiguo y accesible (Chuya Sumba y Ayala Zumba 2018). Esto ha llevado a la búsqueda de componentes adicionales para mejorar las propiedades mecánicas del adobe dentro de un marco de sustentabilidad con el fin de evaluar los reforzamientos en el sistema de muros portantes en zonas sísmicas (Chacón Sánchez *et al.* 2021). Lara Calderón y Bustamante (2022) realizaron un análisis tipológico de las construcciones de adobe, tapial y bahareque en 50 inmuebles situados en varias provincias de Ecuador. Los autores concluyen que se deben hacer correcciones para su mejor conservación. Proponen el uso de residuos en la fabricación de adobes y tapias, tales como fibra de coco, ceniza de cáscara de arroz, polvo de ladrillo, desperdicios de madera aserrada, fibras de maíz, té o de palmeras, escorias de alto horno, y, especialmente, plásticos, de los cuales únicamente el 2% es reprocesado.

Investigaciones realizadas en países de alta sismicidad como Perú han experimentado con fibras de Ichu reforzadas mediante tratamientos químicos superficiales. El estudio realizado por Gire Quispe y Cáceres Lupaca (2020) evaluó el comportamiento mecánico de la fibra antes y después del tratamiento. Sus resultados revelan que la formulación del material compuesto de Ichu-PLA presenta mejores propiedades mecánicas en tracción. Otros investigadores, como Li, Noori y Altabay (2021), han proporcionado pautas para mejorar el desempeño sísmico de los edificios con suelo crudo. Cárdenas-Gómez, Gonzales y Damiani (2021) analizaron técnicas constructivas con adobe, concluyendo que el adobe con fibra de caña ofrece seguridad a un costo reducido, menor impacto ambiental y mejor rendimiento térmico en climas fríos.

Roux Gutiérrez y Olivares Santiago (2002) experimentaron con la fibra de coco, demostrando que los ladrillos hechos con prensa hidráulica presentan una mejor absorción y permeabilidad, con una reducción del 23,12% y 47,09% respectivamente. Sin embargo, la fibra de coco incrementa la porosidad del material, lo que puede ser perjudicial en zonas húmedas. Por otro lado, Cobreros (2009) sugiere utilizar diversos materiales fibrosos como refuerzo de retracción, incluyendo sisal, cáñamo, estopa de coco, bonote, aserrín, paja de cereales o cáscara de arroz y hierbas.

A pesar de estos avances, la incorporación de fibras de agave en la producción de adobe no ha sido investigada detalladamente. A diferencia de las fibras sintéticas y algunas fibras naturales, el agave es un material de desecho, lo que contribuye a su reciclaje, reúso y reutilización, premisas básicas de la economía circular. Las estrategias de reforzamiento convencionales han demostrado ser efectivas, no obstante, suelen ser costosas, requieren mucho tiempo para su aplicación y su provisión usualmente depende de los precios y disponibilidad de la materia prima en el mercado, mientras que el adobe propuesto en este estudio tiende a ser económicamente accesible, su tiempo de aplicación es reducido y su abastecimiento es casi inmediato en países latinoamericanos.

En resumen, nuestra investigación contribuye a la creciente literatura sobre la incorporación de fibras vegetales en materiales de construcción, proponiendo un enfoque innovador en el uso de fibras de agave en la producción de adobe. Esta estrategia de reforzamiento no sólo mejora las propiedades mecánicas del adobe, sino que también promueve la sustentabilidad de la industria al utilizar un material de desecho.

### Metodología

La presente investigación es de tipo experimental. La relevancia de la misma radica en ofrecer una propuesta para desarrollar técnicas de reforzamiento con materiales reciclables para bloques de adobe, con el propósito de minimizar sus costos de producción y mejorar sus propiedades mecánicas de resistencia reutilizando materiales que generalmente se desechan y desperdician. Las fibras naturales de bagazo de agave poseen una densidad baja y no liberan gases de efecto invernadero, minimizando la producción de ceniza. Esto ofrece a la industria tequilera una gestión de residuos más eficiente, proporcionando una vía de reciclaje económica y sencilla, añadiendo valor a sus residuos e introduciendo esta técnica de producción de biomateriales compuestos a la economía circular. Nuestra investigación innova al demostrar la eficacia superior de esta combinación en la producción de adobe (Ruiz 2019; 2023).

Nuestra investigación se centra en el estudio de los beneficios del adobe reforzado con bagazo de agave (*Agave tequilensis* Haw), un subproducto de la producción de tequila o mezcal. Este material constructivo de bajo costo ofrece propiedades térmicas y aislantes superiores a otros materiales. En México, se desechan anualmente alrededor de 400,000 toneladas de bagazo y 300,000 toneladas de hojas de agave, lo que representa una fuente significativa de fibras. A pesar de las diversas opciones para deshacerse del bagazo, su abundancia ofrece grandes oportunidades para su reutilización. Hasta la fecha, la explotación de los subproductos fibrosos del agave para la fabricación de productos de alto valor añadido en la construcción no ha sido investigada a profundidad (Ruiz 2019). Es así que, nuestro trabajo sienta las bases para el desarrollo de un nuevo biomaterial compuesto.

Investigaciones previas han demostrado que la adición de fibra de bagazo de agave *Angustifolia Haw* al adobe incrementa su resistencia a la compresión en un 35% en comparación con el adobe tradicional (Ruiz 2019). Nuestro estudio busca expandir este conocimiento técnico, experimentando con diferentes proporciones de bagazo en la mezcla de arcilla y arena. Hemos seleccionado una región en el Estado de México donde se cultiva agave para la producción de mezcal y se fabrica adobe. De esta manera, reciclamos los residuos de agave y los incorporamos en la producción de adobe, creando un material de construcción más resistente y sustentable.

El objetivo de este estudio fue diseñar un biocompósito para la industria de la construcción a partir de la reutilización de fibras de bagazo de agave (*Angustifolia Haw*). Se realizó el estudio de caracterización de las propiedades físico-mecánicas y químicas de diferentes muestras derivadas de la composición original de adobe procedentes del sitio de estudio. Las pruebas realizadas fueron: longitud, peso, humedad, granulometría, peso volumétrico, prueba Proctor, plasticidad, densidad de sólidos, colorimetría, difracción de rayos X, resistividad eléctrica, absorción, potencial de hidrógeno, microscopía de barrido y compresión simple.

A partir del análisis de investigaciones previas y considerando las propiedades físico-mecánicas y químicas del bagazo de agave (*Angustifolia Haw*), hipotetizamos que: La incorporación de fibras de agave y ceniza incrementará la resistencia a la compresión, la capacidad de absorción y la plasticidad de los bloques de adobe.

### Muestra

Los estándares europeos BS EN 12390-1 y del Gobierno de la Región Administrativa Especial de Hong Kong CS1:2010, establecen las normas técnicas para realizar pruebas de resistencia y fuerza en hormigón y concreto endurecido. Estos estándares recomiendan emplear cuatro (4) muestras por cada tipo de material o lote de producción. Siguiendo estas directrices, se evaluaron cinco (5) muestras de cada tipo de composición. Se compararon cuatro (4) tipos de composición de bloques: tierra y zacate, tierra y bagazo de agave, tierra y fibra de agave y tierra, bagazo y fibra de agave. En total, se probaron y evaluaron 20 muestras. Los resultados, presentados en las tablas subsiguientes, representan la media ponderada de las cuatro (4) muestras utilizadas por cada composición.

### Resultados

Las diferentes muestras de adobe que se prepararon en Zumpahuacán, Estado de México, revelan que la muestra número dos (2), elaborada con tierra y bagazo, es menos pesada que el adobe tradicional [Tabla 1].

De acuerdo con Vera y Miranda (2004), la resistencia a la compresión promedio del adobe fabricado en México oscila entre los 0.18 MPa (1.81 kg/cm<sup>2</sup>) hasta los 0.76 MPa (7.57 kg/cm<sup>2</sup>). Los resultados mostrados en la [Tabla 2] confirman que la muestra dos (2) supera a en gran medida a los otros tipos de bloques compuestos.



Figura 1.- Obtención de dimensiones. Fuente: Elaboración propia



Figura 2.- Pesaje de bloques. Fuente: Elaboración propia

Muestra	Composición de los bloques	Dimensiones (cm) y volumen (cm <sup>3</sup> )	Peso (kg)	Peso Volumétrico (kg/m <sup>3</sup> )
1	Tierra y zacate (Adobe tradicional)	40.8x21x14 = 11995	18.20	1517
2	Tierra y bagazo de agave	40.1x20x13.9 = 11147	17.20	1543
3	Tierra y fibra de agave	40.2x20.4x14 = 11481	18.10	1576
4	Tierra, bagazo y fibra de agave	39.1x20x14.1 = 10998	17.40	1582

Tabla 1.- Dimensiones, volúmenes y peso de las muestras

Las pruebas a compresión se llevaron a cabo utilizando una prensa Forney QC-150-DR de 2,000 a 20,000 kilogramos-fuerza. Para estimar el peso, el volumen y el peso volumétrico se utilizó una báscula digital Braunker YP-200 con capacidad de hasta +500kg con una superficie de 70x70 cm. Las pruebas se efectuaron en el laboratorio de materiales Ing. Javier Barrios Sierra en la Universidad Autónoma del Estado de México.

Con el fin de medir y calcular la capacidad de absorción de las muestras, se llevaron a cabo dos tipos de pruebas de

absorción: la prueba rápida y la prueba completa. En este estudio, ambas pruebas se realizaron. En la prueba rápida, se pesa el bloque en seco, se sumerge en agua a 2 cm de altura durante 30 minutos y se vuelve a pesar. En la prueba completa, se pesa el bloque en seco, se sumerge completamente en agua a 21°C durante 24 horas y se pesa nuevamente para obtener el peso saturado. El porcentaje de absorción de agua se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$\text{Capacidad de Absorción} = \frac{\text{Peso}_{\text{saturado}} - \text{Peso}_{\text{seco}}}{\text{Peso}_{\text{seco}}} \times 100$$

El siguiente cuadro comparativo [tabla 3] resume las siguientes propiedades físicas y mecánicas obtenidas de las cuatro (4) muestras de composición: resistencia a la compresión, peso, capacidad de absorción, costo de producción y tiempo de elaboración. Estos factores se clasificaron en una escala Likert, donde 1 representa la mejor condición y 4 la condición más deficiente.



**Figura 3.-** Obtención de dimensiones. Fuente: Elaboración propia



**Figura 4.-** Bloque fracturado por la compresión. Fuente: Elaboración propia

Muestra	Composición de los bloques	Fuerza ejercida (kgf)	Área de contacto (cm <sup>2</sup> )	Resistencia a la compresión (kgf/cm <sup>2</sup> )	Resistencia a la compresión (MPa)
1	Tierra y zacate (Adobe tradicional)	1380	418	3.3014	0.3239
2	Tierra y bagazo de agave	1870	419	4.4730	0.4389
3	Tierra y fibra de agave	1400	418	3.3412	0.3278
4	Tierra, bagazo y fibra de agave	1740	419	4.1521	0.4074

**Table 2.-** Resistencia a la compresión. Fuente: Autor

Muestra	Composición	Resistencia a la compresión	Peso	Absorción (%)	Costo de producción	Tiempo de elaboración
1	Tierra y zacate (Adobe tradicional)	4	4	1	2	1
2	Tierra y bagazo de agave	1	1	3	1	1
3	Tierra y fibra de agave	3	3	2	4	3
4	Tierra, bagazo y fibra de agave	2	2	4	3	4

**Tabla 3.-** Cuadro comparativo de propiedades. Fuente: Autor

Los resultados de caracterización demostraron que las arenas, arcillas y cenizas cumplen con las condiciones óptimas en materia de color, densidad, composición química, granulometría, pH y compacidad para elaborar adobes de calidad. Un aspecto relevante de esta investigación es el análisis del comportamiento mecánico de los bloques de adobe a cargas verticales, en especial las pruebas de esfuerzo a compresión simple. La composición de adobe con bagazo ceniza presentó mejores resultados en materia de esfuerzo a la compresión, ligereza y plasticidad que las demás muestras.

Indudablemente, este tipo de investigación experimental abre muchas puertas hacia la edificación sustentable y el fomento de la arquitectura vernácula, sin embargo, se requiere de patrocinios para poder construir inmuebles y poder realizar otro tipo de estudios ante sismos y cambios climáticos actuales.

### Conclusiones

En el contexto de la creciente crisis ambiental global, la huella de carbono de los materiales de construcción convencionales se ha convertido en un problema claro. Este estudio propone una alternativa innovadora que combina técnicas de construcción tradicionales con materiales compuestos naturales, específicamente el bagazo de agave, un subproducto de la industria del mezcal. Esta combinación no sólo mejora las propiedades físicas y mecánicas del adobe, sino que también se alinea con los principios de la economía circular, un modelo económico que busca minimizar los residuos y maximizar la reutilización de los recursos.

El adobe es un componente trascendental en la identidad hispanoamericana con una historia que se remonta a la época precolombina. Es un material emblemático en la arquitectura latinoamericana, tanto en la tradicional como en las nuevas tendencias de diseño (Serrano Barquín, et al., 2020). Diversas investigaciones han demostrado que la modificación química de las fibras naturales es un componente clave en la producción de adobes mejorados. El uso y modificación de estas fibras ofrecen beneficios significativos en comparación con otros materiales de construcción que tienen un impacto ambiental negativo.

Esta investigación es particularmente relevante para las comunidades que dependen de la producción de mezcal, tequila y adobe, ya que proporciona una ruta de reciclaje eficiente y rentable para la gestión de residuos. Para los productores de adobe, al reciclar los residuos de agave en la producción de sus productos, se añade valor industrial y comercial a dichos subproductos, diferenciándolos de sus sustitutos o competidores directos. Para los productores de tequila y mezcal, la reutilización del bagazo de agave representa una reducción en sus costos de operación, ya que se disminuirían los gastos de eliminación de residuos. Igualmente, dichas compañías gozarían de una imagen corporativa socialmente responsable.

Asimismo, la propuesta de adobe con residuos de bagazo de agave tiene implicaciones significativas para la industria de la construcción. Este material ofrece beneficios térmicos, acústicos y aislantes superiores a los de otros materiales de construcción. Comparado con el adobe tradicional, nuestra propuesta incrementa la resistencia a las cargas verticales para muros hasta en un 35%, mejorando la durabilidad y la longevidad de las estructuras construidas con este material.

En términos ambientales, esta composición no genera una liberación neta de gases de efecto invernadero, lo que contribuye a la mitigación del cambio climático. Este es un aspecto crucial, dado que la industria de la construcción es uno de los principales contribuyentes a las emisiones de gases nocivos para el ecosistema.

### Referencias

- ALEM, A. (2003). "Pueblos indígenas, la naturaleza y el desarrollo sostenible". *Futuros. Revista Latinoamericana y Caribeña de Desarrollo Sustentable*, 1 (2): 1-13.
- CALVO, R.; ÁLAMOS, N.; BILLI, M.; URQUIZA, A.; CONTRERAS, R. (2021). "Desarrollo de indicadores de pobreza energética en América Latina y el Caribe". *CEPAL-Serie Recursos Naturales y Desarrollo*, (207) <https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/47216/4/S2100433.es.pdf>
- CÁRDENAS-GÓMEZ, J. C., GONZALES, M., & DAMIANI, C. (2021). "Evaluation of reinforced adobe techniques for sustainable reconstruction in andean seismic zones". *Sustainability*, 13(9). <https://doi.org/10.3390/su13094955>
- CASTILLO LEVICOY, C., & PÉREZ LIRA, C. (2020). "Arquitectura en adobe y quincha: construcción de una identidad en torno a los recursos naturales de la ribera del Lago General Carrera en la región de Aysén, Chile". *Ge-Conservacion*, 18: 56-68. <https://doi.org/10.37558/gec.v18i1.769>
- CASTRO, D., FROLLINI, E., MARINI, J., & RUVOLO-FILHO, A. (2013). "Preparação e Caracterização de Biocompósitos Baseados em Fibra de Curauá, Biopolietileno de Alta Densidade (BPEAD) e Polibutadieno Líquido Hidroxilado (PBHL)". *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 23(1): 65-73.
- CEBALLOS, P. (1992). "Las construcciones en tierra en Ecuador: innovaciones tecnológicas". *Revista INVI*, 7(16): 18-25. <https://doi.org/10.5354/0718-8358.1992.62012>
- CHACÓN SÁNCHEZ, J. P.; SUQUILLO RONQUILLO, B. J.; SOSA CAIZA, D. A. y CELI SÁNCHEZ, C. A. (2021). "Evaluación y Reforzamiento de una Estructura Patrimonial de Adobe con Irregularidad en Planta". *Revista Politécnica*, 47(1). <https://doi.org/10.33333/rp.vol47n1.05>
- CHUYA SUMBA, E., & AYALA ZUMBA, M. F. (2018). Comparación de Parámetros Mecánicos y Físicos del Adobe Tradicional con Adobe Reforzado con Fibra de Vidrio. Universidad de Cuenca, Ecuador. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/30095>

- COBREROS, C. (2009). "Uso de fibras vegetales procedentes de explotaciones agrícolas en la edificación sostenible", *Tesina Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona*: Universidad Politécnica de Cataluña.
- DE ANDA ALANÍS, E. X. (2006). *Historia de la arquitectura mexicana*. Barcelona: Gustavo Gili.
- DOMÍNGUEZ VEGA, W. (2010). "La Arquitectura de tierra es una herencia humana". *Ciencias Holguín*, XVI (1): 1-7. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181517919025>
- GAMA-CASTRO, J.; CRUZ Y CRUZ, T.; PI-PUIG, T.; ALCALÁ-MARTÍNEZ, R.; CABADAS-BÁEZ, H.; JASSO-CASTAÑEDA, C.; DÍAZ-ORTEGA, J.; SÁNCHEZ-PÉREZ, S.; LÓPEZ-AGUILAR, F. y VILANOVA DE ALLENDE, R. (2012). "Arquitectura de tierra: el adobe como material de construcción en la época prehispánica", *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 64: 177-188. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94326949003>
- GIRE QUISPE, A., & CÁCERES LUPACA, A. G. (2020). "Evaluación de la influencia del tratamiento superficial sobre el comportamiento mecánico de fibras de ichu en biocompuestos a base de PLA", *Ingeniería*, 28. <https://doi.org/10.14483/23448393.18852>
- ISLAS, G. (2014). "Las fibras de la Yucca: Una alternativa sostenible para el diseño de packaging en alimentos selectos". *Tesis de Maestría en Diseño*. Toluca: Universidad Autónoma del Estado de México.
- JOSÉ, N. (2002). "Arquitectura de Tierra: ¿Una Especie En Extinción?", *Cuadernos de la Facultad de Humanidades y Ciencias Sociales*. Universidad Nacional de Jujuy, Buenos Aires, Argentina (18). <https://www.redalyc.org/comocitar.oa?id=18501813>
- LARA CALDERÓN, M. L., & BUSTAMANTE, R. (2022). "Caracterización y Patología de los Muros de Tierra de las Construcciones Andinas Ecuatorianas", *Revista Politécnica*, 49(2): 37-46. <https://doi.org/10.33333/rp.vol49n2.04>
- LI, Z., NOORI, M., & ALTABEY, W. (2021). "Experimental and numerical assessment on seismic performance of Earth adobe walls". *SDHM Structural Durability and Health Monitoring*, 15(2). <https://doi.org/10.32604/sdhm.2021.011193>
- LIBEROTTI, G., & DANEELS, A. (2012). "Adobes en arquitectura monumental: análisis químico-físicos, arqueología y reconstrucción 3D para determinar las técnicas constructivas en los sitios de La Joya (México) y Arslantepe (Turquía)", *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 64(1): 79-89. <https://www.redalyc.org/pdf/943/94324474008.pdf>
- MURRAY, A., SKENE, K. & HAYNES, K. (2017). "The Circular Economy: An Interdisciplinary Exploration of the Concept and Application in a Global Context", *Journal of Business Ethics*, 140: 369-380.
- PINAS, J. M., LIRA, L., HORN, M., SOLIS, J. L., & GÓMEZ, M. M. (2020). "Influence of Stipa ichu on the thermal and mechanical properties of adobe as a biocomposite material". *Journal of Physics: Conference Series*: 1433(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1433/1/012003>
- REVISTA DIGITAL DE LA SECRETARÍA DE TURISMO, comunicado del 26 de junio de 2023. <https://www.gob.mx/sectur/archivo/articulos>
- ROUX GUTIÉRREZ, S. y OLIVARES SANTIAGO, M. (2002). "Utilización de ladrillos de adobe estabilizados con cemento portland al 6% y reforzados con fibra de coco, para muros de carga en Tampico". *Informes de la Construcción*, 53(478): 39-50.
- RUIZ SERRANO, M. (2019). Conformación de bloques de adobe con residuos de agave "Angustifolia Haw". Estrategia para el desarrollo local sustentable en Santa María La Asunción, Zumpahuacán, Estado de México. *Tesis de Maestría en Estudios Metropolitanos, Urbanos y Regionales*. Facultad de Arquitectura y Diseño. Toluca: UAEMéx.
- RUIZ SERRANO, M. (2023). Caracterización de adobe reforzado con fibra de bagazo de agave y ceniza como estabilizador. Material constructivo sustentable. *Tesis de Doctorado en Diseño en proceso, Facultad de Arquitectura y Diseño*. Toluca: UAEMéx.
- SALIH, M. M., OSOFERO, A. I., & IMBABI, M. S. (2020). "Critical review of recent development in fiber reinforced adobe bricks for sustainable construction", In *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 14: 839-854. <https://doi.org/10.1007/s11709-020-0630-7>
- SÁNCHEZ-CRUZ, M., CAPOTE-RODRÍGUEZ, G., & CÁRDENAS PULIDO, J. (2020). "Métodos de Tratamiento Superficial y su efecto en las Propiedades Físico Mecánicas de Fibras de Guadua", *Revista Ciencia et Technica*, XXV, 25(1). <https://doi.org/10.22517/23447214.20721>
- SÁNCHEZ-CRUZ, M., CAPOTE-RODRIGUEZ, G., & PATIÑO-QUIAZUA, J. (2023). "Influencia del tipo de fibra y del tratamiento superficial de las fibras en las propiedades físicas y mecánicas de compuestos reforzados con fibras vegetales", *Ingeniería*, 28: e18852. <https://doi.org/10.14483/23448393.18852>
- SERRANO BARQUÍN, H., RUIZ SERRANO, M., ZARZA DELGADO, P., RUIZ SERRANO, E., SERRANO BARQUÍN, C., & ESTRADA, R. (2020). *El adobe. Su tradición simbólica y arquitectónica en el Estado de México*. Toluca: Eón/UAEMéx. <http://hdl.handle.net/20.500.11799/108995>
- SPENGLER, G. y RATTO, N. (2020). "Arqueometría de materiales constructivos en tierra de la aldea de Palo Blanco (Catamarca, Argentina)". *Intersecciones en Antropología*, 21(2): 73-185. <https://doi.org/10.37176/iea.21.2.2020.508>
- VÁZQUEZ-GARCÍA, L. M. y MUNGUÍA-LINO, G. (2015). *Fibras vegetales y las artesanías en el Estado de México*. Toluca: Universidad Autónoma del Estado de México.

VERA S. y MIRANDA R. (2004). Comportamiento sísmico de estructuras de mampostería en la república mexicana. *Primera conferencia Internacional de Sismos*, Santiago de Cuba.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. (2018). *WHO Housing and health guidelines*. Génova: World Health Organization. Disponible en: <https://www.who.int/publications/item/9789241550376>

Beta Gamma Sigma. Cuenta con más de seis años de experiencia en la industria privada y en el sector público como Gerente de Mercadotecnia, Consultor de negocios y administración, Director de Mercadotecnia y Relaciones Públicas. Actualmente, labora como Senior Lecturer para Hong Kong Metropolitan University.

## Autor/es



**Mauricio Ruiz Serrano**

[mruiuze@uaemex.mx](mailto:mruiuze@uaemex.mx)

Universidad Autónoma del Estado de México

<https://orcid.org/0000-0003-4067-8943>

Profesor de la Universidad Autónoma del Estado de México desde 2019. Obtuvo su licenciatura en Ingeniería Física por la Universidad Iberoamericana, tiene una maestría en Estudios Sustentables Regionales y Metropolitanos, Doctorado en Diseño por la Universidad Autónoma del Estado de México. Su línea de investigación es en sustentabilidad y bioconstrucción. Actualmente es docente de la Universidad Autónoma del Estado de México, en Toluca, México



**Héctor Serrano Barquín**

[hectorsb2012@yahoo.com.mx](mailto:hectorsb2012@yahoo.com.mx)

Universidad Autónoma del Estado de México

<https://orcid.org/0000-0002-0601-1830>

Egresado de la Facultad de Arquitectura y Diseño de la Universidad Autónoma del Estado (UAEMéx) Maestro en Estudios de Arte por la Universidad Iberoamericana. Doctor en Historia del Arte, investigador de la Escuela de Artes y de la Facultad de Arquitectura y Diseño de la UAEMéx., de esta última fue director. Ha dirigido dos museos de arte en la ciudad de Toluca y ha ocupado diversos cargos en el área de urbanismo en los sectores estatal y federal. Publicaciones, principalmente sobre temas de diseño y arte: Imagen y representación de la mujer en la plástica mexicana. Cultura visual de género. Lo binario femenino/masculino, Simbolismos de género en conventos novohispanos, entre otros. Miembro del Sistema Nacional de investigadores.



**Andrés Ruiz Serrano**

[rserrano@hkmu.edu.hk](mailto:rserrano@hkmu.edu.hk)

Universidad Metropolitana de Hong Kong

<https://orcid.org/0000-0002-4019-6621>

Licenciado en mercadotecnia. Licenciado en Psicología. Dipomado en Negocios Internacionales. Cuenta con una Maestría en Administración y un Doctorado en Mercadotecnia. Miembro

Artículo enviado 12/10/2023  
Artículo aceptado el 18/02/2024



<https://doi.org/10.37558/gec.v25i1.1257>