

Capítulo 1

Uso de Residuos Agroindustriales para la Estabilización de Adobes

Juan Jesús Zavala-Ramírez¹, Francisco Javier García-Rodríguez¹, Hugo Carrillo-Rodríguez¹, Jaime Navarrete-Damián¹, Juan Bosco Hernández-Zaragoza², Teresa López-Lara²

¹Instituto Tecnológico de Celaya, Departamento de Ingeniería Industrial, Avenida García Cubas 1200 Esquina Ignacio Borunda, 38010 Celaya, GTO, México.

²Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería, Cerro de las Campanas S/N, Col. Las Campanas, 76010, QRO, México.

xe@live.com.mx, francisco.garcia@itcelaya.edu.mx, hugo.carrillo@itcelaya.edu.mx, jaimenavarrete@itcelaya.edu.mx, jbhernandezzaragoza@gmail.com, lopezlarat@gmail.com

Doi: <http://dx.doi.org/10.3926/oms.241>

Referenciar este capítulo

Zavala-Ramírez, J.J., García-Rodríguez, F.J., Carrillo-Rodríguez, H., Navarrete-Damián, J., Hernández-Zaragoza, J.B., & López-Lara, T. (2015). Uso de residuos agroindustriales para la estabilización de adobes. En Martínez Barrera, G., Hernández Zaragoza, J.B., López Lara, T., & Menchaca Campos, C. (Eds.). *Materiales Sustentables y Reciclados en la Construcción*. Barcelona, España: OmniaScience. pp. 11-30.

1. Introducción

Una de las tendencias innovadoras para enfrentarse a las crecientes montañas de basura en el mundo, se basa en cambios de paradigma, en torno al manejo de los desechos; partiendo de la definición de basura, su manejo y disposición, así como sus consecuentes cambios administrativos (Sales-Heredia, 2012). Es muy diferente llamar “basura” a ciertos objetos, que material reciclable. El primer gran cambio se dio en Estados Unidos cuando se dejó de hablar de basura y se empezó a hablar de la administración del ciclo de materiales. Este concepto modificó la idea de desechos, por otro dirigido a vigilar el ciclo del material utilizado y la posibilidad de reusarlo o reciclarlo. Ashby (2001) evaluó los mecanismos del desarrollo de materiales para el siglo XXI, y concluye que se está creando la necesidad de adaptar el diseño y los materiales, para enfrentar esta problemática, lo que resulta primordial para restaurar el equilibrio con el medio ambiente.

Por su parte, la Industria de la Construcción en México, es un motor fundamental del desarrollo y uno de los sectores más importantes en la generación del valor agregado, representando en el período 2003-2010 entre 6.5% y 7.2% del PIB (INEGI, 2011), pero también es quien más contribuye a la generación de problemas ambientales. Afortunadamente, esta industria puede recibir residuos y subproductos, para su reciclado, por el gran volumen de materiales que maneja. Es posible incluir, un porcentaje significativo de materiales de reciclado en la formulación de materiales para construcción; e. g., lodos de depuradora (Zalygina & Barantseva, 1998; Balgaranova, Petrov, Pavlova, & Alexandrova, 2003), residuos de los procesos de generación de energía (Lemeshev et al., 2001), restos de la industria agroalimentaria (Gregorová, Pabst & Bohaňenko, 2006), otros materiales orgánicos (Demir, 2008), etc.

Los residuos de interés para su reciclado y aprovechamiento, en el desarrollo del presente trabajo son: bagazo de agave y poliestireno expandido. En el primer caso, se refiere a una biomasa fibrosa, obtenida mediante molienda de la piña del agave y equivale a cerca del 40% del peso total en base húmeda de la cabeza de agave (Cedeño, 1995). En el segundo caso, el EPS, procede de empaques y embalaje, representa el 0.1% del total de los residuos sólidos urbanos, en México dentro de la categoría de “plástico”. En 2010, la industria tequilera generó aproximadamente, 310.7 mil toneladas de bagazo (CRT, 2014). Una cantidad significativa de estos residuos, podrían ser utilizadas en la fabricación de materiales para la construcción. La mayor parte de este residuo termina como desecho en tiraderos clandestinos que ocasionan efectos negativos a la fertilidad de tierras de cultivo, contaminación por lixiviados y riesgos fitosanitarios debido por la inadecuada incorporación de estos materiales al suelo (Rodríguez, Pascoe, Zamora, Álvarez de la Cuadra & Salcedo Pérez, 2001).

El adobe como material de construcción (Gonzalo-Sánchez, 2012), ha sido utilizado por miles de años, para uso habitacional en muchos de los pueblos indígenas de América (José, 2002), tanto en el suroeste de los Estados Unidos como en Mesoamérica y la región andina en Sudamérica, actualmente el 50% de las casas del mundo están construidas con este material (Pacheco-Torgal & Jalali, 2012). La utilización del adobe representa una alternativa viable para resolver el problema de la falta de vivienda, a través de la propuesta de una casa auto construible de bajo costo. Sin embargo, una limitante para desarrollar tal alternativa consiste en que la mayoría de las técnicas constructivas tradicionales que utilizan materiales obtenidos a partir del suelo, son resultado del conocimiento empírico. Dicho conocimiento generalmente es asistemático, varía en cada cultura y región, y carece de una terminología interdisciplinaria (Gama-Castro, Cruz-Cruz,

Pi-Puig, Alcalá-Martínez, Cabadas-Báez, Jasso-Castañeda et al., 2012). Sin embargo, se ha adaptado adecuadamente a las exigencias y necesidades de la sociedad actual, presentando interesantes aplicaciones desde el punto de vista de diseño y construcción de hoy en día. Es usado como material de construcción, principalmente para la edificación de viviendas, debido a sus propiedades y características: bajo costo de fabricación y amplia disponibilidad; alto ahorro de energía, haciendo uso principalmente de energías renovables; gran trabajabilidad y propiedades mecánicas óptimas en la construcción; fácil integración al ecosistema local, empleando los materiales y técnicas locales; y fácil reciclamiento de los excedentes de construcción. Todas estas características conllevan un enfoque ecológico responsable con la naturaleza representando, además, una alternativa de solución al problema de vivienda mediante la propuesta de una edificación construible de bajo costo (Ramos-Ramírez, Guzmán-Andrade, Sandoval-Juárez & Gallaga-Ortega, 2002).

En la actualidad, el adobe se considera como un material pobre y discriminado, debido a las malas condiciones en las que se encuentra su sector económico y la manera artesanal en la que se elabora, además la ignorancia de su proceso por parte de la sociedad, su utilización y la importancia que presenta, principalmente para el pueblo de México, ya que más del 80% de viviendas están construidas por este material. Por ello, se está en busca de un mejor adobe para la construcción proveniente de la arcilla que no cause malestar alguno al medio ambiente, principalmente a la atmosfera, aplicando en esta investigación un reforzamiento con fibras de bagazo y una dilución de poliestireno expandido reciclado, para lograr un incremento en sus propiedades mecánicas, químicas, térmicas, densidad, entre otras.

La utilización de fibra de bagazo de agave como fuente renovable de materia prima, así como el aprovechamiento de materiales de poliestireno expandido y la reducción de la emisión excesiva de éstos al medio ambiente como desechos, constituyen los retos del presente trabajo; aplicar tales materiales considerados como desecho, a la realización de adobes factibles para la construcción, i.e., aplicar a la arcilla un compuesto de matriz termoplástica a base de poliestireno reciclado, y reforzado con partículas de bagazo de agave, es una contribución a la solución de esta problemática. En este sentido, en México se generan residuos agroindustriales que pudieran ser aprovechados para obtener productos de valor agregado, tal como el bagazo de agave, que es considerado como desperdicio derivado del proceso para la producción de tequila y mezcal, del cual se generan miles de toneladas anualmente, por lo que su disposición representa un problema para el sector de la industria tequilera y de mezcal. Sin embargo, se ha demostrado que a partir del bagazo se pueden obtener diferentes productos, como alimento para animales y composta. Por lo que se pretende usar como reforzamiento para materiales de construcción, disminuyendo el uso de aserrín o estiércol utilizados actualmente en la fabricación de ladrillos y productos similares (González-García, González-Reynoso & Nungaray-Arellano, 2005).

La recuperación, reutilización o reciclado de materiales plásticos, son actividades de gran importancia no solo para el comercio y la industria, sino también para nuestro ecosistema. El valor del plástico como materia prima en la mayoría de los productos que son desechados, es usualmente menor a sus costos iniciales de fabricación en relación con el material virgen. Existen 5 tipos de plásticos que constituyen el 97% de los materiales utilizados como empaque para un gran número de productos para el hogar, de los cuales cerca de 6 mil ton terminaron como desechos. Entre los plásticos más comunes se encuentra el poliestireno, constituye el 11% total de las resinas vendidas. Se obtiene del petróleo, es de apariencia cristalina y con alto brillo. Desafortunadamente, este material sumamente utilizado en la vida moderna tarda de 500 a 800 años en degradarse. Debido a lo anterior, en la actualidad se están desarrollando diversos

métodos para reciclarlo y reutilizarlo como subproducto. Sin embargo, existen barreras que dificultan un mayor desarrollo de este tipo de materiales, principalmente por la falta de conocimiento de las tecnologías, insuficiencia de capitales y técnica aún incipiente. Por lo tanto, la factibilidad que presenta la fibra de agave como agente de refuerzo para el poliestireno aplicado a la arcilla con el fin de reducir las emisiones de gases que generan el efecto invernadero, es el reto de esta investigación, con la visión de incrementar sus propiedades mecánicas y mejorar la capacidad del adobe tradicional (Sanjuan-Raygoza & Jasso-Gastinel, 2009).

Por décadas, las universidades se han concentrado en materiales “modernos”, como el acero y el cemento y han desatendido el barro y otros de “muy bajo costo”. La intención de esta investigación es mejorar la resistencia y tenacidad de los adobes, en la realización de construcciones, a pesar de que no existen normas para materiales como el bloque de suelo compactado o adobe, para aprovechar sus características intrínsecas, e. g., su alta resistencia térmica, fácil fabricación y manejo, bajo consumo energético por sus cualidades aislantes, protección contra el ruido externo, versatilidad para realizar instalaciones de tuberías y red eléctrica.

2. Materiales y Métodos

Se utilizaron, en este trabajo, los siguientes materiales: Tierra lama de San Miguel. Octopan; Residuos de bagazo de agave y poliestireno expandido reciclado; productos químicos, acetato de etilo, ($\text{CH}_3\text{COOCH}_2\text{CH}_3$), acetona (CH_3COCH_3), agua y diferentes recipientes de plástico y material de vidrio; herramientas, se utilizó una adobera (molde fabricado en madera), pala, carretilla, criba. El trabajo experimental se realizó en una campana de extracción de humos, además, maquina universal para ensayos mecánicos, molino de bolas, balanza analítica, báscula electrónica, agitador magnético.



Figura 1. Adobes tradicionales elaborados en San Miguel Octopan, Guanajuato



Figura 2. Banco de tierra conocido como tierra lama en la comunidad de San Miguel Octopan

Se analizó la capacidad de carga de los adobes elaborados con biomasa de residuos agrícolas, bagazo de agave y aserrín; como agentes de refuerzo, y una disolución de poliestireno expandido reciclado como agente estabilizador. Primero, se estudió la técnica tradicional de la región para la fabricación de adobes (Figura 1). El suelo utilizado proviene del municipio de San Miguel Octopan, en Celaya, Guanajuato. Se mezcló en una cárcava con abono de ganado vacuno, dejándolo reposar durante 10 min. Luego, se vierte la fibra natural sobre la muestra en reposo: aserrín y abono, en porciones de 1:1. En seguida, se mezclan todos los componentes. El trabajador realiza el batido de la mezcla con una pala en 4 ciclos, i.e., mezcla toda la composición 4 veces seguidas. El tiempo requerido para el mezclado es entre 90 y 120 min. Posteriormente, se deja reposar 24 hs, para obtener una arcilla con mejores propiedades y más compacta. Se cubre con una película de plástico para evitar la pérdida de agua por medio de evaporación. Después, se vierte en moldes llamados adoberas con capacidad de 6 piezas. Ahora, se acomodan en un patio con una longitud de 20 a 25 m. Debido a la humedad en las muestras, se deja reposar entre 24 y 30 hs, dependiendo del clima. A continuación, remueven los bordes y excesos de arcilla en el molde utilizando una espátula o cuchillo, esta operación es llamada el recortado, se realiza para obtener un producto con dimensiones homogéneas. Posteriormente, se giran un ángulo de 45° a cada pieza para densificarlas y se colocan en el inventario, llamado trinchas. Finalmente, cuando el material está totalmente seco, se le denomina adobe.

2.1. Caracterización del Barro

El Barro utilizado en el presente trabajo, conocido como tierra lama, proviene de un banco de tierra, son parcelas destinadas a la comercialización de suelo, ubicado en la comunidad de San Miguel Octopan (Figura 2), municipio de Celaya; es el tipo de arcilla más utilizada en esa comunidad, debido a la experiencia de los productores de ladrillo. Comentan que cuenta con propiedades como: excelente absorción del agua, buena compactación durante el moldeo, incorporación del arcilla, lo cual evita posibles grietas durante el secado del material.

Se realizó un análisis mediante Difracción de Rayos x (XRD), en muestras de arcilla, en un intervalo 2θ entre 10°C y 100°C, con radiación $\text{CuK}\alpha$, a 30kV y 2°C/min (Figura 7). Así mismo, se realizó un análisis simultáneo, termogravimétrico (TGA) y calorimetría diferencial de barrido (DSC), estos análisis se llevaron a cabo en una atmósfera de nitrógeno, aumentando la temperatura hasta 1000°C con una velocidad de calentamiento de 15°C/min; así como ensayos mecánicos a tensión y compresión.

2.2. Preparación y Evaluación de Adobes Modificados

Se experimentó con dosificaciones estabilizadas de bagazo de agave y aserrín con disoluciones de poliestireno reciclado, sustituyendo el uso del abono por *fibra* obtenida de biomasa residual y *polímero reciclado*, como elementos de refuerzo y estabilizante, respectivamente. Evitando algún riesgo sanitario por el uso del abono y promoviendo la aplicación de un proceso de producción sustentable, dedicado a la fabricación de materiales para la construcción. El procedimiento para fabricar los adobes se desarrolló en cuatro etapas. La primera etapa, se llevó a cabo un programa para la recuperación de residuos de poliestireno expandido y el bagazo de agave, denominada acopio de materiales. Además, se realizó investigación de campo para identificar la arcilla adecuada. En la segunda etapa, se determinaron la cantidad apropiada de polímero, fibras de

bagazo y arcilla, mediante un diseño de experimentos. En la tercera etapa, se realizó la preparación de las muestras de adobe. Finalmente, se determinó, el tiempo y la temperatura de secado en la última etapa.

2.2.1. Acopio y Preparación de Materiales

En la primera etapa, es necesario retirar impurezas de las fibras naturales y de la arcilla, que generen problemas durante el mezclado; moler la biomasa hasta obtener una longitud de fibra de aproximadamente 2.5 cm. El bagazo de agave utilizado, se obtuvo de la piña de agave angustifolia (Figura 3a), mejor conocida como salmiana y fue proporcionado por la planta piloto de Mezcal del Instituto Tecnológico de Celaya. Este bagazo fue desmedulado, presecado por introducción en flujo de aire caliente, almacenado en pacas por varias semanas, desempacado y secado (Figura 3b). El material fibroso se molió hasta obtener fibras entre 2 y 3 cm de longitud. El poliestireno expandido fue recuperado de las oficinas del Instituto Tecnológico de Celaya (Figura 3c). Fue diluido utilizando Acetona y Acetato de Etilo grado reactivo. Se determinó, mediante una matriz de experimentos, la composición adecuada que permite proteger las fibras de la humedad y condiciones ambientales. La matriz se obtuvo de un banco de arcilla ubicado en San Miguel, Octopan, Guanajuato.

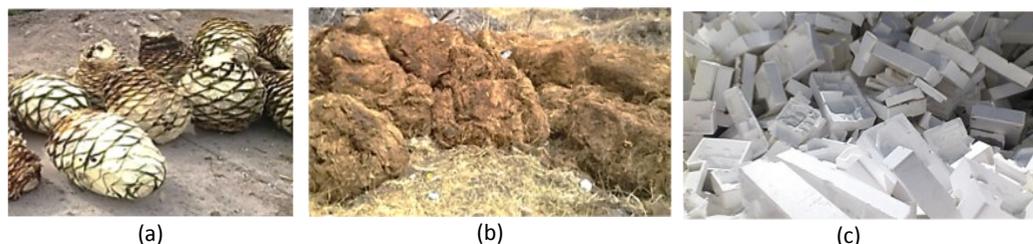


Figura 3. Materiales utilizados para la fabricación de los cerámicos de barro fibroreforzados.
(a) Piña de agave angustifolia, (b) Bagazo de agave y (c) Poliestireno expandido reciclado (Unicel)

2.2.2. Reposo de la Matriz Arcillosa y Obtención de una Dilución de Poliestireno Expandido Reciclado

Aquí la arcilla y el agua requerida se mezclaron hasta obtener una masa homogénea (Figura 4a). Se guardó en un recipiente evitando su exposición a la intemperie, dejándola reposar 24 hr para garantizar la máxima plasticidad. El material fibroso se molió hasta obtener fibras entre 2 y 3 cm de longitud (Figura 4b). Se elaboraron compuestos sin fibra, al 5% y 10% en volumen de fibra de bagazo de agave. Por otra parte, se cortó el poliestireno en trozos pequeños y se preparó una solución acetato de etilo y acetona para disolverlos. Una vez llevada a cabo la disolución se dejó reposar 10 min (Figura 4c). Este proceso se realizó en una campana de extracción.



Figura 4. Preparación de materiales. (a) Moldeo del barro, (b) fibra molida, (c) poliestireno expandido diluido

2.2.3. Mezclado y Moldeo

En la tercera etapa, se recubren las fibras con el polímero obtenido, combinándolas con la solución hasta que las fibras obtienen un color rojo canela (Figura 5a). Una vez transcurrido el tiempo de reposo de la arcilla, se mezcló con las fibras recubiertas de polímero por un lapso de 10 minutos. Mientras se realiza el mezclado, es de suma importancia agregar agua, para alcanzar una consistencia adecuada en el producto final (Figura 5b). En la elaboración de los adobes (Figura 5c), se utilizó una adobera con dimensiones de 27 x 14 x 7 cm. Primero, se humedeció el molde, luego se colocó arcilla sobre las paredes para que al secarse el adobe no se pegue en las paredes del molde. Se llena el molde cuidadosamente para no generar burbujas de aire en volumen del material. Para terminar, se levanta el molde inmediatamente con mucho cuidado para no deformar el adobe.

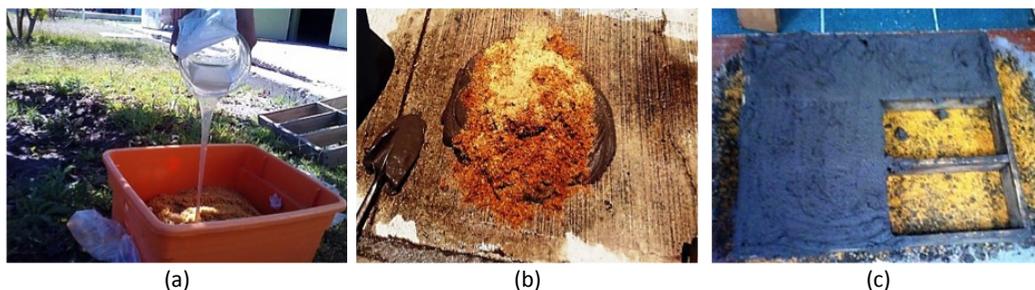


Figura 5. Preparación de materiales. (a) Mezclado de fibras y polímero reciclado diluido, (b) Mezclado de barro y fibras recubiertas con polímero reciclado, (c) Moldeo de adobes

2.2.4. Obtención de los Adobes

Finalmente, dependiendo del clima, se dejan secar a la intemperie por 50 hs. Durante la etapa de secado, se recortan los excesos de arcilla alrededor del adobe con una espátula o cuchillo (Figura 6a). Posteriormente, se cambia de posición para homogeneizar el proceso de secado. Los adobes así preparados, se almacenan en un lugar libre de humedad. Entre menos humedad contenga será mejor para la construcción (Figura 6b).

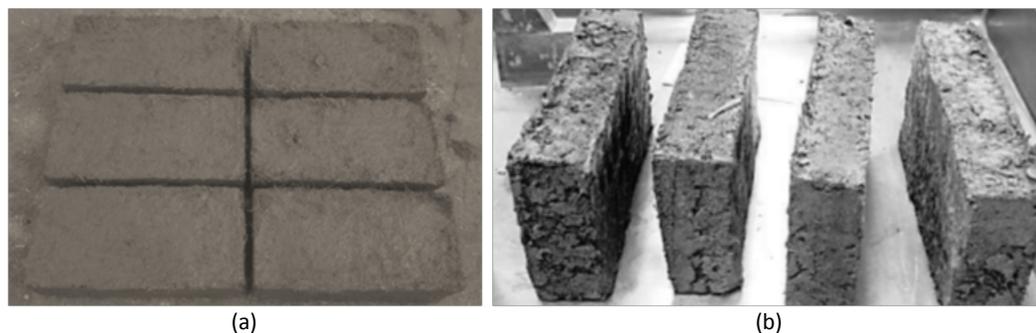


Figura 6. Adobes mejorados. (a) Recién fabricados y (b) Secados al sol después de 28 días

Los adobes obtenidos con las diferentes composiciones descritas en la Tabla 1, se caracterizaron física y mecánicamente, mediante la determinación de la absorción de agua y la densidad aparente utilizando la norma ASTM C67-03a (ASTM, 2003). Así como la determinación del módulo de ruptura (ASTM, 2003).

Muestras	Arcilla (Kg)	Aserrín (gr)	Bagazo (gr)	Polímero (ml)	Agua (lt)	Cantidad (piezas)	Fecha de elaboración
R	3.125	312.5	0	0	4	6	12-02-14
A	3.125	312.5	0	250	4	6	19-02-14
B	3.125	0	312.5	250	4	6	26-02-14
AB	3.125	156.25	156.25	250	4	6	05-03-14

Tabla 1. Dosificaciones propuestas en la fabricación de Adobes mejorados

3. Resultados y Discusión

3.1. Caracterización de las Componentes del Adobe

3.1.1. Tierra Lama

Se presentan resultados de Difracción de Rayos X en muestras de tierra lama, obteniendo difractogramas con resolución media debido a la presencia de fases de muy baja cristalinidad (Figura 7). Todas las muestras presentan las mismas fases, se diferencian entre sí por su abundancia relativa. Las muestras están compuestas esencialmente de cuarzo, quien proporciona cierta estabilidad a la matriz de barro; caolinita, aporta plasticidad y resistencia; cristobalita y tridimita, ilita, mineral arcilloso que confiere propiedades plásticas al adobe; goetita y pequeñas cantidades de calcita.

A continuación, se enlistan las fases identificadas en las muestras de tierra lama (Tabla 2), que permiten obtener un barro moldeable agregándoles agua. También se le añaden otros elementos, tales como fibra de bagazo de agave con un tamaño controlado de longitud y polímero EPS reciclado diluido para aumentar su cohesión. En la técnica empleada para darle la

forma final al barro, la temperatura y condiciones de secado son los factores fundamentales que determinan las diferencias entre el adobe tradicional y el mejorado.

Muestras	Fases identificadas
Tierra lama	1. Cuarzo: SiO_2
	2. Caolín: $2\text{H}_2\text{O Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$
	3. Ópalo tipo Cristobalita y Tridimita: $\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$
	4. Illita: $\text{K Al}_2 (\text{Al Si}_3)\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
	5. Goetita: $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$
	6. Calcita: CaCO_3

Tabla 2. Análisis cualitativo de fases en muestras de tierra lama

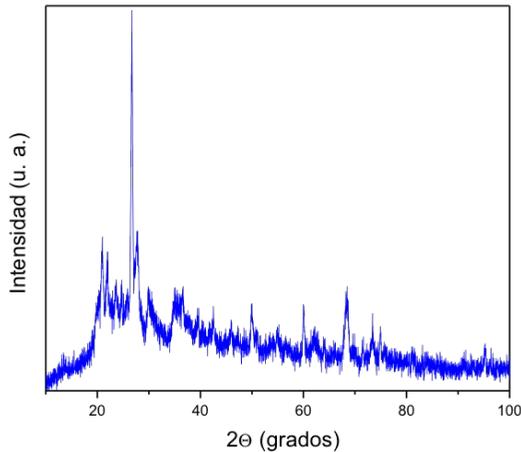


Figura 7. Diffractograma de rayos X sobre muestras de tierra lama de San Miguel Octopan, Guanajuato

3.1.2. Fibras

Las fibras fueron molidas en un molino de cuchillas giratorias en cizalla, para reducir su longitud a un tamaño más manejable. Después, fueron introducidas a un molino de bolas, hasta alcanzar tamaños promedio de 2.5 cm de longitud. En una maya no. 120 se tamizaron 200 mg de fibra (Fernandes-Pereira, Carvalho-Benini, Watashi, Cornelis-Voorwald & Hilario-Cioffi, 2013). Para realizar la prueba de degradación térmica, se utilizó un equipo TGA-2000, marca TA Instruments en muestras de 5 mg de fibra de bagazo de agave en un rango de 30 hasta 400°C, a una tasa de calentamiento de 10°C/min en una atmósfera de nitrógeno. Este análisis permite determinar las temperaturas y la cinética de descomposición de las fibras. Particularmente, se presenta la temperatura inicial del proceso de degradación, denominada T_{d1} , y la temperatura media, T_{d2} , establece la activación de la máxima velocidad de descomposición, correspondiente al punto máximo de la primera derivada de la curva de análisis, (Tabla 3). También se utiliza para estimar

los contenidos de materiales residuales (Vega-Baudrit, Delgado-Montero, María & Alvarado-Aguilar, 2008).

El estudio TGA, permite describir el historial térmico de una muestra, en este caso particular, de la fibra de bagazo de agave, indicando la pérdida de masa a través de un proceso de degradación (Figura 8). En el perfil negro, de la Figura 8, se indica la pérdida de masa en (gr) con respecto a la temperatura (°C). Se observa que la máxima pérdida de masa ocurre en el rango de los 350°C y se completó en los 483°C (Awal & Ghosh, 2010). Se ha usado también para determinar temperaturas críticas de fibras de sisal, cáñamo, plátano, piña y algodón, en un rango de 320 a 350°C (Amigó, Salvador, Sahuquillo, Llorens & Martí, 2008). La hemicelulosa y la celulosa se degradan durante la segunda etapa del proceso y la lignina se descompone arriba de 350°C (Yanjun, Lanxing, Chi, Runzhou & Qinglin, 2013; Fernández-Pereira et al., 2013).

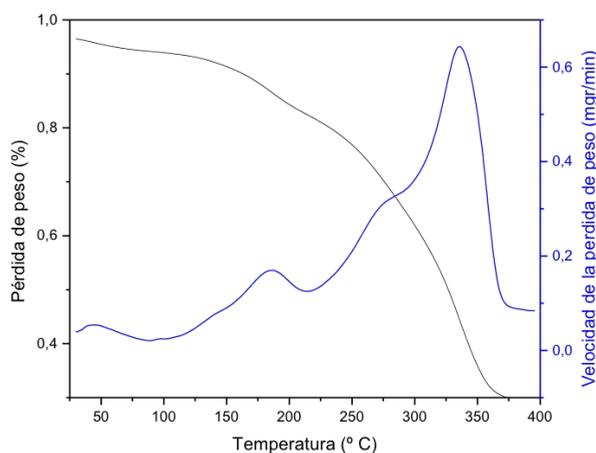


Figura 8. Rampas de degradación térmica en fibras de bagazo de agave (en negro) y su primera derivada (en azul)

Muestra	Componentes (%)			Temperaturas (° C)	
	Hemicelulosa	Celulosa	Lignina	T _{d1}	T _{d2}
Fibra de agave	16.16	53.23	26.82	87	338

Tabla 3. Porcentaje estimado de pérdida de peso en la concentración de celulosa, lignina y hemicelulosa, con 2.99% de error esperado y parámetros térmicos de las fibras

En el perfil azul de la Figura 8, se representa la primera derivada de la pérdida de masa con respecto al tiempo, “d(masa)/dt” (mg/min). Aquí se observa la velocidad máxima de pérdida de masa y se identifican las temperaturas de evaporación de las tres principales componentes de la fibra: hemicelulosa, celulosa y lignina. En la Tabla 3, se presentan los porcentajes de pérdida de peso asociados con las componentes reportadas para el bagazo de agave y las temperaturas

correspondientes al inicio de la degradación y la asociada con la máxima velocidad de descomposición. La pirólisis es el primer paso en un proceso de combustión de biomasa (Muller-Hagedorn, Bockhorn, Krebs & Muller, 2003). Es un proceso complejo, principalmente por la diversidad de comportamientos ante la degradación térmica de sus componentes: melaza residual (sacararosa, glucosa y fructuosa), hemicelulosa, celulosa y lignina. Por ello, es muy difícil explicar con un solo mecanismo el comportamiento de todos los tipos de biomasa, sin embargo, a partir de los resultados obtenidos, se deduce que la melaza residual reacciona en primer lugar, por ser un componente térmicamente inestable. En seguida reacciona la hemicelulosa, posteriormente la celulosa y por último la lignina, siendo ésta la más resistente a elevadas temperaturas por la mayor complejidad de las moléculas en relación con el resto de los constituyentes (Acelas-Soto, Ruíz-Machado & López-López, 2010). De acuerdo al análisis realizado, se determinó que la concentración de melaza residual es baja, debido a la limpieza realizada en las muestras de fibras del bagazo de agave y su temperatura de descomposición se encuentra muy cercana a los 200°C (Vega-Baudrit et al., 2008). Por su parte, la hemicelulosa, celulosa y lignina se ha encontrado que se descomponen entre 212-310°C, 327-370°C, y 277-400°C, respectivamente (Du, Sarofim & Longwell, 1990; Solorza-Feria, Rendón-Villalobos, Sánchez-Muñoz & Flores Huicochea, 2013).

El análisis FTIR (Figura 9 y Tabla 4) se realizó en un espectrómetro infrarrojo marca THERMO modelo Nicolet iS5 en modo ART (reflexión total atenuada). La prueba se realizó en pastillas hechas de con 2 mg de fibra de bagazo de agave mezclada con 200 mg de KBr, comprimidas con 7 ton de presión con un dado para pastillas de 13 mm para carga de 10 ton marca Perkin Elmer, modelo KBR DIE, y una prensa hidráulica inglesa de 15 ton (Awal & Ghosh, 2010).

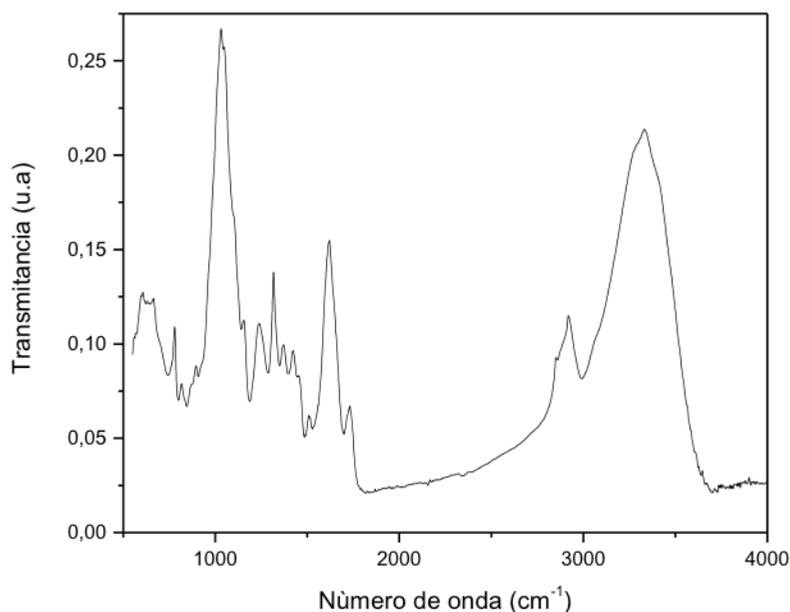


Figura 9. Análisis FTIR en muestras de fibra de agave

Numero de onda (cm ⁻¹)	Vibración	Componente o grupo funcional	Referencias
3433	-OH estiramientos	Grupos hidroxilos y Agua	Sócrates (2001)
2920 - 2850	C-H estiramientos	Metileno	Smith (1999)
1740 -1720	C=O estiramientos	Aldehídos, Cetona, Ácidos carboxílicos	Ouatmane, Provengano, Hafidi y Senesi (2000); Tan (1993); Smith (1999); Bođírlău y Teacă (2009)
1640	C=O estiramientos C=C estiramientos	Carboxilatos, Amidas I, Alquenos, Compuestos aromáticos	Naumann, Schultz & Helm (1996); Smith (1999); Hesse, Meier & Zeeh (1995); Nanny y Ratasuk (2002)
1510 - 1520	Esqueleto aromático	Lignina y Lignocelulosa	Ouatmane et al. (2000); Faix (1991)
1384	N-O estiramientos	Nitratos	Smith (1999); Smidt, Böhm & Schwanninger (2011); Zaccheo, Ricca & Crippa (2002)
1320	C-N estiramientos	Compuestos aromáticos primarios, Aminas secundarias	Smith (1999)
1200 - 900	C-O-C, C-O	Polisacáridos	Grube, Zagreba, Gromozova & Fomina (1999)
1080	C-O-C, C-H estiramientos	Polisacáridos y Hemicelulosa	Grube et al. (1999); Bođírlău y Teacă (2009)

Tabla 4. Análisis del espectro de absorción FTIR en muestras de bagazo de agave

3.1.3. Poliestireno Expandido Diluido

Los espectros IR del poliestireno reciclado diluido muestran una total concordancia con los espectros procedentes del EPS de referencia. El espectro de infrarrojo del PS comercial empleado en este proyecto, muestra las siguientes bandas características: Una banda fuerte a 3025 cm⁻¹ aproximadamente, debido a las tensiones C-H del anillo aromático; una banda a 2919 cm⁻¹ y 2849 cm⁻¹ que surgen de la vibración simétrica y asimétrica de los grupos -CH₂-, respectivamente; se muestra una banda a los 1601 y otra en 1492 cm⁻¹ debido a la presencia de las vibraciones de tensiones entre C-C del anillo aromático; las vibraciones de estiramiento y balanceo de los anillos C-H asociados a 1451 y 1027 cm⁻¹ y finalmente, las bandas 906, 747 y 694 cm⁻¹ correspondientes a las vibraciones de balanceo de los anillos aromáticos (Figura 10). En el caso de la muestra diluida de poliestireno, se presentan además, las bandas correspondientes a los solventes utilizados, acetona y acetato de etilo.

Adicionalmente, se realizó una evaluación estadística del porcentaje de absorción en adobes tradicionales y mejorados, utilizando la norma ASTM C67-03a, la cual especifica que el material de prueba se sumerge en un recipiente con agua durante 24 hs.

El porcentaje de absorción se determinó utilizando la Ecuación (1):

$$\% \text{ Absorción} = 100 \frac{(W_s - W_d)}{W_d} \quad (1)$$

donde W_d y W_s se refieren al peso, W , antes y después de la saturación, respectivamente. A partir de la Tabla 5, se observa que en el caso del adobe tradicional, no fue posible determinar el porcentaje de absorción de agua, ya que el adobe se deshizo, mientras que las muestras que contienen polímero tienden a aumentar su peso casi un 50%.

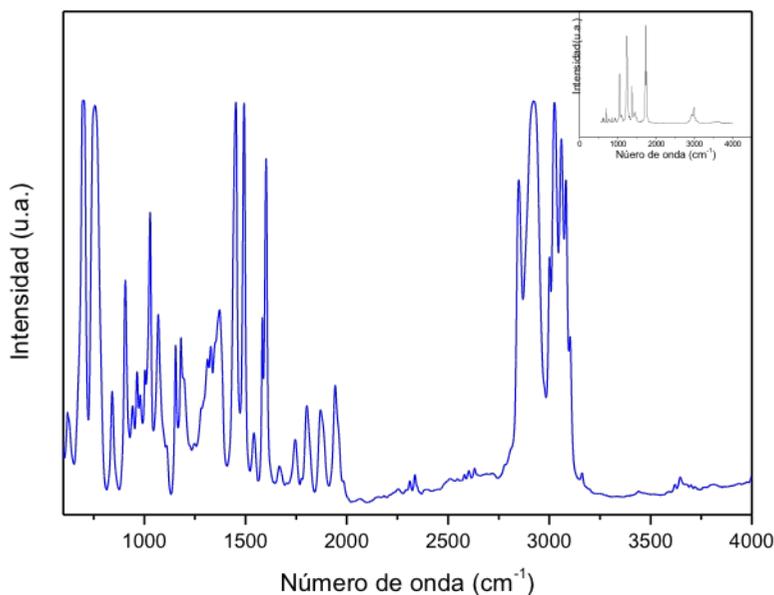


Figura 10. Espectros FTIR de poliestireno expandido en azul y en la esquina superior derecha la referencia del EPS

3.2. Análisis Térmicos

Para completar la caracterización e identificar los compuestos amorfos, en la Figura 11a, se muestra el análisis termogravimétrico realizado a muestras de adobe tradicional y mejorado. Indica la pérdida de masa en (mg) con respecto a la temperatura (°C). En ambos casos, la máxima pérdida de masa hasta 120°C se debe al agua higroscópica, la máxima pérdida de masa se encuentra entre los 200 y 700°C. En 275°C, se presenta el fenómeno térmico de la deshidroxilación de la goetita. La transformación de la caolinita en metacaolinita ocurre a los 500°C y a los 700°C, se lleva a cabo la descomposición de la calcita y su transformación en cal con pérdida de dióxido de carbono. El porcentaje final remanente es de un 10% el cual puede ser atribuido a cenizas de CaCO_3 o material inorgánico. En la Figura 11b se representa la rapidez con

la que se lleva a cabo la pérdida de masa. Se observan diferentes picos o bandas que indican el punto de evaporación de una componente del adobe.

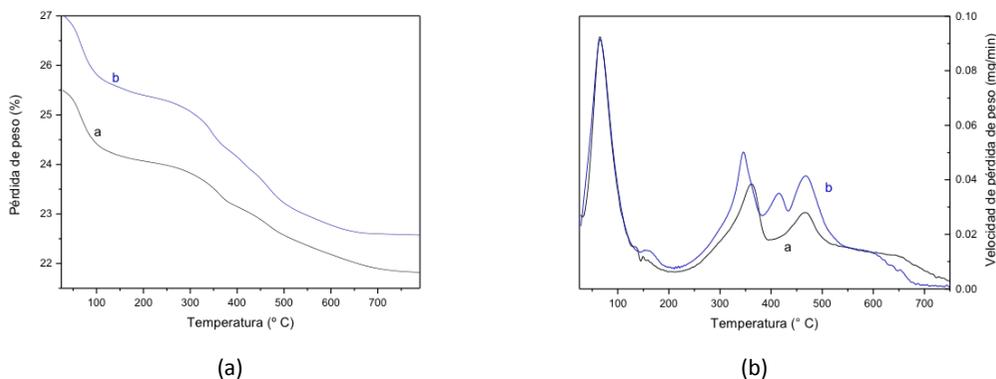


Figura 11. Perfiles térmicos. (a) Evaluación de la pérdida de peso en adobes (TGA), y (b) Rapidez de la pérdida de peso. La curva negra corresponde al adobe tradicional y la azul al mejorado, en ambos casos

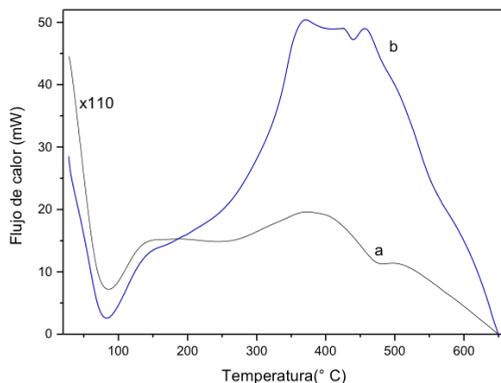


Figura 12. Perfiles de flujo de calor. (a) Adobe tradicional y (b) Adobe mejorado

En la Figura 12, se presentan los perfiles DSC correspondientes a las muestras de adobe analizadas. Aquí se grafica el tiempo en segundos (s) y el flujo de calor en (mW). Es importante hacer notar que los experimentos DSC, se llevaron a cabo en atmósfera de Nitrógeno. Se presenta un pico endotérmico a 85°C asociado con la deshidratación de la muestra; entre 220 y 400°C, se identifica una región exotérmica, corresponde a una pérdida de masa, debida a la combustión de materia orgánica. En 450°C, se observa un segundo pico endotérmico, correspondiente a la descomposición de agua adsorbida estructuralmente en algunas fases de SiO₂ de baja cristalinidad identificadas en la tierra lama (Tabla 2). Alrededor de 500°C, se observa un pico exotérmico.

3.3. Ensayos Mecánicos

Los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos se describen a continuación. El módulo de ruptura fue calculado de acuerdo a la Ecuación (2) (ASTM, 2003):

$$S = \frac{3W \left(\frac{L}{2} - x \right)}{bd^2}, \quad (2)$$

donde S es el módulo de ruptura (MPa), W es la carga máxima aplicada (kg), L es la distancia entre los soportes (cm) (calculado como la longitud de la muestra menos dos pulgadas, ya que los soportes se encuentran a un pulgada de distancia de cada arista de la muestra), x es la distancia horizontal desde el punto de aplicación de la carga hasta la fisura que se presenta después de aplicar la carga (cm), y b y d , el ancho y el espesor de la muestra, respectivamente (cm).

Propiedad	Adobe tradicional	Adobe modificado
Dimensiones : Espesor, ancho y Largo (cm)	7, 14, 27	7, 14, 27
Densidad kg/cm^3	1.3302	1.461
Absorción promedio (%)	---	42.3357
Resistencia a la compresión (MPa)	6.85	8.51
Tensión de rotura promedio (MPa)	0.56	.60

Tabla 5. Propiedades de los adobes tradicional y mejorado

Los ensayos de flexión y compresión en adobes, han sido ejecutados en cada uno de los 6 especímenes preparados para cada composición. Dos pruebas han sido consideradas para cada composición. La fuerza vertical aplicada y los desplazamientos resultantes se han registrado hasta la ruptura, generando la aparición de grietas verticales cerca de las esquinas de ladrillos y en medio de las superficies verticales. En el caso de los ensayos a compresión, se colocó en la parte inferior de la placa de acero, una capa de arena, con el fin de sentar muestras planas, para compensar la irregularidad de la cara inferior de la muestra; permitiendo una distribución uniforme de cargas.

Los resultados obtenidos en las dimensiones físicas de los adobes y ensayos mecánicos se describen a continuación en la Tabla 5. El adobe elaborado en forma tradicional tiene una resistencia a la flexión (0.56 MPa) y a la compresión (6.85 MPa) (Figuras 13 y 14). Estos parámetros explican la baja resistencia mecánica de los adobes tradicionales, dependen directamente de la cantidad de agua presente en las muestras. Si el contenido de humedad en el adobe excede el 6%, su resistencia a la compresión puede ser comprometida hasta en un 50%. Es por ello que las viviendas de adobe presentan un alto grado de vulnerabilidad. Adicionalmente, se realizaron pruebas con adobes mejorados hechos con suelo previamente seleccionado y caracterizado; posteriormente a ese mismo suelo se incorporó la fibra con longitudes de 25 mm, con una combinación de Aserrín, Aserrín + Bagazo y Bagazo al 10% del peso del adobe, manteniendo constante el porcentaje de humedad. Los resultados muestran que con la incorporación de un tamaño de fibra controlado en la matriz del adobe y un contenido de Aserrín al 10% w en la matriz del adobe, se incrementa la resistencia a la compresión en 24.12% con respecto al adobe tradicional, obteniendo un valor de 8.51 MPa. Con respecto a la resistencia a

la flexión, en muestras con Aserrín + Bagazo al 10%w, se generó un incremento de 7.86%, obteniendo un valor de 0.60 MPa (Figuras 13 y 14).



Figura 13. Ensayos mecánicos. (a) Fractura resultante en un adobe bajo la prueba de flexión y (b) fractura resultante en un adobe bajo la prueba de compresión

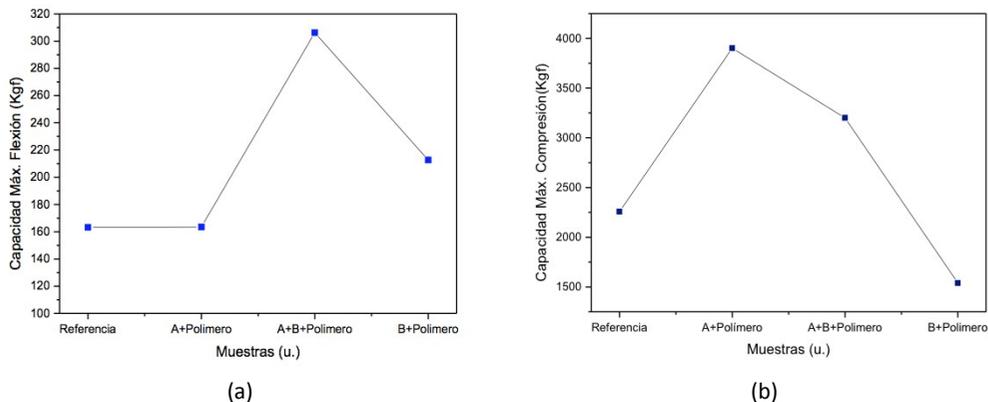


Figura 14. Resultados obtenidos en los ensayos mecánicos. (a) Ensayo de flexión y (b) Ensayo de compresión

4. Conclusiones

En este trabajo, se explora y evalúa la posibilidad de utilizar biomasa de residuos agrícolas: bagazo de agave y aserrín; como agentes de refuerzo, y una disolución de poliestireno expandido reciclado como agente estabilizador, adicionados al suelo para fabricar adobe compactado, para mejorar la respuesta del adobe a esfuerzos de flexión y compresión. Así, se prepararon varios tipos de muestras utilizando combinaciones de Aserrín, Aserrín + Bagazo y Bagazo. Se utilizó fibra

con longitudes de 25 mm, en una proporción del 10%w del adobe y se mantuvo constante el porcentaje de humedad.

A partir de los ensayos realizados, en ambos casos, se determinaron los mismos parámetros, indicando que el adobe tradicional tiene bajo desempeño, i.e., baja resistencia a la flexión y a la compresión con respecto a los adobes mejorados. Los resultados muestran que incorporando un tamaño controlado de fibra en la matriz del adobe, un contenido de Aserrín al 10%w, incrementa la resistencia a la compresión en 24.12% con un valor de 8.51 MPa. En la rubro de resistencia a la flexión, en muestras con Aserrín + Bagazo al 10%w, se generó un incremento de 7.86% con respecto al adobe tradicional, obteniendo un valor de 0.60 MPa.

El aprovechamiento de fibras vegetales de desecho recubiertas con una solución polimérica de poliestireno expandido reciclado, para la producción de adobe, es perfectamente viable para obtener un producto final con mayor resistencia y baja absorción de humedad, en este sentido será beneficioso para el desarrollo de la arquitectura de bajo costo.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la M. C. Luz Yareli Duran Morales de la Universidad Politécnica de Juventino Rosas, al Dr. José Francisco Louvier Hernández del Laboratorio de Biopolímeros del ITC, al M. en C. Quetzalcóatl Enrique Saavedra Arroyo del Instituto Tecnológico Superior de Irapuato, al M. en C. Miguel Ángel Silva García del Centro Regional Optimización y Diseño de Equipo, CRODE Celaya y al Dr. José Martín Yañez Limón y al M. T. Rivelino Flores Farías del CINVESTAV-IPN Unidad Querétaro, por las facilidades brindadas en la realización de los ensayos experimentales.

Referencias

- Acelas-Soto, N., Ruíz-Machado, W., & López-López, D. (2010). Determinación de los parámetros cinéticos en la pirólisis del pino ciprés. *Quim. Nova*, 33(7), 1500-1505. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-40422010000700014>
- Amigó, V., Salvador, M., Sahuquillo, O., Llorens, R., & Martí, F. (2008). Valorización de residuos de fibras vegetales como refuerzo de plásticos industriales. *I Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos*. Castellón: REDISA 2008.
- Ashby, M.F. (2001). Drivers for material development in the 21st century. *Prog. Mater. Sci.*, 46, 191-199. [http://dx.doi.org/10.1016/S0079-6425\(00\)00014-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0079-6425(00)00014-1)
- ASTM (2003). *Standard test methods for sampling and testing brick and structural clay tile*. ASTM C67-03a. Annual Book of ASTM Standards.
- Awal, A., & Ghosh, S.B. (2010). Thermal properties and spectral characterization of wood pulp reinforced bio-composite fibers. *J Therm Anal Calorim*, 99, 695-701. <http://dx.doi.org/10.1007/s10973-009-0100-x>

- Balgaranova, J., Petrov, A., Pavlova, L., & Alexandrova, E. (2003). Utilization of wastes from the coke-chemical production and sewage sludge as additives in the brick-clay. *Water Air Soil Pollut.*, *150*, 103-111. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1026190417523>
- Bodîrlău, R., & Teacă, C.A. (2009). Fourier transform infrared spectroscopy and thermal analysis of lignocelluloses fillers treated with organic anhydrides. *8th International Balkan Workshop on Applied Physics*, 5-7 July. Constanta, Romania.
- Cedeño, C.M. (1995). Tequila production. *Critical Reviews in Biotechnology*, *15*(1), 1-11. <http://dx.doi.org/10.3109/07388559509150529>
- CRT (2014). Consejo Regulador del Tequila. *Información estadística*. <http://www.crt.org.mx> (consultado: 5-12-2014).
- Demir, I. (2008). Effect of organic residues addition on the technological properties of clay bricks. *Waste Manag.*, *28*, 622-627. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2007.03.019>
- Du, Z., Sarofim, A. F., & Longwell, J.P. (1990). *Kinetic modeling of carbon oxidation*. Thesis (Sc. D.) Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Mechanical Engineering.
- Faix, O. (1991). Classification of lignins from different botanical origins by FTIR spectroscopy. *Holzforschung*, *45*, 21-27. <http://dx.doi.org/10.1515/hfsg.1991.45.s1.21>
- Fernandes-Pereira, P.H., Carvalho-Benini, K.C., Watashi, C.Y., Cornelis-Voorwald, H.J., & Hilario-Cioffi, M.O. (2013). Characterization of High Density Polyethylene (HDPE) Reinforced with Banana Peel Fibers. *Bio Resources*, *8*(2), 2351-2365.
- Gama-Castro, J.E., Cruz-Cruz, T., Pi-Puig, T., Alcalá-Martínez, R., Cabadas-Báez, H., Jasso-Castañeda, C. et al. (2012). Arquitectura de tierra: El adobe como material de construcción en la época prehispánica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, *64*(2), 177-188.
- González-García, Y., González-Reynoso, O., & Nungaray-Arellano, J. (2005). Potencial del bagazo de agave tequilero para la producción de biopolímeros y carbohidrasas por bacterias celulolíticas y para la obtención de compuestos fenólicos. *E-Gnosis*, *3*, 3. Universidad de Guadalajara, Guadalajara, México.
- Gonzalo-Sánchez, V. (2012). *Morteros de barro estabilizados con fibras de paja, esparto y sisal para su uso como revestimientos*. Tesis de Maestría. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica.
- Gregorová, E., Pabst, W., & Bohaňenko, I. (2006). Characterization of different starch types for their application in ceramic processing", *J. Eur. Ceram. Soc.*, *26*, 1301-1309. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2005.02.015>
- Grube, M., Zagreba, E., Gromozova, E., & Fomina, M. (1999). Comparative investigation of the macromolecular composition of mycelia forms *Thielaviaterrestris* by infrared spectroscopy. *Vibr. Spectrosc.*, *19*, 301-306. [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-2031\(98\)00074-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-2031(98)00074-5)
- Hesse, M., Meier, H., & Zeeh, B. (1995). *Spektroskopische Methoden in der organischen Chemie*. Goerg Thieme Verlag: Stuttgart, New York. 364.
- INEGI (2011). <http://cuentame.inegi.org.mx/economia/secundario/construccion/> (Fecha último acceso: 1-10-14).

José, N. (2002). Arquitectura de tierra: ¿Una especie en extinción? *Cuadernos de la Facultad de Humanidades y Ciencias Sociales*, 18, diciembre - Universidad Nacional de Jujuy. Argentina.

Lemeshev, V.G., Petrov, S.V., & Lemesev, O.V. (2001). Utilization of technogenic products in production of ceramic building materials. *Glass Ceram.*, 58, 93-96.
<http://dx.doi.org/10.1023/A:1010943314294>

Muller-Hagedorn, M., Bockhorn, H., Krebs, L., & Muller, U. (2003). A comparative kinetic study on the pyrolysis of three different wood species. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, 68/69, 231-249.
[http://dx.doi.org/10.1016/S0165-2370\(03\)00065-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0165-2370(03)00065-2)

Nanny, M.A., & Ratasuk, N. (2002). Characterization and comparison of hydrophobic neutral and hydrophobic acid dissolved organic carbon isolated from three municipal landfill leachates. *Water Res.* 36, 1572-1584. [http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1354\(01\)00359-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00359-1)

Naumann, D., Schultz, C.P., & Helm, D. (1996). What can infrared spectroscopy tell us about the structure and composition of intact bacterial cells? En Mantsch, H.H. & Chapman, D. (Eds.). *Infrared Spectroscopy of Biomolecules*. Wiley-Liss: New York. 279-310.

Quatmane, A., Provengano, M.R., Hafidi, M., & Senesi, N. (2000). Compost maturity assessment using calorimetry, spectroscopy and chemical analysis. *Compost Sci. Util.*, 8, 124-134.
<http://dx.doi.org/10.1080/1065657X.2000.10701758>

Pacheco-Torgal, F., & Jalali, S. (2012). Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction. *Construction and Building Materials*, 29, 512-519.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.054>

Ramos-Ramírez, E., Guzmán-Andrade, J.J., Sandoval-Juárez, M.C., & Gallaga-Ortega, Y. (2002). Caracterización de arcillas del Estado de Guanajuato y su potencial aplicación en cerámica. *Acta Universitaria*, 12(1), 23-30. Universidad de Guanajuato, México.

Rodríguez M.R., Pascoe, S., Zamora, N.F., Álvarez de la Cuadra, J., & Salcedo Pérez, E. (2001). Evaluación de sustratos vegetales elaborados a partir de residuos de la industria tequilera. *Memorias del I Congreso Nacional de Agricultura Sustentable*. Veracruz, México. p. 257-259.

Sanjuan-Raygoza, R.J., & Jasso-Gastinel, C.F. (2009). Efecto de la fibra de agave de desecho en el reforzamiento de polipropileno virgen o reciclado. *Revista mexicana de ingeniería química*, 8(3), 319327. Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa, Distrito federal, México.

Smidt, E., Böhm, K., & Schwanninger, M. (2011). The Application of FT-IR Spectroscopy in Waste Management. En Goran S. Nikolić (Ed.). *Fourier Transforms - New Analytical Approaches and FTIR Strategies*. India: InTech, pp. 405-430.

Smith, B. (1999). *Infrared spectral interpretation*. CRC Press: Boca Raton, FL. 264.

Socrates, G. (2001). *Infrared and raman characteristic group frequencies. Tables and carts*. 3rd ed. John Wiley and Sons Ltd.: Chichester. 347.

Solorza-Feria, J., Rendón-Villalobos, R., Sánchez-Muñoz, J., & Flores Huicochea, E. (2013). Composición del bagazo de caña por análisis termogravimétrico. *Memorias CIM*. 24 y 25 de Octubre, 54-59.

Tan, K.H. (1993). *Humus and humic acids*. In: *Principles of Soil Chemistry: Colloidal Chemistry of Organic Soil Constituents*. CRC press. M. Dekker Inc. 79-127.

Vega-Baudrit, J., Delgado-Montero, K., María, S.B., & Alvarado-Aguilar, P. (2008). Materiales poliméricos compuestos obtenidos a partir de los residuos generados de la agroindustria de la caña de azúcar. Una alternativa adicional II. *Revista Iberoamericana de polímeros*, 9(4), 389-406.

Yanjun, L., Lanxing, D., Chi, K., Runzhou, H., & Qinglin, W. (2013). Bamboo and High Density Polyethylene Composite with Heat-Treated Bamboo Fiber: Thermal Decomposition Properties. *Bio Resources*, 8(1), 900-912.

Zaccheo, P., Ricca, G., & Crippa, L. (2002). Organic matter characterization of composts from different feedstocks. *Compost. Sci. Util.* 10, 29-38. <http://dx.doi.org/10.1080/1065657X.2002.10702060>

Zalygina, O.S., & Barantseva, S.E. (1998). The use of excess activated sludge from municipal sewage treatment works in production of construction ceramics. *Glass Ceram.*, 55, 164-167. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02694733>