

OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS DE FIBRAS Y CELULOSA DE *AGAVE ATROVIRENS* Y MATRIZ DE POLIPROPILENO

Canché Escamilla Gonzalo*, Ortiz Reyes Ingrid Arianna, Duarte Aranda Santiago

Centro de Investigación Científica de Yucatán A.C. Calle 43 No 130 Chuburná de Hidalgo. 97205 Mérida, Yucatán, México.

Fecha de recepción: 6 de noviembre de 2020 - Fecha de aceptación: 9 de junio de 2021

Resumen

El aprovechamiento industrial de agave para la producción de pulque, en las zonas desérticas de México, genera una gran cantidad de residuos lignocelulósicos, viables de ser aprovechados en la obtención de materiales compuestos con la fibra entera o con la celulosa extraída, otorgándoles valor agregado al mencionado desperdicio. En este trabajo se prepararon materiales compuestos de polipropileno (PP) y fibras de las hojas *Agave Atrovirens* (agave pulquero) así como con la celulosa obtenida de las fibras. La caracterización fisicoquímica de las fibras mostró que tienen un alto contenido de extraíbles (35%) y celulosa (34%), por lo que podrían ser una fuente de celulosa. Tanto las fibras como la celulosa fueron térmicamente estables hasta temperaturas de 220 °C, por lo que se pueden procesar con los polímeros más comunes para obtener materiales compuestos. El uso de fibras enteras o celulósicas modifica notablemente las propiedades de la matriz de polipropileno, aumentando el módulo elástico con el contenido de las fibras debido a su mayor rigidez. Aunque se observó una disminución inicial en la resistencia a la tracción y la deformación en el material compuesto con respecto a la matriz, la resistencia a la tracción se mantuvo constante a medida que aumentaba el contenido de fibra debido a la mejora de la compatibilidad fibra-matriz por acción del agente de acoplamiento utilizado.

Palabras clave: Materiales compuestos, *Agave Atrovirens*, Polipropileno, fibras naturales, celulosa.

OBTAINING AND CHARACTERIZING MATERIALS MADE OF FIBERS AND CELLULOSE FROM *AGAVE ATROVIRENS* AND POLYPROPYLENE MATRIX

Abstract

The industrial use of agave for the production of pulque, in the desert areas of Mexico, generates a large amount of lignocellulosic waste, which could be used to obtain composite materials with the whole fiber or with the cellulose extracted from said materials, thus there would be a benefit to the aforementioned

*gcanche@cicy.mx

residue. In this work, polypropylene (PP) composite materials with whole fibers and cellulose fibers obtained from the residues of the *Agave Atrovirens* (agave pulquero) leaf were obtained. The physicochemical characterization of the fibers showed that it has a high content of extractables (35%) and cellulose (34%) so it could be a source of cellulose. Both whole fibers and cellulose fibers showed thermal stability up to temperatures of 220 ° C, which is why it can be processed with the most common polymers to obtain composite materials. The use of whole fibers or cellulosic notably modifies the properties of the polypropylene matrix, with an increase in the elastic modulus with the content of the fibers due to their greater rigidity. Although an initial decrease in tensile strength and deformation was observed in the composite material with respect to the matrix, the tensile strength remained constant as the fiber content increased due to the improvement of the fiber-matrix compatibility per action of the coupling agent used.

Keywords: Composites, *Agave Atrovirens*, Polypropylene, Natural Fibers, Cellulose.

Introducción

La gran cantidad de residuos lignocelulósicos generados por las actividades agroindustriales resulta importante, ya que puede contribuir en forma notable a la problemática de contaminación ambiental cuando su disposición final no es la adecuada, debido a que el principal producto de su degradación biológica es el metano, que es un gas de efecto invernadero [Zhang et al., 2014; Carrillo-Nieves D., 2019]. Por otro lado, la era del plástico ha venido a afectar las condiciones que mantienen el equilibrio ecológico natural, ya que su uso en las actividades humanas incluyendo las agrícolas se ha incrementado; por lo que el mal manejo de los residuos urbanos y agrícolas resulta en la presencia de residuos plásticos en los ecosistemas (Eriksen et al., 2018; Cordier y Uehara, 2019). Estos factores han impulsado el desarrollo de nuevos materiales que sean amigables con el ambiente, mediante uso de polímeros naturales tales como almidones (Cuevas-Carballo, 2018), la incorporación de fibras naturales en matrices biodegradables (Gunti et al., 2016) o en el desarrollo productos de larga duración que favorezcan la reducción tanto de residuos agroindustriales como de plásticos de reciclado (Mejri et al., 2017; Chauhan et al., 2019; Castillo-Lara et al., 2020). Además, el desarrollo de estos materiales que involucran el reciclado de residuos agroindustriales o plásticos puede

contribuir a la reducción la huella de carbono que el ser humano genera diariamente [Gholampour y Ozbakkaloglu, 2020]. Se ha reportado en la literatura que las fibras naturales se pueden usar como refuerzo en materiales compuestos con matrices poliméricas a pesar de las características hidrofílicas de las fibras naturales y las características hidrofóbicas de muchas matrices poliméricas, como lo es el polipropileno, mediante el uso de agentes acoplantes que mejoren la compatibilidad fibra-matriz [Sanjay, 2018]. El polipropileno (PP) es un termoplástico popular en la industria por sus propiedades mecánicas y fácil procesabilidad, lo que ha permitido su uso en la producción de envases, películas plásticas, etc. por lo que junto con el polietileno y el polietilenterftalato son los más abundantes en la corriente de residuos municipales. Para tener una buena adhesión interfacial entre el PP y las fibras naturales se usan agentes acoplantes como el PP injertado con anhídrido maleico (PP-AM) [Qiu, 2002; Pracella M. et al., 2010]. Por otro lado, en estudios recientes se ha demostrado que las fibras de celulosa proporcionan mejores características mecánicas que la fibra entera, debido a las diferentes relaciones longitud-diámetro y propiedades mecánicas [Naranjo, 2016].

En México, los agaves son usados para la producción de fibras como el henequén (*Agave fourcroydes*) o para la producción de licores como el Tequila de *Agave tequilana*, el Mezcal que se puede obtener de diferentes agaves o el pulque que se obtiene del *Agave atrovirens*. En ambos casos, se genera una gran cantidad de residuos lignocelulósicos que consiste de una parte fibrosa y otra parte no fibrosa (Sanchez-Olivares et al., 2019). El *A. atrovirens* es una especie nativa de las áreas desérticas de México, importante desde el punto de vista ecológico para prevenir la erosión del suelo y del económico porque es utilizado en el proceso de obtención del pulque [Romero, 2015]. El pulque se produce del aguamiel obtenido del tronco de dicho agave, generándose como residuos el tronco y las hojas o pencas, que pueden ser fuentes de fibras naturales. El uso de estas fibras en la obtención de materiales compuestos puede darle un valor agregado a la industria del pulque.

En este trabajo se caracterizaron las fibras y la celulosa obtenida de fibras de las hojas de *Agave atrovirens*. Las fibras enteras y la celulosa se

usaron para la obtención de materiales compuestos con matriz de polipropileno. Se determinaron las propiedades mecánicas a tensión de los materiales compuestos.

Metodología

Obtención de la fibra

Se utilizaron pencas de plantas de *A. atrovirens* de una edad aproximada de 13 a 14 años, las cuales fueron colectadas en Maquixco, Teotihuacán, Estado de México. Las fibras se obtuvieron de la penca 6 días después de su recolección mediante el siguiente procedimiento: las pencas se cortaron en trozos de 20 cm de largo y se comprimieron en un trapiche (Figura 1) para retirar agua contenida en la penca, así como la cutícula y parénquima de la hoja. Se realizó la limpieza manual de las fibras hasta desprender la fracción de la cutícula adherida a las mismas y posteriormente se secó a temperatura ambiente. La fibra seca se redujo en tamaño en un molino de cuchillas Brabender modelo R-30050 y se separó la fracción de tamaños entre las mallas 40-60, la cual se empleó para las pruebas de caracterización fisicoquímica y química.



Figura 1. Obtención de las fibras de la hoja de *A. atrovirens*: a) planta de *A. Atrovirens*, B) trapiche para recuperación de fibras.

Obtención de fibras de celulosa

Para la obtención de la fibra de celulosa las fibras se cortaron a longitudes de 10 cm y se sometió a un proceso de pulpeo desarrollado en el CICY y que consta de 4 etapas: hidrólisis ácida, cloración con hipoclorito de sodio, extracción alcalina y blanqueo con hipoclorito. Las fibras de celulosa se limpiaron manualmente para remover residuos como restos de cutícula, espinos, etc. Las fibras se secaron a temperatura ambiente hasta peso constante.

Caracterización de las fibras enteras y fibras de celulosa

La caracterización de la fibra entera incluyó la determinación de su composición química utilizando métodos de la Technical Association of Pulp and Paper Industry (TAPPI). Se determinó el contenido de extraíbles en benceno:etanol 2:1 y en etanol (Tappi 204), seguida por extracción en agua (Tappi 207). Las fibras libres de extraíbles se usaron para la determinación de lignina Klason (Tappi 222) y holocelulosa (celulosa + hemicelulosa).

La estabilidad térmica de las fibras y de la celulosa se determinó mediante termogravimetría en un equipo TGA-8000 de Perkin Elmer, con barridos de temperatura de 50 a 700°C, una rampa de calentamiento de 10 °C/min, manteniendo un flujo de 20 mL/min de N₂.

Las dimensiones (longitud y diámetro) de las fibras y de la celulosa se obtuvieron a partir de las microfotografías de MEB de las fibras y de la celulosa, usando una de las herramientas del microscopio electrónico de barrido JEOL JSM 6360LV usado. Se midieron al menos 100 fibras.

Obtención y caracterización de materiales compuestos

Previo al mezclado todos los materiales fueron secados a 100 °C por 15 horas. Ambas, fibra

(malla 40-60) y celulosa se mezclaron en fundido en una cámara Brabender de 60cm³, a 180°C, 40 rpm durante 10 minutos, en porcentajes de 10, 20 y 30% en peso en una matriz de PP. Se empleó PP injertado con anhídrido maleico (PP-AM epolen E-43P) como agente acoplante, en un 5% en peso respecto al peso de la fibra como se ha reportado en la literatura [Arbelaiz et al., 2005]. En una prensa de laboratorio Carver de platos de 12 x 12 cm, se obtuvieron mediante moldeo por compresión a 7000 lbf y temperatura de 180°C, especímenes para ensayos mecánicos a tensión tipo IV de la ASTM D6380-02. Los especímenes se ensayaron en una máquina de ensayos universales Instron 5500R, a una velocidad de separación constante de 5 mm/min y celda de 500 Kg. Se caracterizó morfológicamente la superficie de fractura criogénica de los materiales compuestos en un microscopio electrónico de barrido JEOL JSM 6360LV. La superficie de las probetas se recubrió con oro para mejorar el contraste.

Resultados y Discusión.

Caracterización de las fibras enteras y de las fibras de celulosa

Las hojas de *Agave atrovirens* tuvieron un contenido de sólidos del 14% en peso, que incluye la cutícula y fibras largas de entre 5 a 30 cm de longitud. En la figura 2 se muestran las micrografías de MEB de las fibras y de la celulosa. Se observa que las fibras presentan superficies rugosas y la presencia de microfibras, las cuales se podrían deber al proceso de desfibrilación mecánico usado en la obtención de las fibras de las hojas. Las fibras molidas y retenidas en malla 40-60 tuvieron diámetros en el rango de 100-175 micras con diámetro promedio de 137.7 micras; mientras que la longitud promedio fue de 1.40 mm.

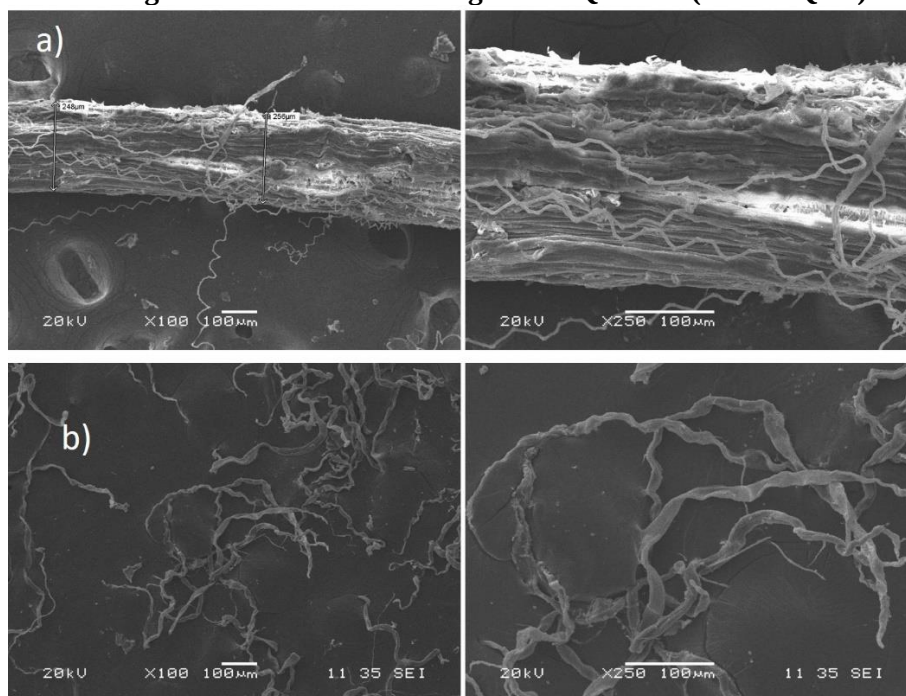


Figura 2. Microfotografías de MEB de la Fibra obtenida de la hoja de *A. Atrovirens* (a) y de celulosa obtenida de las fibras (b).

Con respecto a la composición química de las fibras, se obtuvo un contenido de extraíbles totales del 35%, un contenido de celulosa del 34% y de hemicelulosa del 27% así como un 4% de lignina. El alto contenido de celulosa y el bajo contenido de lignina permite el emplear métodos más suaves que los usados en la industria papelera para la extracción de celulosa de madera. Por otro lado, el alto contenido de extraíbles podría afectar el desempeño de las fibras enteras como refuerzo de materiales compuestos.

El proceso de pulpeo de las fibras resulta en una desestructuración de la mismas, con la remoción de la lignina y hemicelulosa que actúan como aglomerantes de las fibras de celulosa (ver Figura 2), como se observa al comparar los diámetros de las fibras enteras y de las fibras de celulosa, debido la remoción de los demás componentes (extraíbles, lignina y hemicelulosa) que actúan como aglomerantes de las microfibras de celulosa [Andrade Canto, 1998]. Se obtuvieron microfibras de celulosa con diámetros promedio de 11.5 ± 4.0 micras (rango de 9-17 micras) y longitudes

promedio de 150 ± 90.4 micras (rango de 100 a 175 micras).

En la figura 3 se muestran los termogramas de TGA y DTGA de la fibra entera y las fibras de celulosa. Se observa que tanto la fibra como la celulosa presentan una pérdida de masa a 100 °C que corresponde a la humedad absorbida por los materiales y posteriormente son estables hasta 220 °C. Arriba de esta temperatura se observa una caída brusca de la masa de 75% y 65% para la fibra y celulosa, respectivamente en el rango de 250 °C y 400 °C. La pérdida de masa en esta zona está asociada a la pérdida de los compuestos volátiles generados en la degradación térmica de los extraíbles, de las hemicelulosas, de la celulosa y de lignina [Fonseca-Prieto et al., 2013]. La degradación de la lignina ha sido reportada ampliamente y ocurre de manera gradual y lentamente a partir de 190 °C hasta 600 °C aproximadamente [Bledzki et al., 2010].

En la curva de DTGA se aprecian la presencia de picos con máximos 360 °C y 350 °C para la fibra y la celulosa, respectivamente. La ausencia del

hombro a 310 °C en la curva de la celulosa, presente en la fibra, confirma la remoción de hemicelulosa y extraíbles durante el proceso de pulpeo. El corrimiento a temperatura más bajas del

máximo en las curvas de celulosa, se atribuye a la remoción de la lignina ya que como se indicó antes, la lignina tiene mayor temperatura de degradación que la celulosa.

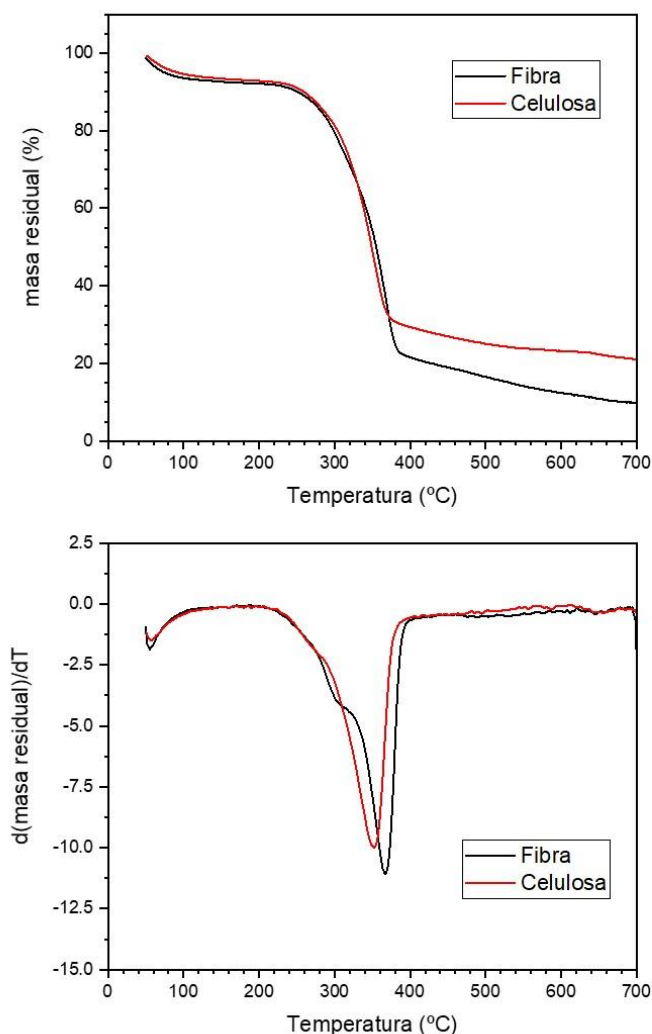


Figura 3. Termograma de TGA (a) y DTGA (B) de fibras y celulosa de A Atrovirens.

Caracterización de los materiales compuestos

En la figura 4 se muestran las microfotografías de MEB de la superficie de fractura de los materiales compuestos obtenidos con las fibras enteras o con las fibras celulosa en una matriz de polipropileno. Se observa, en forma cualitativa, que la distribución de las fibras y de la celulosa es

homogénea en la superficie de fractura, aunque debido al tamaño de las fibras celulosa no se distinguen a bajos aumentos. Así mismo, la presencia de fibras rotas a lo largo de su sección longitudinal o transversal, así como la ausencia de fibras enteras o de fibras zafadas de la matriz, evidencia la buena adherencia entre fibra y matriz

debido al agente acoplante usado en este trabajo. Sin embargo, también se aprecian fibras con poca adherencia con la matriz, lo que se debe a que la incorporación del agente acoplante es puntual a sobre la superficie de la fibra, sin llegar a recubrirla completamente [Reddy y Yang, 2015]. La reacción entre los grupos anhídrido maleico del agente acoplante (PP injertado con anhídrido maleico) y los grupos hidroxilos superficiales de la fibra entera o de la fibra de celulosa forman el

injerto de cadenas de PP sobre la superficie de la fibra, que pueden interaccionar con las cadenas de PP de la fase continua [Pérez-Fonseca, 2016]. En los materiales compuestos con fibras de celulosa se aprecian tanto fibras individuales como también aglomerados que no lograron desintegrarse durante el mezclado en fundido, debido a la mayor interacción entre las fibras de celulosa que dificulta su separación y dispersión en la matriz.

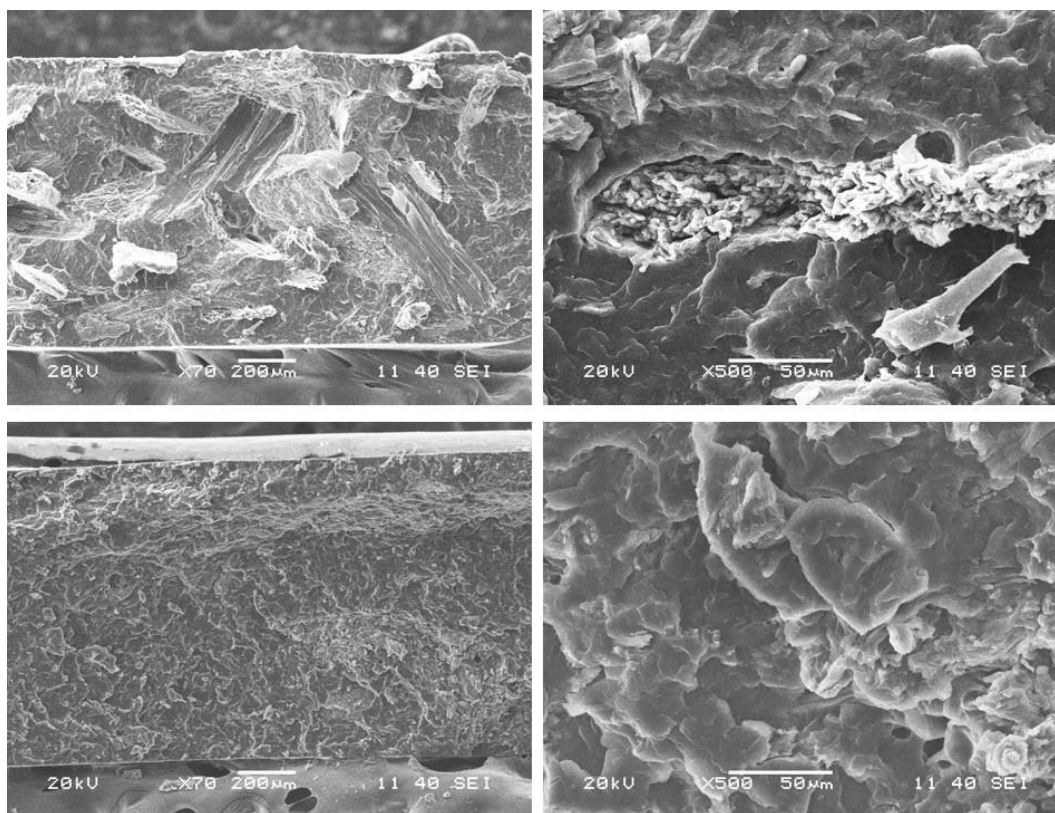


Figura 4. MEB de materiales compuestos con 30% de fibra: a) fibra entera y b) fibra de celulosa

En la figura 5 se muestran los resultados de la caracterización mecánica a tensión de los materiales compuestos con fibras enteras o fibras de celulosa y matriz de PP. Se observa un incremento del módulo elástico, con respecto al módulo de la matriz, al aumentar el contenido de fibras en los materiales compuestos, que se atribuye a la mayor rigidez de las fibras con respecto a la matriz. Los valores de módulo de materiales compuestos con fibra de celulosa fueron ligeramente mayores que los obtenidos con

fibras enteras indicando una mayor rigidez de las primeras, y mayor interface debido al menor tamaño de la fibra de celulosa. Con respecto a la resistencia a tensión, se observó una disminución inicial debido al efecto plastificante de las cadenas injertadas a las fibras ya que el peso molecular del PP-g-AM es menor que el del PP usado como matriz; sin embargo, el valor de resistencia a tensión se mantiene constante independientemente del contenido de fibra con lo que se corrobora la eficacia del agente acoplante

para mejorar la compatibilidad fibra-matriz [Gassan y Bledzki, 2020]. No se observa un notable incremento en la resistencia a tensión cuando se usó celulosa como agente reforzante en comparación con la fibra entera, como se ha reportado en literatura, lo que se podría atribuir a que ambas fibras tuvieron valores muy similares de L/D (12.3 y 13.0 para fibra y celulosa, respectivamente). Se ha reportado que a valores más altos de L/D se tiene una mejor transferencia de esfuerzo de la fibra hacia la matriz y se observa

un incremento en la resistencia a tensión [Migneault et al., 2008]. Por otro lado, las fibras enteras presentan, amarre mecánico con la matriz debido a su alta rugosidad y microfibrilación, que favorece la transferencia de esfuerzos de la fibra entera a la matriz. Se ha reportado que la desfibrilación de las fibras naturales resulta en materiales compuestos con mejores propiedades mecánicas que los obtenidos con las fibras enteras (Brugnago et al., 2011). La deformación disminuye con el contenido de fibras debido a la menor deformación de la zona de interface fibra-matriz que favorece la falla del material conforme se aplica carga a las probetas.

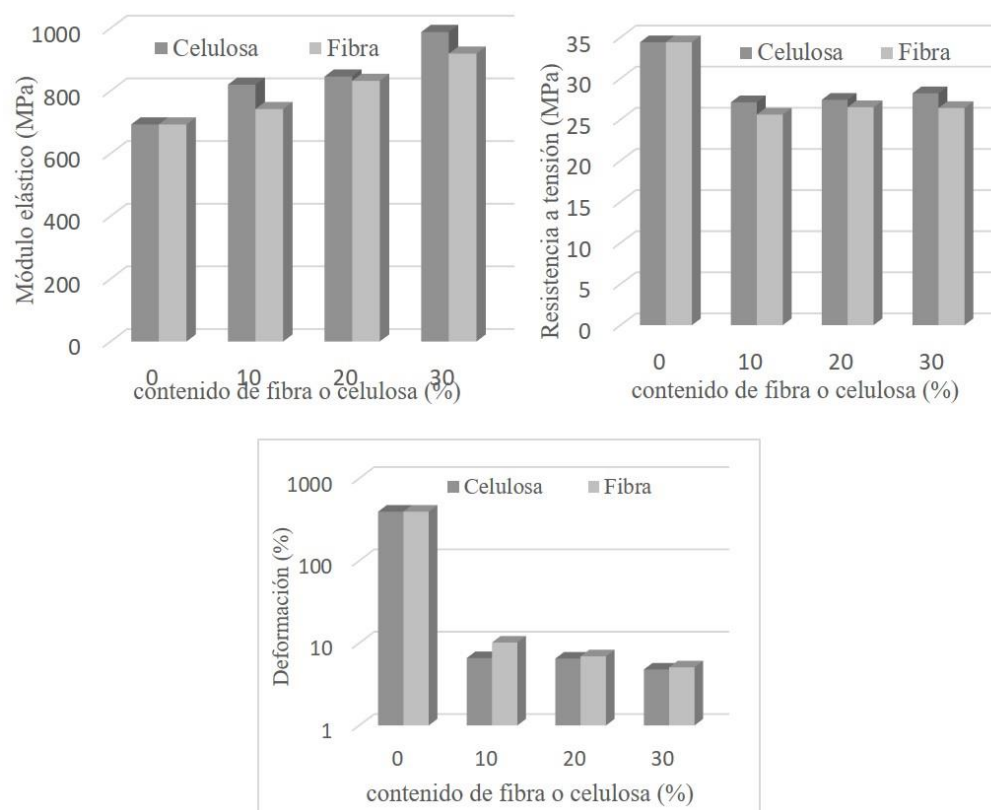


Figura 5. Propiedades mecánicas a tensión de materiales compuestos con matriz de PP y con fibra o celulosa de *A. atrovirens*. 1) Módulo elástico, 2) Resistencia a tensión y 3) Deformación.

Conclusiones

Se obtuvo celulosa y materiales compuestos a partir de los residuos lignocelulósicos que se generan en la producción de pulque a partir de la

planta de *Agave atrovirens*, lo que puede resultar en una mejora en la cadena productiva del pulque. El contenido de celulosa de 34% es similar a los de la madera usada en la obtención de pulpas celulósicas, por lo que éstas fibras se pueden usar

para obtención de celulosa. El alto contenido de extraíbles (35%) puede afectar en los procesos de pulpeo y/o de obtención de materiales compuestos, por lo que se sugiere buscar alternativas de uso para esos extraíbles.

La estabilidad térmica hasta 220 °C de las fibras permite su uso en la obtención de materiales compuestos con la mayoría de termoplásticos de

mayor uso a nivel comercial como las poliolefinas, sin riesgo de degradación de las fibras.

Las propiedades mecánicas de los materiales compuestos se favorecen por la modificación superficial de la fibra con agentes acoplantes así como por la microfibrilación de las fibras naturales, ya que se incrementa la interacción fibra-matriz mediante interacción de las cadena injertadas con la matriz o mediante amarre mecánicos, respectivamente.

Referencias

- Andrade Canto S.B. (1998). Efecto de las Condiciones del Proceso de Obtención de Celulosa de Henequén sobre sus Propiedades Fisicoquímicas. Ingeniero Químico Industrial, Facultad de Ingeniería Química, UADY
- Arbelaiz A., Fernández B., Ramos J.A., Retegi A., Llano-Ponte R.I., Mondragon I. (2005). Mechanical properties of short flax fibre bundle/polypropylene composites: Influence of matrix/fibre modification, fibre content, water uptake and recycling. *Composites Science and Technology* 65, 1582–1592
- Bledzki A.B., Mamun A.A., Volk J. (2010) Physical, chemical and surface properties of wheat husk, rye husk and soft wood and their polypropylene composites. *Composites: Part A*. 41: 480-488.
- Brugnago R.J., Satyanarayana K.G., Wypych F., Pereira Ramos L. (2011). The effect of steam explosion on the production of sugarcane bagasse/polyester composites. *Composites Part A* 42 (4), 364-370
- Carrillo-Nieves D., Rostro Alanís M.J., De la Cruz Quiroz R., Ruiz H.A. Iqbal H.M.N., Parra-Saldívar R. (2019). Current status and future trends of bioethanol production from agro-industrial wastes in Mexico. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 102, 63-74
- Castillo-Lara J.F., Flores-Johnson E.A., Valadez-González A., Herrera-Franco P.J., Carrillo J.G., González-Chi P.I., Li Q.M. (2020). Mechanical Properties of Natural Fiber Reinforced Foamed Concrete. *Materials* 2020, 13, 3060.
- Cordier M., Uehara T. (2019). How much innovation is needed to protect the ocean from plastic contamination? *Science of the Total Environment* 670, 789-799
- Cuevas-Carballo Z. B., Duarte-Aranda S., Cancé-Escamilla G. (2017). Properties and biodegradability of thermoplastic starch obtained from granular starches grafted with polycaprolactone, *International Journal of Polymer Science* 3975692, 1-13.
- Chauhan V., Kärki T., Varis J. (2019). Review of natural fiber-reinforced engineering plastic composites, their applications in the transportation sector and processing techniques. *J. Thermoplastic Composite Materials*. First Published November 27, 2019, 1-41.

- Eriksen M.K., Pivnenko K., Olsson M.E., Astrup T.F. (2018). Contamination in plastic recycling: Influence of metals on the quality of reprocessed plastic. *Waste Management* Volume 79, 595-606
- Fonseca-Prieto F., Canché-Escamilla G., Chavarría-Hernández J.C., Duarte-Aranda S. (2014) Characterization of lignocellulosic residues oh henequen and their use as a bio-oil source. *Biomass Conversion. Biorefinery* 4, 95-104
- Gassan J., and Bledzki K. (2020) Possibilities to improve the properties of natural fiber reinforced plastics by fiber modification Jute polypropylene composites. *App. Comp. Mat.* 7: 373-385.
- Gholampour A., Ozbakkaloglu T. (2020) A review of natural fiber composites: properties, modification and processing techniques, characterization, applications. *J Mater Sci.* 55: 829-892.
- Gunti R., Ratna Prasad A.V., Gupta A.V.S.S.K.S. (2016). Mechanical and Degradation Properties of NaturalFiber-Reinforced PLA Composites: Jute, Sisal,and Elephant Grass. *Polymer Composite* 39 (4), 1126-1136.
- Mejri M., Toubala L., Cuillière J.C., François V. (2017). Fatigue life and residual strength of a short-natural-fiber-reinforced plastic vs Nylon Composites Part B: Engineering 110, 429-441
- Migneault S., Koubaa A., Erchiqui F., Chaala A., Englund K., Krause C., Wolcott M. (2008). Effect of Fiber Length on Processing and Properties of Extruded Wood-Fiber/HDPE Composites. *Journal of Applied Polymer Science* 110, 1085–1092.
- Naranjo, C. D. D., Alamilla-beltrán, L., Gutiérrez-lopez, G. F., Terres-rojas, E., & Solorza-, J. (2016). Isolation and characterization of cellulose obtained from Agave salmiana fibers using two acid-alkali extraction methods *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 7 (1), 31–43.
- Pérez-Fonseca A., Arellano M., Rodrigue D., Gonzalez-Nuñez R., Robledo-Ortíz J. (2016) Effect of Coupling Agent Content and Water Absorption on the Mechanical Properties of Coir-Agave Fibers–Reinforced Polyethylene Hybrid Composites. *Polymer Composites* 37 (10), 3015-3024
- Qiu W., Zhang F., Endo T., Hirotsu T. (2003). Preparation and Characteristics of Composites of High-Crystalline Cellulose with Polypropylene: Effects of Maleated Polypropylene and Cellulose Content. *J, Applied Polymer Sciecn* 87 (2), 337-345
- Reddy N., Yang Y. (2015) Biocomposites Using Lignocellulosic Agricultural Residues as Reinforcement. *Innovative Biofibers from Renewable Resources*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Romero-López M.R., Osorio-Díaz P., Flores Morales A., Robledo N., y Mora-Escobeno R. (2015) Chemical composition, antioxidant capacity and prebiotic effect of *aguamiel (agave atrovirens)* during in vitro fermentation. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 14 (2): 281-292.

- Sanchez-Olivares G., Rabe S., Pérez-Chávez R., Calderas F., Schartel B. (2019). Industrial-waste agave fibres in flame-retarded thermoplastic starch biocomposites. *Composites Part B: Engineering* 77, 107370
- Sanjay, M. R., Madhu, P., Jawaid, M., Sentharamaikkannan, P., Senthil, S., Pradeep S. (2018). Characterization and properties of natural fiber polymer composites : A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 172, 566–581.
- Zhang Y., Gan T., Luo Y., Zhao X., Hu H., Huang Z., Huang A., Qin X. (2014). A green and efficient method for preparing acetylated cassava stillage residue and the production of all-plant fibre composites. *Composites Science and Technology* 102: 139-144.