

Usos potenciales de la cáscara de banano: elaboración de un bioplástico

Potential uses of banana peelings: production of a bioplastic.

DOI: <http://dx.doi.org/10.23850/24220582.109>

Recibido: 11-09-2014 Aceptado: 27-11-2014

Javier López Giraldo¹, Julio César Cuarán Cuarán², Laura Viviana Arenas García³, Luz Marina Flórez Pardo⁴.

Resumen

En el 2006 se produjeron en el Valle del Cauca cerca de 399.844 toneladas de cáscara de banano, material poco estudiado. Para observar su valorización se efectuó una caracterización morfológica, química y térmica; se utilizaron diferentes tinciones para identificar las estructuras donde se encontraban la celulosa, lignina, lípidos y almidón. Luego se determinó el contenido de extraíbles en cloroformo-metanol, la celulosa, la hemicelulosa y cenizas por el método de Van Soest y lignina por Klason. El análisis térmico se hizo por un análisis TGA – Termogravimétrico y DSC – Calorimetría Diferencial de Barrido. Se encontró que la cáscara de banano tuvo un 11.91% de humedad residual, 23.03% de hemicelulosa, 23.02% de celulosa, 29.87% de lignina y 0.78% de cenizas, además de almidón observado por tinción con lugol. El contenido de holocelulosa (hemicelulosa y celulosa) cercano al 46.05% la hace apta para la elaboración de papel y el tener una humedad menor al 20% y un contenido bajo de cenizas, la estima útil para cualquier aplicación térmica con un bajo impacto ambiental. Sin embargo, se evidenció que por tener un contenido de almidón cercano al 12%, es posible obtener de ella un bioplástico. De acuerdo con estos resultados, se hicieron dos estudios para obtener de este material un uso particular: un bio-papel y un bio-plástico. Con el primero no se logró un producto con una buena resistencia mecánica, mientras que con el segundo se obtuvo un bio-material con resultados positivos en cuanto a durabilidad y aspecto físico.

Palabras clave: Bioplástico, bio-papel, análisis proximal, biomasa, cáscara de banano.

1 Colombiano, estudiante de Ingeniería Ambiental, Universidad Autónoma de Occidente, Colombia, Facultad de Ingeniería, Departamento de Energética y Mecánica, Programa de Ingeniería Ambiental. Javier_loggi@hotmail.com

2 Colombiano, estudiante de Ingeniería Ambiental, Universidad Autónoma de Occidente, Colombia, Facultad de Ingeniería, Departamento de Energética y Mecánica, Programa de Ingeniería Ambiental. jucecu92@gmail.com.

3 Colombiana, estudiante de Ingeniería Ambiental, Universidad Autónoma de Occidente, Colombia, Facultad de Ingeniería, Departamento de Energética y Mecánica, Programa de Ingeniería Ambiental. lauragarcia2825@gmail.com

4 Colombiana, Posdoctorado en Ciencias Químicas, Docente Universidad Autónoma de Occidente, Colombia, Facultad de Ingeniería, Departamento de Energética y Mecánica, Programa de Ingeniería Ambiental. lmflomez@uao.edu.co.

Abstract

In 2006, in Valle del Cauca, 399.844 metric tons of banana peel, a poorly studied material, were produced. To study its value, a morphological, chemical and thermal characterization was effectuated; different tinctions were used to identify the different structures where the cellulose, lignine, lipids and starch are located. Subsequently, the content of extractibles was measured with a methanol-chloroform mixture, the cellulose, hemicellulose and ashes by the Van Soest method and Lignine by Klason. The thermal analysis was made through a TGA - thermogravimetical analysis and DSC – Differential Scanning Calorimetry. It was found that the banana peel had a 11.91% of residual humidity, 23.03% of hemicellulose, 23.02% of cellulose, 29.87% of lignine and 0.78% of ashes, besides starch, observed by lugol tinction. The holocellulose content (hemicellulose and cellulose) is close to 46.05%, and makes it apt for papel elaboration while having less than 20% humidity and low ash content, making it useful for any thermal application with low environmental impact. However, we evidenced that by having a starch content close to 12%, is possible to obtain from it, a bioplastic. According to these results, studies were conducted to generate from this material, a particular use; a bio-paper and bio-plastic. With the first, the final product had a low mechanical resistance, while with the second, a biomaterial with positive results regarding durability and physical aspect.

Keywords: Bioplastic, biopaper, proximal analysis, biomass, banana peelings.

Introducción

En Colombia, productos como la caña de azúcar, el maíz, la remolacha, el sorgo dulce, la yuca y el café tienen el potencial para ser usados en la fabricación de etanol de primera generación. El problema reside en que estas materias primas agrícolas también compiten con la producción de alimentos, lo que en algunos casos ha influido para que haya un aumento en el precio de los mismos, por lo que esto no ha generado un buen impacto social y económico en las poblaciones. Por lo tanto, se han desarrollado nuevas tecnologías para producir etanol de segunda generación, a partir de la biomasa residual, que tiene una matriz de materia lignocelulosa que no es de fácil digestión y que no compete con la seguridad alimentaria de las personas; este grupo incluye residuos de maíz, de la producción de forestería (cáscaras de maíz, esterilla de arroz, aserrín) y biomasa de plantas (cultivos productores de energía como pasto, plantas de rápido crecimiento y otras diferentes pasturas) (Ramírez *et al.*, 2012). La tecnología para

aplicar este proceso a escala industrial está en etapa de maduración y se ha encontrado que es más rentable si se integra a la producción de otros componentes como biomateriales, bioplásticos, papel, productos farmacéuticos, nutracéuticos, cosméticos, entre otros. Este concepto, que contempla el uso completo de la biomasa sin generar desechos, se denomina “biorrefinería”.

Uno de los residuos frutales a analizar en este proyecto y que se produce en importantes cantidades en el país, es derivado del banano. Existen dos tipos de especies de esta fruta, el banano de exportación *Cavendish Valery* y el banano criollo o de consumo interno. Este último se produce principalmente en los departamentos del Valle del Cauca, Tolima y Antioquia y generó una producción para el año 2003 de aproximadamente 136.644 toneladas que representaron un 7.5% (13.964 hectáreas) del total de hectáreas de frutas del país (Espinal *et al.*, 2005). Respecto a la participación municipal en el departamento del Valle del Cauca, Sevilla es el primer productor

con un 36.1%, seguido de Trujillo con el 8.9%, Bugalagrande y Buenaventura cada uno con el 6.5% y por último Obando, con el 6.4% (Ministerio de Medio Ambiente, 2012).

En cuanto a la cantidad de residuos que genera el banano se encontró en el Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia (Ministerio de Minasy Energía (2006), que en el Valle del Cauca en el año 2006 se produjeron 399.844 toneladas de residuo/año en 6.202 hectáreas en todo el departamento, consolidándose éste como el segundo residuo de cosecha de mayor producción después de la caña de azúcar, que simplemente se desecha, sin ningún tipo de valorización.

También es importante resaltar que debido al contenido de almidón en la cáscara (12.78 g por cada 100 g de cáscara húmeda (Zea *et al.*, 2013) y en base seca del 39.89% (Monsalve *et al.*, 2006), es posible obtener de él un bioplástico mediante métodos químicos, térmicos y mecánicos. Asimismo, se pueden fabricar copolímeros tan flexibles como el polietileno o tan rígidos como el poliestireno (Remar, 2011). Por lo tanto, es factible hacer esfuerzos para el desarrollo de este tipo de aplicaciones complementarias a la del bioetanol, con el fin de organizar una biorrefinería a partir de la cáscara de banano. Por consiguiente, en esta investigación se realizó la caracterización morfológica, química y térmica de la cáscara de banano, para determinar en función de sus propiedades, el adecuado aprovechamiento de ésta. Posteriormente se evaluó la viabilidad de obtener productos como hojas de papel con fibra de banano y bioplástico, a partir de esta biomasa, teniendo en cuenta la norma TAPPI 494 del manual TAPPI Standards: Regulations and Style Guidelines, y las propiedades del bioplástico.

Materiales y Métodos

Área de estudio

La muestra de cáscara de banano se extrajo de una frutería reconocida en la ciudad de Santiago de Cali. En este establecimiento se compran a la semana alrededor de 1.260 bananos (10.5 racimos) y se generan cerca de 97.67 kg de cáscaras que se descartan como residuo orgánico.

Muestra

Se realizó una recolección en el establecimiento de 26.58 kg de cáscaras de banano, correspondiente a los días viernes, sábado y domingo. Esta biomasa se redujo de tamaño en forma manual hasta obtener partículas con un tamaño de 2 cm, para proceder al método del cuarteo (SECOFI, 1985) y conseguir una muestra final de 5 kg. Para la eliminación de contaminantes presentes en la muestra se hizo un lavado con agua caliente por cinco minutos, seguido de un secado a 45 °C por una semana, hasta obtener peso constante. Con la biomasa seca se realizó una trituración para lograr partículas de tamaño de 2 mm, procediendo al cuarteo para la obtención de una muestra de 50 g.

Caracterización morfológica

El estudio morfológico tuvo lugar en los tejidos de la parte interna de las cáscaras frescas de banano, mediante la extracción de finos cortes perpendiculares a la dirección de la fibra, los cuales se colocaron en placas de vidrio. Luego se procedió a aplicar la tinción a las diferentes estructuras, de acuerdo con la metodología propuesta por Flórez (2002). Los reactivos utilizados para la tinción se indican en la Tabla 1.

Tabla 1. Reactivos empleados para la caracterización morfológica

Componente a identificar	Reactivo	Cantidad	Color indicador de presencia
Celulosa	Solución de cloruro de cinc yodado	1 gota	Azul
	Yodo	1 gota a 0,1 mol/L	
	H ₂ SO ₄ al 60%	1 gota	
Lignina	Solución alcohólica de floroglucinol	Cantidad necesaria	Rojo
	HCl	1 gota	
Lípidos	Sudan III	2 gotas	Anaranjado
	Alcohol al 70%	Cantidad necesaria	
Almidón	Lugol	1 gota	Azul

Es importante resaltar que la tinción indica la presencia de celulosa, lignina, lípidos y almidón cuando la muestra se torna de color azul, rojo, anaranjado y azul, respectivamente.

Caracterización química

Humedad

Un gramo de la muestra se llevó al horno a 105 °C hasta lograr un peso constante.

Extracción de compuestos solubles en cloroformo-metanol y agua.

La extracción de compuestos insolubles se desarrolló con la finalidad de eliminar aquellas sustancias que pudieran interferir con la cuantificación de celulosa, hemicelulosa y lignina que se encuentran en la biomasa, como los azúcares, los ácidos y otras moléculas de bajo peso molecular. Para ello, 5 gramos de la muestra fueron puestos en contacto con 200 ml de cloroformo y 100 ml de metanol en un extractor Soxleth. A medida que transcurrió la lixiviación, la solución contenida en el balón se tornó amarilla indicando que la extracción de insolubles estaba en operación. Este proceso terminó cuando el líquido acumulado en el brazo sifón no presentó coloración, después de 9 lavados. Posteriormente, el cartucho con la muestra se secó a 40°C hasta peso constante y se puso de nuevo en contacto con 300 ml de agua desionizada en el Soxleth, para retirar los solubles en esta sustancia. El proceso terminó después de 7 lavados y el cartucho con la muestra de nuevo se secó a 40°C, para determinar gravimétricamente los porcentajes de sustancias solubles de la cáscara de banano. Todos los análisis se hicieron por duplicado y el error experimental se ajustó a un valor menor a un 5%.

Van Soest

Con el fin de caracterizar los componentes de la pared celular de la cáscara de banano (celulosa, hemicelulosa y cenizas), se utilizó el método de Van Soest (1983). Para ello se partió de un gramo de muestra, proveniente de la extracción de solubles con el Soxleth. Para la digestión de la muestra con la solución detergente neutra y ácida se empleó un fibertest marca RALPA. Los lavados entre cada extracción se hicieron con agua caliente y acetona.

Lignina Klason

Para la determinación de lignina total insoluble se pesaron 200 mg (0,2 g) de la biomasa la cual se puso a digerir en un frasco boeco ámbar junto con 2 ml de H₂SO₄ al 72% (v/v) por una hora. Una vez pasado este tiempo de reacción, se adicionó 56 ml de agua destilada, dejando agitar la mezcla por cinco minutos para posteriormente llevarla a autoclave por una hora. Luego la solución se filtró al vacío y el sólido residual se lavó con abundante agua (aproximadamente 400 ml) hasta lograr un pH neutro y se secó en una mufla a 105°C hasta lograr peso constante.

Caracterización térmica

Para esta caracterización se realizó un análisis TGA – Termogravimétrico y DSC – Calorimetría Diferencial de Barrido. En el primer análisis se empleó una muestra previamente adecuada de 8.81 mg de cáscara de banano, colocándola en una placa de cerámica y dentro del equipo, el cual manejaba una tasa de calentamiento de 20 °C/min en una atmósfera de nitrógeno. El rango de temperatura experimental varió entre la temperatura ambiente y 900 °C.

Para el análisis DSC el equipo se compone de dos porta muestras (uno para la muestra y el otro para la referencia), con calentadores independientes y sensores de temperaturas. Se emplearon 1.4 mg de cáscara de banano, la cual fue sometida a una tasa de calentamiento de 10 °C/min en una atmósfera de nitrógeno, que inició con la temperatura ambiente y finalizó con 400 °C.

Valorización de la biomasa

Elaboración de papel

De acuerdo con el contenido de holocelulosa presentado en la caracterización química, se evidenció que una de las posibles aplicaciones de la biomasa era la generación de papel. Para esto, se emplearon 70 gramos de papel reciclado y 30 gramos de cáscara de banano triturada, los cuales se dispersaron en bastante agua hasta obtener una solución más acuosa que espesa. Con la ayuda de un marco en el cual estaba adherida una fina rejilla se recogió una capa homogénea de pasta, de aproximadamente 3 mm de espesor. Esta pasta se

separó con cuidado de la malla y luego se puso a secar hasta su peso constante.

Al papel de reciclaje y al papel obtenido de la cáscara de banano por comparación, se les aplicó la prueba de materiales TAPPI 494 de la TAPPI Standards: Regulations and Style Guidelines, la cual indica el grado de resistencia mecánica de rompimiento del mismo. Esta prueba se hizo en una máquina INSTRON, a una velocidad de 25 mm/min. El corte de las láminas o probetas (cinco por tipo de papel), se hizo con una cortadora láser proporcional al tamaño y la velocidad sugerida por la norma, en unas dimensiones de 14 mm de ancho por 140 mm de largo.

Elaboración de bioplástico

El almidón es uno de los componentes principales para la elaboración de bioplásticos. Como las pruebas de tinción con lugol mostraron la presencia de este componente en las cáscaras, se utilizó este material para realizar las diferentes pruebas, pero sin extraerlo de la cáscara, lo cual es un aporte frente a otras investigaciones en las que se obtiene el biopolímero a partir de almidón puro nativo o modificado químicamente. Para esto se efectuaron tres ensayos:

Ensayo 1:

Para este primer ensayo se emplearon 100 g de cáscara de banano, a los cuales se les realizó una adecuación preliminar para eliminar los contaminantes presentes. Esta adecuación consistió en un lavado de las cáscaras con agua caliente por 5 minutos, posteriormente un secado a 45 °C por una semana hasta obtener peso constante, seguido de una trituración que redujo las cáscaras a partículas de tamaño de 2 mm y finalmente se empleó la técnica de cuarteo (SECOFI, 1985) hasta obtener una muestra de 50 gramos.

A partir de esta muestra de 50 gramos, se procedió a calentarla en un vaso precipitado de 500 ml con agua destilada, hasta alcanzar el punto de ebullición. Posteriormente se extrajo la biomasa de la solución calentada y se mezcló en una licuadora hasta lograr una masa, la cual se colocó en el horno a una temperatura de 45 °C durante 24 horas.

Trascurrido el tiempo, se trituró la masa seca hasta obtenerla en forma de polvo. De este polvo

se tomaron 50 g los cuales se mezclaron con 50 ml de vinagre, 50 ml de glicerina y 50 ml de agua destilada; estos ingredientes se sometieron a calentamiento y se mezclaron eventualmente durante el proceso, hasta alcanzar una temperatura inferior a 60°C.

Ensayo 2:

Para este segundo ensayo se emplearon directamente 143.44 g de cáscaras de banano frescas (sin lavado y secado previos) y se calentaron en un vaso precipitado de 800 ml con agua destilada, hasta alcanzar el punto de ebullición.

Posteriormente se extrajo la biomasa de la solución calentada y se mezcló en una licuadora hasta obtener una masa, la cual se colocó en el horno a una temperatura de 45 °C durante 24 horas. Para este ensayo se realizó el mismo procedimiento de elaboración del bioplástico empleado en el ensayo No. 1, ya que lo que se quería demostrar era si la biomasa necesitaba una adecuación previa o si se podía emplear directamente.

Ensayo 3:

En este ensayo se emplearon 70.04 g de cáscara de banano, los cuales se depositaron y mezclaron en un vaso precipitado de 800 ml con 400 ml de agua destilada y 2.0481 g de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ durante media hora en ebullición, para evitar el pardeamiento enzimático y que el plástico resultante durara aproximadamente 30 días. Posteriormente se sacaron las cáscaras y se secaron con gasa por otros 30 minutos, para luego hacer una pasta con ellas en una licuadora. De esta pasta acuosa se tomaron 25 ml y se mezclaron con 3 ml de HCl 0,1 M, 2ml de glicerol y 3 ml de NaOH 0,1 M. Una vez mezclados todos los ingredientes se depositó la pasta en una caja Petri y se introdujo al horno a 103 °C por 30 minutos, obteniéndose exitosamente el bioplástico.

A partir de las tres experimentos, el resultado exitoso fue el realizado en el ensayo 3, el cual se replicó pero con diferentes biomasa de banano, como se muestran a continuación en la Tabla 2.

El objetivo principal de esta experimentación adicional era probar cuál biomasa era la más idónea para la elaboración de bioplástico.

Tabla 2. Experimentos para producir el bioplástico

No. De ensayo	Tipo de biomasa	Cantidad de biomasa
E1	Cáscara de banano previamente adecuada, pulverizada y sin $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$.	25 ml.
E2	Cáscara de banano sin adecuaciones, pulverizada y sin $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$.	19 ml.
E3	Cáscara de banano sin pulverizar y con $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$.	20 ml.
E4	Cáscara de banano pulverizada y con $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$.	15 ml.

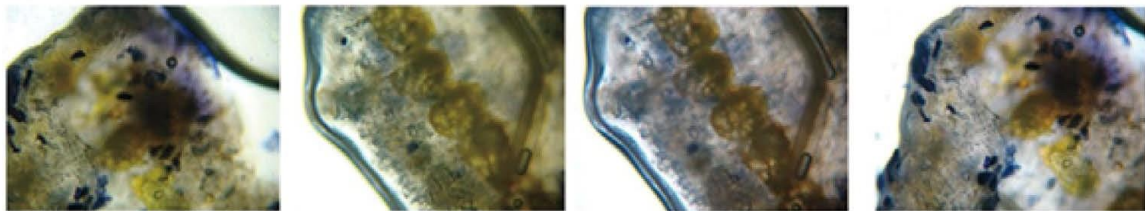
Resultados y discusión

Caracterización morfológica

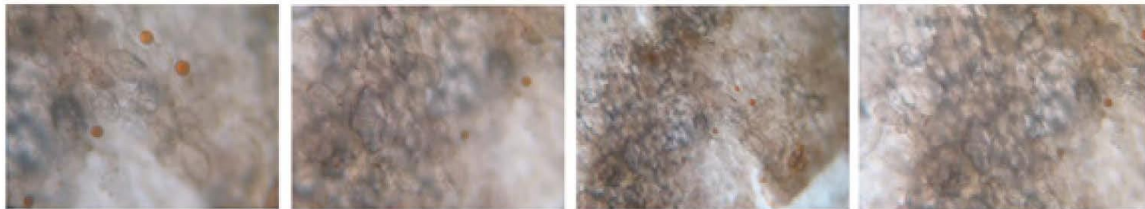
A partir de la metodología sugerida por Flórez, (2013) para caracterizar morfológicamente biomasa, se obtuvo que las paredes primarias del tejido interno de la cáscara de banano en fresco tiñeron de color azul, indicando la fuerte presencia de celulosa Figura 1. En algunas estructuras se observaron engrosamientos en las paredes,

probablemente de carácter secundario. No se presentó en esta parte del tejido coloración roja propia de la lignina, probablemente porque en esta parte interna de la cáscara no hay estructuras de soporte propias del xilema y el floema de la planta, células piedra o engrosamientos de paredes secundarias ricas en lignina. Es posible que hacia la parte externa de la cáscara aparezcan estos tipos de estructuras que expliquen el alto contenido de lignina encontrado en la caracterización de tipo químico.

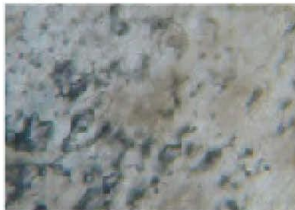
Celulosa



Lipidos



Lignina



Almidones

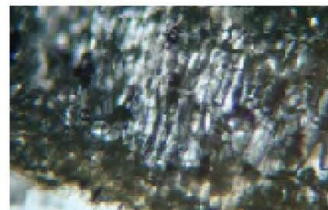
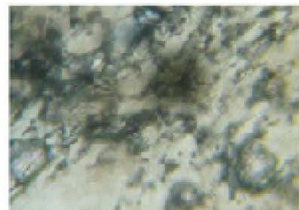


Figura 1. Tinción de las muestras

Por otro lado, los lípidos se observaron como pequeñas gotas de color naranja en menor proporción, en contraste con la gran cantidad de gránulos de almidón que tiñeron de morado con el lugol y que indica la presencia de cadenas lineales y ramificadas de amilosa y amilopeptina, que son polisacáridos con los que se puede producir, a través de procesos como la hidrólisis, fermentación y destilación, productos como el etanol, o por procesos de tipo químico, bioplásticos.

Al parecer, esta primera caracterización indica que el residuo podría ser empleado para la producción de biocombustibles por el hallazgo de azúcares distribuidos en la celulosa y almidón, además al no estar presente la lignina facilita la extracción de estos, pero es un tema que ya ha sido estudiado. Sin embargo, esta caracterización solo permite la determinación de la presencia o ausencia y no la cantidad, que es una medida entre tantas, que permite la viabilidad del aprovechamiento del residuo. Adicionalmente es importante la determinación de la humedad, ya que es uno de los parámetros principales para la viabilidad económica porque a mayor contenido de éste mayor consumo energético se presentará.

Caracterización química

Humedad

A través de la prueba de humedad se obtuvo que el porcentaje de este parámetro para las cáscaras de banano es de un 11.91%. Según Arrieta *et al.* (2006), la cáscara de banano en su proceso de maduración realiza un proceso osmótico donde el agua de la cáscara es transferida a la pulpa del fruto, por lo que su valor varía de acuerdo con el estado de maduración en que se encuentre la cáscara y las condiciones ambientales de la zona que propician este fenómeno. Similares resultados fueron reportados por Campuzano *et al.* (2010).

Es importante mencionar que el contenido de humedad obtenido de esta biomasa es menor al 50%, es decir que respecto a este parámetro no presenta limitaciones en cuanto al desarrollo de diversas aplicaciones incluyendo las térmicas, en donde se requiere que el contenido deba ser menor al 20%.

Por medio de un estudio realizado por Kasper *et al.* (2013), en el que se presenta la humedad

de diferentes biomásas altamente empleadas en diversas aplicaciones térmicas como el bagazo de caña de azúcar (11%), cáscara de arroz (8.8%), hoja de banano (8.3%) y paja de caña de azúcar (9.9%), se observa que la cáscara de banano (11.9%) presenta un porcentaje de humedad similar al bagazo de caña de azúcar y cercano a las otras biomásas. Adicionalmente, en este estudio desarrollado por Kasper *et al.* (2013), se identifica que otro de los residuos generados por la cosecha de este fruto (hoja de banano) muestra un valor muy bajo de humedad, lo que revela otra posible utilidad de uno de los residuos de este cultivo frutal, probablemente en tratamientos de carácter térmico.

Sin embargo, para la determinación de la viabilidad energética de un residuo, aparte del contenido de humedad, es importante evaluar el contenido de material volátil y carbono, los cuales proporcionan una medida del grado de facilidad de ignición de la biomasa, también el contenido de cenizas, azufre y nitrógeno, los cuales indicará el grado de escoria que pueda generar la biomasa en los procesos de combustión. Nogués *et al.* (2010).

Van Soest y Klason

Una vez realizada la metodología propuesta por Peter Van Soest, que determinó que la porción de la muestra es insoluble en un detergente neutro (FDN) y ácido (FDA), se pudo conocer las fracciones completamente digeribles de carbohidratos y proteínas, así como lípidos y algunas cenizas (FDN), mientras que con el segundo método (FDA), se pudo aislar principalmente celulosa y lignina Segura *et al.* (2007). Cabe resaltar que mediante la diferencia de los valores obtenidos respectivamente por estos métodos, se logró cuantificar la fracción de hemicelulosa presente en la muestra de estudio.

Mediante esta técnica se obtuvo la siguiente caracterización química para la cáscara de banano en % en base seca: 23.03% de hemicelulosa, 23.02% de celulosa, 0.78% de cenizas y 29.87% de lignina Klason. A partir de esta caracterización se aprecia que el contenido de holocelulosa (celulosa más hemicelulosa) es de 46.05% y si al 100% se le resta este valor más lo que se extrajo de insolubles en cloroformo-metanol y solubles en agua caliente, que fue de un 12% y el contenido de lignina y cenizas, la diferencia da un 11.3% que podría corresponder al almidón presente en la cáscara (cuya presencia fue corroborada en la tinción con

lugol), lo que incrementaría a un 57.4% el contenido de carbohidratos útiles para la producción de biocombustibles y otros bioproductos de interés.

La relación 1/1 entre celulosa y hemicelulosa hallada en este estudio, también fue cercana a la hallada por Monsalve *et al.* (2006), para cáscara de banano: 14.8% de hemicelulosa y 13.2% de celulosa, aunque ellos encontraron un 64.5% menos de holocelulosa y un 53.1% menos de lignina que en esta investigación. Las condiciones en que fue recolectada la muestra, el tipo de especie, el estado de madurez del fruto, las condiciones agroclimáticas de cultivo y los métodos usados para hacer la caracterización, entre otros, pueden explicar esta diferencia.

El contenido de cenizas es el resultado de la combustión de la parte inorgánica de la biomasa, este valor es importante ya que indicará si existirán problemas de obstrucción, escoria, ensuciamiento y corrosión en procesos de combustión. Nogués *et al.* (2010). En las biomásas herbáceas un alto contenido de elementos alcalinos indicarán un gran porcentaje de cenizas Doshi *et al.* (2014). Para el caso de la cáscara de banano el pH varía de acuerdo con el grado de maduración del fruto, cuando éste se encuentra inmaduro (cáscara verde) el pH será alcalino, mientras que al estar maduro (cáscara amarilla) su pH disminuye significativamente a ácido, esto se debe posiblemente a que los ácidos

orgánicos disminuyen conforme se da el proceso de maduración de la fruta al transformarlos en azúcares (Cardona y Velásquez, 2012). En este estudio, las cenizas fueron mucho más bajas que las reportadas por Monsalve *et al.* (2006), probablemente porque las cáscaras fueron lavadas antes de hacer la caracterización.

Respecto al valor de la lignina, su porcentaje puede ser alto o bajo dependiendo de la aplicación. Si se requiere extraer la fibra, un mayor contenido de ésta dificultará su obtención, mientras que si se precisa la transformación de la biomasa a pellets, un mayor contenido servirá como aglutinante en su elaboración Nogués *et al.* (2010).

Caracterización térmica

Es un método influenciado por el flujo de calor, y la biomasa se ve afectada por este aspecto. La Figura 2 muestra la curva de pérdida de masa que se presenta, de color azul (TGA) y la curva derivativa de pérdida de masa, de color rojo (DTG). De acuerdo con estas gráficas se observa que para el caso de la cáscara de banano se presentaron cuatro etapas de degradación. En el primer proceso se presenta el secado de la muestra desde una temperatura ambiente hasta aproximadamente 100°C, donde se pierde cerca del 1.53% de su masa.

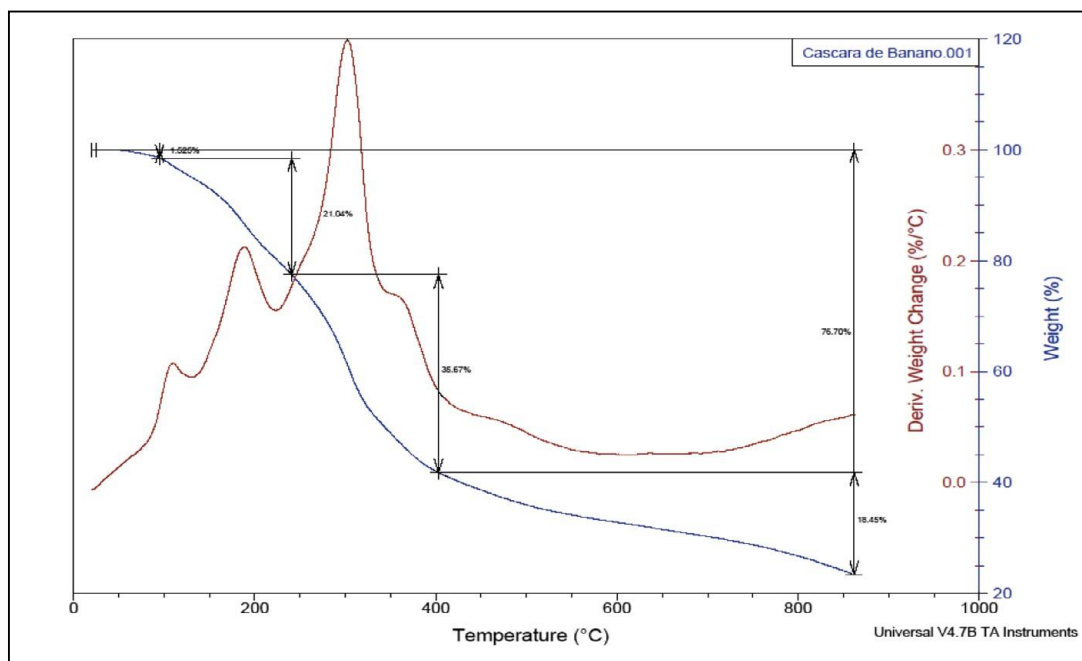


Figura 2. Curva TG y TGA de la cáscara de banano

La siguiente etapa corresponde a una pérdida de masa de un 21.04% posiblemente asociada a la descomposición de la hemicelulosa entre los 150 y los 230 °C, la cual se visualiza por una bien definida curva que se presenta bajo atmósfera de nitrógeno. La máxima descomposición se dio a los 200°C. En la tercera etapa se pierde una masa de un 35.65% entre los 230 y los 400°C que corresponde a una no muy bien definida curva de descomposición de la celulosa. El hombro que se presenta en esta curva, puede estar asociado a algún compuesto particular ligado con la celulosa, como algún tipo de lignina más lábil. La máxima descomposición de la celulosa se dio a una temperatura de 320°C. Estas temperaturas de descomposición pueden estar asociadas con las características de cristalinidad, el tamaño de cristal de la celulosa o el tipo de atmósfera en la que se da su descomposición. Miranda *et al.* (2013).

El último compuesto en degradarse fue la lignina, a la que es necesario llegar a temperaturas superiores de 400°C para que se dé la descomposición de este elemento, al que le corresponde un porcentaje en pérdida de masa del 18.45%.

Por medio de las curvas DSC representadas en la Figura 3, se puede determinar la entalpía necesaria para que ocurran los procesos de reacción, transformación o cambio de estado de la materia, la cual se determina hallando el área bajo la curva y mediante la siguiente expresión:

$$\otimes H = K \otimes A$$

Donde:

ΔH es la entalpía

K es la constante calorimétrica propia del equipo

A es el área bajo la curva

Los valores consolidados de estas entalpías se muestran en la Tabla 3. Como se observa en la Figura 4, se presenta un aumento del poder calorífico en el primer tramo, debido a la pérdida de humedad, lo que evidencia un proceso exotérmico. Es importante aclarar que a pesar de que exista un aumento en la temperatura no implica un aumento en el poder calorífico. Adicional a esto, hay una relación directa entre el aumento de la temperatura y la volatilización de los constituyentes químicos de

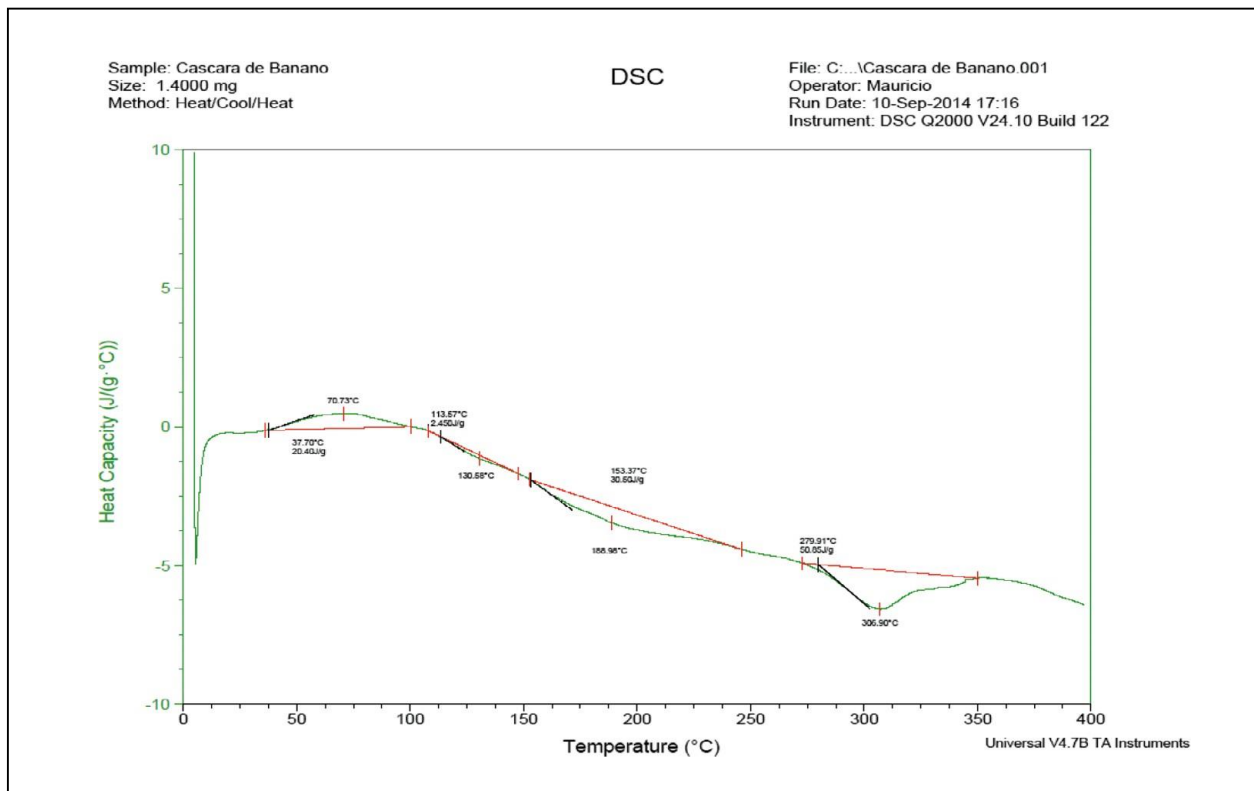


Figura 3. Curva DSC de la cáscara de banano

Tabla 3. Procesos térmicos (exotérmico y endotérmico) por DSC

Etapa	Entalpía (J/g)	Proceso energético	Proceso
1	20,40	Exotérmico (-)	Humedad
2	2,45	Endotérmico (+)	Hemicelulosa
3	30,50	Endotérmico (+)	Celulosa
4	50,85	Endotérmico (+)	Lignina

Fuente: Los autores.

la biomasa (C, H, O, N, S), esto refleja la tendencia descendente en la Figura 3 a partir del primer pico.

Como se observa en el tramo 2, se genera un proceso endotérmico probablemente atribuido a que una vez descompuesta la celulosa y hemicelulosa con una entalpía de 32.95 J/mol, Tabla 3 los constituyentes de la lignina tienden a absorber calor ya que no se evidencia una fragmentación solo hasta que la temperatura alcanza los 350 °C, posteriormente se presenta un descenso asociado a una pérdida de poder calorífico.

De acuerdo con lo anterior se evidencia que hay un alto contenido de constituyentes químicos como

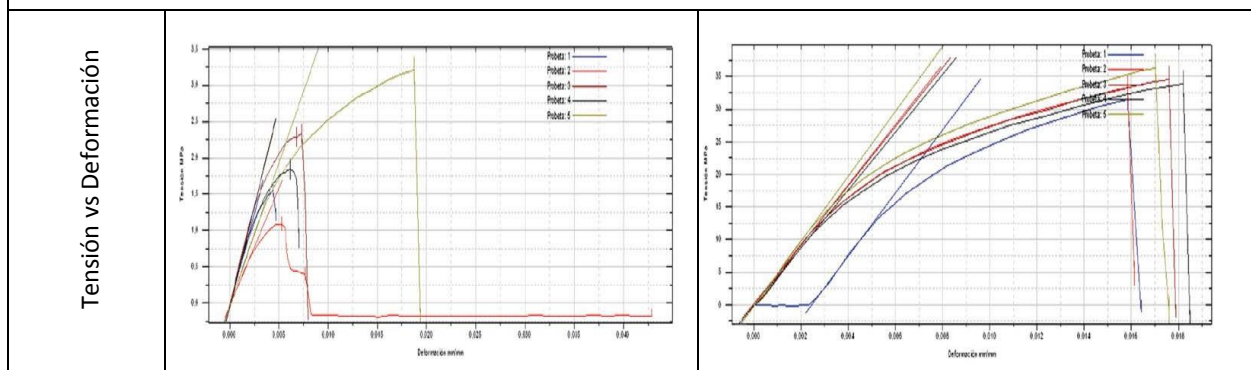
los C, H, O, N, S. Por lo tanto es probable que exista un alto contenido de cadenas de azúcares dentro de la biomasa, lo que permite pensar en su uso para los bioproductos.

Elaboración de papel

Después de elaborar las diferentes probetas, estas fueron sometidas a pruebas de resistencia mecánica. Los resultados se presentan en la Tabla 4, junto con los de la hoja de impresión de papel reciclado (Figura 4). Se observa que la carga máxima que resiste el papel obtenido de la cáscara de banano es aproximadamente tres veces menos que la que resiste el papel reciclado, la tensión

Tabla 4. Resistencia mecánica de la Hoja-banano vs Hoja-reciclable

Probeta	Hoja-Banano				Hoja-reciclable			
	Carga. Max (KN)	Tens. Max (MPa)	Desp. Max (mm)	Defor. Max (mm/mm)	Carga. Max (KN)	Tens. Max (MPa)	Desp. Max (mm)	Defor. Max (mm/mm)
1	0,0123	1,552	0,666	0,0047	0,0427	31,56	2,333	0,0164
2	0,0101	1,089	6,083	0,0428	0,0450	33,24	2,292	0,0161
3	0,0209	2,327	1,125	0,0079	0,0468	34,59	2,542	0,0179
4	0,0175	1,835	0,999	0,0070	0,0458	33,85	2,625	0,0185
5	0,0305	3,206	2,750	0,0194	0,0491	36,24	2,500	0,0176

**Figura 4.** Gráficas de tensión-deformación para las diferentes probetas

máxima es de 10 a 30 veces menos y las fuerzas de deformación son igualmente, 2 a 3 veces menores. También se muestra cómo los resultados de las pruebas son más homogéneos en las de papel reciclado, que en las de papel de cáscaras de banano, debido a la difícil distribución y alineación de las fibras en este último caso. Cabe mencionar que la hoja de impresión reciclable se fabricó según la Norma Tappi T 205 (Forming handsheets for physical test of pulp) y adicionalmente, para determinar las propiedades de este papel, se tuvo en cuenta normas como la Tappi T 220 om-88 (Physical testing of pulp handsheets), Tappi T 494 om-96 (Tensile properties of paper and paperboard – using constant rate of elongation apparatus), Tappi 410 om-93 (Grammage of paper and paperboard – weight per unit area), entre otras.

Por lo tanto, se puede concluir que las fibras de la cáscara de banano no son aptas para fabricar papel en las condiciones en que fue elaborado en esta investigación. Esto se puede deber también a que el material tiene un bajo contenido de holocelulosa (46.05%) y un alto contenido de lignina (García, 2006). Por el contrario, el papel está compuesto en su mayor parte por celulosa y en su fabricación, es fundamental liberarla del denominado complejo hemicelulosa – lignina, que forma la matriz en la que se insertan las microfibrillas elementales de este componente (Núñez, 2008) y tener un bajo contenido de ceniza, como sí lo tiene la cáscara de banano. Esto se puede corroborar con los datos reportados por (García, 2006), quien realiza el análisis del porcentaje de holocelulosa, lignina klason y cenizas a diferentes fibras como lino, cáñamo, kenaf, yute, sisal y abaca, en los cuales el porcentaje de holocelulosa se encuentra en el rango entre 81.6% y 92%, la lignina klason entre 2.9% y el 13.3% y el contenido de cenizas entre el 0.2% y el 2%, siendo el más importante y el que define si es buena materia prima para la producción de papel, el contenido de holocelulosa. Con base en estos resultados reportados por (García, 2006), se observa que la cáscara de banano presenta un valor muy bajo de holocelulosa (46.05%) resultando como materia prima inadecuada para la elaboración de papel.

Elaboración de bioplástico

Los bioplásticos son una alternativa emergente que surge a raíz de la gran problemática ambiental que ocasionan los plásticos derivados del petróleo,

ya que estos son altamente contaminantes por degradarse en un largo periodo, ocupan volúmenes considerables en las estaciones de reciclaje y se generan de manera alarmante debido a la cultura consumista de productos cada vez más desechables (Donoso *et al.*, 2009).

En la actualidad, los diferentes profesionales del área de la química, las ciencias naturales y el medio ambiente han empleado todos sus esfuerzos en desarrollar técnicas para la elaboración de bioplásticos, estas técnicas se pueden agrupar en tres grandes núcleos: los bioplásticos, procedentes de los recursos renovables, los sintetizados por vía biotecnológica y los polímeros biodegradables sintéticos (Remar, 2011). De acuerdo con esta clasificación, el bioplástico generado en el proyecto hace parte de los procedentes de los recursos renovables, ya que se empleó la cáscara de banano como fuente de almidón y posteriormente se desarrolló el proceso químico de polimerización. El almidón es un polisacárido abundante y biodegradable presente en las plantas, el más utilizado es el proveniente del maíz. Los bioplásticos obtenidos a través de esta fuente son catalogados como material termoplástico, lo que le da un valor agregado al producto final (Remar, 2011). Según se mencionó anteriormente, el principal requisito para la elaboración de bioplástico a partir del almidón es que la biomasa presente un alto contenido de éste. Como se reportó en la caracterización morfológica y química, se estima que la cáscara de banano tiene aproximadamente un 11.3% de almidón, muy similar al encontrado por (Bilgin, 2014) a través de un análisis proximal que se realizó a este compuesto y que se presenta en la Tabla 5.

Tabla 5. Composición proximal de la cáscara de banano

Elementos de contenido	g/100g de materia seca
Proteína	8,6 ± 0,1
Grasa	13,1 ± 0,2
Almidón	12,78 ± 0,9
Ceniza	15,25 ± 0,1
Fibra dietética total	50,25 ± 0,2

Fuente: Bilgin, 2014

El almidón, junto con la celulosa, son importantes materias primas utilizadas en la industria de la-

boración de bioplásticos. El almidón se compone de dos tipos diferentes de cadenas de polímeros constituidos por moléculas de glucosa asociadas: la *amilasa* y la *amilopectina*. En la elaboración del bioplástico desarrollado en este proyecto, el ácido clorhídrico se emplea para la hidrólisis de la *amilopectina* necesaria para formar la unión entre éste y las cadenas de glucosa.

A partir de los ensayos realizados por (Bilgin, 2014), se logró demostrar que si se emplea una cantidad menor a 25 ml de pasta de cáscara de banano, el bioplástico resultante es muy frágil y de resistencia débil. Igualmente se adicionó el bisulfito para incrementar la vida media del bioplástico por encima de los tres días, pero en esta investigación se encontró que este compuesto juega otro papel importante en la elaboración del biocompuesto. Las pruebas dieron negativas (E1, E2, Figura 5) en las que no se agregó este compuesto, lo mismo que en el bioplástico que se sometió a calentamiento en el horno a 45 °C (E4, Figura 5), contrario a la investigación desarrollada por (Bilgin, 2014).

El biocompuesto correspondiente al ensayo número 3 fue el único que presentó las características de

un bioplástico, con una duración superior a los 15 días. Desafortunadamente se percibió que el bioplástico obtenido presentó unas partículas pequeñas, propias de la cáscara y que no le daban un aspecto homogéneo al producto (como se observa en la Figura 6) por lo que es importante continuar ensayando técnicas que permitan un mejor acabado del producto.

Por la anterior razón, las pruebas de resistencia mecánica generadas al bioplástico no fueron muy satisfactorias, obteniendo esfuerzos de 0.5994 MPa cuando para un polietileno de baja densidad PEBD este esfuerzo en una prueba mecánica en promedio es de 5.44 MPa (Hernández, 2009). Cabe resaltar que durante la prueba mecánica del bioplástico se observó que el rompimiento se generaba en los segmentos en donde se localizaban fragmentos grandes de la cáscara de banano, mostrando que la no homogenización de la biomasa jugó papel clave en esta prueba.

En la Tabla 6 y la Figura 7, se muestran los resultados de la prueba de resistencia mecánica realizados para el bioplástico.

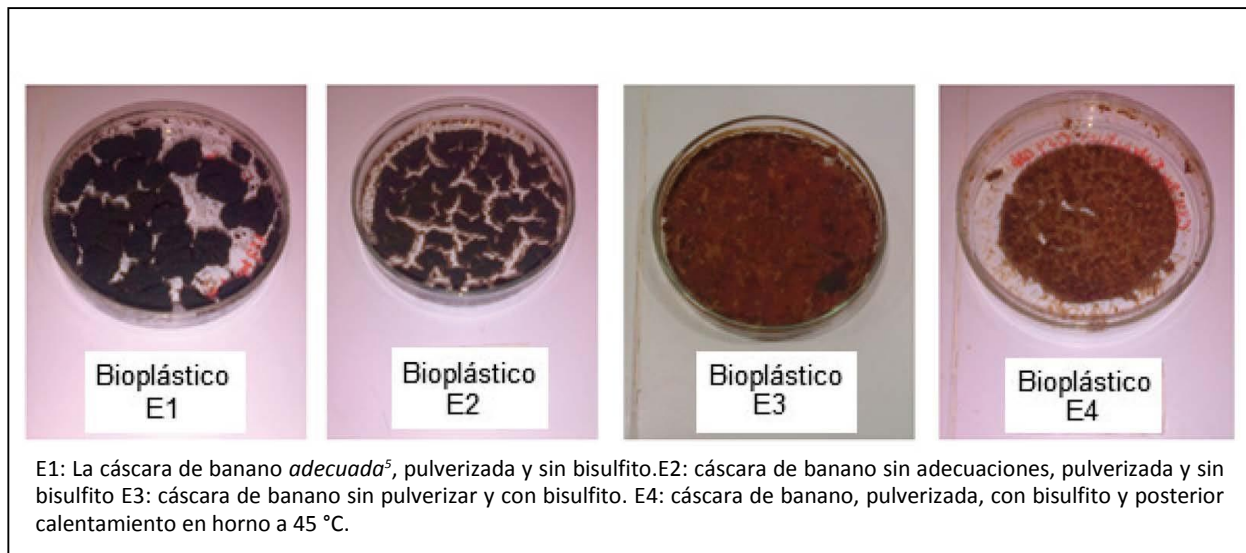


Figura 5. Variación de la metodología para la elaboración de bioplástico

⁵ El término *adecuada* hace referencia a las cáscaras de banano que se lavaron con agua caliente por cinco minutos y se secan a 45°C por una semana, hasta obtener un peso constante.



Figura 6. Bioplástico a partir de cáscaras de banano

Tabla 6. Resultados de la prueba de resistencia mecánica

Probeta	Carga Max. (KN)	Tens. Max. (MPa)	Tens. Flu. S. (MPa)	Desp. Max (mm)	Defor. Max. (mm/mm)	Modulo (MPa)
1	0,0033	0,4248	0,4248	6,498	0,0846	9,103
2	0,0037	0,5994	0,5994	6,786	0,0883	8,216
3	0,0031	0,3630	0,0529	6,589	0,0858	12,170
4	0,0030	0,4287	0,4287	5,267	0,0686	10,110

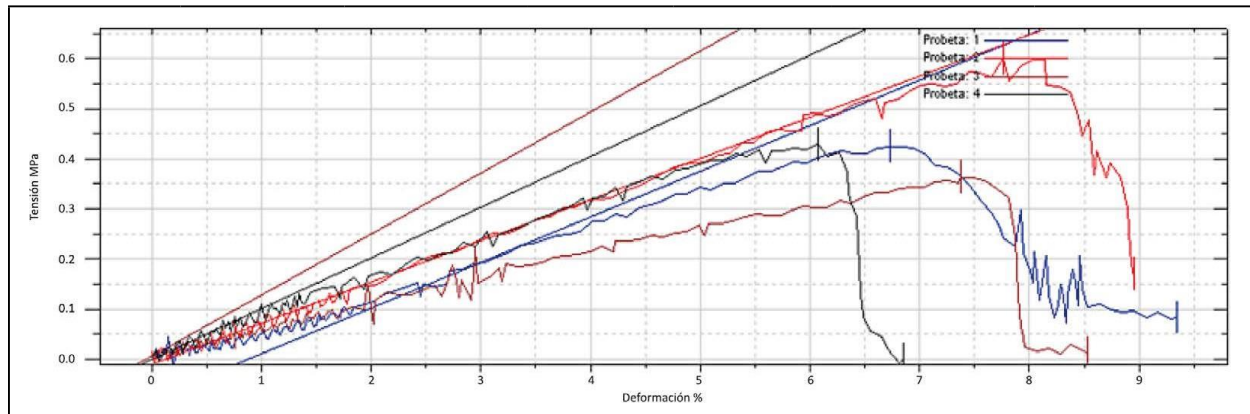


Figura 7. Gráfica de tensión vs deformación para el biopolímero

Conclusiones

- La cáscara de banano tuvo un contenido de 23.03% de hemicelulosa, 23.02% de celulosa, 29.87% de lignina, 11% de solubles, 12.3% de almidón y 0.78% de cenizas. Algunos de estos compuestos dieron positivo a las tinciones hechas durante el estudio morfológico, como la celulosa y el almidón. El estudio térmico indicó que la biomasa se volatiliza en un rango de temperatura entre 200 - 400°C y que la lignina residual es la más recalcitrante a la descomposición.
- Su aplicación en la fabricación del papel generó un producto poco homogéneo y de bajos esfuerzos mecánicos, principalmente por tener un escaso contenido de holocelulosa y un alto contenido de lignina. En este caso, se recomienda un estudio para observar la viabilidad de usarla en la fabricación de pellets.

- Se desarrolló la metodología para fabricar el bioplástico a partir de todo el material contenido en las cáscaras del banano, sin necesidad de aislar el almidón, como se hace en muchas investigaciones. Pero esto afectó la calidad del biomaterial, por lo que se hace necesario continuar con las investigaciones para mejorar la homogeneidad del producto, que tuvo una vida media superior a los quince días.

Agradecimientos

Se agradece al encargado de Laboratorio de Bioprocesos, Javier Jurado, toda su orientación y acompañamiento en la realización de la investigación y a la Universidad Autónoma de Occidente por los recursos aportados en este estudio.

Referencias

- Arrieta, A., Baquero, U. y Barrera, J. (2006). *Caracterización fisicoquímica del proceso de maduración del plátano papocho (Musa ABB Simmonds)*. *Agronomía Colombiana*. 24(1): 48 – 53.
- Bilgin, Elif. (2014). *Going Bananas, using banana peels in the production of bio-plastic as a replacement of the traditional petroleum based plastic*. Recuperado de <https://www.googleusercontent.com/en/projects/ahJzfnN-jaWVuY2VmYWlyLTlwMTJyRAsSC1Byb2plY3RTa-XRlIjNhaEp6Zm5OamFXVnVZMlZtWVdseUxUSXd-NVEp5RUFzU0lxQnliMnBsWTNRWW9ZR0tBUXcM>
- Campuzano, A., Cornejo, F., Ruiz, O., y Peralta, E. (2010). Efecto del tipo de producción de banano Cavendish en su comportamiento pos-cosecha. *Revista Tecnológica ESPOL*. 23(2): 41 -48.
- Cardona, L. López, M. y Velásquez, H. (2012). Caracterización mecánica y físico-química del banano tipo exportación Cavendish valery. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*. 58(2): 2075 – 2988.
- Donoso, P., Gómez, S. y Najle, N. (2009). Bioplásticos utilizados en la agroindustria. *Seminario de procesos de producción y materiales industriales II*. Recuperado de http://www.thesis.uchile.cl/tesis/uchile/2009/aq-campos_p/pdfAmont/aq-campos_p.pdf
- Doshi, Pooja; Srivastava, Gopal; Pathak, Gauri & Diksit, Madhurima. (2014). Physicochemical and thermal characterization of nonedible oilseed residual waste as sustainable soil biofuel. *Waste Management*, 34: 1836 – 1846.
- Espinal C, Covalada H y Pérez D. 2005. *La cadena de cultivos ecológicos en Colombia, una mirada global de su estrategia dinámica 1991 – 2005*. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural Observatorio Agrocadenas Colombia. Recuperado de http://www.agronet.gov.co/www/docs_agronet/20051121601_caracterizacion_ecologicos.pdf
- Flórez Pardo L. M. (2002). *Diseño de un Complejo Enzimático Adaptado a la Licuefacción de Frutas Tropicales. Aplicación a la Pulpa de Maracuyá*. Tesis de Doctorado. Universidad Politécnica de Valencia (Valencia, España), 317 p.
- Flórez Pardo L. M. (2013). *Guía para la caracterización morfológica de fibras o biomasa. Guía de procedimientos del grupo de investigación GRUBIOC*. Universidad Autónoma de Occidente – Universidad del Valle (Colombia), 10 pgs.
- García, I. M. (2006). *digital.CSIC ciencia en abierto*. Obtenido de digital.CSIC ciencia en abierto: Recuperado de <http://digital.csic.es/bitstream/10261/66200/1/Caracterizaci%C3%B3n%20de%20fibras%20de%20plantas%20herb%C3%A1ceas.pdf>
- Hernández, N., y Escobar, M. (2009). *Obtención y caracterización de un material polimérico a partir de la mezcla de polietileno de baja densidad (PEBD) y almidón de maíz modificado*. Tesis para optar al título de ingeniero químico. Recuperado de <http://cdigital.uv.mx/bitstream/12345678/938/1/Miriam%20Vazquez%20Escobar.pdf>
- Kasper, F., Eveline, R., Marangoni, C., Souza, O., y Sellin, N. (2013). *Thermochemical characterization of banana leaves as potential energy source. Energy conversion and management*. 75: 603 – 608.

- Miranda, M.I.G.; BICA, C.I.D.; NACHTIGALL, S.M.B.; REHMAN, N.; ROSA, S.M.L. (2013). Kinetic thermal degradation study of maize straw and soybean hull celluloses by simultaneous DSC–TGA and MDSC techniques. *Thermochimica Acta*, 565: 65–71.
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2012). *Anuario estadístico de frutas y hortalizas 2007 – 2011 y sus calendarios de siembras y cosechas*. Ministerio de Agricultura y Desarrollo rural, Bogotá, Colombia
- Ministerio de Minas y Energía. (2006). *Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia*. Ministerio de Minas y Energía, Bogotá, Colombia.
- Monsalve, G., Medina, V., y Ruiz, A. (2006). *Producción de etanol a partir de la cáscara de banano y de almidón de yuca*. Revista Facultad Nacional de Minas. 73(150): 21 – 27.
- Nogués, F., García, D. y Rezeau, A. (2010). *Energía de la biomasa, volumen I*. España: Pressas universitarias de Zaragoza.
- Núñez, E. (2008). *Pulpa y papel I*. Recuperado de: <http://www.cenunez.com.ar/archivos/67-PulpayPapellOctavaParte.pdf>
- Ramírez, A., Montoya, I., y Montoya, A. (2012). *Analysis of the competitive potential of bioethanol in Colombia: an approach from Michael Porter's 5 competitive forces*.
- Remar, R. (2011). Bioplásticos. *Fundacion Moderna. Obtenido de Fundacion Moderna*. Recuperado de <http://www.modernanavarra.com/wp-content/uploads/Bioplasticos.pdf>
- Segura, F., Echeverri, R., Patiño, A., y Mejía, A. (2007). Descripción y discusión acerca de los métodos de análisis de fibra y del valor nutricional de forrajes y alimentos para animales. *Revista de la Facultad de Química Farmacéutica*, 5-7.
- SECOFI, Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, Dirección General de Normas. (1985). *Protección al ambiente-Contaminación del suelo- Residuos sólidos municipales Muestreo- Método de cuarteo*. Norma Mexicana NMX-AA-15-1985, 1-8.
- TAPPI (2013). *TAPPI Standards: Regulations and Style Guidelines*. Recuperado de http://www.tappi.org/content/pdf/standards/tm_guidelines_complete.pdf
- Van Soest, P., (1983). Use of detergents in the Analysis of fibrous feeds. I. Preparation of fiber residues of low nitrogen content. *Journal of the AOAC*. 46: 829 – 835.
- Zea, A., Morales, J., y Peña, D. (2013). *Producción de bioplásticos a partir de cascaras de banano*. Disponible en línea en: <https://prezi.com/t7pu7rleoc4o/produccion-de-bioplasticos-a-partir-de-cascaras-de-banano/>