

EVALUACIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS DE BIOPLÁSTICOS TERMO-COMPRESIONADOS ELABORADOS CON HARINA DE YUCA

EVALUATION OF PHYSICAL PROPERTIES OF THERMOPRESSING BIOPLASTICS MADE FROM CASSAVA FLOUR

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DE TERMO-COMPRESIONADOS BIOPLÁSTICOS FEITOS A PARTIR DE FARINHA DE MANDIOCA

Diana Paola Navia-Porras¹, Nathalia Bejarano-Arana²

RESUMEN

Las innovaciones tecnológicas en materiales plásticos elaborados con recursos naturales renovables requieren el conocimiento de sus propiedades y características funcionales para identificar sus potencialidades y ventajas competitivas frente a los materiales elaborados con recursos no renovables. En este trabajo, se estudió el comportamiento de las propiedades mecánicas, densidad y color (L^ , a^* y b^*) en bioplásticos elaborados con harina de yuca de variedad MPER-183 gelatinizada, reforzados con fibra de fique. Los bioplásticos fueron obtenidos mediante la técnica de moldeo por compresión variando la presión (0, 20 y 40 psi) y la temperatura (180, 190 y 200°C). Las variables temperatura y presión de compresión afectaron significativamente ($p < 0,05$) las propiedades mecánicas, el color y la densidad de los bioplásticos, identificando las condiciones de temperatura de 180°C y presión de 0 psi como las más favorables para L^* , a^* y b^* , altos valores de esfuerzo de flexión, modulo elástico de flexión y baja densidad, mientras que la temperatura de 190°C y presión de 0 psi, fueron apropiadas para obtener altos valores de esfuerzo de tensión y modulo elástico de tensión.*

Recibido para evaluación: 10 de octubre de 2013. **Aprobado para publicación:** 16 mayo de 2014

1 Universidad de San Buenaventura sede Cali, Facultad de Ingeniería, Grupo de Investigación Biotecnología. Magister en Ingeniería de Alimentos. Cali, Colombia.

2 Universidad de San Buenaventura sede Cali, Grupo de Investigación Biotecnología. Estudiante de Ingeniería Agroindustrial. Cali, Colombia.

Correspondencia: dnavia@usbcali.edu.co

ABSTRACT

Technological innovations in plastics made from renewable resources require knowledge of their properties and functional characteristics to identify their qualities and competitive advantages over materials made from nonrenewable resources. This report aims to study, the behavior of the mechanical properties, density and color (L^ , a^* and b^*) of bioplastics made from gelatinized cassava flour of variety MPER-183, reinforced with fique fiber. Bioplastics were obtained by compression molding technique by varying the pressure (0, 20 and 40 psi) and temperature (180, 190 and 200°C). The variables temperature and compression pressure significantly affected ($p < 0,05$) the mechanical properties, color and density of bioplastics, identifying conditions at 180°C and 0 psi pressure, as the most favorable for L^* , a^* and b^* , high values of flexural strength, flexural elastic modulus and low density, while the temperature of 190°C and pressure of 0 psi, were suitable for obtaining higher values of tensile strength and tensile elastic modulus.*

RESUMO

As inovações tecnológicas em plásticos feitos a partir de recursos renováveis exigem o conhecimento das suas propriedades e características funcionais para identificar seus pontos fortes e vantagens competitivas sobre os materiais feitos a partir de recursos não-renováveis. Neste relatório o comportamento das propriedades mecânicas, densidade e cor (L^ , a^* e b^*) de bioplásticos feitos a partir de farinha de mandioca gelatinizada da variedade MPER-183, reforçado com fibras de fique, foi estudada. Bioplásticos foram obtidos pela técnica de moldagem por compressão através da variação da pressão (0, 20 e 40 psi) e temperatura (180, 190 e 200°C). As variáveis de temperatura e de pressão de compressão afetam significativamente ($p < 0,05$) as propriedades mecânicas, a cor e densidade de bioplásticos, identificando as condições de 180°C e à pressão de 0 psi como o mais favorável para L^* , a^* e b^* , de alta valores da esforço de flexão, módulo de elasticidade de flexão e baixa densidade, enquanto a temperatura de 190°C e à pressão de 0 psi, sendo assim adequadas para a obtenção de maiores valores de resistência à tracção e módulo de elasticidade à tracção.*

INTRODUCCIÓN

Los plásticos provenientes de fuentes petroquímicas son ampliamente usados en los sectores de la economía mundial, tales como el industrial, el agrícola, el pecuario y de servicios, debido a que cuentan con propiedades que favorecen sus aplicaciones y comercialización. La demanda de estos materiales ha aumentado progresivamente, y en consecuencia también su participación en la producción de desechos sólidos [1], en razón a su baja tasa de degradación. No obstante, existen otras alternativas para la disposición final de los plásticos provenientes de hidrocarburos, como la incineración, pero esta técnica genera perjuicios ambientales por la producción de gases tóxicos [2]; por su parte, el reciclaje, implica posibilidades de

PALABRAS CLAVE:

Flexión, Color, Densidad, Biopolímeros

KEYWORDS:

Flexion, Color, Density, Biopolymers

PALAVRAS-CHAVE:

Flexão, Cor, Densidade, Biopolímeros.

contaminación de los materiales recolectados y sus costos de separación y procesamiento son aspectos de amplia discusión [3].

En el contexto de estos aspectos ambientales, las investigaciones en plásticos biodegradables han ganado interés desde hace algunos años, y a la fecha, el almidón y el ácido poliláctico, son considerados las materias primas principales para la obtención y comercialización de bioplásticos para empaques y otras aplicaciones industriales [4]. En general, los recursos amiláceos son prominentes a nivel mundial para la producción de bioplásticos, en razón a su abundancia, disponibilidad y facilidad para la plastificación a través de diversas técnicas de procesamiento como extrusión, termo-compresión o termoformado [5].

El moldeo por compresión en caliente o termo-compresión es una **técnica** con poca generación de desperdicios, y que debido a la baja orientación en las piezas moldeadas, permite la distribución apropiada de los rellenos fibrosos en la matriz polimérica, manteniendo las propiedades mecánicas del producto obtenido [6]. Estos aspectos son relevantes, dado que los recursos amiláceos pueden mezclarse con fibras naturales para favorecer las propiedades mecánicas de los bioplásticos fabricados [7,8]. En Colombia, la fibra natural de mayor producción es el fique [9] y su agroindustrialización esta direccionada principalmente a la producción de sacos para empaques, dado su resistencia mecánica, por lo que su uso como componente reforzante en bioplásticos es una alternativa viable.

Como antecedentes de este trabajo, se han desarrollado materiales semirrígidos utilizando harina de yuca, mezclada con fique y glicerol mediante moldeo por compresión [10], obteniendo resultados prometedores en cuanto a su funcionalidad mecánica, sobresaliendo la variedad de yuca MPER 183 sobre otras estudiadas [11].

Con el propósito de fortalecer algunas de las propiedades de los bioplásticos desarrollados en estudios previos con harina de yuca nativa, se requiere hacer modificaciones al proceso y/o materias primas; en consecuencia, el objetivo de este trabajo fue evaluar las propiedades mecánicas tensión y flexión, densidad y color (L^* , a^* y b^*) en materiales biocompuestos elaborados con harina de yuca gelatinizada incorporando fibra de fique en la matriz termoplástica.

MÉTODO

Los bioplásticos fueron elaborados con harina gelatinizada de yuca con un contenido de humedad de $11 \pm 0,5\%$ (base húmeda), fibra de fique con humedad de 10% (base húmeda) molida y tamizada (tamaño $\leq 250 \mu\text{m}$), y plastificante (glicerol USP Disan, Colombia). La harina fue obtenida de la mollienda de trozos secos de raíces de yuca de la variedad MPER 183 cultivada en la zona norte del Departamento del Cauca (Colombia). La fibra fue extraída de las hojas de fique (*Furcraea* sp.) y adquirida en la Cooperativa Agropecuaria de Paniquitá Ltda. (Cauca, Colombia), posteriormente se redujo su tamaño en un molino de martillos/cuchillas (Penagos, TP8) y fue tamizada en un tamizador eléctrico vibratorio.

Preparación de las muestras

La gelatinización del almidón se realizó a partir de dispersiones acuosas de harina de yuca (30% p/p), en un baño termostataado a 75°C durante 20 min. Posteriormente, la fibra y glicerol fueron incorporados a la mezcla hasta obtener una masa moldeable con un contenido de humedad del $40 \pm 1\%$, la cual fue termo-comprimida durante 5 min bajo las condiciones descritas en el cuadro 1, en una prensa neumática (Plasmega, Colombia). Estas condiciones fueron empleadas para elaborar los bioplásticos y evaluar sus propiedades mecánicas, color y densidad.

Evaluación mecánica

Las propiedades de flexión se evaluaron bajo las especificaciones de la norma ASTM D790 [12]. Se determinó el esfuerzo en la rotura ($\sigma\Phi$) y el modulo elástico (EF) en muestras previamente acondicionadas durante diez días a $23 \pm 1^\circ\text{C}$ y $50 \pm 1\%$ de humedad relativa (HR). Se evaluaron 7 muestras por tratamiento.

Las propiedades de tensión fueron evaluadas de acuerdo a la norma ASTM D638 [13]. Se determinó el esfuerzo en la rotura (σT) y el modulo elástico (ET) en muestras tipo I, previamente acondicionadas durante diez días a $23 \pm 1^\circ\text{C}$ y $50 \pm 1\%$ de HR. Se evaluaron 7 muestras por tratamiento.

Para la evaluación de las pruebas de tensión y flexión se utilizó un texturómetro (Shimadzu, EZ Test L, Japón), equipado con una celda de carga de 500 N.

Densidad

La densidad fue calculada como la relación entre el peso y el volumen medida a $23 \pm 1^\circ\text{C}$, en muestras de 2 cm de largo, 2 cm de ancho y 3 mm de espesor. El peso fue obtenido con balanza analítica Ohaus (PA214C, USA) y el volumen midiendo las dimensiones con calibrador digital (Control Company, 3415, USA). Los valores reportados corresponden al promedio de 10 mediciones de cada tratamiento.

Color

El color de los bioplásticos fue determinado usando un colorímetro (CM-600d, Konica Minolta Optics Inc., Japón). Se obtuvieron coordenadas de color CIEL*a*b* (L^* , a^* , y b^*) empleando como referencia el iluminante D65 con observador de 10° . El rango de los parámetros de color fue $L^* = 0$ (negro) hasta 100 (blanco), $a^* = -60$ (verde) hasta +60 (rojo), y $b^* = -60$ (azul) hasta +60 (amarillo). Los valores reportados corresponden al promedio de cinco mediciones en cada tratamiento. Las mediciones se realizaron en las muestras obtenidas en la prueba de flexión.

Diseño experimental y análisis estadístico

Se empleó un diseño experimental factorial con dos factores y tres niveles por factor (Cuadro 1), con un total de nueve tratamientos (Cuadro 2). Los resultados de las variables de respuesta de tensión, flexión, densidad y color, fueron analizados con el programa SPSS versión 20, mediante análisis de varianza (nivel de confianza del 95%) debido a que los datos obtenidos se ajustaron a una distribución normal. Posteriormente se usó la prueba de *Tukey* para la comparación de medias, teniendo en cuenta que se presentaron varianzas homogéneas.

RESULTADOS

Propiedades mecánicas

La figura 1 representa el comportamiento del esfuerzo de rotura y módulo elástico de flexión y la figura 2 muestra los valores de esfuerzo de rotura y módulo elástico de tensión. El análisis de varianza estableció que la temperatura, presión e interacción entre ambos factores influenciaron significativamente ($p < 0,05$) todos los valores de las propiedades mecánicas evaluadas. Asimismo, la presión tuvo mayor efecto que

Cuadro 1. Diseño experimental.

Factores	Niveles	Variables de Respuesta
T ($^\circ\text{C}$)	180	Propiedades de flexión Propiedades de tensión Color Densidad
	190	
	200	
Presión (psi)	0	
	20	
	40	

Cuadro 2. Codificación de los experimentos.

Tratamiento	Temperatura ($^\circ\text{C}$)	Presión (psi)
A	180	0
B	180	20
C	180	40
D	190	0
E	190	20
F	190	40
G	200	0
H	200	20
I	200	40

la temperatura en los valores de σ_F , E_F , σ_T y E_T . Todos los tratamientos fueron significativamente diferentes en las cuatro propiedades ($p < 0,05$), siendo "A" el de mayor valor en las propiedades de flexión con 4,7 MPa (σ_F), y 307,1 MPa (E_F) y "D" en tensión con 1,85 MPa (σ_T), y 515,8 MPa (E_T).

Puede notarse una tendencia a la disminución en los valores de σ_F y E_F , con el incremento simultaneo en la temperatura y presión de compresión. Este comportamiento generalizado para flexión y tensión (comparando los tratamientos de 180 y 200°C), se relaciona posiblemente con un cambio estructural de la matriz

Figura 1. Propiedades de flexión.

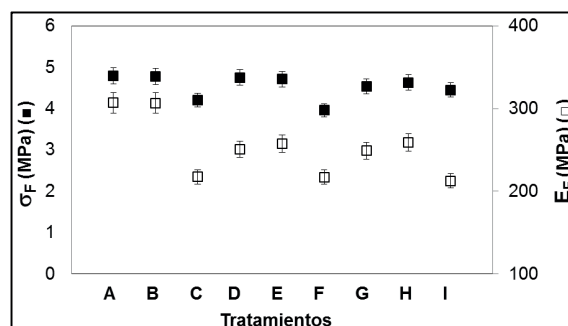
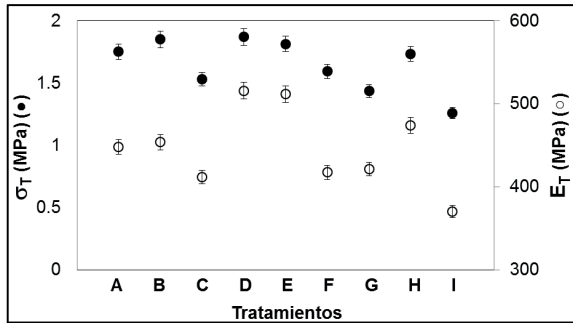


Figura 2. Propiedades de tensión.



termoplástica ocasionado por la acción combinada de calor y alta presión a la que fue sometida en la termo-compresión, en donde posiblemente se generaron aglomerados de amilosa/amilopectina con fracciones proteicas y de fibra desnaturalizadas por la acción de las temperaturas cercanas a 200°C. Estas aglomeraciones, desfavorecen la plastificación uniforme del biopolímero, ya que concentran la capacidad de resistencia mecánica en algunos puntos del material, debilitando las zonas restantes, ocasionando que su respuesta ante los esfuerzos mecánicos disminuya.

Al respecto, algunos investigadores han argumentado que las técnicas de procesamiento que involucran calor y presión, generan modificaciones en la estructura del material, como disociación de las macromoléculas poliméricas, pero a la vez, pueden formarse acumulaciones en puntos específicos de la matriz termo-plastificada, que no favorecen su desempeño mecánico. En este sentido, se ha reportado que en materiales extruidos de almidón, las altas temperaturas de procesamiento pueden desnaturalizar las proteínas las cuales forman aglomeraciones con el almidón gelatinizado, minimizando el esfuerzo de tensión [14].

Por su parte, el incremento de la temperatura de moldeo podría ocasionar la degradación en los componentes del material, perjudicando la resistencia mecánica del mismo. De acuerdo con Navia (2011) [15] la degradación del fíque evaluada por la técnica de análisis termo gravimétrico inicia entre 190 y 200°C, indicando que es posible la presencia de fracciones degradadas de este componente en las muestras obtenidas a estas temperaturas. Además, la harina de yuca de la variedad estudiada tiene alrededor del 3% de proteína [15], la cual es sensible a la desnaturalización y degradación por las altas temperaturas de procesamiento [16]. Este fenómeno, también ha sido reportado por Jansens *et al.*, (2013) [17], quienes

manifestaron una disminución en el esfuerzo de flexión por causa de la degradación de la fracción proteica en bioplásticos obtenidos por termo-compresión a 170°C a partir de gluten de trigo.

De otro lado, en la evaluación de tensión se presentó un fenómeno contrario al anteriormente discutido, en donde los tratamientos a 190°C presentaron respuestas más altas con respecto a los elaborados a 180°C, principalmente para los valores de E_T . La comparación de medias de *Tukey*, estableció un comportamiento equivalente en los valores de E_T para los tratamientos "D" y "E", que fueron los más altos respecto a esta propiedad. De acuerdo con Mohammadi *et al.*, (2013) [18] el aumento de la temperatura de moldeo favorece la plastificación homogénea del material, promoviendo la formación de enlaces almidón-plastificante, y consecuentemente la plastificación del polímero, razón por la cual los tratamientos D y E, tienen valores más altos en E_T .

Los tratamientos "A", "B", "D" y "E" fueron agrupados por *Tukey* como similares para los valores más altos de σ_F y σ_T y para E_T fueron "A" y "B". De esta manera, puede afirmarse que la presión de 40 psi y la temperatura de 200°C no beneficiaron las propiedades mecánicas de los bioplásticos evaluados en este estudio.

El comportamiento mecánico (σ_F , σ_T y E_T) de los materiales de este estudio fue superior a los bioplásticos obtenidos por Navia *et al.*, (2011) [11]. Estos investigadores reportaron valores de 3,5 MPa (σ_F), 1,8 MPa (σ_T), y 366,7 MPa (E_T) en muestras fabricadas con harina de yuca variedad MPER 183, glicerol y polvillo de fíque por termo-compresión. Este comportamiento puede ser atribuido al uso de harina gelatinizada previo al procesamiento del bioplástico por la técnica de termo-compresión, la cual, favorece la adherencia de los componentes en el material, potenciando su resistencia ante los esfuerzos mecánicos ejercidos. Luo *et al.*, (2012) argumentan que el uso del almidón gelatinizado promueve la adhesión interfacial entre los componentes de la matriz termoplástica favoreciendo sus propiedades funcionales [19].

En otros estudios, se han reportado valores en propiedades mecánicas similares a los encontrados en esta investigación, tal es el caso de bioplásticos basados en almidón de yuca con alcohol polivinílico (PVOH) y aceites esenciales elaborados por termo-compresión con s_T de 6 MPa [20]; materiales espumados obtenidos por extrusión de almidón de papa reforzados con

fibra de coco cuyo $s_T < 1$ MPa [21], y bioplásticos elaborados por termo-compresión a partir de harina de yuca incorporando arcilla como componente reforzante con valores de s_T de 1,2 MPa [22]. Por su parte, Moreira *et al.*, (2012) [23] reportaron valores de s_T entre 0,8 y 5,2 MPa y de E_T entre 7,7 y 202,7 MPa en muestras obtenidas por compresión en caliente, a partir de almidón de maíz y pectina.

Densidad

Los valores bajos de densidad son una característica deseada en los bioplásticos obtenidos en este estudio, debido a la disminución de costos al utilizar menor cantidad de material [24], por otro lado, el producto tendría menor peso favoreciendo sus condiciones de comercialización. El menor valor obtenido para este parámetro físico fue 0,41 g/cm³ en el tratamiento "A". El análisis de varianza estableció que la temperatura, presión e interacción entre ambos factores influenciaron significativamente ($p < 0,05$) la densidad de los bioplásticos evaluados, siendo la presión el factor de mayor efecto versus la temperatura. Igualmente, se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos ($p < 0,05$) y la prueba de comparación de medias de *Tukey* los agrupó en tres subconjuntos (A); (B hasta G) y (H, I).

En la figura 3, puede notarse que el incremento en la presión como factor de mayor influencia, aumentó los valores de densidad de las muestras. Este fenómeno, obedece a que los valores altos de presión en el proceso de compresión obstaculizan la salida del vapor de agua desde el interior de la muestra, y consecuentemente, se limita la formación de poros y espacios intersticiales en la estructura del bioplástico, los cuales promueven la expansión de la estructura del material,

por lo tanto, el aumento en la presión de compresión no favoreció la densidad del bioplástico.

Por su parte, la incidencia de la temperatura sobre la densidad, posiblemente obedece a que la salida del vapor de agua ocurre más rápido, dado que a mayor temperatura la energía cinética de las moléculas aumenta, formando así espacios vacíos más reducidos, reflejándose en un aumento de la densidad.

Otros estudios han reportado valores de densidad, en materiales espumados obtenidos por termo-compresión a partir de almidón y fibras de caña de azúcar entre 0,19 y 0,29 g/cm³ [25], en bandejas biodegradables obtenidas por termo-compresión a partir de almidón, reforzadas con fibras de celulosa entre 0,45 y 0,68 g/cm³ [26], bandejas termo-comprimidas obtenidas a partir de almidón de yuca, quitosano y fibras naturales con valores entre 0,12 y 0,15 g/cm³ [27] y bandejas fabricadas a partir de almidón de yuca, con proteína de maíz, soya y trigo y fibras de kenaf, obtenidas por termo-compresión entre 0,2 y 0,8 g/cm³ [24].

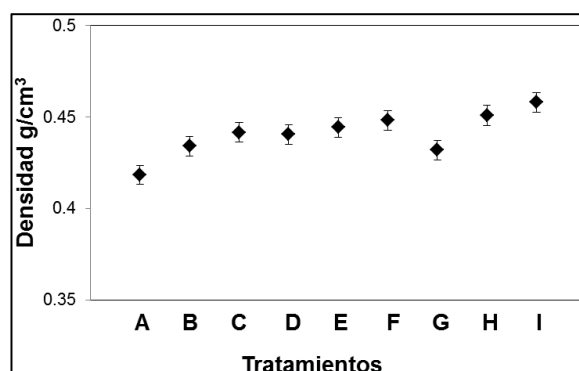
Si bien, la densidad de los bioplásticos es similar a las reportadas en otros materiales obtenidos de forma similar, ésta, es aún muy alta comparada con la del poliestireno expandido que está entre 0,05 y 0,09 g/cm³ [24], que es el polímero sintético fósil objetivo de sustitución con los materiales obtenidos en este estudio, por lo tanto, podría considerarse como alternativa incorporar agentes de expansión durante el procesamiento, que favorezcan la disminución de la densidad de los bioplásticos.

Color

Los parámetros de color evaluados se presentan en el cuadro 3. El análisis de varianza estableció que la temperatura, presión e interacción entre ambos factores influenciaron significativamente ($p < 0,05$) los valores de L^* de los bioplásticos, siendo la temperatura el factor de mayor efecto versus la presión. Sin embargo, solo el factor temperatura presentó efecto significativo ($p < 0,05$) sobre a^* y b^* . Asimismo, se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos para el parámetro L^* ($p < 0,05$), mientras que a^* y b^* no presentaron diferencias ($p > 0,05$). La prueba de comparación de medias de *Tukey* agrupó los tratamientos en tres subconjuntos para L^* : (A); (B hasta F) y (G hasta I).

La luminosidad (L^*) de las muestras fue positivamente influenciada por la más baja presión y temperatura eva-

Figura 3. Densidad de los bioplásticos.



Cuadro 3. Parámetros de color (L^* , a^* y b^*).

Tratamiento	L^*	a^*	b^*
A	69,211	7,411	27,652
B	67,518	7,746	27,511
C	66,087	7,751	27,267
D	67,759	7,634	26,940
E	66,469	7,748	26,873
F	66,011	7,714	26,574
G	65,376	7,690	26,674
H	64,833	7,723	26,241
I	64,859	7,752	26,324

luadas, ya que a menor temperatura y presión el valor de L^* fue más alto, significando que los bioplásticos obtenidos con el tratamiento A fueron los que presentaron mayor claridad frente a los demás tratamientos.

Aunque los valores de a^* y b^* , no fueron estadísticamente diferentes, puede apreciarse una leve variación entre ellos (cuadro 3). En a^* , los valores son más altos en los tratamientos con mayor temperatura y presión, inversamente, los tratamientos con menor temperatura y presión evidenciaron valores más altos en b^* . Estos resultados, pueden relacionarse con el efecto independiente de la temperatura que se evidenció en el análisis de varianza, y también corresponden a lo evidenciado por L^* , indicando que las muestras más rojizas y con mayor tendencia a presentar color azul corresponden a las más oscuras, es decir, las obtenidas con 200°C y 40 psi.

Teniendo en cuenta que el mercado objetivo para los bioplásticos estudiados corresponde a menaje para contener y/o empacar alimentos, se considera que las muestras elaboradas a 180°C y 0 psi, son las más apropiadas, dado que bajo estas condiciones, los parámetros L^* , a^* y b^* indicaron que las muestras obtenidas fueron las de color más claro. En este sentido, Fama *et al.*, (2009) [28] evaluaron muestras de almidón de yuca plastificadas con glicerol y reforzadas con salvado de trigo y argumentaron que el oscurecimiento de los bioplásticos utilizados en coberturas o empaques de alimentos no es favorable.

Resultados similares se han presentado en bioplásticos amiláceos obtenidos por termo-compresión [29] donde los valores de L^* oscilaron entre 63,9 y 73,5, y b^* entre 13,6 y 24,8. Kaisangsri *et al.*, (2012) [27], reportaron valores de L^* entre 67,9 y 70,5, en bandejas fabricadas con almidón de yuca, quitosano y fibras naturales moldeadas por compresión.

CONCLUSIONES

Los bioplásticos obtenidos por termo-compresión bajo las condiciones de 180°C, y 0 psi presentaron los mayores valores de σ_F y E_F , mientras que, el tratamiento de 190°C y 0 psi, evidenció el mayor valor de s_T y E_T . La presión de 40 psi y la temperatura de 200°C son condiciones de moldeo que no favorecieron el comportamiento mecánico de los bioplásticos elaborados con harina de yuca gelatinizada.

Los valores de densidad incrementaron con el aumento de presión y temperatura. Los bioplásticos con menor densidad fueron obtenidos a 180°C y 0 psi. De la misma forma, estos últimos presentaron valores más altos del parámetro L^* , indicando que son los de color más claro, con respecto a los demás.

AGRADECIMIENTOS

A la Dirección de Investigaciones de la Universidad San Buenaventura Cali y al grupo de investigación CYTBIA de la Universidad del Cauca.

REFERENCIAS

- [1] PRAKASH, J., SIVAKUMAR, V., THIRUGNANA-SAMBANDHAM, K., and SRIDHAR, R. Degradation behavior of biocomposites based on cassava starch buried under indoor soil conditions. *Carbohydrate Polymers* 101(1), 2014, p. 20-28.
- [2] ILES, A., and MARTIN, A. Expanding bioplastics production: sustainable business innovation in the chemical industry. *Journal of Cleaner Production* 45(1), 2013, p. 38-49.
- [3] SOROUDI, A., and JAKUBOWICZ, I. Recycling of bioplastics, their blends and biocomposites: A review. *European Polymer Journal* 49(10), 2013, p. 2839-2858.
- [4] REDDY, M., VIVEKANANDHAN, S., MISRA, M., BHATIA, S., and MOHANTY, A. Biobased plastics and bionanocomposites: Current status and future opportunities. *Progress in Polymer Science*, 38(10-11), 2013, p. 165-1689.
- [5] XIE, F., POLLET, E., HALLEY, P., and AVÉROUS, L. Starch-based nano-biocomposites. *Progress in Polymer Science* 38(10-11), 2013, p. 1590-1628.
- [6] SEYMOUR, R., and CARRAHER Jr, C. Introducción a la química de los polímeros. 2 ed. Barcelona (España): Reverté S.A., 2002, 716 p.

- [7] SOYKEABKAEW, N., LAOSAT, N., NGAOKLA, A., YODSUWAN, N., and TUNKASIRI, T. Reinforcing potential of micro and nano-sized fibers in the starch-based biocomposites. *Composites Science and Technology*, 72(7), 2012, p. 845-852.
- [8] FARUK, O., BLEDZKI, A., FINK, H., and SAIN, M. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. *Progress in Polymer Science*, 37(11), 2012, p. 1552- 1596.
- [9] HIDALGO, M., MINA, J., and HERRERA, P. The effect of interfacial adhesion on the creep behavior of LDPE–Al–Fique composite materials. *Composites: Part B*, 55(1), 2013, p. 345-351.
- [10] VILLADA, H., NAVIA, D., and CASTAÑEDA, J. Biodegradable packaging obtained from cassava flour and fique fiber and their manufacture process. WO 2013042094 A1, Clases C08L3/02, B65D65/46, B29C43/02, C08J5/04. Popayán (Colombia): 2013.
- [11] NAVIA, D., VILLADA, H., y AYALA, A. Evaluación mecánica de bioplásticos semirrígidos elaborados con harina de yuca. *Biotecnología en el sector Agropecuario y Agroindustrial*, Ed especial No. 2, 2013, p. 77-84.
- [12] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). ASTM D790: Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. Pennsylvania (United States): 2010, 11 p.
- [13] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). ASTM D638: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. Pennsylvania (United States): 2010, 16 p.
- [14] GONZÁLEZ, J., PARTAL, P., GARCÍA, M., and GALLEGOS, C. Effect of processing on the viscoelastic, tensile and optical properties of albumen/starch-based bioplastics. *Carbohydrate Polymers*, 84(1), 2011, p. 308-315.
- [15] NAVIA D. Desarrollo de un material para empaques de alimentos a partir de harina de yuca y fibra de fique [Tesis de maestría Ingeniería en Alimentos]. Cali (Colombia): Universidad del Valle, 2011, 127 p.
- [16] CIANNAMEA, E., STEFANI, P., and RUSECKAITE, R. Physical and mechanical properties of compression molded and solution casting soybean protein concentrate based films. *Food Hydrocolloids*, 38(1), 2014, p. 193-204.
- [17] JANSSENS, K., HONG, N., TELEN, L., BRIJS, K., LAGRAIN, B., VAN VUURE, A., VAN ACKER, K., VERPOEST, I., VAN PUYVELDE, P., GODERIS, B., SMET, M., and DELCOUR, J. Effect of molding conditions and moisture content on the mechanical properties of compression molded glassy, wheat gluten bioplastics. *Industrial Crops and Products*, 44(1), 2013, p. 480-487.
- [18] MOHAMMADI, A., MORADPOUR, M., SAEIDI, M., and KARIM, A. Thermoplastic starches: Properties, challenges, and prospects. *Starch/Starke*, 65(1-2), 2013, p. 61-72.
- [19] LUO, X., LI, J., and LIN, X. Effect of gelatinization and additives on morphology and thermal behavior of corn starch/PVA blend films. *Carbohydrate Polymers*, 90(4), 2012, p. 1595-1600.
- [20] DEBIAGI, F., KOBAYASHI, R., NAKAZATO, G., PANNAGIO, L., and MALI, S. Biodegradable active packaging based on cassava bagasse, polyvinyl alcohol and essential oils. *Industrial Crops and Products*, 52(1), 2014, p. 664–670.
- [21] AGUILAR, E., ZAZUETA, J., JIMÉNEZ, O. and MARTÍNEZ, F. Mechanical and structural properties of expanded extrudates produced from blends of native starches and natural fibers of henequen and coconut. *Starch – Stärke*, 59(11), 2007, p. 533-542.
- [22] KAEWTATIP, K., and TANRATTANAKUI, V. Structure and properties of pregelatinized cassava starch/kaolin composites. *Materials and Design*, 37(1), 2012, p. 423-428.
- [23] MOREIRA, F., MARCONCINI, J., and MATTOSO, L. Analysis of the influence of composition and processing parameters on the mechanical properties of biodegradable starch/pectin blends. *Polymer Bulletin*, 69 (5), 2012, p. 561-577.
- [24] KAISSANGSRI, N., KERDCHOECHUEN, O. and LAOHAKUNJIT, N. Characterization of cassava starch based foam blended with plant proteins, kraft fiber, and palm oil. *Carbohydrate Polymers*, Article in Press, 2014, 29 p.
- [25] VERCELHEZE, A, FAKHOURI, F., DALL-ANTÔNIA, L., URBANO, A., YOUSSEF, E., YAMASHITA, F., and MALI, S. Properties of baked foams based on cassava starch, sugarcane bagasse fibers and montmorillonite. *Carbohydrate Polymers*, 87(2), 2012, p. 1302-1310.
- [26] SALGADO, P., SCHMIDT, V., MOLINA, S., MAURI, A., and LAURINDO, J. Biodegradable foams based on cassava starch, sunflower proteins and cellulose fibers obtained by a baking process. *Journal of Food Engineering*, 85(3), 2008, p. 435-443.

-
- [27] KAI SANGSRI, N., KERDCHOECHUEN, O. and LAOHAKUNJIT, N. Biodegradable foam tray from cassava starch blended with natural fiber and chitosan. *Industrial Crops and Products*, 37(1), 2012, p. 542– 546
- [28] FAMÁ, L., GERSCHENSON, L., and GOYANES, S. Starch vegetable fibre composites to protect food products. *Carbohydrate Polymers*, 75(2), 2009, p. 230-235.
- [29] POLAT, S., USLU, M., AYGÜNB, A., and CERTEL, M. The effects of the addition of corn husk fibre, kaolin and beeswax on cross-linked corn starch foam. *Journal of Food Engineering*, 116(2), 2013, p. 267-276.