

SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE UN POLÍMERO BIODEGRADABLE A PARTIR DEL ALMIDÓN DE YUCA

JULIANA MENESES*
CATALINA MARÍA CORRALES**
MARCO VALENCIA***

RESUMEN

En la presente investigación se elaboró un polímero biodegradable a partir del almidón de yuca con base en la implementación de la metodología Taguchi como herramienta de diseño de experimentos. El almidón dulce de yuca se mezcló, variando las condiciones, según lo indicado por el diseño de experimentos, con reactivos que cumplen la función de plastificantes, extensores, espesantes, lubricantes, humectantes y desmoldantes. Las diferentes mezclas se sometieron a procesos comunes para los polímeros convencionales en un molino abierto, una inyectora y una prensa de vulcanización. El proceso experimental arrojó como resultado seis muestras poliméricas con características adecuadas, que se sometieron a la medición de sus propiedades físicas, químicas, mecánicas y de biodegradabilidad.

PALABRAS CLAVE: diseño de experimentos; polímero biodegradable; almidón de yuca; amilopectina; amilosa.

ABSTRACT

In the present research a biodegradable polymer was elaborated from manioc starch, based on the Taguchi methodology as the experiment design tool. The sweet manioc starch was mixed with chemical reagents acting as plastifiers, extensors, thickeners, lubricants, moisturizers, and mold releasing agents, varying

* Ingeniera Ambiental, Escuela de Ingeniería de Antioquia. juliana.meneses@gmail.com

** Ingeniera Administradora, Escuela de Ingeniería de Antioquia. catacome82@hotmail.com

***GPC: Grupo de productividad hacia la competitividad, Escuela de Ingeniería de Antioquia. pfmaval@eia.edu.co
Ingeniero Metalúrgico UdeA, Magíster en Ingeniería, énfasis en Materiales, UPB.

the experimental conditions as indicated by the experiment design. The different mixtures underwent several processes common to conventional polymers in an open mill, an injection machine, and a vulcanizing press. The experimental process gave as a result six polymeric samples of adequate characteristics, all of which were subjected to physical, chemical, and mechanical properties and biodegradation measurement.

KEY WORDS: experiment design; biodegradable polymer; manioc starch; amylopectin; amylose.

1. INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de la sociedad para la fabricación de nuevos productos que sustituyan los plásticos derivados del petróleo se convierte en la principal motivación para la presente investigación, ya que los plásticos suplen gran cantidad de necesidades a la población, pero dejan a su paso impactos ambientales que perduran por decenios.

Los plásticos sintéticos se han venido desarrollando por parte de la industria química desde las primeras décadas del siglo XX, teniendo un máximo impulso durante la II Guerra Mundial. Debido a su utilidad, el crecimiento de la industria del plástico ha sido muy elevado, generando avances, innovaciones y satisfacción de infinidad de necesidades, razones que convierten a los plásticos en un material de consumo masivo que está presente en gran cantidad de artículos de la actualidad.

La problemática generada por su uso intensivo radica en su baja biodegradabilidad (alta recalcitrancia) y, por consiguiente, en su elevada generación de residuos.

Debido a que son macromoléculas de gran estabilidad estructural, los plásticos son muy resistentes a las agresiones del medio, son livianos en comparación con otros materiales utilizados para los mismos fines y son de bajo costo debido a su alta producción en escala industrial, características que los hacen productos muy demandados por las empresas y los consumidores finales.

A la misma velocidad con que los plásticos se demandan, también se desechan. Son productos cuya utilización como material de empaque para

todo tipo de elementos ha sido muy exitosa, lo cual les representa un ciclo de vida muy corto y, por lo tanto, un alto volumen de eliminación. Alrededor de 100 millones de toneladas de plástico se producen cada año, de los cuales 40 millones son producidos únicamente por los Estados Unidos. Del total de esta gran cantidad de plásticos, alrededor del 30 % se usa en material de empaque, es decir, en material de rápido desecho que tiene una corta vida útil y va a parar a los rellenos sanitarios a permanecer allí por más de 100 años [1].

Pero, a pesar de ser innegable que son un material de gran utilidad y han generado innumerables soluciones a necesidades del hombre, presentan problemas en todo su ciclo de vida y no sólo a la hora de su eliminación.

Los plásticos son derivados del petróleo y dependen en su totalidad de este recurso fósil no renovable. Del total del petróleo extraído en el mundo, alrededor de un 5 % se destina a la industria del plástico. Dicho mineral fósil experimenta en la actualidad un crecimiento continuo en su precio y las proyecciones afirman que se agotará en menos de 50 años si el ritmo de consumo sigue como el actual.

Por lo anterior, en esta investigación se desarrolla un plástico fabricado a partir de recursos naturales renovables y que cuando se desecha no genera impactos sobre el medio ambiente.

2. MATERIALES

2.1 Los plásticos sintéticos

Los plásticos son materiales poliméricos que se componen de moléculas químicas de gran tamaño



en las que se repiten unidades de un compuesto denominado monómero.

Dependiendo del método de polimerización y del monómero, los plásticos tienen estructuras químicas variadas que hacen que, en general, se clasifiquen en dos grandes grupos: los termoplásticos y los termoestables.

Los termoplásticos son polímeros formados por cadenas lineales con ramificaciones. Esta propiedad les otorga la característica de ser reciclables. Los termoestables, por el contrario, son materiales cuya estructura molecular forma una red que no puede desligarse por medio de temperatura (característica que es posible con los termoplásticos) y que después de ser formados no pueden modificarse ni reciclarse.

Existe otro tipo de polímeros conocidos con el nombre de elastómeros o más comúnmente cauchos. Estos materiales están constituidos por moléculas pequeñas independientes provenientes del hule. Al realizarles un proceso conocido como vulcanización, estas moléculas se unen entre sí por azufre, lo que les otorga altas condiciones de elasticidad.

2.2 La yuca y su almidón

La yuca (*Manihot esculenta* Grantz) es una planta originaria de América del Sur, usada principalmente para el consumo tanto humano como animal, y en un pequeño porcentaje para la obtención de almidón y otros usos industriales [2]. El uso de esta planta se caracteriza por el consumo de su raíz, en la que se acumulan gran cantidad de componentes, entre ellos el almidón, que es la forma natural como la planta almacena energía por asimilación del carbono atmosférico mediante la clorofila presente en las hojas.

El almidón puede encontrarse además en otras raíces, frutos, semillas, tubérculos e incluso en bacterias que lo generan como mecanismo de defensa ante situaciones de estrés presentes en su medio.

El almidón de yuca puede clasificarse como agrio y nativo (dulce). El almidón agrio sufre un proceso de fermentación que le otorga propiedades deseables para los alimentos; el almidón nativo o dulce no es sometido a un proceso de fermentación, y es el que se usa generalmente en la industria.

El almidón es un polímero natural cuyos gránulos consisten en estructuras macromoleculares ordenadas en capas y cuyas características en cuanto a composición, cantidad y forma varían de acuerdo con el tipo de fuente de la que provenga.

Los gránulos de almidón están compuestos por capas externas de amilopectina y capas internas de amilosa, cuya proporción es variable dependiendo de la fuente del almidón. Su composición química es la de un polisacárido formado únicamente por unidades glucosídicas, es decir, es una macromolécula formada por gran cantidad de moléculas de glucosa que se repiten.

En el caso del almidón de yuca, su tamaño puede variar de $5 \mu\text{m}$ a $35 \mu\text{m}$, su forma es entre redonda y achatada y su contenido de amilosa es alrededor del 17% [4].

Las figuras 1 y 2 ilustran la estructura de la amilosa y la amilopectina [3].

Una de las principales propiedades del almidón nativo es su semicristalinidad, donde la amilopectina es el componente dominante de la cristalización en la mayoría de los almidones. La porción cristalina está compuesta por estructuras de doble hélice formadas por puentes de hidrógeno entre los grupos hidroxilo en las cadenas lineales de la molécula de amilopectina y por cadenas externas de amilopectina unidas con porciones de amilosa.

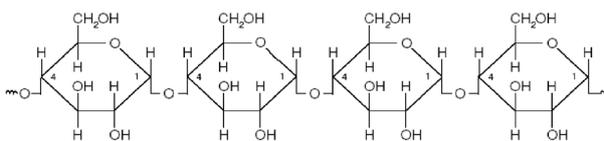


Figura 1. Estructura de molécula de amilosa

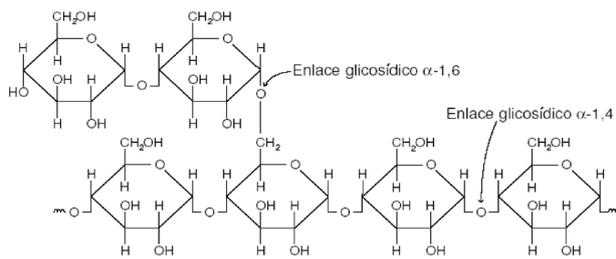


Figura 2. Estructura de molécula de amilopectina

2.3 Propiedades del almidón

Existen varias propiedades que posee el almidón y que determinan la forma en que debe tratarse, según el uso para el que se le requiera.

2.3.1 Gelatinización

Se define como la pérdida de la semicristalinidad de los gránulos de almidón en presencia de calor y altas cantidades de agua, con muy poca o ninguna ocurrencia de despolimerización [4].

La gelatinización ocurre en un rango estrecho de temperaturas que varía dependiendo de la fuente del almidón. El almidón de yuca gelatiniza en agua a temperaturas entre los 60 °C y 67 °C, lo que consiste en un hinchamiento de las moléculas de almidón debido a que el agua penetra en su estructura molecular [5].

La movilidad térmica de las moléculas y la disolución debida al hinchamiento generan una disminución de la cristalinidad por el desenrollado de las dobles hélices, hasta que la estructura granular se fragmenta casi por completo. La viscosidad de esta mezcla depende de la concentración y de la absorción de agua por parte del almidón. Cuando ocurre la gelatinización, los gránulos hinchados del almidón ocupan los espacios vacíos. La viscosidad aumenta con la temperatura hasta la fragmentación de los gránulos, que se desintegran y se disuelven generando un decrecimiento en la viscosidad.

Pero en condiciones de alta concentración de almidón, como suele suceder cuando se pretende

obtener un almidón termoplástico, el comportamiento es diferente. Mientras más rigidez haya, se da una mayor resistencia debido al choque entre los gránulos hinchados, lo que genera una alta viscosidad.

En estas condiciones, cuanto más calor se adiciona, el agua retenida desintegra la estructura ordenada de los gránulos, y la amilosa comienza a difundirse formando un gel que finalmente soporta los gránulos compuestos ante todo por amilopectina.

2.3.2 Retrogradación

Posterior a la gelatinización, en el momento en que deja de introducirse calor y comienza la etapa de enfriamiento, la viscosidad crece de nuevo y se presenta el fenómeno denominado retrogradación.

La retrogradación se define como un incremento espontáneo del estado del orden, es decir, una reorganización de los puentes de hidrógeno y reorientación de las cadenas moleculares. Paralelamente se genera un decrecimiento de la solubilidad en el agua fría y un incremento de la turbiedad [4].

2.3.3 Transición vítrea

La transición vítrea de un material polimérico se refiere al cambio inducido por el calor sobre las características de un polímero, el cual con el incremento de la temperatura pasa de sólido frágil y quebradizo a flexible [1].

La temperatura a la cual ocurre este fenómeno se conoce como temperatura de transición vítrea, que tiene influencia sobre varias propiedades del polímero, entre las cuales se encuentran la rigidez en las cadenas, entrecruzamiento de cadenas, presencia de cristales, incremento de las secciones amorfas, entre otras.

2.3.4 Desestructuración

La desestructuración del almidón nativo consiste en la transformación de los gránulos de almidón cristalino en una matriz homogénea de



polímero amorfo, acompañada por un rompimiento de los puentes de hidrógeno entre las moléculas de almidón, de un lado, y la despolimerización parcial de las moléculas, del otro [3].

El proceso de desestructuración puede generarse por la aplicación de energía al almidón. Los factores químicos y físicos involucrados son temperatura, esfuerzo cortante, como el que genera una máquina tradicional para trabajar plásticos como las extrusoras e inyectoras, tasa de esfuerzo, tiempo de residencia, contenido de agua y cantidad de energía aplicada [4].

2.4 Biodegradabilidad

La norma ASTM D 5488-944 define la biodegradabilidad como la capacidad de un material de descomponerse en dióxido de carbono, metano, agua y componentes orgánicos o biomasa, en el cual el mecanismo predominante es la acción enzimática de microorganismos.

En general, un polímero es biodegradable si su degradación resulta de la acción natural de microorganismos como bacterias, hongos y algas.

Existen varios factores requeridos para que pueda darse un proceso de biodegradación: presencia de microorganismos, presencia de aire (en caso de que se requiera), humedad y minerales necesarios, temperatura adecuada dependiendo del tipo de microorganismo (entre 20 °C y 60 °C) y un valor de pH adecuado (entre 5 y 8) [4].

3. METODOLOGÍA

Para hacer posible la fabricación de un polímero a partir de almidón de yuca, es necesario aportar diferentes reactivos a la mezcla y garantizar ciertas condiciones que permitan su obtención. Los polímeros biodegradables requieren componentes que aporten características de humectación, plasticidad, lubricación, extensión y resistencia, entre otros.

En general, el agua se recomienda como el mejor plastificante, aunque no debe encontrarse en proporciones muy altas con relación al almidón, debido a que para extraerla de la mezcla, una vez ésta se encuentre lista, es necesario elevar la temperatura a la de ebullición del agua, lo que puede degradar la estructura del almidón.

Al igual que el agua, la glicerina es un plastificante y además brinda humectación al polímero. El alcohol polivinílico (PVA) es recomendado también como plastificante, teniendo en cuenta que se asegura que la cantidad de plastificantes dentro de la mezcla no debe exceder el 20 % del peso total [6].

En cuanto a los lubricantes, se recomiendan los aceites naturales como el de linaza o el de soya, los cuales otorgan manejabilidad a la mezcla y evitan que se adhiera a los moldes de los equipos donde se trabaje. Estas grasas vegetales pueden estar en una proporción entre 0,5 % a 15 % [4], aunque otras fuentes recomiendan el uso de estos aceites en una proporción entre 0,5 % y 2 % [7].

Desmoldantes como el estearato de magnesio se recomiendan a la hora de procesar el material en los equipos para que no se adhiera a las paredes [6].

Ciertas sales inorgánicas como el cloruro de sodio (NaCl) mejoran propiedades al polímero como la transparencia, el módulo de Young y la resistencia al esfuerzo cortante [6]. Ácidos inorgánicos como el bórico o el metabórico otorgan también estas propiedades descritas [8].

Algunos compuestos cumplen la función de extensores dentro de la mezcla. Se recomiendan agentes espesantes como los polisacáridos carboximetilcelulosa e hidroxietilcelulosa [9].

Después de conocer las anteriores especificaciones se procede a desarrollar un modelo de diseño de experimentos siguiendo la metodología del japonés Genichi Taguchi [10].

Con esta metodología se realiza un diseño de experimentos que permite orientar el proceso experimental por medio de matrices (arreglos ortogonales diseñados) en las que se involucran las variables del sistema; arroja resultados aleatorios y representativos obteniéndose la mejor muestra de acuerdo con la variable respuesta. La metodología Taguchi permite trabajar con un diseño que entrega resultados representativos y permite hacer pocas corridas experimentales en comparación con otras técnicas de diseño de experimentos.

El tamaño de la matriz depende de los factores (variables) y niveles (valores que toma cada variable). La tabla 1 presenta el cuadro de factores y niveles seleccionados con base en la recopilación bibliográfica.

La tabla 2 presenta la matriz de diseño de experimentos trabajada correspondiente al arreglo ortogonal $L_{18}(2 \times 3^7)$, la cual indica que deben realizarse 18 muestras que se elaboran utilizando un mezclador mecánico de aspas y de agitación circular con temperaturas entre 45 °C y 60 °C para promover la gelatinización y la transición vítrea de la mezcla.

A partir de una adecuada experimentación, la variable respuesta para la escogencia de la mejor muestra serán las mejores propiedades mecánicas que presente el polímero.

El proceso de obtención de las mezclas se realiza con almidón dulce denominado Almiyuca. Para esta investigación se trabajaron dos tipos de almiyuca, uno de ellos proveniente de una fabricación artesanal de color café (Almiyuca 1). El otro almidón, fabricado por Industrias del Maíz S. A., de un color blanco más agradable desde el punto de vista estético (Almiyuca 2).

Los rangos de temperatura que indica la matriz de Taguchi son los que la literatura recomienda utilizar durante el proceso que se le haga al polímero [6-8].

4. PRODUCCIÓN DE LÁMINAS Y PLACAS

Las muestras seleccionadas se trabajan en tres equipos: un molino abierto, una inyectora y una prensa de vulcanización.

Tabla 1. Factores y niveles seleccionados para el diseño de experimentos

N°	Factor	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
1	Tiempo (min)	5	8	-
2	Temperatura (°C)	120	150	180
3	Agua (ml)	131	69	24
4	PVA (g)	90	60	44
5	Grasas vegetales (ml)	29	44	6
6	Glicerina (ml)	23	11	35
7	Hidroxietilcelulosa (g)	20	28	36
8	NaCl (g)	14	8	12
Constantes en cada corrida	Almidón	200 g		
	Estearato de Mg	2 g		
	Ácido bórico	3 g		



Tabla 2. Matriz de diseño de experimentos $L_{18}(2 \times 3^7)$

N° de corrida	Nivel del factor							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	5	120	131	90	6	23	20	14
2	5	120	69	60	44	11	28	8
3	5	120	24	44	29	35	36	12
4	5	150	131	90	44	11	36	12
5	5	150	69	60	29	35	20	14
6	5	150	24	44	6	23	28	8
7	5	180	131	60	6	35	28	12
8	5	180	69	44	44	23	36	14
9	5	180	24	90	29	11	20	8
10	8	120	131	44	29	11	28	14
11	8	120	69	90	6	35	36	8
12	8	120	24	60	44	23	20	12
13	8	150	131	60	29	23	36	8
14	8	150	69	44	6	11	20	12
15	8	150	24	90	44	35	28	14
16	8	180	131	44	44	35	20	8
17	8	180	69	90	29	23	28	12
18	8	180	24	60	6	11	36	14

La desestructuración se comienza en un molino abierto y se continúa ya sea en la inyectora o en la prensa de vulcanización. En el molino se trabaja a 24 r. p. m. con una relación de velocidad entre rodillos de 1,08 a 1 y los rodillos totalmente cerrados a una temperatura promedio de 100 °C.

En el molino se obtienen láminas, gracias a que la mezcla polimérica hace banda, es decir, se adhiere a las paredes del rodillo y se convierte en películas, tal como se observa en la figura 3.

La mezcla 7 permite formarse en banda mientras que la 16 no forma una banda homogénea.

Las láminas obtenidas en el molino se convierten a gránulos que se llevan a la inyectora marca Babyplast de pequeña capacidad, con volumen de inyección de 4 cm³, potencia de 2,9 Kw y presión de inyección de 2.650 kgf/cm².

En el interior de la inyectora se trabajaron temperaturas de 120 °C, 150 °C y 180 °C, según lo indicado por el diseño de experimentos.

No fue posible obtener un producto inyectado debido a la pequeña capacidad de la inyectora, a la forma de los gránulos y al tipo de tornillo extrusor usado, ya que la inyectora se usa para trabajar con polietileno que fluye a una temperatura superior a los 200 °C, y al disminuir la temperatura a la indicada, este plástico se solidifica evitando la salida del polímero biodegradable por la boquilla extrusora.

Los gránulos se llevan entonces a una prensa de vulcanización que funciona combinando presión y temperatura. Dicho proceso de vulcanización no fue aplicado al polímero biodegradable, ya que perdería sus características de biodegradabilidad, sino que simplemente se usó el equipo sin adicionar ningún otro compuesto.

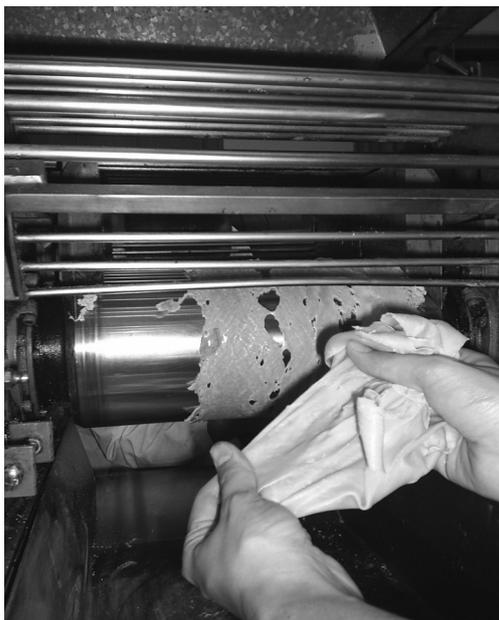


Figura 3. Tratamiento en molino abierto

En la prensa se fabrican placas del polímero biodegradable, como se muestra en la figura 4, con presión de 100 bares y temperatura entre 60 °C y 90 °C, las cuales permanecen en la prensa un tiempo de 8 minutos.

Terminado el proceso de elaboración de placas y láminas, la lámina de la mezcla 7 fabricada en el molino abierto y las placas de las mezclas 7 y 16, provenientes de la prensa, se troquelan para fabricar probetas estándar según la norma ASTM 412.

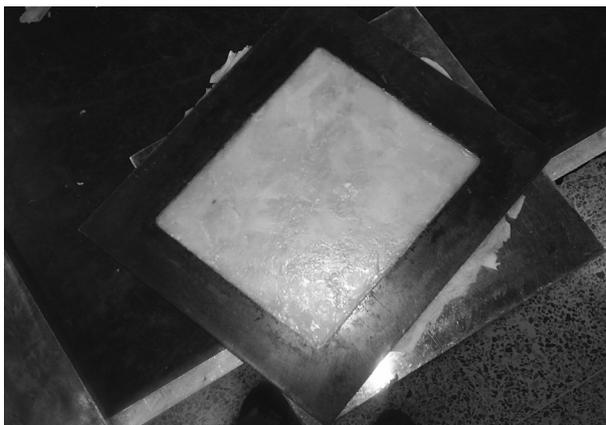


Figura 4. Placa de polímero biodegradable

5. RESULTADOS Y MEDICIÓN DE PROPIEDADES

Las probetas se someten a la medición de cuatro propiedades: resistencia a la tracción, dureza, densidad y comportamiento frente al agua.

5.1 Resistencia a la tracción

Para este ensayo se utilizó un equipo marca Test Resources con capacidad máxima de carga de 3 kN y un recorrido del actuador de 21". Los resultados se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Resultados ensayo de tracción

Polímero	Esfuerzo máximo (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)
Placa 7 Almiyuca 2	0,456	2,458
Placa 7 Almiyuca 1	0,588	2,411
Placa 16 Almiyuca 2	0,353	1,792
Placa 16 Almiyuca 1	0,208	1,284
Lámina 7 Almiyuca 2	3,249	1,126
Lámina 7 Almiyuca 1	2,521	1,664

La muestra que presenta un mejor comportamiento es la lámina 7 fabricada a partir de Almiyuca 2 (nombre comercial), como se observa en la tabla 3; esto es debido a la granulometría, a la gelatinización durante el proceso y la mezcla entre sus componentes.

La figura 5 muestra el comportamiento de tracción de la lámina 7, proveniente de Almiyuca 2.

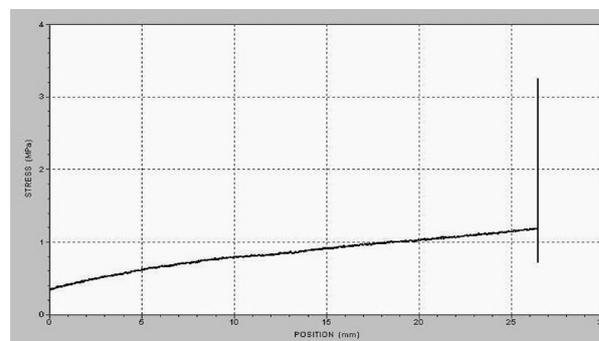


Figura 5. Ensayo de tensión de la lámina 7 Almiyuca 2



5.2 Dureza

La dureza se toma en diferentes puntos de las láminas y placas. En las láminas, la dureza se mide tanto en la parte media (zona 1) como en la parte inicial de la banda (zona 2), donde es más gruesa. En las placas la dureza se mide en las zonas claras (zona 1) y oscuras (zona 2) que se presentan en la

superficie, esto con el fin de determinar si existen diferencias sustanciales. Los resultados se consignan en la tabla 4.

La tabla 4 muestra además que la dureza de las láminas es superior a la de las placas, lo que reafirma las mejores propiedades mecánicas de las láminas respecto a las placas.

Tabla 4. Prueba de dureza

Dureza Shore A	Placa 7 A1	Placa 7 A2	Placa 16 A1	Placa 16 A2	Lámina 7 A1	Lámina 7 A2
Zona 1	42,56	42,26	31,17	49,57	68,56	59,94
Zona 2	49,99	44,93	35,78	42,71	55,40	51,96

A1: Almiyuca 1
A2: Almiyuca 2

5.3 Densidad

Los rangos de densidad entre los plásticos son bajos, debido a que los átomos que los componen son livianos (C, H, O, N por lo general) y a que las distancias medias entre los átomos del plástico son relativamente grandes.

La densidad de los polímeros se mide pesando las muestras para analizar y utilizando una probeta llena de agua para determinar el volumen de líquido desplazado por cada muestra. Los resultados se aprecian en la tabla 5.

Tabla 5. Prueba de densidad

Polímero	Peso (g)	Densidad (g/cm ³)
Placa 7 A1	3,4950	1,40
Placa 7 A2	3,4285	1,37
Placa 16 A1	3,0125	1,21
Placa 16 A2	3,1948	1,28
Lámina 7 A1	0,7710	1,23
Lámina 7 A2	0,6545	1,05

5.4 Comportamiento frente al agua

Es importante evaluar el comportamiento del polímero frente al agua por ser el agente presente en el momento de la biodegradación del plástico.

Para realizar esta prueba se siguió el procedimiento determinado por la Norma Técnica Colombiana NTC 1027 “Determinación de los efectos de productos químicos líquidos, incluyendo el agua, en los materiales plásticos”.

Se toma una muestra de 25 mm por 25 mm y se determina su peso inicial. A continuación la probeta se sumerge dentro de un recipiente que contiene el líquido para analizar, en este caso agua, y permanece allí por 24 horas según lo indicado en la norma. Al retirar el líquido se pesa y se mide nuevamente. La muestra se lleva a un horno a 50 °C por 2 horas, transcurridas las cuales se mide nuevamente su peso.

Los resultados de esta prueba se reportan tanto en incremento o pérdida de peso como en cambio en el área y cambios en la apariencia. Los resultados de las muestras analizadas se consignan en la tabla 6.

Tabla 6. Comportamiento frente al agua

Material	Incremento masa	Cambios	
		Incremento dimensiones	Apariencia
Placa 7 A1	116,7 %	8,2 %	Moderado
Placa 7 A2	180,3 %	44,0 %	Moderado
Placa 16 A1	137,1 %	-	Fuerte
Placa 16 A2	90,7 %	53,8 %	Moderado
Lámina 7 A2	185,6 %	20,0 %	Fuerte
Lámina 7 A1	89,0 %	79,2 %	Fuerte

De los resultados del ensayo, puede observarse que todas las muestras son susceptibles a la degradación por agua, lo cual favorece las condiciones de degradabilidad del polímero y restringe su utilización en algunos artículos.

6. CONCLUSIONES

Del proceso de producción de las muestras, la mezcla 7 y la mezcla 16 son las que presentan las condiciones adecuadas para ser trabajadas en los equipos de procesamiento, debido a sus propiedades de maniobrabilidad, cuerpo de la masa, plasticidad y factibilidad de procesamiento. Por el contrario, las demás mezclas mostraron condiciones de falta de humectación, lo que las hacía débiles y con baja plasticidad.

La temperatura a la que debe trabajarse la mezcla de los reactivos oscila entre 45 °C y 60 °C, rango dentro del cual se realiza una adecuada gelatinización del almidón.

Las condiciones ideales para trabajar en el molino abierto son 100 °C, 24 r. p. m. y una relación de velocidad entre los rodillos de 1,08 a 1. Estas condiciones permiten que el polímero forme banda y pueda convertirse en lámina.

La homogeneidad de las placas fabricadas en la prensa de vulcanización depende de alcanzar una

relación tiempo/temperatura adecuada. A una alta temperatura (por encima de los 90 °C) el polímero se degrada perdiendo sus propiedades mientras que a una baja temperatura (menor de 60 °C) los gránulos no se funden en su totalidad y la placa resultante es heterogénea y con gran cantidad de zonas de falla.

El equipo usado para el procesamiento del polímero debe crear las condiciones adecuadas de mezcla, esfuerzo de cizalladura y temperatura, y de este modo permitir la polimerización completa de la mezcla.

La inclusión de aditivos al plástico es importante, debido a que mejora su desempeño. Por esto es fundamental a la hora de adicionar productos al plástico tener en cuenta su composición, su toxicidad y su degradabilidad, ya que todo insumo que se adicione al polímero debe ser biodegradable y ambientalmente asimilable, con el objeto de que no entorpezca el comportamiento final del plástico después de ser desechado.

El material que presenta las mejores propiedades es el que proviene de Almiyuca 2, producto de la mezcla 7 con una resistencia a la tracción de 3,249 MPa, módulo de elasticidad de 1,284 MPa, dureza de 59,9 Shore A y densidad de 1,05 g/cm³. El comportamiento frente al agua se evidencia en un incremento en la masa del 185,6 % y en el área superficial del 20 %.



Luego de la medición de las propiedades del polímero obtenido a partir del almidón de yuca, puede concluirse que es viable realizar un producto que no requiera una resistencia a la tracción muy alta y no debe estar expuesto al agua ni a unas condiciones de humedad elevadas; por lo tanto, la potencial fabricación de recubrimientos plásticos (como cápsulas) o la fabricación de bolsas plásticas o empaques plásticos son los usos que podrían dársele al polímero para tratar de sustituir un producto cuya generación de residuos es masiva, con el fin de tratar de solucionar la no biodegradabilidad de los plásticos convencionales.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] STEVENS, E. S. 2002. Green plastics: an introduction to the new science of biodegradable plastics. New Jersey: Princeton University Press, 238 p.
- [2] GOTTRET, María Verónica; ESCOBAR, Zully y PÉREZ, Salomón. 2002. El sector yuquero en Colombia: desarrollo y competitividad. En: OSPINA, Bernardo y CEBALLOS, Hernán. La yuca en el tercer milenio, p. 340-377. Cali: CIAT, 570 p.
- [3] RUIZ, Gladys. 2006. Obtención y caracterización de un polímero biodegradable a partir del almidón de yuca. Revista Ingeniería y Ciencia Universidad EAFIT. 2(4): 5-28.
- [4] FRITZ, H. G.; SEIDENSTUCKER, T.; BOLZ, U. and JUZA, M. 1994. Study on production of thermoplastics and fibers based mainly on biological materials. Stuttgart. European Commission, 392 p.
- [5] CEBALLOS, Hernán y DE LA CRUZ, Gabriel Antonio. 2002. Taxonomía y morfología de la yuca. En: OSPINA, Bernardo y CEBALLOS, Hernán. La yuca en el tercer milenio, p. 16-31. Cali: CIAT, 570 p.
- [6] OFICINA EUROPEA DE PATENTES EP670863 Biodegradable compositions comprising starch. www.european-patent-office.org
- [7] OFICINA EUROPEA DE PATENTES EP304401A2 Shapes articles made from pre-processed starch. www.european-patent-office.org
- [8] OFICINA EUROPEA DE PATENTES EP1526156 Biodegradable polymeric compositions comprising starch and a thermoplastic polymer. www.european-patent-office.org
- [9] US5679145 Starch-based compositions having uniformly dispersed fibers to manufacture high strength articles having a fiber-reinforced starch bound cellular matrix. www.uspto.gov
- [10] GUTIÉRREZ PULIDO, Humberto y DE LA VARA SALAZAR, Ramón. 2004. Análisis y diseño de experimentos. México D. F.: McGraw-Hill, 571 p.