

DEGRADABILIDAD DE UN POLÍMERO DE ALMIDÓN DE YUCA

GLADYS RUIZ*
CAROLINA MONTOYA**
MARCO PANIAGUA***

RESUMEN

El uso de materiales poliméricos se ha incrementado debido a sus buenas propiedades y bajo costo, como resultado, la cantidad de estos materiales que llega a los rellenos sanitarios ha aumentado hasta llegar hoy en día al 30 %. Como una solución a este problema, se han desarrollado los polímeros biodegradables, que en comparación con los sintéticos son degradados en el ambiente al ser expuestos a ciertas condiciones en un tiempo más corto. En esta investigación se estudia la degradabilidad de un polímero fabricado con almidón de yuca, para esto se hace una caracterización del material y se somete a diferentes medios como agua dulce y salada, luz solar y la simulación de un relleno sanitario por varios períodos. Para determinar la degradabilidad del material se midió el porcentaje de mineralización, así como cambios en las propiedades mecánicas, morfología superficial, absorbancia en IR y pérdida de peso, dependiendo del tipo de medio. De los resultados obtenidos se encontró que el polímero es degradado al estar sometido a la simulación de relleno sanitario, agua salada y, en menor medida, a la luz solar, en tanto que en el agua dulce el polímero no se degrada.

PALABRAS CLAVE: almidón de yuca; polímeros biodegradables; porcentaje de mineralización; caracterización TPS.

* Ingeniera Metalúrgica, Universidad de Antioquia. Magíster en Ingeniería de Procesamiento de Polímeros, Universidad Eafit. Investigadora Grupo de Investigación en Materiales de Ingeniería, Universidad Eafit, Medellín, Colombia. gruiz@eafit.edu.co.

** Ingeniera de Producción, Universidad Eafit. Investigadora Grupo de Investigación en Materiales de Ingeniería, Universidad Eafit, Medellín, Colombia. cmonto18@eafit.edu.co.

*** Ingeniero Metalúrgico, Universidad de Antioquia. Investigador Grupo de Investigación en Materiales de Ingeniería, Universidad Eafit, Medellín, Colombia. mpaniag@eafit.edu.co.

DEGRADABILITY OF A TAPIOCA STARCH POLYMER

ABSTRACT

The use of polymeric materials has been increased due to their good properties and low cost. As a result, the amount of plastic that gets to landfills has increased until 30 %. As a solution to this problem, biodegradable polymers have been developed; and compared to synthetic polymers, they are degraded in the environment when exposed to certain conditions in a shorter period. One of the raw materials that is widely used in the manufacturing of biodegradable materials is starch. In this research study, the biodegradability of a polymer made of tapioca starch has been studied. To determine this, the polymer has been characterized and exposed to salt and fresh water, sunlight and a simulation of a landfill for a series of periods. To determine its biodegradability, percentage of mineralization was measured as well as changes in tensile properties, superficial morphology, IR absorption and weight loss depending on the type of environment. From the results it was found that the polymer is degraded by being subjected to simulated landfill, salt water and to a lesser extent in sunlight, while in fresh water it does not get degraded.

KEY WORDS: tapioca starch; biodegradable polymers; mineralization rate; TPS characterization.

DEGRADABILIDADE DE UM POLÍMERO DE AMIDO DE MANDIOCA

RESUMO

O uso de materiais poliméricos tem aumentado devido a suas boas propriedades e baixo custo, como resultado, a quantidade destes materiais que chega nos aterros sanitários subiu até chegar hoje em dia a 30 %. Como uma solução a este problema, se desenvolveram os polímeros biodegradáveis, que em comparação com os sintéticos são degradados no ambiente ao ser expostos a certas condições em um tempo mais curto. Nesta pesquisa se estuda a degradabilidade de um polímero fabricado com amido de mandioca, para isto se faz uma caracterização do material e se submete a diferentes meios como água doce e salgada, luz solar e a simulação de um aterro sanitário por vários períodos. Para determinar a degradabilidade do material se mediu a porcentagem de mineralização, assim como mudanças nas propriedades mecânicas, morfologia superficial, absorvância em IV e perda de peso, dependendo do tipo de meio. Dos resultados obtidos se encontrou que o polímero é degradado ao estar submetido à simulação de aterro sanitário, água salgada e, em menor medida, à luz solar, enquanto na água doce o polímero não se degrada.

PALAVRAS CÓDIGO: amido de mandioca; polímeros biodegradáveis; porcentagem de mineralização; caracterização TPS.

1. INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años, la industria de los materiales poliméricos ha experimentado un gran crecimiento hasta convertirse en la actualidad en los materiales más utilizados superando incluso el

uso del acero y reemplazando en algunas aplicaciones materiales usados comúnmente como metales, vidrio y madera. Esta industria tiene una producción mayor que la del acero y el aluminio juntos (Bower, 2002) y el uso extendido de estos materiales se debe principalmente a su bajo costo, buenas propiedades



y fácil moldeabilidad, por lo que son utilizados en casi todas las industrias: alimentos, construcción, transporte, agricultura y medicina.

En los años sesenta cuando salieron al mercado los primeros polímeros sintéticos, una de sus características más llamativas era su durabilidad y estabilidad en casi todos los ambientes; pero con el pasar de los años, lo que en un comienzo fue tratado como una ventaja, se convirtió en un problema, porque los polímeros que eran desechados podían pasar años sin ser afectados por el entorno, aun sin importar las condiciones en las que se encontraran; sumado a esto, por su baja densidad se requieren grandes espacios para su almacenamiento y como la cantidad de polímeros producidos sigue aumentando, se incrementa la cantidad de desechos generados así como el espacio necesario para su disposición final.

Aunque las autoridades ambientales están haciendo su trabajo, reglamentando el reciclaje en los diferentes sectores e implantando controles sobre la gran cantidad de bolsas plásticas que se consumen diariamente, han surgido ideas como el uso de materiales biodegradables derivados de recursos naturales, para disminuir el impacto ambiental que genera el uso de polímeros sintéticos. Desde los años ochenta en varios países de Europa y Asia, se han hecho investigaciones con el objetivo de obtener materiales biodegradables que ofrezcan buenas propiedades y bajos costos de producción, para de esta forma poder competir con los polímeros sintéticos. Algunas de estas investigaciones han dado como resultado materiales que ya se utilizan comercialmente, este es el caso del Mater-Bi, una mezcla biodegradable de almidón y PVA (acetato de polivinilo) que se emplea como película para empaque de alimentos y agricultura (Fritz, 1994); también se usa el Solanyl BP, un polímero biodegradable al 100% que utiliza el almidón de papa como materia prima y cuyas propiedades mecánicas son similares a las del polietileno o poliestireno (Rodenburg Biopolymers, 2008), también se pueden encontrar en el mercado marcas comerciales como Sorona, StarchTech y Vegemat. Algunos de estos materiales se producen a base de almidón, un

carbohidrato sintetizado en las plantas como reserva de alimento que, debido a su constitución, puede ser transformado en un material termoplástico a través de la ruptura de su estructura granular utilizando un plastificante. Las propiedades del almidón, como su resistencia mecánica y flexibilidad, dependen de la resistencia y carácter de la región cristalina, del tipo de planta, distribución del peso molecular, grado de ramificación y proceso de conformación (Lorcks, 1998; Chaléat, Halley y Truss, 2008); puede provenir de diferentes fuentes como son el maíz, la yuca y la papa. Actualmente el almidón más utilizado en el mundo para la fabricación de estos materiales es el de maíz, pero en el caso colombiano, el almidón de yuca es un recurso renovable que abunda en nuestro país.

En cuanto al almidón de yuca, objeto de estudio de este trabajo, se han realizado investigaciones que se enfocan en realizar mezclas de éste con diferentes polímeros, ya sea mezclándolo con polímeros sintéticos u otros polímeros biodegradables, para de esta forma analizar cómo se comporta el material en cuanto a sus propiedades mecánicas, reológicas y biodegradabilidad (Kaewtatip y Tanrattanakul, 2008; Kiatkamjornwong *et al.*, 1999; Salgado *et al.*, 2007). Debido a que esa bibliografía únicamente incluye el análisis y comportamiento de mezclas de almidón de yuca y otros polímeros, el objetivo de este trabajo es determinar el nivel de degradabilidad de un polímero fabricado 100 % con almidón de yuca que se obtuvo en una investigación pasada (Ruiz, 2006), del cual ya se han evaluado sus características mecánicas, térmicas y morfológicas, pero no se han realizado ensayos para determinar su degradabilidad.

Para complementar una investigación que comenzó en 2002 en la Universidad Eafit sobre polímeros fabricados con almidón de yuca, se realizó esta investigación con el objetivo de caracterizar el material y conocer cómo es su comportamiento después de desechado; para esto, el polímero es sometido a la acción de diferentes medios por varios períodos, en los cuales se hace un control de varias propiedades que darán como resultado el nivel de degradabilidad del polímero.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materiales

Para realizar los diferentes ensayos, se utilizaron láminas extruidas de almidón termoplástico con 70 % de almidón, 18 % de glicerina y 12 % de agua, que se obtuvieron tal y como lo explica Ruiz (2006); antes de realizar los ensayos, fueron acondicionadas según la norma ASTM D618-05 "Standard practice for conditioning plastics for testing" en lo que se refiere a humedad y temperatura.

2.2 Métodos

2.2.1 Caracterización del polímero

Antes y después de someter el polímero a cada uno de los medios de degradación, fue caracterizado utilizando las normas y ensayos que se enumeran a continuación.

Para la caracterización mecánica, se realizó un ensayo de tracción siguiendo el procedimiento detallado en la norma ASTM D882-02 "Standard test method for tensile properties of thin plastic sheeting", utilizando una máquina de ensayos Instron 3366 con una celda de carga de 1MN. Se tomaron cinco muestras para determinar el módulo de elasticidad y ocho para determinar la resistencia a la tracción.

Para la realización de pruebas de espectrometría infrarroja (FTIR) las muestras fueron sometidas a abrasión mecánica para obtener partículas del material que se dispersaran fácilmente en KBr y poder realizar la lectura; el equipo utilizado fue un espectrómetro, marca Perkin Elmer modelo Spectrum One con detector DTGS. La temperatura de análisis fue de 24 °C y se realizaron ocho barridos con una resolución de 4 cm⁻¹ y un rango de número de onda de 4000-450 cm⁻¹.

Por último la morfología del material se determinó empleando un microscopio electrónico de barrido JEOL JSM 1910LV.

2.3 Pruebas de degradabilidad

Para determinar el nivel de degradabilidad del polímero en agua, se utilizó una modificación de la norma ASTM D5988-03 "Standard test method for determining aerobic biodegradation in soil of plastic materials or residual plastic materials after composting" y del procedimiento explicado por Chiellini *et al.* (2006), para determinar la degradabilidad de un polímero en un medio acuoso; en este caso se usaron recipientes cerrados cada uno con 400 ml de agua del acueducto de la ciudad de Medellín y en el cual se introdujeron dos gramos de polímero de almidón.

En el caso del agua salada, se utilizó una variación de la norma ASTM D6691-01 "Standard test method for determining aerobic biodegradation of plastic materials in the marine environment by a defined microbial consortium", en este caso se prepararon recipientes cerrados con 300 ml de solución salina compuesta por (peso por litro de agua): 17,5 g sal de mar sintética, 2 g NH₄Cl; 2 g MgSO₄·7H₂O, 0,5 g KNO₃ y 0,1 g K₃PO₄; fueron mezclados con 10 ml de caldo marino compuesto por (peso por litro): 19,4 g NaCl, 5,9 g MgCl₂, 3,24 g Na₂SO₄, 1,8 g CaCl₂, 0,08 g KBr, 4 mg H₃BO₃, 4 mg Na₂SIO₃, 1,6 mg NH₄NO₃ y 8 mg Na₂PO₄ e inoculados con 10 ml de una suspensión de esporas de *Aspergillus niger*.

Para determinar el nivel de degradabilidad en ambos medios, se introdujo en cada uno de los recipientes uno más pequeño con una solución de NaOH 1M que actúa como trampa de CO₂, lo que permitió calcular la cantidad aproximada de carbono liberado de la muestra.

En cada caso el montaje se realizó para 14 muestras, asignando uno adicional sin muestra como control. Los recipientes se mantuvieron en la oscuridad por un período de 60 días, midiendo la cantidad de CO₂ producido por medio de titulación manual, utilizando una solución HCl 1 M y fenolftaleína como indicador.



Para determinar la biodegradabilidad del polímero sometido a un relleno sanitario, se siguió el procedimiento planteado por Chiellini y Corti (2003), en el cual la muestra se introduce en un recipiente cerrado que contiene un sustrato multicapas y en el que la biodegradación del polímero es medida por la cantidad de CO_2 que liberan las muestras en comparación con el sustrato sin muestra. Aunque la producción de CO_2 depende de la presión y la temperatura, el hecho de que todas las muestras estén a las mismas condiciones hace que se tenga un valor confiable de biodegradabilidad. Para evitar una excesiva producción de CO_2 por parte del sustrato, la materia orgánica se mezcla con *perlita*, un silicato de aluminio inerte que asegura las condiciones para el crecimiento de microorganismos, pero que evita la producción elevada de CO_2 (Chiellini y Corti, 2003).

En este caso y como se muestra en la figura 1, el sustrato consiste en dos capas compuestas por 50 g de perlita humedecida con 150 ml de agua destilada, estos se introducen en el fondo y sobre el suelo utilizado, en medio de estas capas, se colocan 500 g de suelo (tierra y materia orgánica) mezclados con 50 g de perlita y 100 ml de $(\text{NH}_4)_2(\text{HPO}_4)$ como fertilizante. Igual que en los medios anteriores, el montaje se realizó para 14 muestras y se utilizó una solución NaOH como “trampa” de CO_2 , la cual fue titulada periódicamente durante 60 días utilizando HCl y fenolftaleína como indicador.

Por último, las láminas del polímero fueron expuestas a la luz solar cubriéndolas para evitar su contacto con la lluvia ya que debido a la naturaleza higroscópica del material éste podría absorber grandes cantidades de agua y desintegrarse, afectando así las condiciones del ensayo. Las láminas fueron expuestas al sol por 60 días durante mayo y junio de 2008. La temperatura promedio en este período fue de $17,5^\circ\text{C}$, la humedad relativa del 73 % y promedio de radiación solar del 4 kWh/m^2 .



Figura 1. Montaje utilizado para determinar la biodegradabilidad del polímero simulando un relleno sanitario

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se muestran los resultados obtenidos después de someter el polímero a cada uno de los medios que se explicaron; estos se compararán con los resultados obtenidos antes de la degradación.

3.1 Porcentaje de biodegradabilidad

Se intentó determinar el porcentaje de biodegradabilidad para el caso de agua dulce, salada y la simulación del relleno sanitario; pero el polímero sometido a agua dulce no liberó CO_2 (esto se evidenció durante la titulación debido a que la cantidad de HCl necesaria para la titulación era igual a la alícuota de NaOH utilizada); y lo que ocurre en el material es un hinchamiento de los gránulos de almidón como resultado de la absorción de agua debido a la naturaleza hidrofílica del material, este hinchamiento produce su dispersión en el recipiente, la disolución de la glicerina utilizada como plastificante y la pérdida del agua que contenía el polímero antes de someterse al medio. En ningún caso, los

cambios que sufrió el material al estar sometido a este medio pueden considerarse como degradación o disolución, porque si bien el almidón en un material hidrofílico, es insoluble en agua fría.

Para el caso de agua salada y la simulación del relleno sanitario, la producción promedio acumulada de CO_2 se obtuvo después de corregir la producción total de cada recipiente con el que fue utilizado como control, este valor fue relacionado con la cantidad teórica de CO_2 que puede liberar el material y da como resultado el porcentaje de mineralización en ambos medios tal como se muestra en la figura 2.

En el caso de la simulación del relleno sanitario, durante los primeros días del ensayo, la producción de CO_2 era casi igual para el control y para las muestras (la cantidad de HCl utilizado en la titulación era muy similar), pero a partir del día 20 su nivel comenzó a aumentar en las muestras, pero manteniéndose casi constante en el control, lo que significa que la diferencia entre las muestras y el control corresponde al carbono liberado por la muestra en forma de CO_2 .

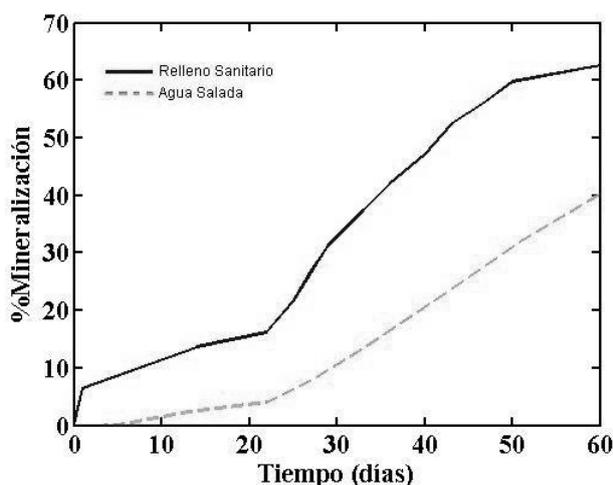


Figura 2. Porcentaje de mineralización acumulado para polímero sometido a agua salada y la simulación de relleno sanitario

Para el montaje realizado con agua salada, se observó una producción más lenta y menor de CO_2 comparada con la del relleno sanitario, ésta fue

nula durante los primeros cinco días de ensayo, pero después de la esporulación del *Aspergillus niger*, la producción comenzó a aumentar y a permanecer constante en el control. Como se observa en la figura 2, la mineralización en el caso del agua salada llegó al 40,26 % mientras que en la simulación de relleno sanitario se obtuvo el 62,56 %. Aunque en el caso del agua salada no se superó el 60 % que establece la norma para un polímero biodegradable, la pérdida de peso y la presencia de *Aspergillus niger* en la superficie del material después de secado son evidencia de la biodegradabilidad que sufre el material en el medio.

En el caso de los polímeros fabricados con almidón, la capacidad que tienen los gránulos para absorber agua es determinante para la biodegradación, debido que al aumentar la capacidad del polímero para absorber agua, se facilita la acción de las enzimas que son capaces de convertir el polímero en fragmentos más pequeños y asimilables por los microorganismos presentes en el medio y así comenzar la mineralización; en el caso del almidón, al estar compuesto por dos polímeros, la parte amorfa formada por cadenas de amilosa es capaz de absorber más agua y, por ende, el ataque enzimático es mayor que en la fracción cristalina, compuesta por la amilopectina, por lo que la velocidad y porcentaje de biodegradación es mayor en la parte amorfa del gránulo de almidón (Bastoli, 2005).

3.2 Cambio de propiedades mecánicas

A las muestras que fueron sometidas a la luz solar se les hizo un ensayo de tracción con las mismas condiciones del realizado para la caracterización inicial del material, esto con el fin de determinar el cambio en su comportamiento mecánico; este ensayo sólo fue posible realizarlo a las muestras sometidas a la luz solar, porque las sometidas a los demás medios pierden su forma durante el ensayo. En la figura 3, se puede ver el diagrama esfuerzo-deformación promedio, en el cual se compara el polímero de almidón de yuca inicial y el sometido



a la luz solar; de la figura 3 se puede concluir que el material sometido a la luz solar por este período de tiempo, sufrió una transición de dúctil a frágil, mostrando bajos niveles de deformación.

De igual manera, en la tabla 1 se muestra cómo cambiaron las propiedades del polímero. El esfuerzo máximo soportado por el material disminuye un 24 % y el cambio más significativo es el de la deformación máxima, que pasó de 100 al 16 % en promedio, lo que significa que el material pasó de ser flexible a frágil; esta pérdida de elasticidad del material hace que el módulo de elasticidad aumente en un 20 % y se tenga un material más rígido.

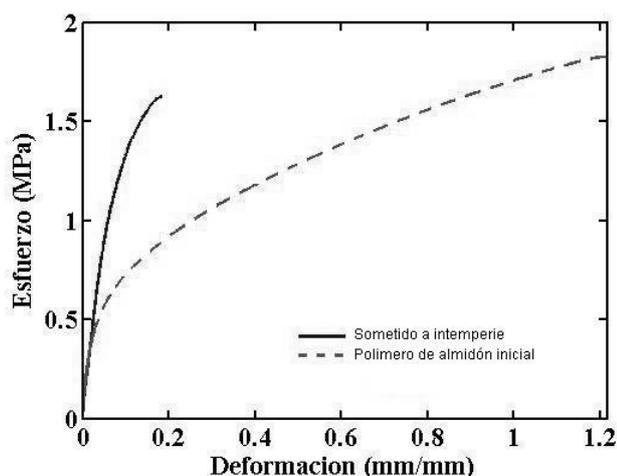


Figura 3. Diagrama esfuerzo-deformación promedio obtenido del polímero de almidón inicial y después de ser sometido a la luz solar

Este cambio en las propiedades del material se debe a que el polímero estuvo gran parte del tiempo en contacto con la luz solar y la radiación ultravioleta, lo que produce su fotodegradación, modificando el arreglo de sus cadenas poliméricas y, por ende, su grado de cristalinidad.

3.3 Cambios de espectrometría infrarroja

En la figura 4 se muestra la comparación de los espectros infrarrojos para el polímero antes y después de ser sometido a cada uno de los medios de degradación. En la figura 4 se puede observar que el polímero inicial tiene una banda en 3394 cm^{-1} que corresponde a los estiramientos del enlace O-H de grupos hidroxilo y una banda en 1637 cm^{-1} corrobora la presencia de agua en la muestra; por otro lado, las extensiones C-H de carbonos saturados se presentan en 2928 cm^{-1} , mientras que sus flexiones simétricas, en 1375 cm^{-1} . Los estiramientos de alcoholes secundarios y primarios C-OH y de éteres C-O-C aparecen en la región de 1153 cm^{-1} a 1026 cm^{-1} .

En las muestras expuestas a los medios de degradación, se pueden ver las bandas que corresponden a la extensión de los grupos hidroxilo entre 3423 cm^{-1} y 3421 cm^{-1} y la presencia de agua en todas las muestras con bandas entre 1638 cm^{-1} y 1632 cm^{-1} . También se ve la extensión de grupos C-H saturados con bandas entre 2929 cm^{-1} y 2925 cm^{-1} y

Tabla 1. Propiedades mecánicas del polímero antes y después de ser sometido a la luz solar

Propiedades	Promedio (inicial)	Promedio (final)
Esfuerzo máximo (MPa)	$1,74\pm 0,36$	$1,32\pm 0,50$
Deformación máxima (mm/mm)	$1,12\pm 0,19$	$0,16\pm 0,08$
Módulo de elasticidad (MPa)	$19,56\pm 6,74$	$25,00\pm 14,77$

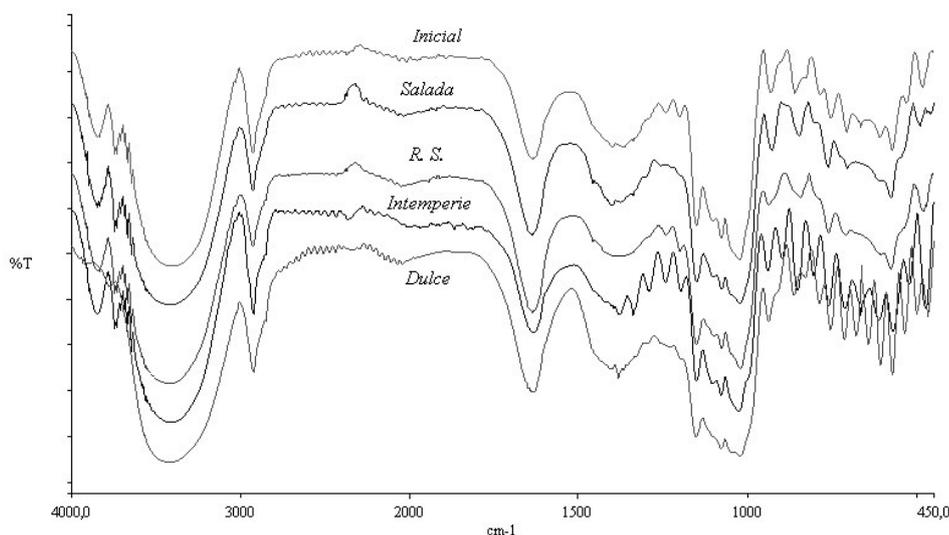


Figura 4. Comparación de los espectros infrarrojos obtenidos para cada una de las muestras

sus flexiones con bandas entre 1405 cm^{-1} y 1384 cm^{-1} ; por último, las extensiones C-O-H y C-OH secundarios y primarios corresponden a las bandas entre 1154 cm^{-1} y 1024 cm^{-1} , respectivamente.

Las similitudes de los espectros indican que la muestra inicial, la sometida a agua salada, a la simulación de relleno sanitario y a luz solar, aunque tienen pequeñas diferencias entre sí, presentan bandas similares; en tanto que la muestra sometida a agua dulce es la que presenta menor similitud con las demás, esto se debe a la ausencia de las dos primeras bandas en el espectro, cercanas a 3800 cm^{-1} , lo que se puede ver en la figura 5. Por eso se puede decir que las muestras poseen básicamente la misma composición química, a pesar de las pequeñas diferencias en la región de baja frecuencia entre 700 cm^{-1} y 500 cm^{-1} .

3.4 Cambio de apariencia y morfología superficial

Las figuras 5a y 5b muestran las micrografías electrónicas de barrido obtenidas para el polímero

de almidón de yuca antes de ser sometido a los diferentes medios de degradación. Se pueden ver los gránulos de almidón rodeados por la glicerina (zonas blancas); los agujeros que se ven en el polímero corresponden al vapor que se genera en el material como resultado de la evaporación del agua durante el proceso de extrusión.

En el caso del polímero expuesto a agua dulce, al retirar las muestras del recipiente y dejarlas secar, se convirtieron en sólidos con apariencia cristalina y comportamiento frágil. En las figuras 6a y 6b aparecen las micrografías SEM de estas muestras, en las cuales no se observan zonas blancas correspondientes a la glicerina que se disolvió en el medio; también se aprecia la ruptura de los gránulos de almidón y se puede observar una superficie lisa con algunos poros que corresponden a los espacios vacíos dejados por el agua evaporada durante el proceso de secado de las muestras.

Al igual que en el caso del agua dulce, lo que queda del polímero en agua salada son cristales frágiles, pero a diferencia del polímero sometido a



agua dulce, éste posee toda la superficie cubierta de *Aspergillus niger*. En las figuras 7a y 7b, se exponen las micrografías SEM de estas muestras, en las que se puede apreciar la formación de cristales en la superficie del material como resultado de la degradación;

esto se debe principalmente a que la biodegradación de la parte amorfa del material es más rápida que la de la parte cristalina, como consecuencia de esto se tiene que el polímero resultante corresponde a la parte cristalina del material.

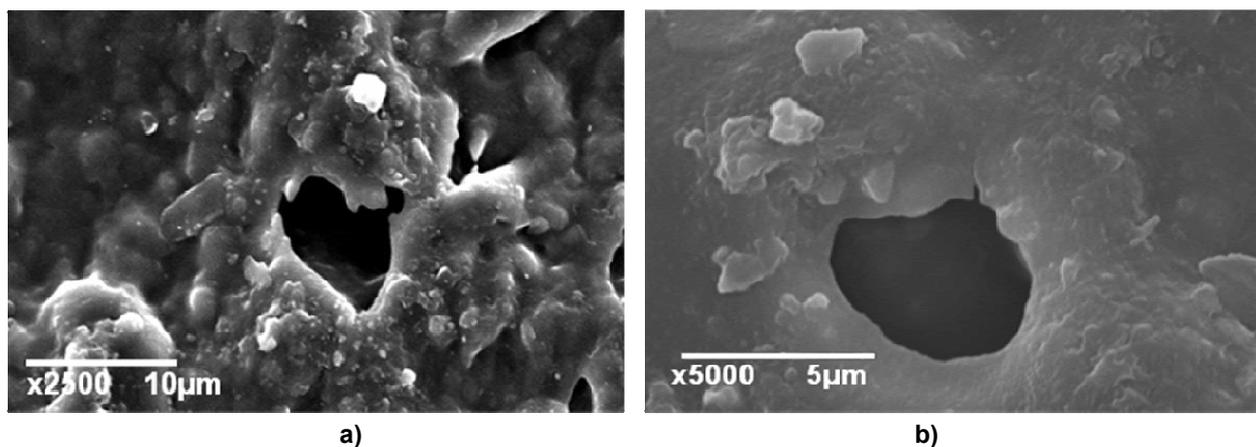


Figura 5. Micrografía electrónica de barrido para polímero de almidón de yuca. a) 2500 y b) 5000 aumentos

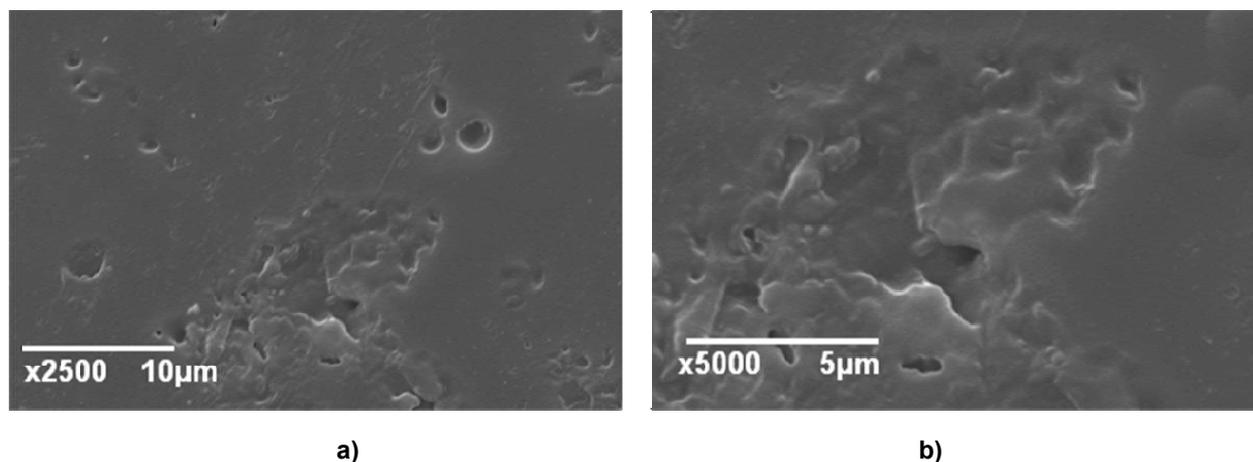


Figura 6. Micrografía electrónica de barrido para polímero de almidón de yuca sometido a agua dulce. a) 2500 y b) 5000 aumentos

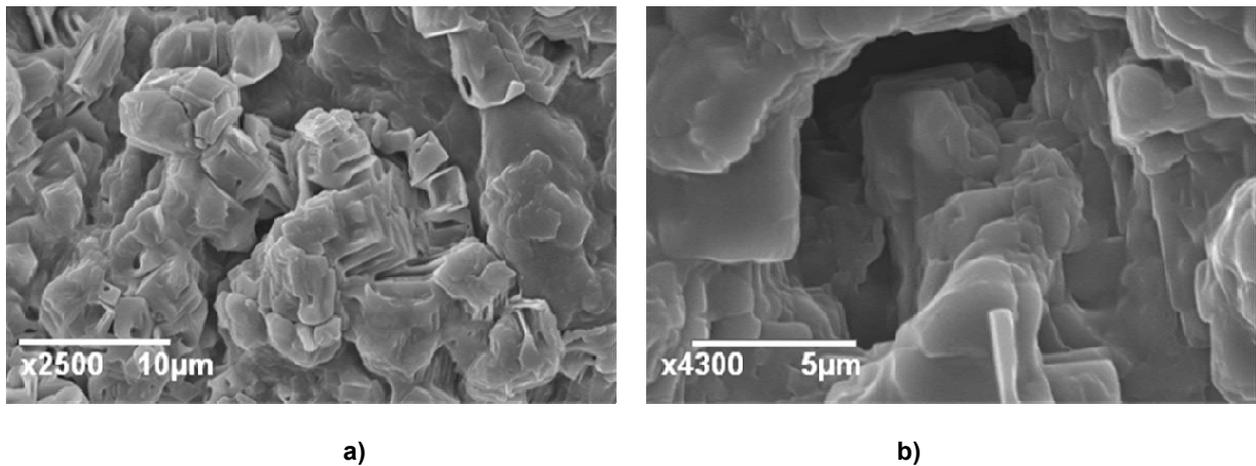


Figura 7. Micrografía electrónica de barrido para polímero de almidón de yuca sometido a agua salada. a) 2500 y b) 5000 aumentos

En los residuos de polímero recuperados de la simulación del relleno sanitario, se pueden observar algunos restos de hongos adheridos a la superficie del material así como restos de sustrato que no fue posible retirar después del ensayo; el material recuperado presentaba un comportamiento frágil al igual que en los demás medios en los que el polímero tuvo que ser secado luego del ensayo. En las micrografías de las figuras 8a y 8b, se pueden ver algunos gránulos del almidón como en el polímero inicial, así

como algunas grietas que se dan como resultado de la retrogradación del material después del secado.

En el polímero sometido a la luz solar no se notan diferencias a simple vista, excepto por un oscurecimiento del material y un aspecto quebradizo. En las figuras 9a y 9b, se observa el agrietamiento producido durante la exposición a la radiación solar, lo cual se produjo posiblemente por la migración del plastificante y por la fotodegradación que sufrió el material.

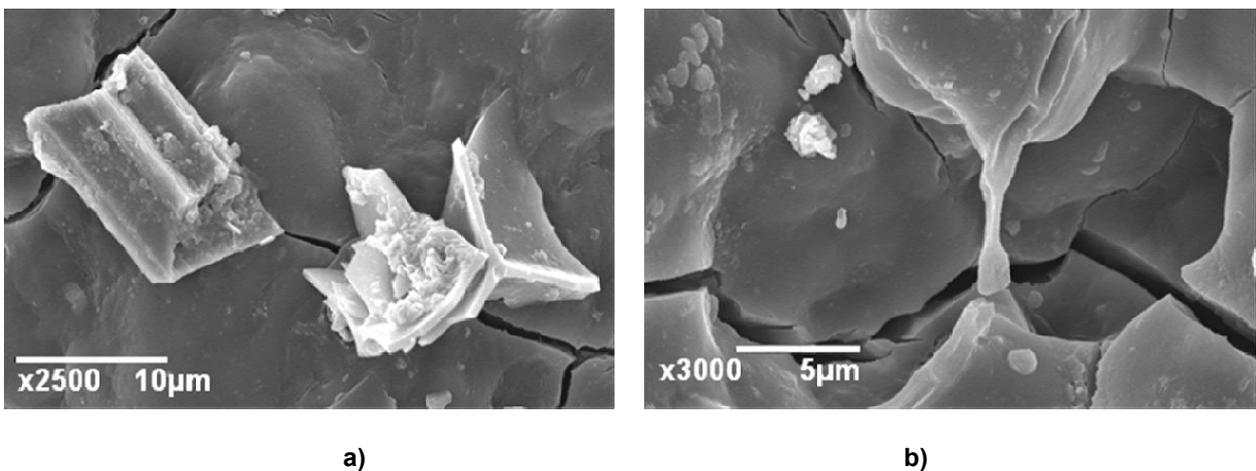


Figura 8. Micrografía electrónica de barrido para polímero de almidón de yuca sometido a relleno sanitario. a) 2500 y b) 5000 aumentos

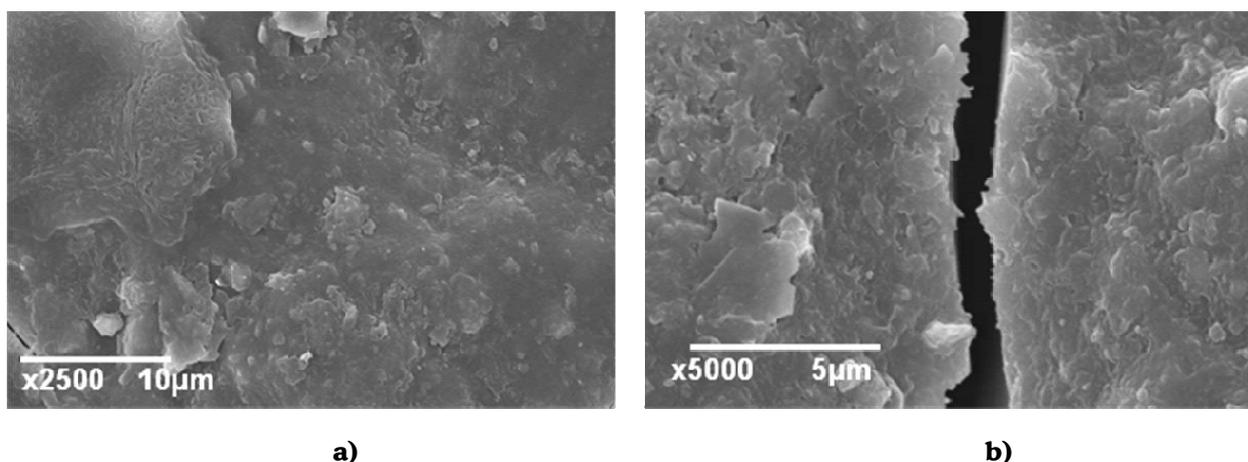


Figura 9. Micrografía electrónica de barrido para polímero de almidón de yuca sometido a la luz solar. a) 2500 y b) 5000 aumentos

3.5 Pérdida de peso

Las muestras del polímero que fueron expuestas a cada medio se pesaron en una balanza analítica para de esta manera medir la pérdida de masa que sufre el material. En la tabla 2, se pueden observar los porcentajes de pérdida de peso para cada una de las muestras.

Tabla 2. Porcentaje de pérdida de peso del polímero, después de ser sometido a los diferentes medios durante 60 días

Medio utilizado	% pérdida de peso
Relleno sanitario	90,47
Agua dulce	86,83
Agua salada	75,72
Luz solar	2,05

En el caso del relleno sanitario, la cantidad de muestra remanente en algunos de los recipientes fue mínima, en tanto que en otros no se encontraron residuos de material, lo que evidencia que se presenta una alta tasa de biodegradación del polímero, debido

a la gran concentración de microorganismos contenidos en este medio. Para los materiales sometidos a medios acuosos se presenta una disminución de peso, que puede ser atribuida, en el caso del agua dulce, a la disolución de la glicerina y a la pérdida de agua que posee el polímero en el mismo medio; esta pérdida de masa es alta, si se tiene en cuenta que el material no estuvo en contacto con microorganismos, pero en este caso, el que los gránulos de almidón absorban agua genera la desintegración del material en el recipiente, lo que pudo producir que, cuando se retiraran las muestras del recipiente, algunos pequeños fragmentos del material se eliminaran junto con el agua.

Para las muestras sometidas a agua salada la pérdida de peso se debe a la biodegradación que ocurre en el material por la enzima producida por el hongo *Aspergillus niger*, de igual forma que en el medio anterior, en este caso también se presenta disolución de los plastificantes en el medio de ensayo. Por último en el caso de la luz solar la pérdida de peso es mínima debido a que la concentración de microorganismos es casi nula; lo anterior indica que el polímero se puede dejar a la luz solar al menos por 60 días sin que ocurra su degradación, lo cual es importante en aplicaciones tales como los empaques.

4. CONCLUSIONES

La mayor biodegradación se obtuvo en las muestras expuestas al relleno sanitario, lo cual se evidencia por la mayor producción de CO₂ y mayor porcentaje de mineralización (mayor de 60% según lo establece la norma), mayor pérdida de peso y presencia de algunos hongos después de terminado el ensayo; esta degradación es causada por la variedad de microorganismos del medio.

Las muestras dejadas en agua dulce por el mismo período muestran gran pérdida de peso, debido a la disolución de los plastificantes en el agua y la dispersión del almidón, la muestra también presenta cambios en su espectro IR y morfología; pero no hay señales que indiquen una biodegradación.

En el agua salada la biodegradación es un poco menor y más lenta que en la simulación del relleno sanitario y es causada por la enzima producida por el hongo *Aspergillus niger* al estar en presencia del almidón; aunque la mineralización no alcanza el 60 % como lo establece la norma, la pérdida de peso y la presencia de hongos en la superficie del material muestran señales de biodegradación.

En las muestras dejadas a la luz solar se produce una fotodegradación que se comprueba con la disminución de la resistencia a la tracción y de la flexibilidad y con el aumento del módulo de elasticidad.

AGRADECIMIENTOS

Los autores manifiestan su agradecimiento a la Universidad Eafit por la financiación de esta investigación, a Colciencias por el patrocinio de la joven investigadora, al laboratorio de materiales de la Universidad Eafit por facilitar la realización de los ensayos y a los laboratorios de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín y de la Universidad de Antioquia por la realización de algunos de los ensayos.

REFERENCIAS

- Bastioli, C. (ed.). *Handbook of biodegradable polymers*. 1st ed. Shawbury, Shrewsbury, Shropshire: Smithers Rapra Technology, 2005.
- Bower, D. I. *An introduction to polymer physics*. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.
- Chaléat, C. M.; Halley, P. J. and Truss, R. W. "Properties of a plasticized starch blend. Part 1: Influence of moisture content on fracture properties". *Carbohydrate Polymers*, vol. 71, No. 4 (March 2008), pp. 535-543.
- Chiellini, E. and Corti, A. "A simple method suitable to test the ultimate biodegradability of environmentally degradable polymers". *7th World Conference on Biodegradable Polymers & Plastics*. (Tirrenia, Italy, 2002), pp. 381-395.
- Chiellini, E.; Corti, A.; Del Sarto, G. and D'Antone, S. Oxo-biodegradable polymers: Effect of hydrolysis degree on biodegradation behavior of poly(vinyl alcohol). In: *Polymer Degradation and Stability*, vol. 91, No. 12 (December 2006), pp. 3397-3406.
- Fritz, H. G. *Studies of production of thermo-bioplastics and fibers based mainly on biological materials*. 1st ed. Stuttgart: European Commission, 1994.
- Kaewtatip, K. and Tanrattanakul, V. "Preparation of cassava starch grafted with polystyrene by suspension polymerization". *Carbohydrate Polymers*, vol. 73, No. 4 (January 2008), pp. 647-655.
- Kiatkamjornwong, S.; Sonsuk, M.; Wittayapichet, S.; Prasassarakich, P. and Vejjanukroh, P.-C. "Degradation of styrene-g-cassava starch filled polystyrene plastics". *Polymer Degradation and Stability*, vol. 66, No. 3 (December 1999); pp. 323-335.
- Lorcks J. "Properties and applications of compostable starch-based plastic material". *Polymer Degradation and Stability*, vol. 59, No. 1-3 (January 1998), pp. 245-249.
- Rodenburg Biopolymers B. V. *What is Solanyl® BP* [online]. <<http://www.biopolymers.nl/en/bioplastic/>> [citado en octubre de 2008].
- Ruiz, G. "Obtención y caracterización de un polímero biodegradable a partir de almidón de yuca". *Ingeniería y Ciencia*, vol. 2, No. 4 (2006), pp. 5-28.
- Salgado P. R.; Schmidt V. C.; Molina S. E.; Mauri A. N. and Laurindo, J. B. "Biodegradable foams based on cassava starch, sunflower proteins and cellulose fibers obtained by a baking process". *Journal of Food Engineering*, vol. 85, No. 3 (April 2008), pp. 435-443.