

Estudio de la Biodegradación de un Material Compuesto Obtenido con Ácido Poliláctico (PLA) Reforzado con Fibra Corta de Abacá (*Musatextilis*)

Layedra F.*; Galeas S.*; Guerrero V.*

*Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Mecánica, Quito, Ecuador
e-mail: ferlayedra@chemist.com, salome.galeas@epn.edu.ec, victor.guerrero@epn.edu.ec

Resumen: En este proyecto se exponen los resultados de la caracterización mecánica y térmica de compuestos de matriz PLA reforzados con fibra corta de abacá, elaborados mediante moldeo por compresión. Se fabricaron probetas con diferentes porcentajes volumétricos de fibra, se evaluaron los defectos macroscópicos y las propiedades mecánicas a tracción de las probetas de acuerdo a normas ASTM. El compuesto con 15 vol% de fibra fue seleccionado para realizar ensayos de biodegradación. En el ensayo de biodegradación a suelo abierto se observó un significativo cambio de color en las probetas. Al analizar los resultados de los ensayos de tracción se observó que las probetas de PLA mantuvieron sus propiedades mecánicas durante el experimento mientras que las del compuesto se redujeron hasta los 70 días de exposición, luego de los cuales se mantuvieron. En los ensayos en laboratorio se determinó que el material compuesto se biodegradó más velozmente que el PLA. La evaluación de las propiedades térmicas permitió observar en el PLA una disminución en la temperatura de transición vítrea y un incremento en la entalpía de fusión. Por otro lado, el material compuesto mostró un incremento en la temperatura de transición vítrea.

Palabras clave: Ácido poliláctico, biodegradación, fibras naturales, materiales compuestos.

Abstract: This project shows the results of the mechanical and thermal characterization of PLA matrix composites reinforced with abaca short fiber obtained by compression molding. Specimens with different fiber volume percentages were manufactured, macroscopic defects and mechanical tensile were evaluated according to ASTM standards. The composite with 15 vol % fiber was selected for testing biodegradation. In the open soil biodegradation test significant color change was observed in the specimens. The tensile tests showed that the samples of PLA kept its mechanical properties during the experiment while the compound was reduced to 70 days of exposure, after which the mechanical properties were kept. Laboratory biodegradation tests demonstrated that composite suffers a faster biodegradation than PLA. Evaluation of thermal properties in the PLA allowed to observe a decrease in glass transition temperature and an increase in the enthalpy of fusion.

Keywords: Polylactic acid, biodegradation, natural fibers, composites.

1. INTRODUCCION

El desarrollo de materiales “verdes”, que puedan ser desechados con el menor impacto ambiental y con aplicaciones estructurales así como cotidianas es cada vez más necesario. La formulación de materiales compuestos con estos fines ha hecho posible impulsar nuevas tecnologías de procesamiento y fabricación de materiales biodegradables [1].

En el Ecuador, a partir del año 2008, se empezó a fabricar materiales oxo-biodegradables para reemplazar fundas

plásticas a base de polietileno. Estos materiales poseen aditivos que presentan sales metálicas (óxidos de hierro, níquel, cobalto, magnesio) para facilitar su biodegradación [5]. Estudios posteriores han demostrado que la fabricación de materiales oxo-biodegradables no resuelve el problema de la contaminación debido que dichos plásticos modificados no cumplen con normas ambientales europeas tales como: presencia de metales pesados, capacidad de desaparición del compuesto y calidad del compuesto final (pruebas agronómicas y ecotoxicidad). Por esta razón fueron etiquetados, bajo la Directiva de EU 67/548/EEC, como sustancias peligrosas por tener efectos adversos al ambiente y al ser humano [3]. Es importante entonces desarrollar materiales que puedan ser desechados con el menor impacto ambiental y que no comprometan la salud del ser humano.

Artículo recibido el 15 de diciembre de 2014; revisado 15 de diciembre de 2014. Este trabajo fue realizado en el marco de ejecución del Proyecto Semilla PIS-12-36 “Desarrollo de materiales compuestos de matriz polimérica sintética y biodegradable reforzados con material lignocelulósico y nanoarcillas ecuatorianas para aplicaciones industriales” financiado por la Escuela Politécnica Nacional.

Autor para correspondencia: salome.galeas@epn.edu.ec, 2976300 ext. 3735.

El ácido poliláctico, más conocido como PLA, es un polímero que posee propiedades comparables a las del polipropileno, pero que puede ser obtenido de fuentes naturales. Este polímero es un poliéster alifático y es altamente biodegradable. La incorporación de fibras naturales al PLA para obtener un material compuesto con mejores propiedades mecánicas y que al mismo tiempo posea la capacidad de biodegradarse es resultado de las cada vez más exigentes necesidades del mundo actual de crear materiales más resistentes y cuyo impacto en el ambiente sea menor [2, 9].

Una fibra natural que ha ganado especial atención es la fibra de abacá. El Ecuador es el segundo productor mundial de abacá después de Filipinas y en el 2007 se produjeron 10000 toneladas [4]. Debido a su baja densidad, gran resistencia a la tracción, capacidad de biodegradarse y su bajo costo, esta fibra es un material ideal para proveer un refuerzo a matrices poliméricas.

En el presente proyecto se combinó el polímero PLA con fibras de abacá mediante moldeo por compresión para obtener un material con propiedades mecánicas superiores a las de sus constituyentes. Además, es importante conocer el impacto ambiental que pueden producir los desechos de estos materiales, por lo que determinar su velocidad de biodegradación y el tiempo que tardarán en llegar a una completa degradación es de vital importancia. La incorporación de las fibras alterará la velocidad de biodegradación de este material por lo cual es necesario compararlo con la matriz pura y determinar la variación en la tasa de biodegradación. La utilización de un medio real para determinar la biodegradación es en muchos casos poco aplicable y difícil de reproducir y llevar a cabo. Por esto la importancia de crear un medio simulado que sea lo más parecido al medio real en el cual se espera que el material en estudio sea dispuesto finalmente [8].

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materiales

Para la fabricación de materiales se empleó ácido poliláctico (PLA) de marca NatureWorks® PLA Polymer 2002D, el cual está diseñado para aplicaciones de extrusión y termoformado. Como refuerzo del compuesto se utilizó fibra de abacá de la variedad Tangongón rojo, grado de calidad 3, procedente de la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas y suministrada por la Corporación de Abacaleros del Ecuador (CAE).

Para los ensayos de biodegradación a suelo abierto se utilizó suelo cultivable de un huerto ubicado al sur de la ciudad de Quito de las cercanías de Turubamba de Monjas. Esta tierra fue depositada en dos cajas de madera con dimensiones 1,20 x 0,80 x 0,20 m³. Para la biodegradación aerobia en laboratorio se utilizaron los siguientes reactivos de grado

analítico: hidróxido de potasio 0,5 N, ácido clorhídrico 0,25 N y fenoltaleína.

Para la fabricación de las láminas de material se utilizó un molde de tipo macho-hembra fabricado en el Laboratorio de Nuevos Materiales (LANUM) de la EPN. Además se empleó una prensa calefactora marca CARVER modelo 4128, un pH-metro Jenway 3510, una estufa Venticell 404, una mufla Carbolite, una balanza analítica Shimadzu y material de vidrio.

Para la evaluación de las propiedades mecánicas de los materiales se utilizó una máquina universal de ensayos Tinius Olsen modelo H25KS y para la evaluación térmica un calorímetro diferencial de barrido DSC Q-2000 y un analizador termogravimétrico TGA Q-500, ambos de la marca TA Instruments.

2.2 Métodos

2.2.1. Formulación del material compuesto

Se determinaron los parámetros de procesamiento de las láminas de PLA puro y de los materiales compuestos para las etapas de precalentamiento, moldeo y enfriamiento. Para el PLA puro se realizaron pruebas variando la temperatura, tiempo y presión para cada una de las fases del proceso. Se tomó como referencia la temperatura de fusión del polímero detallada en la hoja técnica. Las temperaturas, tiempos y presiones con los cuales se experimentó se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores de presión, temperatura y tiempo de moldeo para la obtención de PLA puro.

Fase de precalentamiento	Presión (kPa)	0
	Temperatura (°C)	210
		180
		170
		160
Tiempo (min)	5	
	10	
	15	
	20	
Fase de moldeo	Presión (kPa)	0
	Temperatura (°C)	125
		250
		500
		Temperatura de precalentamiento
Tiempo (min)	5	
	10	
	15	
	20	
Fase de enfriamiento	Presión (kPa)	0
	Temperatura (°C)	18°C (enfriamiento con agua) Al ambiente hasta 50°C
	Tiempo (min)	N/A

Se fabricaron materiales compuestos con un porcentaje de refuerzo en volumen de 13, 15 y 20%. Para las etapas de precalentamiento y enfriamiento se utilizaron los parámetros establecidos para la elaboración de láminas de PLA puro.

Durante la fase de moldeo se distribuyeron uniformemente fibras cortas de abacá sobre el material fundido. Las fibras fueron previamente secadas en estufa a 70°C durante cuatro horas. Las presiones y temperaturas ensayadas para la fase de moldeo se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores de presión, temperatura y tiempo de moldeo para la obtención de los compuestos.

Presión (kPa)	500
	750
Temperatura (°C)	170
	180
Tiempo (min)	10
	20

La determinación de los parámetros de procesamiento para cada una de las fases del moldeo por compresión se realizó mediante evaluación visual de las láminas.

2.2.2. Caracterización mecánica de los materiales

Los materiales fueron ensayados a tracción de acuerdo a la norma ASTM D-3039. Estos ensayos fueron realizados en primera instancia a los materiales fabricados para determinar el compuesto que sería sometido a las pruebas de degradación. Posteriormente se realizaron pruebas de tracción a los materiales antes y durante el proceso de biodegradación.

2.2.3. Ensayos de biodegradación

De los resultados obtenidos de la caracterización mecánica se seleccionó el compuesto para realizar pruebas de biodegradación. Además se consideraron los defectos macroscópicos como la presencia de burbujas, fibra expuesta, distribución de la fibra en la matriz y acabado superficial. Se realizaron dos tipos de ensayos: biodegradación aerobia bajo condiciones controladas en el laboratorio y biodegradación a suelo abierto.

Los ensayos en laboratorio se realizó de acuerdo a la norma ASTM D5988-03. Se estimó el grado de biodegradación aerobia de una muestra plástica mediante la medida de la cantidad de dióxido de carbono producido como función del tiempo que el material es expuesto al suelo.

Para el ensayo en suelo abierto se cortaron las láminas de PLA y material compuesto para obtener probetas para ensayos de tracción de acuerdo a la norma ASTM D3039-00 para ensayos de tracción. Las probetas se enterraron a una profundidad de 15 cm medidos desde la superficie del suelo. Estas fueron agrupadas en conjuntos de siete y fueron removidas en periodos de dos semanas durante cinco meses.

Las probetas removidas fueron analizadas visualmente, pesadas y ensayadas a tracción de acuerdo a la norma antes mencionada.

2.2.4. Caracterización térmica de los materiales

Los materiales fueron caracterizados mediante análisis termogravimétrico (TGA) y calorimetría diferencial de barrido (DSC). Estos ensayos permitieron observar el comportamiento térmico de los materiales a medida que ocurre la biodegradación.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Formulación del material compuesto

Los valores de presión, temperatura y tiempo para cada una de las etapas del procesamiento para el PLA puro y para los materiales compuestos se presentan en las tablas 3 y 4 respectivamente.

Tabla 3. Parámetros de procesamiento de PLA puro.

Fase de precalentamiento	Presión (kPa)	0
	Temperatura (°C)	170
	Tiempo (min)	10
Fase de moldeo	Presión (kPa)	125
	Temperatura (°C)	170
	Tiempo (min)	10
Fase de enfriamiento	Presión (kPa)	0
	Temperatura (°C)	Agua a 18°C
	Tiempo (min)	N/A

Tabla 4. Parámetros de procesamiento de los compuestos.

Fase de precalentamiento	Presión (kPa)	0
	Temperatura (°C)	170
	Tiempo (min)	10
Fase de moldeo	Presión (kPa)	500
	Temperatura (°C)	170
	Tiempo (min)	10
Fase de enfriamiento	Presión (kPa)	0
	Temperatura (°C)	Agua a 18°C
	Tiempo (min)	N/A

Como se observa en las tablas presentadas, para la obtención de materiales compuestos se requiere una presión mayor a la empleada para la obtención de material puro.

3.2 Caracterización mecánica de los materiales

Para los ensayos de tracción se cortaron probetas de las láminas obtenidas de acuerdo a la norma ASTM D-3039.

3.2.1. Pruebas preliminares

La presencia de la fibra corta de abacá no aumentó las propiedades mecánicas del material compuesto respecto a la matriz de PLA puro. Se puede ver en la Fig. 1 que a medida que se incrementa el porcentaje volumétrico se tiene una disminución del esfuerzo a tracción. Esto puede deberse a

que no hay una buena compatibilidad entre la fibra y la matriz. Cabe señalar que se eligió el material con un refuerzo de 15% para los ensayos de biodegradación porque presentó menores defectos macroscópicos.

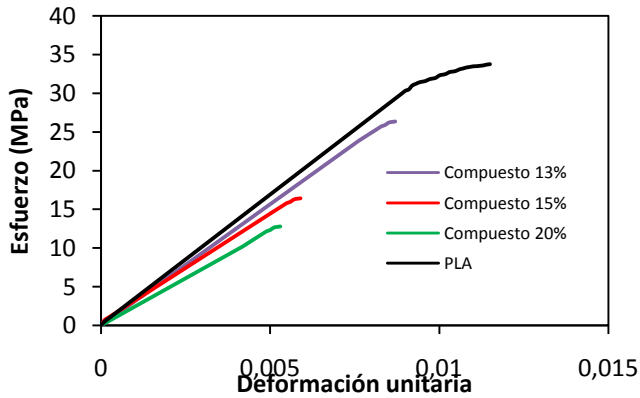


Figura 1. Diagrama esfuerzo vs. deformación unitaria de materiales compuestos con diferentes fracciones volumétricas de fibra comparados con el PLA.

3.2.2. Ensayos mecánicos de los compuestos

En las Fig. 2 y 3 se presentan los cambios experimentados por el módulo de elasticidad durante la biodegradación en suelo abierto para el PLA y el compuesto respectivamente.

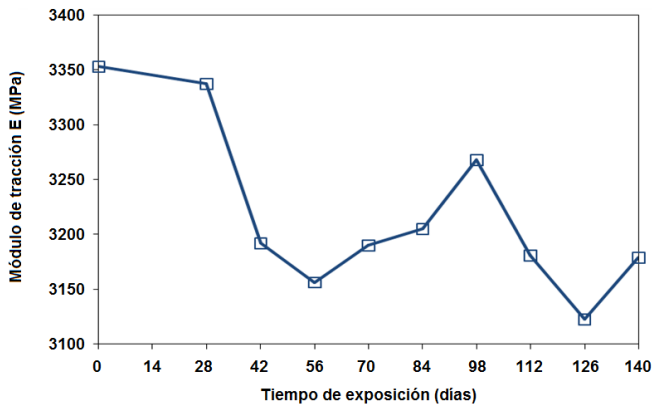


Figura 2. Módulo de tracción de las probetas de PLA puro expuestas a los ensayos de biodegradación en suelo abierto a diferentes tiempos

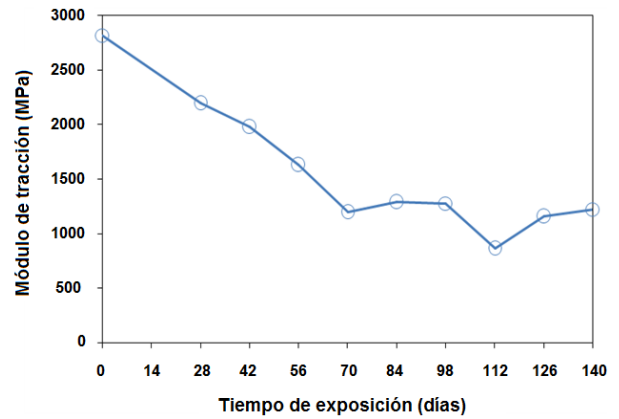


Figura 3. Módulo de tracción de las probetas de material compuesto expuestas a diferentes tiempos en los ensayos de biodegradación en suelo abierto

3.3 Ensayo de biodegradación

3.3.1. Biodegradación aerobia en laboratorio

En la Fig. 4 se observa que en el ensayo de biodegradación del PLA puro, la cantidad de CO₂ producido como resultado de la biodegradación incrementó a una tasa relativamente constante durante los 60 días de ensayo. La cantidad de CO₂ producido fue de 1,361 mmol por cada 1,97 g de PLA. Es decir que se produjeron 0,691 mmol de CO₂ por gramo de PLA ensayado. En color azul se muestra la diferencia entre el CO₂ producido por la muestra de PLA + tierra y la tierra.

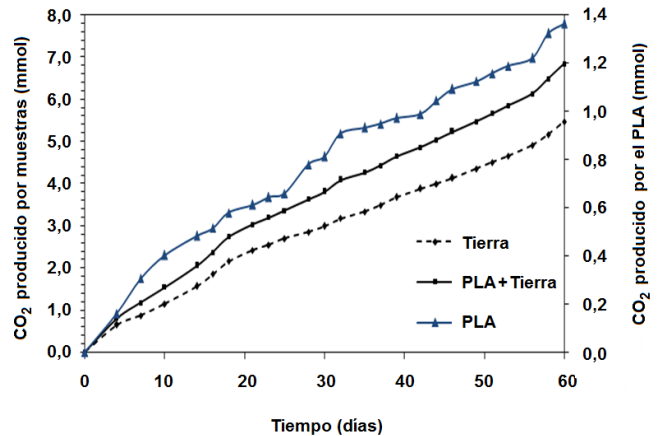


Figura 4. Cantidad de CO₂ producido por biodegradación del PLA

En la Fig. 5 se observa que la cantidad de CO₂ producida por el material compuesto incrementó con mayor rapidez respecto al blanco (tierra). Con relación a la cantidad de CO₂ generada por el PLA, ésta incrementó con una velocidad relativamente constante. La cantidad de CO₂ producido fue de 2,179 mmol utilizando 1,450 g de PLA; es decir que se produjeron 1,502 mmol de CO₂ por gramo de material compuesto ensayado. En color azul se muestra la diferencia

entre el CO₂ producido por la muestra compuesto + tierra y la tierra.

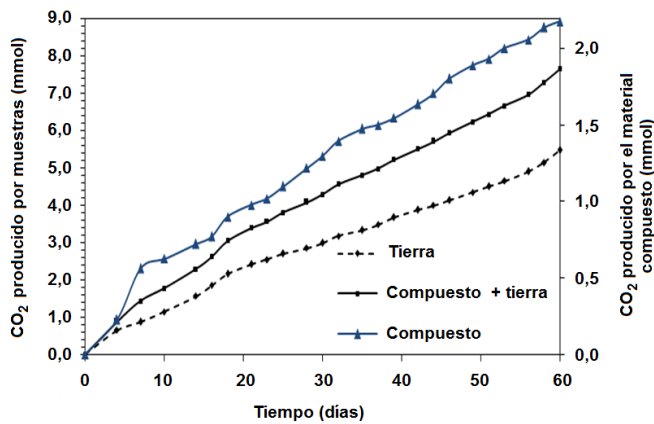


Figura 5. Cantidad de CO₂ producido por el material compuesto

3.3.2. Biodegradación en suelo abierto

De acuerdo al análisis visual realizado a las probetas de PLA y de compuesto se observaron cambios superficiales. En el caso del PLA la superficie de las probetas mostró un cambio de coloración ligero durante el transcurso del experimento. En el caso del material compuesto, se observaron cambios ocurridos en el refuerzo. Las fibras tomaron un color amarillento en las primeras semanas y, con en el transcurso del tiempo se evidenció la presencia de manchas oscuras en su superficie.

3.4 Caracterización térmica de los materiales

3.4.1. Calorimetría diferencial de barrido (DSC)

En la Fig. 6 se presentan los termogramas DSC de las probetas de PLA enterradas en suelo abierto.

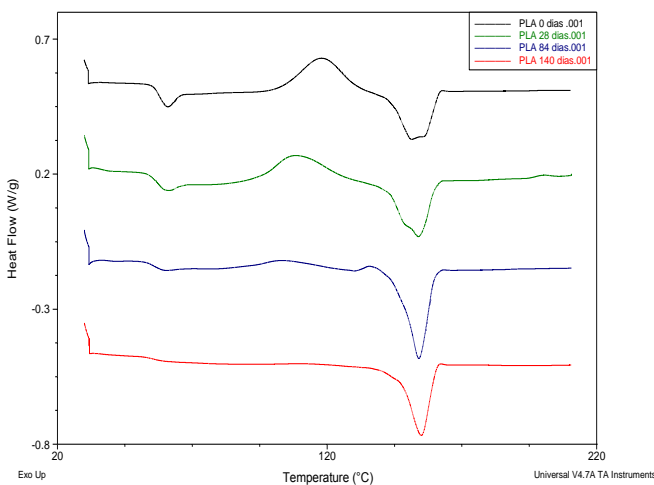


Figura 6. Curvas DSC de las muestras de PLA analizadas con una rampa de calentamiento de 5°C min⁻¹ en atmósfera de N₂ desde 30°C a 220°C

Las placas de PLA que no fueron enterradas presentaron mayor cantidad de polímero amorfo en su estructura, mientras que las que fueron enterradas presentaron a mayor tiempo de exposición un menor contenido de polímero amorfo superficial. Estudios realizados por E. Rudnik y D. Briassoulis atribuyen dicho efecto al posible engrosamiento de los cristalitas de PLA debido a una disminución de la movilidad de la cadena de la región amorfa. Para este ensayo se obtuvo un incremento en el porcentaje de cristalinidad (Xc) del 3,2% a los 28 días de exposición, luego de lo cual éste disminuye [10].

Los resultados expuestos en la Tabla 5 se obtuvieron del análisis de cada uno de los termogramas de la Fig.6.

Tabla 6. Propiedades térmicas del PLA a diferentes tiempos de exposición en suelo abierto

Tiempo de exposición (días)	Tg (°C)	Hc (J/g)	Tc (°C)	Hf (J/g)	Tf (°C)	Xc
0	57,70	27,71	117,94	26,03	151,54	28,0%
28	57,80	21,03	108,34	29,05	153,85	31,2%
84	55,53	7,49	104,77	33,15	154,06	35,6%
140	55,78	0,94	114,23	27,23	154,97	29,3%

En esta tabla se puede observar que la temperatura de transición vítrea (Tg) disminuye en aproximadamente 2°C mientras que la entalpía de cristalización (Hc) disminuye de forma continua durante los 140 días de duración del experimento. Ello indica que existe un ordenamiento de las moléculas de PLA en la superficie y además puede estar relacionado con el cambio de color de las probetas de PLA enterradas. La disminución en la entalpía de cristalización (Hc) permite aseverar que la biodegradación afecta a la parte amorfa del PLA [11] siendo la parte cristalina más resistente a la biodegradación.

Asimismo, la Tabla 6 muestra que existe un incremento en la entalpía de fusión del polímero, lo cual está directamente relacionado con la disminución de la entalpía de cristalización. La mineralización del PLA aumentó, lo que permite aseverar que se produjeron cambios estructurales a nivel molecular y por tanto un ordenamiento molecular en la superficie del PLA. Con respecto a la temperatura de fusión del PLA esta incrementó en aproximadamente 2°C luego de 140 días de exposición. Este resultado va de la mano con los obtenidos por E. Rudnik y D. Briassoulis [10], los mismos que observaron un comportamiento similar durante los tres primeros meses de su ensayo en suelo abierto.

Los termogramas obtenidos mediante DSC de las probetas de material compuesto enterradas en suelo abierto se muestran en la Fig. 7.

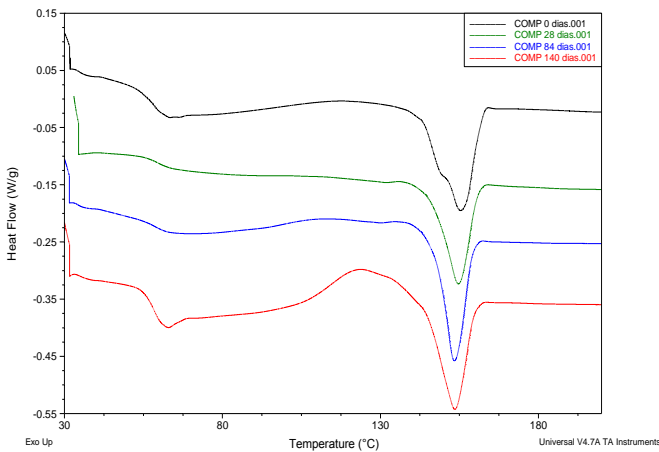


Figura 7. Curvas DSC de material compuesto analizadas con rampa de calentamiento de $5^{\circ}\text{C min}^{-1}$ en atmósfera de N_2 desde 30°C a 220°C

El análisis mediante calorimetría diferencial de barrido realizado a las muestras permitió conocer, de manera general, el comportamiento del material compuesto durante el proceso de biodegradación y posteriormente compararlo con el del PLA puro. De acuerdo a la Fig. 7, la temperatura de transición vítrea del material compuesto es superior a la temperatura de transición vítrea del PLA puro. Esto pudo deberse a que durante las etapas de procesamiento del material compuesto, en particular durante la etapa de moldeo, las cadenas del polímero pudieron ordenarse de tal manera que se produjeron sectores más cristalinos, que posteriormente pudieron ser causa del incremento de la temperatura de transición vítrea. Por otra parte, las temperaturas de fusión de las muestras de material compuesto presentaron valores superiores a la temperatura de fusión del PLA, lo que indica que la adición de la fibra modifica las propiedades térmicas de la matriz de PLA.

En la Tabla 7 se muestran los resultados de los análisis realizados a los termogramas de los materiales compuestos para diferentes tiempos de exposición en suelo abierto.

Tabla 7. Propiedades térmicas del material compuesto a diferentes tiempos de exposición en suelo abierto

Tiempo de exposición (días)	Tg (°C)	Hf (J/g)	Tf (°C)
0	58,51	24,97	155,37
28	59,62	19,67	154,64
84	58,33	21,78	153,28
140	58,54	23,53	153,44

Debido a que las condiciones de procesamiento que permitieron obtener el material compuesto fueron diferentes a las condiciones con las que se fabricaron las probetas de PLA, en particular la aplicación de presión, no se pudo establecer de manera exacta el efecto de la fibra en el comportamiento térmico del material [7].

3.4.2. Análisis termogravimétrico

En la Fig. 8 se muestran las curvas de descomposición del PLA expuesto a diferentes tiempos en el ensayo de biodegradación en suelo abierto.

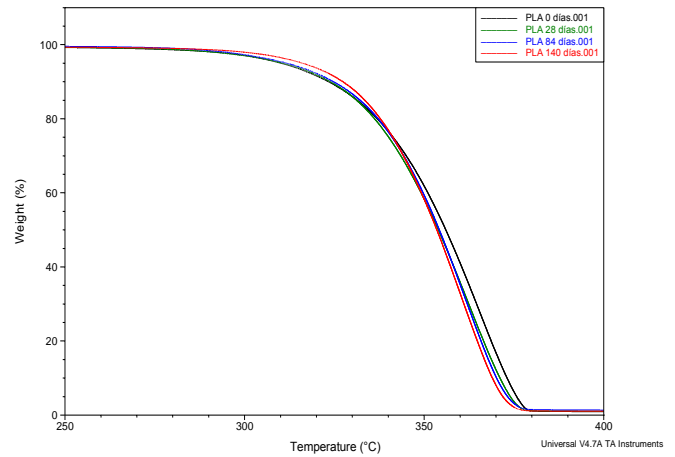


Figura 8. Termogramas TGA de PLA analizadas con rampa de calentamiento de $10^{\circ}\text{C min}^{-1}$ en atmósfera de N_2

Con base en los termogramas mostrados en la Fig. 7 se puede observar que a mayor tiempo de exposición de las probetas de PLA, las temperaturas de inicio de la descomposición y temperatura de descomposición disminuyen. Esta disminución en la temperatura de descomposición del PLA permite aseverar que el proceso de biodegradación produjo cambios estructurales a nivel molecular en las cadenas del mismo. Como resultado de la disminución del peso molecular y la ruptura de las cadenas del PLA se produjo la disminución en la temperatura de descomposición.

El proceso de biodegradación produjo una disminución de aproximadamente 5°C en la temperatura de descomposición del PLA. Sin embargo, la temperatura a la cual inicia la descomposición del material no se vio afectada en gran medida, la diferencia fue de aproximadamente 1°C .

En la Fig. 9 se muestran los termogramas de las probetas de material compuesto expuestas a diferentes tiempos de biodegradación en suelo abierto.

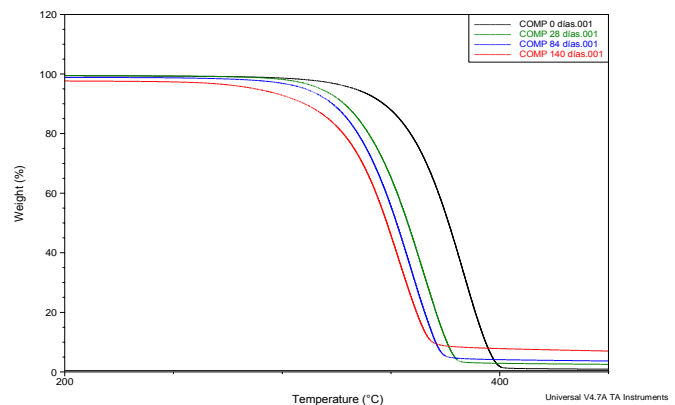


Figura 9. Termogramas TGA de material compuesto analizadas con rampa de calentamiento de $10^{\circ}\text{C min}^{-1}$ en atmósfera de N_2

Se puede observar que la biodegradación afecta en gran medida al proceso de descomposición térmica del material compuesto disminuyendo la temperatura de inicio de la degradación térmica y la temperatura de descomposición, con un incremento en la cantidad de ceniza formada. También se puede ver que a mayor tiempo de exposición, el residuo resultante de la degradación térmica del material compuesto se incrementa en alrededor del 7%.

El incremento en la temperatura de descomposición del material compuesto inicial con respecto a la del PLA inicial se puede atribuir al efecto que pudo tener el procesamiento sobre las propiedades térmicas del PLA, ordenando las cadenas del polímero y formando zonas cristalinas que pudieron incrementar la temperatura de transición vítrea al mismo tiempo que le proporcionaron al polímero una mayor estabilidad térmica [6].

En contraste, la disminución en la temperatura de descomposición del material compuesto se puede atribuir al efecto que pudo producir la descomposición de las fibras de abacá. Esto pudo haber incrementado el área de afectación de la biodegradación sobre la matriz de PLA y la velocidad de biodegradación, con una subsecuente disminución del peso molecular del polímero y la disminución de la estabilidad térmica del material compuesto.

4. CONCLUSIONES

Las probetas con 15% de fracción volumétrica de fibra presentaron mayor facilidad de procesamiento. La resistencia a la tracción disminuyó con respecto a la matriz en un 16%, esto puede deberse a una deficiente adhesión entre la fibra y la matriz PLA.

En los ensayos de biodegradación en laboratorio se pudo determinar que el material compuesto sufre un proceso de biodegradación que ocurre a mayor velocidad que en caso el PLA puro. Así, al cabo de los 60 días de ensayo se obtuvo una pérdida de masa del 3.25% para el PLA puro y de 6.41% para el compuesto reforzado con el 15% de fibra de abacá.

Los ensayos de biodegradación en suelo abierto permitieron observar cambios físicos visibles tanto en el PLA como en el material compuesto, los cambios en la coloración de dichos materiales pueden suponer una disminución del peso molecular del polímero y una degradación de la fibra. Luego de transcurridos los 140 días de exposición a suelo abierto, el módulo a tracción del PLA disminuyó un 5% mientras que el módulo del compuesto tuvo un decremento de 57%.

Del análisis termo-mecánico realizado a los materiales se concluye que la disminución en la temperatura de transición vítrea del PLA permite asegurar que existieron cambios estructurales en la superficie del polímero y evidencia rompimiento de las cadenas poliméricas producto de la biodegradación. Además, la disminución en la entalpía de

cristalización del PLA mostró que la parte amorfa del polímero fue la más afectada en el proceso de biodegradación.

El proceso de biodegradación disminuyó en alrededor de 5°C la temperatura de descomposición del PLA, lo que supone cambios estructurales de las cadenas moleculares del polímero a nivel superficial.

Por su parte, el material compuesto presentó una temperatura de transición vítrea superior respecto a la del PLA. Además, la temperatura de descomposición del material compuesto sin exponer a ensayos de biodegradación en suelo abierto fue superior en relación a la temperatura de descomposición del PLA puro.

La biodegradación de las fibras de abacá incrementó la velocidad de biodegradación del material compuesto a la vez que generó una disminución de la temperatura de descomposición del material compuesto produciendo que la estabilidad térmica del material compuesto disminuya a mayor tiempo de biodegradación.

REFERENCIAS

- [1] C. Baillie, "Why green composites?" in *Green Composites*, 1st ed., Cambridge: Woodhead Publishing Ltd & CRC Press LLC, 2004, pp. 1-8.
- [2] C. Bastioli, "Poly (Lactic Acid) and Copolyesters" in *Handbook of Biodegradable Polymers*, 1st ed., Shropshire: Rapra Technology Limited, 2005, pp. 287-295.
- [3] H. Castellón, "Plásticos oxo-biodegradables vs plásticos degradables" [Online], Venezuela: Asociación Venezolana de Industrias Plásticas, 2009. Disponible en: http://www.avipla.org/uploads/ponencias/1_HELLO_CASTELLON.pdf
- [4] FAO, "El año internacional de las fibras naturales 2009; ¿Por qué naturales?", [Online], Ecuador: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2009, Disponible en: http://www.fao.org/ec/Fibras/AIFN_hojas.pdf
- [5] Flexiplast, "Flexiplast Empaques Flexibles" [Online], Ecuador: Flexiplast, 2010. Disponible en: <http://www.flexiplast.com>
- [6] S. Lee y S. Wang. (2006, Enero). "Biodegradable polymers/bamboo fiber biocomposite with bio-based coupling agent". *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 37, Issue 1, January 2006, pp. 80-91.
- [7] A. Narladkar, "Conformation, morphology and glass transition of poly (lactic acid) in supported thin films", Ph.D Thesis, Dept. Química, Université de Bretagne-Sud, Morbihan, Francia, 2008.
- [8] L. C. Pardini y F. L. Neto, "Reforços para Compósitos" en *Compósitos estruturais ciencia e tecnologia*, 2006, Sao Paulo: Edgard Blucher, pp.67-86.
- [9] S. Ponce y V. Guerrero, "Propiedades mecánicas de compuestos biodegradables elaborados a base de ácido poliláctico reforzados con fibras de abacá". *Revista Politécnica*. Vol.33, No.2, Enero 2014, pp.23-31.

- [10] E. Rudnik y D. Briassoulis. (2011, Mayo). "Degradation behaviour of poly(lactic acid) films and fibres in soil under Mediterranean field conditions and laboratory simulations testing". *Industrial Crops and Products-Elsevier*, Vol. 33, Issue 3, pp.648-658.
- [11] T. Yutaka y P. Buenaventurada. (2006, Julio) . "Biodegradability and biodegradation of poly(lactide)". *Appl Microbiol Biotechnol - Springer-Verlag*, Vol. 72, pp.244-251.