

OPTIMIZACIÓN DE LA MEZCLA ENTRE LDPE Y PLA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE EMPAQUES PLÁSTICOS DE UN SOLO USO.

Optimization of the mixture between LDPE and PLA for the characterization of single-use plastic packaging.

Ing. Diego Andres Diaz Cuervo, MSc. Lina Marcela Crespo Delgado, MSc

Centro Metalmecánico, SENA. e-mail: ddiazc@sena.edu.co

Centro Nacional de Asistencia Técnica a la Industria ASTIN, SENA. Grupo de investigación GIDEMP. e-mail: lm Crespo@sena.edu.co

Resumen – La mezcla entre un plástico sintético LDPE (Polietileno de Baja Densidad) derivado del petróleo y un polímero natural PLA (Ácido Poliláctico) derivado del ácido láctico fue desarrollada en este trabajo. Con la unión de estos dos materiales se pretende crear una mezcla, donde ambos materiales se comporten como uno solo, agregando agentes de acoplamiento y estabilizador térmico para poder transformarlo en un empaque plástico de un solo uso. Este producto se desarrollará con muestras de película plástica, utilizando diferentes proporciones entre LDPE y PLA con el fin de determinar la mezcla ideal que permita la verificación de dispersión, distribución y homogenización.

Palabras clave: homogenización, dispersión, distribución, mezcla, LDPE, PLA.

Abstract - The mixture between a synthetic plastic LDPE (Low Density Polyethylene) derived from petroleum and a natural polymer PLA (Polylactic Acid) derived from lactic acid was developed in this work. With the union of these two materials, it is intended to create a mixture, where both materials behave as one, adding coupling agents and thermal stabilizer to be able to transform it into single-use plastic packaging. This product will be developed with plastic film samples, using different proportions between LDPE and PLA to determine the ideal mixture that allows the verification of dispersion, distribution, and homogenization.

Keywords: homogenization, dispersion, distribution, mixing, LDPE, PLA.

I. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, la mayoría de los productos que consumimos vienen contenidos en materiales plásticos, debido a los beneficios que son innegables: es económico, liviano y fácil de producir. Muchas empresas que fabrican estos productos con materiales plásticos tienen un objetivo de responsabilidad social y corporativa en su plan estratégico de reducir el impacto ambiental de los empaques con un menor consumo energético, desde la producción de la materia prima hasta la disposición final del empaque, teniendo en cuenta los costos y funcionalidad. Los empaques tienen como función contener y proteger el envase durante la cadena de distribución, adicionalmente deberá cumplir con los requisitos de marketing y ventas. También es importante mencionar que los envases, empaques y embalajes deben asegurar la salud del consumidor, propiciando elementos de seguridad que garanticen la integridad del producto final [1].

En la actualidad, algunos investigadores se han interesado en el desarrollo de mezclas que unen diferentes tipos de polímeros (natural y sintético) para el desarrollo de empaques plásticos de un solo uso, mezclando diferentes proporciones de materia prima y aditivos para demostrar su efectividad. Sin embargo, en estas investigaciones no se han considerado técnicas de caracterización que permitan validar los aspectos de la mezcla como la dispersión, distribución y homogenización. Por eso, este trabajo propone desarrollar una mezcla de Polietileno de Baja Densidad (LDPE) y Ácido Poliláctico (PLA) para estudiar la caracterización de empaques de plásticos de un solo uso. Este trabajo desarrolló mezclas de LDPE/PLA en diferentes proporciones utilizando un diseño

experimental mixto de factores aleatorios y fijos para su optimización.

II. ANTECEDENTES

En Colombia actualmente existe un proyecto de ley que entrará en vigor a partir del año 2023, donde se regula el uso de plásticos de un solo uso: bolsas, rollos de película extensible para empaque de alimentos a granel, rollos de película extensible y de burbuja utilizados como envoltura, entre otros [2]. Además, el país con el fin de articular con la metodología de Economía Circular que se plantea en el mundo propone una producción sostenible en la generación de nuevos materiales, reutilización y recuperación de materias primas, minimizando la generación de residuos. Por este motivo, diferentes investigadores se han visto interesados en estudiar materiales alternativos que permitan que este proceso sea amigable para el medio ambiente y para los fabricantes de los diferentes productos.

En la actualidad, la necesidad de migrar a materiales más amigables con el medio ambiente ha impulsado a la creación constante de nuevos materiales con características biobasados. En este camino, se han presentado desafíos en el procesamiento de las materias primas utilizadas para la fabricación de estos componentes, por ende, para mejorar la trabajabilidad de estos en el proceso se han propuesto diversas mezclas de los polímeros biobasados con polímeros sintéticos.

El Ácido Poliláctico (PLA) es el plástico biodegradable más estudiado y utilizado [3]. El PLA se sintetiza directamente de ácidos orgánicos naturales o moléculas de ácido láctico monomérico, haciendo que también tenga la clasificación de material biobasado [4].

Clizia Averza (2022) estudió las mezclas de PLA con Succinato de Polibutileno (PSBA) que es otro polímero natural y la mezcla PLA/PSBA con adición de PoliCaproLactona (PCL). Las mezclas de PLA/PCL/PSBA evidenciaron mayor flexibilidad que las mezclas PLA/PSBA por efecto de la PoliCaproLactona, en general, ambas mezclas mostraron valores de índice de fluidez de 29,5 g/10min. En la evaluación de las propiedades de tracción se evidenció que las mezclas que tiene PCL presentan mayor ductilidad [5].

Por otro lado, Gang Li (2011) estudió diferentes mezclas de almidón termoplástico (TPS) con Polietileno de Baja Densidad (LDPE) donde encontró una mejor distribución y dispersión en la mezcla 50/50, aportando un aumento significativo del área superficial para el TPS, haciendo que aumente la tasa de biodegradación de la mezcla [6].

El Polietileno de Baja Densidad (LDPE) tiene un papel importante cuando se habla de la fabricación de empaques plásticos de un solo uso, por sus propiedades de bajo peso molecular que tiene como ventaja facilitar la dispersión de los materiales que participan en la mezcla. Los polímeros de Polietileno son generalmente insolubles en disolventes y de

naturaleza hidrófoba. Estas propiedades permiten su uso en aplicaciones industriales y de consumo y brindan la ventaja de ahorrar costos en la industria de procesamiento. Son solubles en hidrocarburos y disolventes clorados a altas temperaturas. Su solubilidad aumenta con el parámetro del índice de fluidez (gr/10min) y disminuye con el aumento de densidad y cristalinidad [7]. Por eso, este trabajo desarrolló mezclas de LDPE/PLA en diferentes proporciones utilizando un diseño experimental mixto de factores aleatorios para el análisis de los resultados de las técnicas de caracterización para la optimización de la mezcla.

III. METODOLOGÍA

DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Los diseños de experimentos estadísticos son la conjugación de las hipótesis y supuestos, con los datos reales que se puedan obtener en un experimento. Por lo cual es necesario determinar cuáles son las pruebas que se deben realizar y de qué manera, para obtener datos reales que, al ser analizados, se den evidencias objetivas que respondan el interrogante planteado.

Para el desarrollo del experimento, se planteó un *diseño factorial* que tiene como objetivo estudiar el efecto de varios factores sobre una o varias respuestas, cuando se tiene el mismo interés sobre todos los factores. El modelo que se aplicará al diseño de experimento es un *modelo mixto de factores aleatorios y fijos*. Por ejemplo, si el factor *A* es aleatorio y *B* es fijo, el modelo de componentes de varianza de la *Ecuación 1* [8].

$$Var(Y_{ijk}) = a_a^2 + a_{a\beta}^2 + \sigma^2$$

Ecuación 1.

DETERMINACIÓN DE LAS VARIABLES DE ENTRADA

Para determinar el diseño de experimento a usar en la mezcla entre LDPE y PLA, se deben tener en cuenta las variables de la *Tabla 1* y *Tabla 2*, de la misma manera se debe realizar un arreglo factorial para considerar todas las posibilidades de combinación de los niveles de los factores.

Tabla 1. Variables de entrada del diseño de experimentos factorial.

Independientes	Velocidad RPM %, Mezclas LDPE-PLA, Tiempo de permanencia S, Temperatura del material °C
Dependientes	Película extruida LDPE-PLA (Se analizará por resistencia a la tracción y FTIR)
Observación (Fijas)	Temperatura ambiente, Agente de acople al 3%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Variables independientes de proceso para la fabricación de las películas de LDPE-PLA.

Materia prima	Temp. [°C]		Cantidad [Kg]
	Mín.	Máx.	
LDPE	155	215	20.00
PLA	160	190	20.00

a. Variables respecto a LDPE y PLA.

Máquina	Vel. [%]	Tiem. [S]
Extrusora mono husillo KHUNE	80	45
	70	35

b. Variables respecto a la máquina.

Mezcla	Mezcla LDPE-PLA [%]
1	50-50
2	40-60
3	60-40

c. Porcentajes de mezclas propuestas.

Fuente: Elaboración propia.

IV. RESULTADOS

Por tener recursos presupuestales limitados, se contó con la posibilidad de ejecutar 10 experimentos, los cuales se seleccionaron teniendo en cuenta las mezclas más utilizadas en la industria. En la *Tabla 3* se muestran los 10 experimentos más representativos.

Tabla 3. Número de experimentos a realizar en el diseño de experimento.

Experimento	Mezcla LDPE-PLA [%]	Agente Acoplante [%]	Temp. Mezcla LDPE min. - máx. [°C]	Temp. Mezcla PLA min. - máx. [°C]	RPM Husillo [%]	Tiempo de permanencia [s]
1	50-50	3	155	160	70%	35
2	40-60	3	155	160	70%	35
3	60-40	3	155	160	70%	35
4	50-50	3	215	190	70%	45
5	40-60	3	215	190	70%	45
6	60-40	3	215	190	70%	45
7	50-50	3	155	160	80%	35
8	40-60	3	155	160	80%	35
9	60-40	3	155	160	80%	35
10	50-50	3	215	190	70%	35

Fuente: Elaboración propia.

Determinar la dispersión, distribución y homogenización de la mezcla entre el LDPE y PLA.

NORMAS ASTM

a. FTIR (Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier).

Este ensayo se realizó bajo la norma ASTM E1252-2, que utiliza la interferometría para codificar información sobre un material colocado en el haz de infrarrojos. La Transformación de Fourier decodifica la señal, lo que da lugar a espectros que los analistas pueden utilizar para identificar el material. Los patrones en los espectros ayudan a identificar la muestra, ya que las estructuras específicas en las moléculas muestran huellas IR específicas [9].

b. Resistencia a la tracción de películas plásticas.

Este ensayo se realizó bajo la norma NTC 942 ASTM D 882-18, para determinar la capacidad del material de soportar cargas de estiramiento, por lo que debe evaluarse en ambos sentidos puesto que no siempre es posible saber en qué dirección soportará la carga [10].

PRUEBAS REALIZADAS

a. FTIR (Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier).

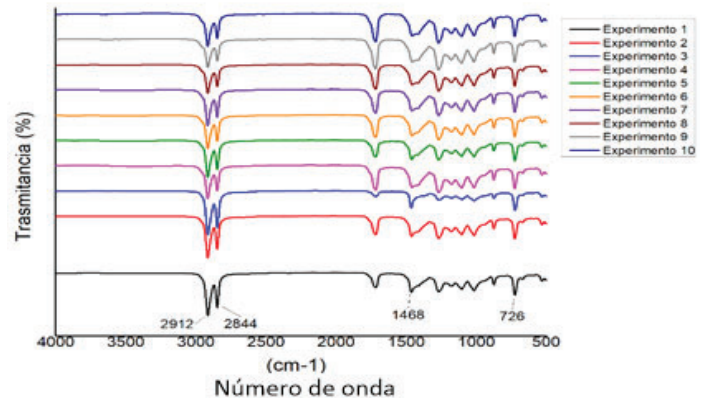


Fig. 1. Identificación de los picos asociados al LPDE en los espectros FTIR de las mezclas de LDPE-PLA. Fuente: Elaboración propia software ORIGIN.

En la *Fig. 2* se identificaron las bandas (picos) asociadas al PLA en las mezclas de LDPE-PLA. En el *Experimento 1* se puede observar el número de onda (cm⁻¹) se encuentra en el rango de: 2800 a 3000 cm⁻¹, 1300 a 1500 cm⁻¹ y 650 a 800 cm⁻¹ respectivamente.

Se identifican que las bandas (picos) asociados al PLA fueron: 1457 y 1468 cm⁻¹ se originó a partir de la vibración de estiramiento del grupo carbonilo (C=O), que se encuentra presente en las moléculas de PLA.

Lo mismo sucede con las bandas (picos) 1180 y 1726 cm⁻¹ ya que se caracteriza la vibración de la flexión asimétrica del grupo funcional -CH₃-.

La banda (pico) 1180 cm^{-1} representó el estiramiento del grupo funcional carbonilo (C-O-C) por la vibración, ya que (C-O) formó enlaces con diferentes átomos o funcionales grupos para desarrollar absorciones vibracionales más complejas.

Las bandas (picos) 876 cm^{-1} y 726 cm^{-1} se atribuyeron a la fase amorfa y fase cristalina que tiene originalmente el PLA por ser un polímero natural y que pasó a ser un polímero sintetizado es decir peletizado.

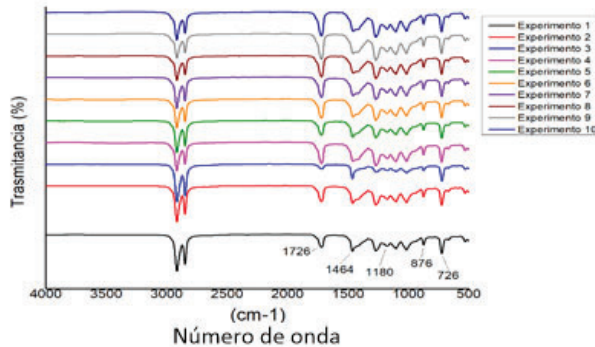


Fig. 2. Identificación de los picos asociados al PLA en los espectros FTIR de las mezclas de LDPE-PLA. Fuente: Elaboración propia software ORIGIN.

b. RESISTENCIA A LA TRACCIÓN de película plástica.

En esta prueba se evaluaron las propiedades mecánicas de las películas plásticas en los 10 experimentos de las mezclas de LDPE-PLA mencionados en la *Tabla 4*. Los resultados se muestran a continuación en la *Tabla 4* y en la *Fig. 3*.

Tabla 4. Resultados de las propiedades mecánicas por medio del ensayo de tracción.

Exp.	Mezcla LDPE-PLA [%]	Esfuerzo máximo longitudinal $[\sigma_{max}]$ (MPa) \bar{x}	Esfuerzo máximo transversal $[\sigma_{max}]$ (MPa) \bar{x}	Temperatura. Mezcla LDPE min. - máx. (°C)	Temperatura. Mezcla PLA min. - máx. (°C)	RPM Husillo (%)	Tiempo de permanencia. (s)
1	50-50	20,66	10,97	155	160	70%	35
2	40-60	18,03	10,29	155	160	70%	35
3	60-40	18,03	13,93	155	160	70%	35
4	50-50	16,17	14,76	215	190	70%	45
5	40-60	14,79	10,52	215	190	70%	45
6	60-40	14,79	8,06	215	190	70%	45
7	50-50	14,35	10,07	155	160	80%	35
8	40-60	13,36	8,40	155	160	80%	35
9	60-40	13,36	9,02	155	160	80%	35
10	50-50	14,83	10,34	215	190	70%	35

Fuente: Elaboración propia.

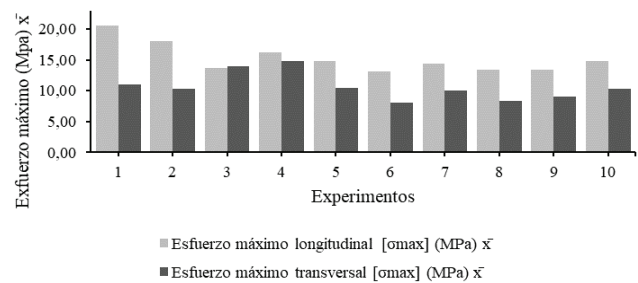


Fig. 3. Esfuerzo máximo entre medias (\bar{X}) longitudinal y transversal de las películas de LDPE-PLA. Fuente: Elaboración propia.

En la sección *longitudinal* de la *Fig. 3*, se evidencia que los experimentos 1 (20,66 MPa), 2 (18,03 MPa) y 3 (18,03 MPa) arrojaron las mejores resistencias a la tracción en este sentido, vale decir que los experimentos se realizaron con las temperaturas mínimas según la *Ficha técnica* del LDPE $155\text{ }^{\circ}\text{C}$ y *Ficha técnica* del PLA $160\text{ }^{\circ}\text{C}$, las RPM fueron iguales (70%) y el tiempo de permanencia de 35 s.

Por otro lado, al analizar los resultados de la sección transversal de la *Fig. 3*, se evidencia que los experimentos 4. (14,76 MPa), 3. (13,93 MPa) y 2. (10,97 MPa) arrojaron las mejores resistencias a la tracción en este sentido.

IX. CONCLUSIONES

- Al implementar un diseño de experimento, para determinar los diferentes porcentajes en la mezcla entre LDPE y PLA, se concluyó que fue necesario conocer inicialmente: a. perfiles de temperatura, b. velocidad del husillo, c. tiempo de permanencia y d. cantidad de materia prima. Así mismo, se planteó realizar el diseño experimental usando un *modelo mixto de factores aleatorios y fijos* que arrojó 48 experimentos a realizar, teniendo en cuenta: tres tipos de mezcla (50-50%, 40-60% y 60-40%), dos RPM (70% y 80%), dos tiempos de residencia (35 y 45 s); pero por disponer de un presupuesto limitado, se escogieron los 10 primeros experimentos ya que también favoreció que arrojó una combinación directa con las variables independientes tal como se ve en la *Tabla 4*.
- En el desarrollo de la película plástica se corroboró que la dispersión, distribución y homogenización no sólo dependen del proceso de transformación, sino que también, estos parámetros se ven afectados por las proporciones de cada uno de los materiales (LDPE y PLA). Esto se reflejó directamente en las propiedades de servicio de la película plástica, específicamente en la *Resistencia a la Tracción*, donde se demostró el mejor desempeño en experimento de la mezcla 1.
- Para realizar la prueba **FTIR** con la obtención de las diez películas plásticas, fue necesario realizar una preparación de muestras (especímenes) y usar un equipo infrarrojo Spectrum 3 FT-IR/NIR/FIR Triple – Rango de onda $11.000 - 30\text{ cm}^{-1}$, aplicando la norma ASTM E1252-21.

Dando como resultado los mejores experimentos de los diez ejecutados fueron el experimento 10. (2916.25 cm⁻¹) con un porcentaje de transmitancia (T%) de 49.39 y el experimento 3. (2914.50cm⁻¹) con un porcentaje de transmitancia (T%) de 32.34 ya que tuvieron los picos más altos en número de onda cm⁻¹. De la misma manera los segundos picos más altos en número de onda cm⁻¹ fueron los experimentos 7. (2848.69 cm⁻¹) con un porcentaje de transmitancia (T%) de 56.92 y experimento 3. (2847.61 cm⁻¹) con un porcentaje de transmitancia (T%) de 41.69.

4. Adicionalmente se puede concluir que en los experimentos de la *Tabla 4*, se logró cuantificar y cualificar la presencia de los materiales de LDPE y PLA en los tres (3) diferentes tipos de mezcla (50-50%, 40-60% y 60-40%), dos (2) RPM (70% y 80%), dos (2) tiempos de residencia (35 y 45 s), propuestos por el diseño de experimento.
5. Para realizar la prueba de **Resistencia a la Tracción** con la obtención de las diez películas plásticas, fue necesario realizar una preparación de muestras (especímenes) en dos sentidos *Longitudinal* y *Transversal* para las diez películas plásticas y usar un equipo: máquina universal de ensayos CP-E00MU02, aplicando la norma ASTM D882-18.
 - 5.1. Como resultado en la sección *longitudinal*, las mejores propiedades mecánicas se obtuvieron en los experimentos 1. (20,66 MPa), 2. (18,03 MPa) y 3. (18,03 MPa) arrojando las mejores resistencias a la tracción en este sentido.
 - 5.2. Como resultado en la sección *transversal* las mejores propiedades mecánicas se obtuvieron en los experimentos 4. (14.76 MPa), 3. (13.93 MPa) y 2. (10.97 MPa) arrojando las mejores resistencias a la tracción en este sentido.

REFERENCIAS

- [1] ¿Qué es un envase, un empaque y un embalaje? - página 1 <https://n9.cl/tt4kf>
- [2] IALIMENTOS.COM (2019). Regulación para plásticos de un solo uso: un nuevo reto para la industria.
- [3] Farah, S., Anderson, D. G., & Langer, R. (2016). Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications—A comprehensive review. *Advanced drug delivery reviews*, 107, 367-392.
- [4] Qin, Q., Yang, Y., Yang, C., Zhang, L., Yin, H., Yu, F., & Ma, J. (2022). Degradation and adsorption behavior of biodegradable plastic PLA under conventional weathering conditions. *Science of The Total Environment*, 842, 156775.
- [5] Aversa, C., Cappiello, G., & Barletta, M. (2022). Study of binary PLA/PBSA and ternary blends PLA/PCL/PBSA for the manufacturing of single dose strips. *Procedia CIRP*, 110, 335-341.
- [6] Aversa, C., Cappiello, G., & Barletta, M. (2022). Study of binary PLA/PBSA and ternary blends PLA/PCL/PBSA for the manufacturing of single dose strips. *Procedia CIRP*, 110, 335-341.
- [7] Flaris, V., & Stachurski, Z. H. (1992). The mechanical behavior of blends of polyethylene, polypropylene, and an ethylene-propylene block copolymer at -20° C. *Journal of applied polymer science*, 45(10), 1789-1798.
- [8] Gutierrez y De La Vara. Garcia y Víctor H. Valdivieso. - Análisis y Diseño de Experimentos – página 154, 155, 156.
- [9] Standard Practice for General Techniques for Obtaining Infrared Spectra for Qualitative Analysis – Section 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9.
- [10] Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting. Section 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10.