

[221024] Diseño de un método para la obtención de un polímero transformado a partir de poliestireno expandido y biosolventes.

Yina Lisset Laverde Montero 1 ^{a,c}, Nicolás Sánchez Barbón 2 ^{a,c}, Silvio Alejandro Aguilar Urrego 3 ^{a,c}, Mateo Alejandro Bustos Martínez 4 ^{a,c}

Luisa Fernanda Posada Uribe ^{b,c}

^aEstudiante de Ingeniería Industrial

^bProfesor, director del Proyecto de Grado, Departamento de Ingeniería Industrial

^cPontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia

Resumen

From the highly consumerist environments and their growing demand for resources today, the increase in production of single-use polymers is evident. Having said this, the need to design a method to obtain a transformed polymer from EPS and biosolvents that presents properties that allow modifying its field of application in industry is identified.

First of all, the existing EPS transformation processes were identified by reviewing the literature and the state of the art. Defining the biosolvent (limonene and eucalyptol), the temperature (150°C and 180°C) and the process time (20 min and 30 min) as the applicable factors in the present investigation. From this, the 2³ factorial design is implemented, which consists of eight independent experiments and two replicates per run, that is, sixteen experiments in total. For each test, three specimens are produced for destructive sampling.

The experimental development begins with obtaining post-consumer EPS from household appliance packaging, which is crushed to facilitate the dissolution of the biosolvent. After the biosolvent is added, the mixture is stirred until a uniform consistency is obtained (70% ethanol is used as the mixture catalyst). Then, a metallic mold is used to heat the mixture, once this process is finished, it is allowed to cool to room temperature to facilitate demolding to finally cut and sand the material obtained. To calculate the response variables corresponding to the mechanical tests conducted on flexion, tension and compression, the treatments standardized by ASTM standards were used.

Subsequently, the statistical model of the design of 2³ factorial experiments in R language is applied and from the results of the ANOVA tables, it is identified that, for the three response variables, the factors evaluated and their interactions between process time and temperature they are significant.

Finally, based on the results obtained, the technical-economic analysis is carried out on a pilot scale and a weighting matrix is designed in which it is evident that the transformed EPS has a score close to Polycril Recycled and higher than MABS, then, it is concluded that the transformed EPS has the necessary characteristics to be reincorporated in an industrial sector and thus contribute to the sustainable development of the country and the well-being of the environment. *Palabras clave: Poliestireno expandido (EPS), impacto ecológico, biosolventes, diseño de experimentos, propiedades mecánicas, polímero transformado.*

1. Justificación y planteamiento del problema

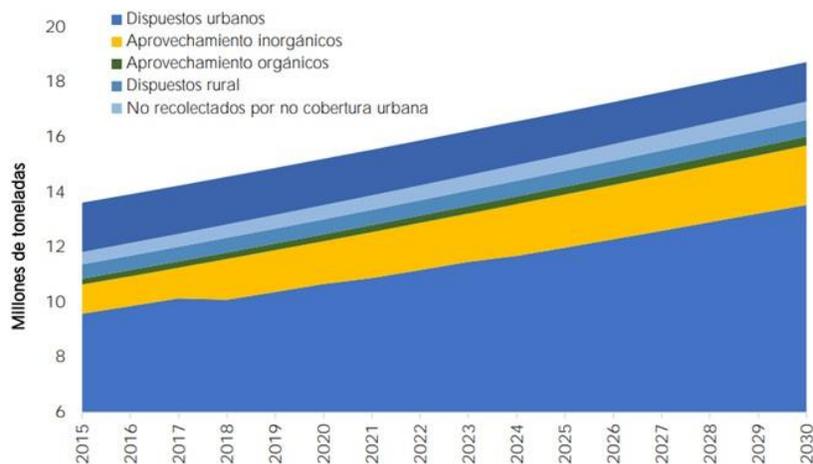
En la actualidad, la sociedad promueve entornos altamente consumistas donde, debido a la creciente demanda de bienes y servicios, se ha incrementado la producción de elementos de un solo uso fabricados a partir de polímeros, los cuales se degradan entre 500 a 1000 años (según su composición, características y uso), generando así un impacto ambiental negativo (García, N., 2019).

La problemática ambiental que quiere abarcar este estudio surge de la utilización de plásticos de un solo uso, ya que, al estar presentes en nuestra vida diaria, su fácil acceso y la falta de protocolos de disposición posconsumo, su reciclaje y reinsertión a la industria se han convertido en uno de los desafíos ambientales más grandes del planeta; puesto que representan casi la mitad de los residuos a nivel mundial. Estos residuos obstruyen los drenajes, ocasionando inundaciones y contaminan cuerpos de agua, afectando así la vida marina y terrestre del planeta (ONU, 2018).

Ante esto, los gobiernos de aproximadamente 100 países según el WRI (Instituto de Recursos Mundiales, por sus siglas en inglés) y el PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente), han tomado medidas y regulaciones para reducir el uso de plásticos en sus territorios, y así mitigar el impacto que este genera en el ambiente (Excell, 2021). En Colombia el Consejo nacional de política, económica y social CONPES afirma que el país debe implementar un esquema de gestión de residuos sólidos que le permita atender su crecimiento exponencial (DNP y BM, 2015).

En el gráfico N° 1 se observa la proyección de generación de residuos sólidos en Colombia para los próximos ocho años, se estima que el 83% de los residuos sólidos domiciliarios en el país son llevados a rellenos sanitarios, lo que considera producir en el año 2030 unas 18.74 millones de toneladas desechadas en este tipo de vertederos según los datos expuestos en el gráfico 1. Si no se implementan medidas necesarias para aprovechar o dar tratamiento a dichos residuos, en el 2030 se pronostican grandes emergencias sanitarias (DNP y BM, 2015).

Gráfico 1. Proyecciones de generación de residuos 2015-2030. (DNP y BM, 2015).



Dentro de los plásticos de un solo uso, se destaca el EPS. Este es conocido por ser un polímero sintético derivado del petróleo cuya textura física puede ser sólida o espumada (Connor, Nick, 2019). En Colombia se le conoce con el nombre de Icopor (por las siglas de la Industria Colombiana de Porosos), y es comúnmente utilizado y comercializado por sus cualidades de protección y aislamiento térmico. El mayor uso de este polímero en el país se encuentra en los sectores de la construcción, embalaje y vajilla desechable, gracias a sus propiedades físicas, mecánicas y además su bajo costo de producción, es un compuesto que cumple con algunas de las necesidades específicas de muchos sectores económicos.

En Colombia, el reciclaje es un tema que ha sido relegado al tratamiento de plásticos y metales, en donde materiales como el EPS pierden relevancia por su falta de métodos de transformación, que sumado a la no biodegradabilidad del material, aumenta los impactos ambientales y sociales de los desechos de este tipo (Benavides, 2019).

En el país se han evaluado diferentes proyectos de ley enfocados en la disminución, reciclaje y prohibición del EPS en casos de un solo uso, ejemplo de esto es el proyecto de ley 005 de 2017 presentado por la senadora Maritza Martínez Aristizábal, el cual tiene como descripción “Por medio del cual se prohíbe la utilización del poliestireno expandido en actividades de comercialización de alimentos, se ordena la implementación de un Plan Nacional de Reciclaje del EPS de uso industrial”. En dicho proyecto se exponen las principales implicaciones reconocidas por la ponente como los daños a la fauna marina, categorizados de dos formas: los daños mecánicos (obstrucción de sistemas digestivo y respiratorio de los animales) y los daños químicos (actuando como un punto de acopio de sustancias tóxicas que al ser consumido por un animal puede causarle la muerte). De igual manera, se reconoce que el exceso de este tipo de materiales en el medio ambiente representa un problema de salud pública, ya que, indirectamente las personas estarían consumiendo estos

materiales bajo la premisa de que los animales que consumen estos materiales después son utilizados para la alimentación humana (Martínez, 2017).

Según el ministerio de ambiente y desarrollo sostenible de Colombia (MADS), diferentes iniciativas resaltan la importancia de buscar opciones de reciclaje y reinserción para el reciclaje del material, mostrando los beneficios económicos y de generación de empleo que puede proveer este proceso. Actualmente, se reconoce en el país que hace falta un alto grado de compromiso tanto por parte de los productores como del consumidor final para que el proceso sea rentable/sostenible, y así pueda seguirse replicando (MADS, 2021).

En Colombia, la fundación Verde Natura es la única entidad en el país encargada en su totalidad de reciclar y reintegrar el EPS a la industria, esta compañía privada se enfoca en la recolección y transformación del polímero mediante un proceso de termo densificado. A pesar de tener una buena iniciativa con el reciclaje y reinserción del EPS, esta entidad solo cuenta con dos aplicaciones para el EPS reciclado encaminados a la manufactura de bolígrafos y reglas escolares, además de no contar con un protocolo establecido a gran escala en un rango nacional para desarrollar su labor (Rodríguez & Montilla, 2021).

Ahora bien, a pesar de que en el país se ha optado por disminuir la utilización de plásticos de un solo uso como el EPS, se ha dejado a un lado el reciclaje de estos materiales. Actualmente no existe la cultura ni la reglamentación que exija el reciclaje en los hogares colombianos y, por lo tanto, esta actividad se maneja de manera informal y se asigna un valor monetario al kilogramo del material que es pagado a la persona que lo recicla al momento de llevarlo a los centros de acopio. Sin embargo, en palabras del director de la Fundación Verde Natura *“En un carrito les caben cuatro kilos de icopor, por el que les pagan 400 pesos (unos 15 centavos de dólar). Por eso no les interesa, prefieren otras cosas”*, este monto asignado a cada kilo además de la baja densidad y el gran volumen que presenta el material, implica que los recicladores formales e informales tendrían que recolectar cantidades masivas de EPS para lograr algún beneficio económico. La consecuencia final de esta situación es que este polímero termina en los rellenos sanitarios sin posibilidad de degradarse debido a su baja capacidad para realizar este proceso (Angulo, 2016).

Adicionalmente, se debe tener en cuenta el beneficio potencial de buscar métodos de reciclaje y transformación posconsumo de polímeros como el EPS en términos de generación de empleo. Según un estudio realizado por el Programa de Medio Ambiente de las Naciones Unidas (UNEP) *“El reciclaje es uno de los sectores más importantes en términos de creación de empleo y actualmente emplea a 12 millones de personas en solo tres países: Brasil, China y los Estados Unidos. La clasificación y el procesamiento de materiales reciclables sustentan diez veces más puestos de trabajo que los rellenos sanitarios o los centros de incineración por tonelada”* (UNEP, 2011).

Teniendo en cuenta la problemática ambiental causada por el EPS y su falta de métodos de transformación de gran impacto, que además sean amigables con el medio ambiente en Colombia, se busca diseñar un método de transformación alternativo, el cual permita la obtención de un polímero transformado a partir de EPS y biosolventes (los cuales, a diferencia de otros solventes no polares, son de base orgánica y no representan una amenaza ambiental). Para ello se empleará un diseño experimental que permita evaluar los factores con mayor efecto en las variables de respuesta asociadas a las propiedades mecánicas del material, y que luego de su evaluación permitan modificar su campo de aplicación en la industria con el fin de aportar al desarrollo sostenible del país.

2. Antecedentes

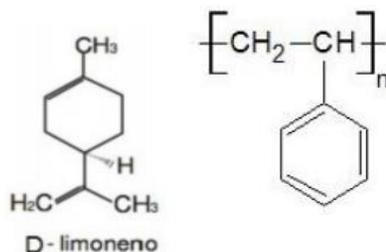
A continuación, se presenta un compendio de estudios e investigaciones relacionadas a la transformación del EPS, la metodología utilizada, hallazgos y conclusiones de cada estudio serán de interés para la presente investigación.

En la actualidad se cuenta con una gran cantidad de métodos para la reutilización y/o transformación de EPS posterior a su utilización y desecho, entre estos podemos encontrar procesos que incluyen la trituración para una nueva compactación, procesos de modificación de la densidad del material al someterlo a cambios de

presión y temperatura, y otros en los que se utiliza el EPS reciclado como insumo de manufactura para la producción de artículos terminados.

Una sustancia actúa como solvente siempre y cuando cuente con una estructura química similar a la del soluto. Para el caso de los polímeros, al entrar en contacto con el solvente, se rompen las interacciones poliméricas permitiendo su disolución; esta reacción se evidencia en el EPS a través de biosolventes tipo terpeno no polares como el d-limoneno y el eucaliptol (Mendoza & Pulido, 2021).

Ilustración 1. Estructura química del Limoneno (a) y el EPS (b).



La Alianza Internacional de Poliestireno Expandido (INEPSA por sus siglas en inglés), es la entidad encargada de regular, buscar y mejorar los procesos de reciclaje de EPS, así como los estándares ambientales por medio de la divulgación y discusión de información referente al EPS. Dentro de los principales procesos de recuperación o reciclaje se identifica que el más utilizado es la creación de otro producto a partir del material

reciclado, en donde se ven involucrados cinco pasos, los cuales abarcan los procesos implementados desde su recolección hasta su transformación en un nuevo material. Dichos pasos son: recogida, compactación, granulación, mezclado y extrusión (Ecoembes, 2022).

El proceso general de reciclado busca obtener la mayor cantidad de EPS y compactarlo a través de prensas, para facilitar el transporte. Paso seguido, se traslada a un punto de recolección en el que luego pasará a ser triturado para generar partículas o gránulos que puedan ser procesados. Posteriormente, estas partículas obtenidas se mezclan con partículas de material nuevo para producir un material compuesto o en algunos casos se deja un 100% del material reciclado. Finalmente, la mezcla de gránulos pasa a la máquina de extrusión para poder generar un nuevo producto con una vida útil restaurada (Ecoembes, 2022).

Un ejemplo de esto es el material compuesto producido mediante la inserción de aserrín en la mezcla, buscando un aumento en la densidad del polímero (Poletto, 2016).

Otro método reconocido es el tratamiento del material con diferentes solventes que permitan una reducción de su volumen en aproximadamente cien veces y con un costo moderado. Dicho método se constituye como una alternativa diferente a la incineración y al reciclado mecánico, ya que es el más barato y menos contaminante. Dado que el EPS es un polímero no polar, para este proceso se trata con solventes que muestren la misma característica, para no verse afectado en gran medida por cualquier medio acuoso básico o ácido, pero si ante disolventes orgánicos como la acetona (González, 2020).

Se encuentra el caso de la compañía chilena Idea-Tec en donde se producen pinturas a base de EPS y solventes no polares para el proceso de transformación. En este caso son utilizados entre 3.5 y 5.5 kg de EPS y entre 0,7 y 1,1 kg de solvente por caneca de pintura, dependiendo de las características que se busque en la mezcla este producto se puede manipular para ser utilizado tanto en ambientes de alto tráfico en la demarcación vial como en ambientes domésticos para dar acabado en las paredes o impermeabilización de terrazas (Archdaily, 2019).

En otro estudio realizado en el Centro de Investigación de Yucatán en México se evaluó el uso del poliestireno expandido mezclado con diferentes disolventes con el fin de utilizar la mezcla como recubrimiento sobre un papel tipo Kraft para aumentar su hidrofobicidad y sus propiedades mecánicas de tensión y compresión. Para este proceso se realizó un experimento haciendo uso de tres solventes: limoneno, acetona y cloroformo; al realizar la evaluación de cada uno de los factores mecánicos, se obtuvo que recubriendo el papel Kraft con una capa de poliestireno expandido mezclado con acetona y dos capas de poliestireno expandido mezclado con limoneno se lograba disminuir la humedad del papel en un 40%, aumentar su resistencia a la tensión en un 44% y además aumentar hasta 3 veces la resistencia a la compresión (Caamal, 2018).

En una investigación realizada por estudiantes de la Universidad de Cartagena se estudió la capacidad del poliestireno expandido mezclado con el limoneno para disminuir la corrosión de materiales metálicos obteniendo resultados positivos, pues al aumentar la cantidad de limoneno usado en la mezcla, mejora la propiedad anticorrosiva en el material aplicado (Benítez & Vélez, 2013).

Por otra parte, en la Universidad de Castilla-La Mancha en España, en la Facultad de Química, se realizó un estudio para evaluar el reciclaje del EPS empleando diferentes solventes, entre ellos el limoneno. Inicialmente realizaron la disolución de EPS en los diferentes solventes a temperatura ambiente, tomando como criterio de evaluación que *“Un buen solvente para el reciclaje del poliestireno extruido debe tener alta capacidad de disolución y alta volatilidad que permita su remoción con mínima degradación”*, teniendo en cuenta también el costo del solvente, la toxicidad y la disponibilidad de este. Una vez realizado este proceso, se determinó que el limoneno, terpineno, cimeno y felandreno poseen valores de solubilidad muy similares; por lo que el factor de decisión para escoger el solvente adecuado pasó a ser su disponibilidad en el mercado. Finalmente, se evaluó el efecto de la temperatura en la solubilidad del EPS junto con el solvente dando como resultado que la temperatura máxima para la disolución es de 60°C ya que, aunque a más temperatura mayor solubilidad, se degradan las cadenas poliméricas en el proceso (Caamal, 2018).

A su vez, Yi-Bo Zhao, Xu-Dong & Hong Gang en la Universidad de Pekín en China evaluaron la capacidad de reciclaje del EPS disolviéndolo en diferentes solventes. El proceso consistió en cortar y eliminar los residuos e impurezas del EPS, disolverlo en el solvente, lavar y secar el polímero resultante, separar y recuperar los solventes. Durante este proceso se obtuvo que el limoneno, además de funcionar como un buen solvente para el EPS, también funciona como un antioxidante durante el proceso de calentamiento. El proceso se realizó a una temperatura de 30°C y con una concentración de 0.4 g de EPS por 1 g de limoneno (Zhao et al., 2018).

Al mismo tiempo, un estudio relacionado fue el realizado en Japón por Tsutomu, Mayumi, Yasuhito & Haruo, los investigadores realizaron el proceso de reciclaje del EPS usando el limoneno como solvente debido a su alta solubilidad, suministro estable y fragancia. Durante su proceso de investigación, se pudo evidenciar que el disolver 5 cm³ de limoneno en 125 cm³ de EPS tardó 3 minutos y el volumen de EPS se redujo un 1/20 del original. De esta manera, 18 litros de limoneno podrían disolver aproximadamente 10 kg de EPS. Para ayudar al proceso de disolución, a la mezcla del EPS con el limoneno; se le añadió un 3% de volumen de etanol, provocando que la tasa de disolución se duplicara debido a que ayuda a la penetración del limoneno en la disolución con el EPS. Como resultado de este proceso, el punto de inflamación del compuesto resultante fue de 49.5°C, siendo 2.5°C mayor que el del limoneno (Noguchi et al., 1998).

Adicionalmente, en un artículo realizado en el estado de Texas, Estados Unidos, se evaluó un método de reciclaje para el EPS con ayuda de limoneno, dónde en el experimento se usó un vaso de EPS con residuos de bebida gaseosa, el cual fue disuelto por el biosolvente; el residuo líquido de la bebida se depositó en la parte superior del recipiente de trabajo, quedando como capa inferior la disolución de EPS formando una bicapa líquida. Para poder separar esta bicapa líquida, se usó politol y un foto-iniciador para después calentarlo a 140°C, después de esto, se vertió la disolución en un molde precalentado y con radiación UV se formó una red elastomérica que se usó para hacer un prototipo de una funda de iPhone 4 (Hearon et al., 2014).

Finalmente, una investigación realizada en Corea del Sur por Changyun Shin & George G, quienes diseñaron un método con el fin de fabricar nano fibras de EPS usando solventes y biosolventes, entre ellos el limoneno, identificó que los solventes usados como el tetrahidrofurano o la dimetilacetamida tienen efectos ambientales y a la salud negativos, lo cual dificultó su manejo. Por su parte el limoneno tuvo mejores características por su composición y el hecho de ser un solvente natural.

El biosolvente disolvió el EPS hasta en un 35% de peso en condiciones ambientales estándar y agitando a frecuencias de 100 rpm; se realizó el mismo proceso en las mismas condiciones con los solventes. Posteriormente, ambos compuestos se centrifugaron en una pipeta y con una fuente de alimentación, se les aplicó un voltaje de 20 kV; esto produjo unas fibras como producto del proceso de electro hilado aplicado a cada disolución. Una vez obtenidas las fibras de ambos compuestos, se concluyó que ambas nano fibras son similares con la diferencia de que el limoneno fue calificado como un mejor solvente por las características mencionadas anteriormente (Shin & Chase, 2005).

Los casos enunciados anteriormente permiten exponer algunos estudios destacados que demuestran la capacidad del material para ser reutilizado en diferentes sectores industriales, además, de contribuir al medio ambiente mediante su re inserción generada a partir de métodos de transformación en sus propiedades físicas y químicas. Sin embargo, en Colombia no se cuenta aún con un método que apunte a la transformación de las propiedades mecánicas del EPS mediante biosolventes para obtener un material sólido que permita modificar su aplicación posconsumo en la industria. Los métodos y estudios expuestos en este apartado fueron una guía cardinal, la cual fundamentó mediante la implementación de procesos químicos y físicos junto con biosolventes, el desarrollo de este diseño. En el desarrollo de los objetivos I y II de este documento se evidencian cual fue el manejo que se dio a la información obtenida en este apartado.

3. Objetivos

Diseñar un método para la obtención de un polímero transformado a partir del EPS y biosolventes que presente propiedades que permitan modificar su campo de aplicación en la industria.

- Determinar los procesos de transformación existentes de EPS empleando biosolventes para la obtención de nuevos materiales a través de una revisión y análisis de estado del arte.
- Seleccionar el método de transformación de EPS más adecuado a partir de criterios técnicos y de disponibilidad de recursos.
- Determinar los parámetros de proceso de mayor efecto para la transformación del EPS aplicando el método escogido.
- Realizar un análisis técnico-económico para la escalabilidad del proceso en un rango piloto de la producción del nuevo material.
- Realizar un análisis comparativo entre el EPS transformado y polímeros con propiedades mecánicas similares.

4. Cuerpo del documento

Objetivo 1: Determinación de los procesos de transformación existentes de EPS empleando biosolventes para la obtención de nuevos materiales a través de una revisión y análisis del estado del arte.

Se realizó un análisis bibliométrico empleando el paquete de Bibliometrix, que pertenece a la herramienta de análisis estadístico R. Se escogió la base de datos Scopus bajo el criterio de ser uno de los portales más completos y confiables con artículos científicos indexados a nivel mundial, paso siguiente, se procedió a realizar la búsqueda con los términos de “EPS” y “Essential oils” en todos los campos de investigación disponibles de la base de datos; a partir de esta búsqueda se filtraron los documentos encontrados excluyendo aquellos pertenecientes a campos del conocimiento ajenos a este estudio e idiomas distintos al inglés y español, el

resultado obtenido corresponde a un paquete de cincuenta (50) investigaciones afines, las cuales serán indispensables para el cumplimiento de este objetivo.

Resultados obtenidos:

El análisis bibliométrico obtenido mediante el uso del paquete Bibliometrix en la herramienta R, indica que en los cincuenta (50) documentos obtenidos de la base de datos Scopus se encuentra la siguiente información:

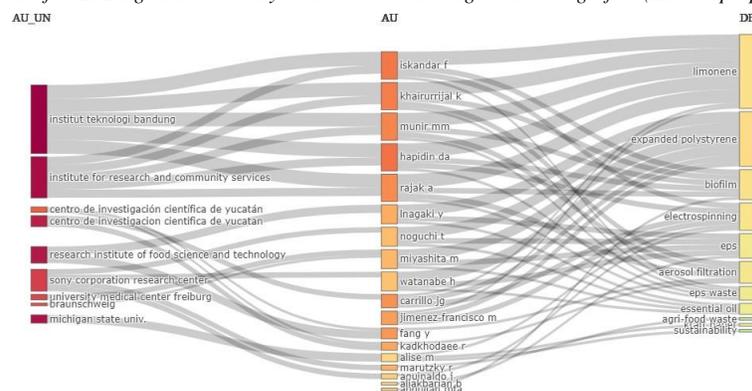
Tabla 1. Información principal de la base de datos SCOPUS. (Autoría propia)

Description	Results
Timespan	1994:2022
Sources (Journals, Books, etc.)	46
Documents	50
Annual Growth Rate %	5,08
Document Average Age	6,06
Average citations per doc	51,1
References	6983
DOCUMENT CONTENTS	
Keywords Plus (ID)	734
Author's Keywords (DE)	184
AUTHORS	
Authors	201
Authors of single-authored docs	4
AUTHORS COLLABORATION	
Single-authored docs	4
Co-Authors per Doc	4,4
International co-authorships %	24
DOCUMENT TYPES	
article	44
book	2
book chapter	3
conference paper	1

En esta tabla se condensa información relevante de la base de datos ingresada al software. Se pueden identificar datos como el periodo de tiempo de investigación, el cual se establece desde el año 1994 hasta el año 2022. Esto nos indica que la búsqueda de métodos de transformación del EPS empleando biosolventes (como lo son los aceites esenciales) ha sido un tema relevante para los 205 autores encontrados, quienes han publicado artículos, libros y han presentado conferencias enfocadas a investigar acerca de este tema, presentando una tasa anual de crecimiento del 5,08% a nivel global.

Este diagrama de flujo tipo Sankey ubica en su columna izquierda a las organizaciones investigativas y su flujo de datos relacionados con los autores ubicados en la columna central, los cuales, a partir de sus investigaciones establecen una serie de palabras clave reiterativas clasificadas en la columna derecha.

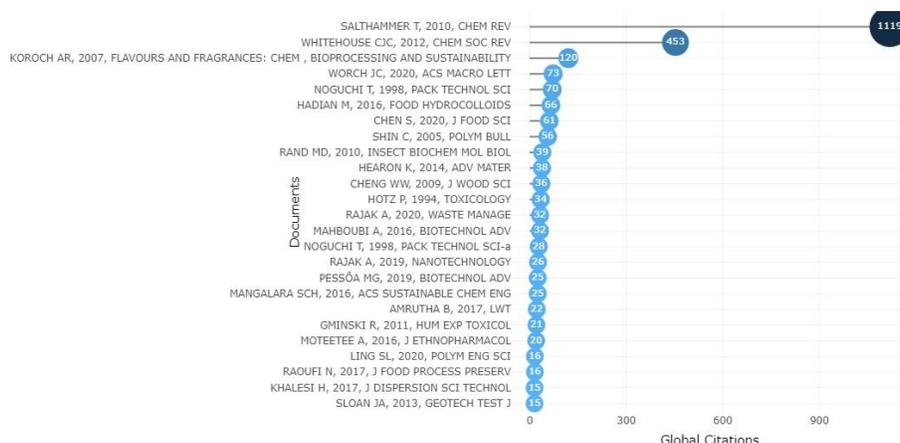
Gráfico 2. Diagrama de Sankey obtenido de la investigación bibliográfica (Autoría propia).



A partir de este diagrama se puede recopilar información importante que ayudará al desarrollo de este estudio teniendo en cuenta los parámetros establecidos del mismo. Los datos de mayor relevancia para este estudio teniendo en cuenta el diagrama, serán limoneno, EPS, desechos de EPS y aceites esenciales.

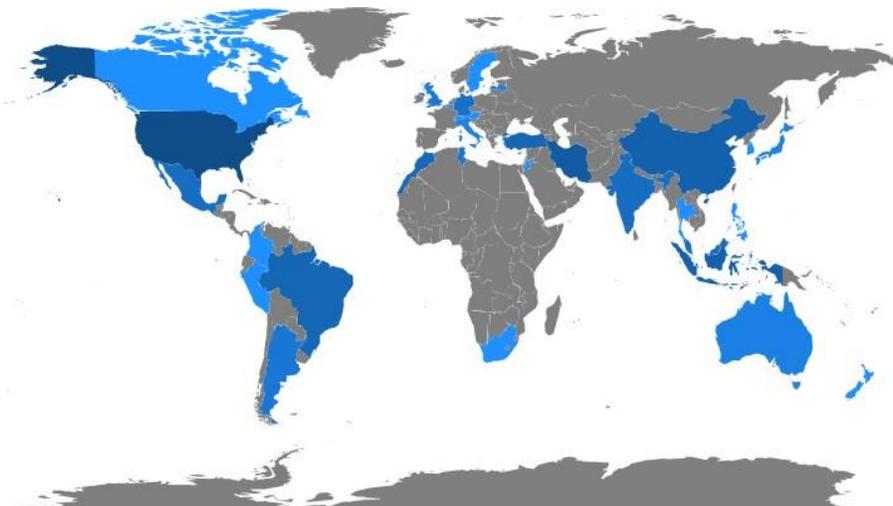
La siguiente gráfica expone el indicador correspondiente a los documentos indexados más citados globalmente abarcan temas relacionados con métodos de transformación de EPS con biosolventes, estos estudios fueron tenidos en cuenta al momento de investigar y plantear los antecedentes del presente estudio.

Gráfico 3. Documentos más citados relacionados con la búsqueda a nivel global, (Autoría propia).



En la siguiente ilustración se aprecia la producción y publicación global de documentos científicos indexados en la base de datos SCOPUS, enfocados a la transformación de EPS mediante biosolventes, para interpretar este mapa se debe tener en cuenta que los países que presentan la tonalidad más opaca de azul cuentan con una mayor cantidad de artículos científicos. Se puede observar que los países con mayor flujo de estudios científicos enfocados en el tema son Estados Unidos, Brasil, Irán, China e Indonesia, los cuales corresponden a algunos de los países con mayor producción y consumo de EPS a nivel global (Flores, 2016).

Ilustración 2. Producción científica por país, (Autoría propia).



Teniendo en cuenta el análisis bibliométrico realizado, se escogió ocho artículos con base en su relevancia, medida a partir de criterios técnicos como el número total de citas y el prestigio de las instituciones educativas que indexaron el documento a la base de datos SCOPUS, además de criterios propios como la

cercanía conceptual que los estudios mencionados tienen con el propósito de este objetivo específico, medida a través de las palabras clave mencionadas anteriormente en el diagrama de Sankey.

Tabla 2. Artículos relevantes escogidos para fundamentar el estudio (Autoría propia).

Autores y año	Solvente usado	Polímero empleado	Factores evaluados	Resultados
Tsutomu N., Mayumi M., Yasuhito I. & Haruo W. 1998	Limoneno, Metilciclohexano, Tolueno y Acetona	EPS	Capacidad de disolución, modulo elástico, resistividad térmica, peso molecular y punto de inflamación	Referente a la capacidad de disolución, el limoneno tiene la ventaja que solo disuelve el EPS, por lo que separar la contaminación de este es más sencillo. Cabe resaltar que se le añadió a la mezcla etanol para ayudar a la disolución por ser un catalizador. El punto de inflamación resultante de la mezcla fue 2.5°C mayor al original, el peso molecular de la solución de limoneno fue mayor con respecto a los demás solventes, sugiriendo que el limoneno es un antioxidante del EPS. El módulo elástico de la mezcla de limoneno resultó un 10% más alto al original y su resistividad térmica también resultó ligeramente más alta que el original.
Ismael Benítez & Jorge Vélez 2013	Limoneno	EPS	Porcentaje de corrosión en la superficie	Después de realizado el experimento, se observó que entre mayor sea la cantidad de limoneno añadida a la mezcla, mayor será el rendimiento contra la corrosión.
M. González 2017	Uso de diferentes disolventes alifáticos, aromáticos y cloratos	EPS	Degradación del polímero	Al mezclar el EPS con los disolventes a 90° C, el poliestireno se deterioró y se degradó con cada uno de ellos.
Yi-Bo Zhao, Xu-Dong & Hong-Gang Ni 2018	Metanol, limoneno, terpineno y cloroformo.	EPS	Solubilidad del EPS en limoneno	Al evaluar los diferentes solventes, las mejores opciones para reciclar el EPS fueron el limoneno, terpineno, cimeno y felandreno; sin embargo, el limoneno presentó ser un buen antioxidante para el EPS además de ser el más amigable con el medio ambiente.
Changyun S. & George G. 2005	Tetrahidrofurano, dimetilformida, dimetilacetamida y limoneno	EPS	Efecto en el medio ambiente, diámetro de las nano fibras	Al realizar el experimento con los solventes propuestos, se obtuvo que, los primeros 3 solventes mencionados en la cuarta columna de esta tabla presentan impactos negativos al ambiente, mientras que el limoneno no, debido a sus propiedades orgánicas. En cuanto a las nano fibras resultantes del experimento, el diámetro de estas en los 3 primeros solventes varía entre 200 nm a 500 nm; en las nano fibras producidas por la mezcla del limoneno, su diámetro varió entre 300nm a 900 nm siendo estas más gruesas mejorando las propiedades de estas.
María Teresa, Ignacio Gracia, Gema Duque, Antonio de Lucas & Juan F. Rodríguez 2009	Limoneno, benceno, tetrahidrofurano, eucaliptol, terpineno, cimeno y felandreno.	EPS	Capacidad de disolución, temperatura de disolución	Una vez realizadas las pruebas requeridas, y teniendo en cuenta el costo del solvente, toxicidad y disposición, se determinó que los mejores solventes fueron el limoneno, terpineno, cimeno y felandreno; presentando resultados similares entre ellos, dejando como decisión abierta el uso de alguno de ellos. En este proceso se usó una temperatura de 30°C y una concentración de 0.4 g por mL de limoneno.
Keith H., Landon D, Jennifer N, Alexander T, Jeffery E, Thomas S,	Limoneno	EPS	Modulo dinámico (almacenamiento y perdida), deformación	Una vez realizadas las pruebas de la mezcla del limoneno con el EPS, mezcla realizada a 25°C, se obtuvo que, con un peso de 30% de EPS en la mezcla, se obtuvieron los mejores resultados. Se obtuvo el mayor módulo de almacenamiento (370.8 MPa) y el mayor módulo de pérdida (15.5 MPa) en comparación a los pesos de EPS de

Karen L
& Duncan J.
2014

0, 10 y 20%.
Mismo resultado con la prueba de tensión la cual arrojó un valor de 5.03 MJ/m³ aproximadamente, con un 30% de peso de EPS.

Jesús
Canché
2018

Limoneno,
acetona y
cloroformo

EPS

Hidrofobicidad y
propiedades
mecánicas a tensión y
compresión

Al aplicar 2 capas de recubrimiento de limoneno a la mezcla del papel Kraft con la acetona, la humedad del papel disminuye en un 40% menos que el papel original. En cuanto a la resistencia a la tensión, con el segundo recubrimiento del limoneno a la mezcla del papel Kraft con la acetona, esta logra incrementar su resistencia a tensión en un 44% más que sin recubrimiento. En términos de compresión, con el recubrimiento del limoneno junto con la acetona, aumento su resistencia en un 90% con respecto a la original; pero al aplicarle un segundo recubrimiento de limoneno, aumento hasta 3 veces su resistencia original.

Objetivo 2: Selección del método de transformación de EPS más adecuado a partir de criterios técnicos y de disponibilidad de recursos.

A partir de la revisión de la literatura existente se identificaron ocho métodos y procesos afines a esta investigación, los cuales se han empleado con el objetivo de reciclar el EPS mediante biosolventes y transformarlo en un nuevo material. Se consideraron los cuatro primeros métodos expuestos en la tabla 2 según su procedimiento e información relevante respecto a la disolución de EPS empleando biosolventes y los cuatro siguientes de los cuales se extrajeron los factores más relevantes según su metodología. De esta manera se construyó una matriz de decisión, donde se evaluaron criterios como la disponibilidad de recursos técnicos, la limitación de tiempo y el capital disponible para el desarrollo del estudio.

Del análisis de los cuatro primeros métodos mencionados anteriormente, se concluye que el limoneno es el biosolvente más adecuado para efectuar la disolución del EPS, según su interacción con el material con impurezas y su impacto en el medio ambiente; la información obtenida a partir de estos métodos de disolución se tiene en cuenta para la evaluación de los métodos relacionados con métodos de transformación.

El primer método de transformación, denominado EPS + limoneno, se obtuvo tomando como referencia el estudio realizado en el centro de investigación de Yucatán por Caamal (2018) el cual consiste en la obtención de látex de poliestireno o látex PS aplicado sobre papel Kraft para evaluar las propiedades de tensión, compresión e hidrofobicidad del material resultante. El proceso aplicado, en el estudio mencionado, inicia con la obtención de una solución polimérica a base de EPS reciclado y solventes como limoneno, acetona y cloroformo; seguidamente se lleva a cabo un proceso de emulsión para la obtención del látex donde se involucra el polímero que se obtuvo previamente, los monómeros metacrilato de metilo (MMA) y butil acrilato (BA).

Para el segundo método de transformación, EPS+ Eucaliptol, se usó como base un estudio realizado en la universidad de Castilla – La Mancha, en el cual se describe el desarrollo de un método de reciclaje de EPS en dos pasos: el primero se basa en la disolución del EPS donde se produce el residuo y el segundo paso, en la destilación del disolvente utilizado. Los solventes utilizados para la disolución del EPS fueron benceno, tolueno, geraniol, limoneno, terpineno, felandreno, cinamaldehído, mentol, terpineno, eucaliptol, nitrobenzeno, N,N-dimetilformamida, entre otros. A través del estudio mencionado se identificó que el eucaliptol y el limoneno tienen la capacidad de disolver el EPS, además de ser más amigables con el medio ambiente por sus propiedades orgánicas (García et al., 2009).

Así mismo, el tercer método de transformación, EPS+ Limoneno + Voltaje, se eligió a partir del estudio realizado por Changyun S. & George G. 2005 en el cual se realiza un proceso de obtención de nano fibras poliméricas, a partir de soluciones de EPS y solventes como el limoneno, tetrahidrofurano, dimetilformamida y dimetilacetamida, a través de electro hilado, el cual se realiza a partir de una jeringa con solución polimérica y

aplicando una carga de voltaje en la punta de la aguja generando un campo eléctrico, en el momento en que dicho campo es mayor a la tensión superficial, la solución es expulsada en forma de hilo.

Finalmente, el cuarto método de transformación, EPS + Limoneno+ UV, se define a partir del estudio realizado en la Universidad de Texas A&M, Departamento de Ingeniería Biomédica, por medio del cual presentaron un método de reciclaje de EPS enfocándose en la transformación del material y la modificación de sus propiedades. El proceso que se planteó en el estudio consiste en la disolución de EPS reciclado, contaminado con residuos de alimentos y bebidas, en limoneno; luego de que el material se disolviera por completo en el biosolvente, se realizó la separación de impurezas con el uso de politol y un foto-iniciador; seguidamente se calentó la mezcla a 140° C con radiación UV. (Hearon et al., 2014)

Los criterios técnicos de evaluación definidos son:

La disponibilidad de equipos técnicos, a través del cual se evalúa el acceso a instrumentos, equipos e instalaciones de laboratorio para llevar a cabo del experimento.

La viabilidad técnica, través de este criterio de evaluación se verifica si el equipo de trabajo cuenta con la experiencia y los recursos técnicos necesarios, tales como, conocimientos previos, software, herramientas y equipos para la aplicación y análisis.

El impacto ambiental, evaluando la capacidad de recuperación de los desechos de EPS para su respectiva transformación con el uso de solventes e insumos que no generen agentes contaminantes o que afecten el medio ambiente y, de esta manera, lograr reducir el volumen de desechos de EPS que llegan a rellenos sanitarios.

En cuanto a criterios de disponibilidad de recursos, se tiene en cuenta:

El costo de insumos, estimando si el costo de los insumos necesarios para el desarrollo del experimento es accesible para los investigadores.

La limitación de tiempo, partiendo de los parámetros estipulados en el planteamiento del proyecto, se evalúa la capacidad de aplicación del método de transformación según el cronograma establecido.

En la aplicación de la evaluación de cada método en la matriz de decisión, se asignó una calificación de 1 a 5 siendo 5 el puntaje máximo indicando mayor viabilidad respecto al criterio sometido a evaluación, y 1 el puntaje mínimo, representando mayor dificultad o imposibilidad de realización.

Cada uno de los investigadores del presente estudio diligenció la matriz de decisión y se realizó la ponderación de las calificaciones asignadas a cada método en cada criterio de evaluación, Ver Anexo I.

Tabla 3. Matriz de decisión.

Método de transformación	Disponibilidad de insumos en el mercado	Costo insumos	Disponibilidad de equipos técnicos	Limitación de tiempo	Viabilidad técnica	Impacto ambiental	Ponderación
Método 1: EPS + limoneno	4,3	3,5	4,5	4,8 5,0		4,8	4,5
Método 2: EPS + eucaliptol	4,3	3,8	4,8	4,8 5,0		4,8	4,5
Método 3: EPS + limoneno + voltaje	3,3	2,8	3,3	3,7 4,0		4,0	3,5
Método 4: EPS+ limoneno + UV	2,5	2,5	2,5	3,5 3,8		3,0	3,0

Los métodos elegidos como base, para el diseño del método de transformación en el presente estudio, corresponden al método 1 y 2, *EPS+ limoneno* y *EPS + Eucaliptol*, debido a que obtuvieron la calificación más alta; de esta manera, se ha decidido diseñar el proceso obtención de un polímero transformado a partir del EPS usando como biosolventes, limoneno y eucaliptol, con el fin de renovar su vida útil y así poder ser reincorporados en nuevo ámbito industrial.

Para validar el procedimiento realizado en este objetivo por el grupo de investigadores del presente estudio se consultó la opinión de uno de los colaboradores de la Fundación Verde Natura, el cual resaltó la importancia del diseño de este método y reconoció su impacto positivo al medio ambiente además del apoyo al desarrollo sostenible del país.

Objetivo 3: Determinación de los parámetros de proceso de mayor efecto para la transformación del EPS aplicando el método escogido.

A partir de los resultados obtenidos mediante la matriz ponderada en el objetivo anterior y la información obtenida a partir de los métodos de disolución, se seleccionaron los métodos de transformación de EPS uno y dos, como los más adecuados según criterios técnicos y disponibilidad de recursos.

Teniendo en cuenta los factores analizados en los dos métodos seleccionados de la matriz EPS+ limoneno y EPS + Eucaliptol, se estableció un punto de partida, donde se determinaron los siguientes factores y sus respectivos parámetros:

- Cantidad de rotaciones por minuto durante la disolución del EPS (0 rpm, 120 rpm)
- Cantidad de rotaciones por minuto durante el proceso de calentamiento (100 rpm)
- Temperatura de proceso (30° C, 140°C)
- Tiempo de proceso de calentamiento (30min, 40min)
- Biosolvente a usar (limoneno, eucaliptol)
- Pureza del biosolvente (60%, 95%)
- Temperatura de secado (50°C, 65°C)

Con esta información establecida se procede a realizar un diseño experimental, teniendo en cuenta el resultado de cada una de las pruebas preliminares con los factores identificados, con el fin de definir los factores y parámetros con los que se desarrollará el diseño experimental que permite el desarrollo del presente objetivo. En la siguiente tabla se condensan las observaciones de los investigadores frente a cada uno de los factores y parámetros evaluados preliminarmente.

Tabla 4. Factores preliminares evaluados (Autoría propia).

Factor	Parámetros	Observaciones
Biosolvente	Aceites esenciales naranja y eucalipto.	* Se experimento con aceites esenciales de clavo, lavanda, naranja y eucalipto. * A pesar de que todas las opciones lograron disolver el EPS, debido a su costo y oferta en el mercado, se optó por escoger los aceites esenciales de naranja y eucalipto como los biosolventes para llevar a cabo esta investigación (ver anexo de costos de aceites esenciales, anexo).
Pureza del biosolvente	De 60% a 95%	* Se experimentó con biosolventes que presentaban purezas de 60% y 95%, sin embargo, no se observó un cambio significativo con respecto a su efectividad en disolver el EPS (teniendo en cuenta su rapidez y cantidades empleadas para su disolución). *Se optó por la pureza del 60% puesto que su costo de adquisición es menor.
Cantidad de rotaciones por minuto durante la disolución del EPS	De 0 rpm a 120 rpm	* A 0 rpm, 8g de EPS tardaban entre 3h y 3,5h en disolverse empleando biosolventes. * A 120 rpm, 8g de EPS tardaban entre 60 min y 75 min en disolverse empleando biosolventes. * Al experimentar con un amplio rango de rotaciones por minuto, el equipo investigador concluyó que, teniendo en cuenta las restricciones de tiempo en la presente investigación, los parámetros sugeridos por los estudios previos no son viables, por lo que se tomó la decisión de usar una batidora de cocina para llevar a cabo esta etapa del proceso.
Cantidad de rotaciones por minuto durante el proceso de calentamiento	100 rpm	* Este parámetro no será considerado significativo puesto que en la práctica se evidencio que la agitación del material durante el proceso de calentamiento genera burbujas que, al solidificarse el material, afectan de forma significativa sus propiedades mecánicas.
Temperatura de proceso	30 °C, 140 °C	* A 30 °C, 24g de la disolución tardaban entre 4h y 5h para compactarse y secarse, adicionalmente el material obtenido no cumplió con las expectativas del grupo investigador. * A 14 0°C, 24g de EPS tardaban entre 20 min y 30 min para compactarse y secarse,

adicionalmente el material obtenido no cumplió con las expectativas del grupo investigador.
*Teniendo en cuenta el comportamiento del material a 140 °C, el grupo experimentó con temperaturas hasta los 190°C con el fin de determinar los parámetros de mayor impacto para este factor.

Tiempo de proceso de calentamiento 30 min, 40 min

* Teniendo en cuenta los parámetros establecidos para el factor de temperatura de proceso, se ajustaron los parámetros para el tiempo de proceso de calentamiento en 20 y 30 min, según las observaciones en las variaciones del material a ciertas temperaturas.

Temperatura de secado De 50°C a 65°C

* Luego de haber definido los factores y sus respectivos parámetros en el desarrollo de experimentos propios, la temperatura de secado se descarta como factor influyente, puesto que el material resultante era capaz de secarse por completo a temperatura ambiente entre 5min y 10 min. Adicionalmente, en un estudio realizado por Kempe, López, Ochoa & Pabón en 2022, dónde se emplearon las temperaturas descritas, el material tardaba alrededor de 15 días en secarse; teniendo en cuenta los parámetros establecidos de tiempo para el desarrollo de este estudio, no se contempló este factor como factible.

Teniendo en cuenta los ensayos preliminares y analizando las observaciones plasmadas en la tabla 4, se establecen los siguientes factores y parámetros como los más adecuados a partir criterios técnicos, prácticos y disponibilidad de recursos con el fin de transformar el EPS en un material con propiedades mecánicas mejoradas que permita ser reintegrado en la industria:

- **Biosolvente:**
 - Aceite esencial de naranja (Contiene un 95% de limoneno).
 - Aceite esencial de Eucalipto (Contiene un 85% de eucaliptol).
- **Temperatura de proceso:**
 - 150°C
 - 180 °C
- **Tiempo de proceso:**
 - 20 min.
 - 30 min.

A partir de las características presentadas en los factores establecidos, se propone implementar un diseño factorial 2^3 , puesto que, Los diseños factoriales son utilizados en experimentos con dos o más variables independientes (también llamados factores), las cuales serán analizadas por el grupo investigador, al ser consideradas variables que afectan al proceso, “En un diseño factorial, cada uno de los niveles de cada factor independiente se combina con cada uno de los niveles de los demás, para así realizar todas las combinaciones posibles. Cada una de las combinaciones se convierte en una condición para el experimento. Esto produce que los experimentos sean más eficientes, dado que se puede proporcionar información de los efectos de todos los factores en relación con los niveles de los otros” (Kuehl, R.O, 2001).

Con el fin de evaluar la interacción de los parámetros y factores escogidos frente a los resultados de las pruebas mecánicas realizadas al material resultante. Este diseño constará de ocho experimentos independientes y dos réplicas por corrida, es decir, dieciséis experimentos en total. Para cada variable de respuesta se produjeron tres probetas para muestreos destructivos.

Para plantear el diseño factorial 2^3 se utilizó el software de análisis estadístico R, en primera instancia se generó el diseño a partir de los factores y parámetros (también llamados niveles) mencionados anteriormente con un factor de aleatoriedad, añadido con el fin de reducir al máximo el error humano que conllevaría desarrollar las pruebas mecánicas en un orden ascendente; En la tabla 5 se presenta el diseño mencionado:

Tabla 5. Diseño factorial 2^3 generado para este estudio.

Name	run.no.in.std.order	run.no	run.no.std.rp	Biosolvente	TiempoDeProceso	TempDeProceso	Blocks
1	7	1	7.1	Limoneno	30	180	.1
2	8	2	8.1	Eucaliptol	30	180	.1
3	4	3	4.1	Eucaliptol	30	150	.1
4	2	4	2.1	Eucaliptol	20	150	.1
5	5	5	5.1	Limoneno	20	180	.1
6	6	6	6.1	Eucaliptol	20	180	.1
7	3	7	3.1	Limoneno	30	150	.1
8	1	8	1.1	Limoneno	20	150	.1
9	7	9	7.2	Limoneno	30	180	.2
10	5	10	5.2	Limoneno	20	180	.2
11	4	11	4.2	Eucaliptol	30	150	.2
12	8	12	8.2	Eucaliptol	30	180	.2
13	2	13	2.2	Eucaliptol	20	150	.2
14	1	14	1.2	Limoneno	20	150	.2
15	6	15	6.2	Eucaliptol	20	180	.2
16	3	16	3.2	Limoneno	30	150	.2

El paso siguiente para el progreso de este objetivo consiste en el desarrollo de cada uno de los experimentos teniendo en cuenta el diseño factorial 2^3 planteado, con el fin de obtener probetas del material, las cuales serán utilizadas para posteriormente analizar sus propiedades mecánicas.

El proceso de diseño definido inicia con la obtención de EPS posconsumo proveniente de embalaje de electrodomésticos, al cual se le realiza una remoción de impurezas notables, como diferentes elementos incrustados o adheridos al material, haciendo uso de bisturí, tijeras o pinzas según la necesidad. Luego, se procede con la trituración del EPS hasta obtener pequeños trozos del material los cuales facilitarán la disolución con el biosolvente. En la ilustración 3 se evidencia el comportamiento del EPS triturado antes y después de entrar en contacto con el biosolvente; por efectos de la escala del experimento, el proceso de triturado se realizó con una licuadora de uso doméstico.

Ilustración 3. EPS triturado antes y después del contacto con el biosolvente.



Haciendo uso de una batidora doméstica y una espátula, se agitó el EPS con el biosolvente hasta que se obtuvo una mezcla uniforme, para acelerar el proceso de disolución entre el soluto y el biosolvente, adicionalmente se utilizó etanol al 70% como catalizador, hasta que el EPS estuvo completamente disuelto. Las proporciones necesarias para la disolución de EPS en biosolvente se establecieron a partir de los ensayos preliminares, estableciendo que 1 g de EPS se puede disolver en 1,5 g de biosolvente; en la ilustración 4 se puede apreciar el proceso descrito.

Ilustración 4. Disolución de EPS con biosolvente.



Posteriormente, se utilizó un molde metálico para calentar la mezcla según los parámetros establecidos. Para el proceso de calentamiento se empleó una plancha disponible en el laboratorio de nanoplasmódica, donde se mantuvo un registro de temperatura y tiempo constantes para cada uno de los experimentos; en la ilustración 5 se evidencia el procedimiento descrito.

Ilustración 5. Proceso de calentamiento del EPS disuelto en el biosolvente.



Luego del proceso de calentamiento de la mezcla, se procede a retirar el molde de la plancha y se deja enfriar entre 10 min y 15 min a temperatura ambiente el con el fin de facilitar el desmolde del material obtenido, posterior a este proceso, se cortaron y pulieron manualmente con una lija N° 100 las probetas con las dimensiones necesarias para realizar las pruebas mecánicas; En la ilustración 6 se evidencia el procedimiento descrito.

Ilustración 6. Material resultante desmoldado, cortado y pulido.



En el Anexo I se encuentra el diagrama de proceso en el cual se ilustra el procedimiento descrito anteriormente.

Para calcular las variables de respuesta correspondientes a las pruebas mecánicas realizadas de flexión, tensión y compresión, se emplearon los tratamientos normalizados por las normas ASTM. Para la medición de las propiedades mecánicas en los tres casos, primero se midieron las dimensiones de cada probeta, luego se introdujeron los datos al software controlador de la máquina Universal WDW-300E y finalmente se llevaron a cabo cada una de las pruebas. Los datos recolectados de las pruebas mencionadas se encuentran en los anexos II, III, IV respectivamente.

Los ensayos realizados se llevaron a cabo bajo las normas ASTM D7264M-07, ASTM D3039, 2008 y ASTM D5628-10, 2010 para las pruebas de flexión, tensión y compresión respectivamente, en la ilustración 7 se puede apreciar gráficamente cada prueba mecánica.

Ilustración 7. Pruebas mecánicas de Tensión, Flexión y Compresión.



Una vez se han desarrollado los dieciséis experimentos planteados y se han organizado los resultados de las pruebas mecánicas realizadas, se procede a utilizar la herramienta de análisis estadístico R en su versión 4.4.2 con el fin de establecer la correlación de los factores y sus respectivos parámetros con los resultados obtenidos; la siguiente tabla muestra el diseño factorial establecido con los respectivos valores de cada una de las pruebas mecánicas realizadas a los experimentos.

Tabla 6. Matriz de variables de respuesta, (Autoría propia).

Biosolvente	Tiempo de Proceso	Temperatura de Proceso	Prueba de flexión (Mpa)	Prueba de tensión (Mpa)	Prueba de compresión (Mpa)
-1	1	1	2,85	23,52	85,27
1	1	1	1,84	22,40	79,37
1	1	-1	2,88	27,04	101,93
1	-1	-1	7,83	49,20	180,77
-1	-1	1	5,74	45,00	175,28

1	-1	1	4,75	40,28	141,58
-1	1	-1	4,13	30,64	116,61
-1	-1	-1	8,20	66,75	298,43
-1	1	1	3,14	23,52	84,51
-1	-1	1	6,24	45,68	174,80
1	1	-1	3,30	26,80	99,81
1	1	1	1,75	21,00	81,10
1	-1	-1	7,36	50,00	179,43
-1	-1	-1	8,23	67,04	296,43
1	-1	1	5,13	41,39	142,39
-1	1	-1	4,00	28,36	114,17

En la tabla se puede observar que los parámetros de los factores fueron reemplazados por notaciones geométricas -1 y 1, este cambio se hizo con el fin de cumplir las reglas de sintaxis establecidas por el software y no representan una alteración para correcta medición en las pruebas de correlación de factores.

Teniendo en cuenta que el modelo estadístico para el diseño de experimentos factoriales 2^3 considera la interacción entre los factores involucrados en el análisis con respecto a los resultados obtenidos, su ecuación se muestra a continuación:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \sigma_k + \alpha\beta_{ij} + \alpha\sigma_{ik} + \beta\sigma_{jk} + \alpha\beta\sigma_{ijk} + \epsilon_{ijk}$$

Donde:

μ es la media general del experimento.

α_i es el efecto debido al i-ésimo nivel del factor A.

β_j es el efecto del j-ésimo nivel del factor B.

σ_k es el efecto del k-ésimo nivel del factor C.

$\alpha\beta_{ij}$ representa el efecto de interacción de la combinación ij.

$\alpha\sigma_{ik}$ representa el efecto de interacción de la combinación ik.

$\beta\sigma_{jk}$ representa el efecto de interacción de la combinación jk.

$\alpha\beta\sigma_{ijk}$ representa el efecto de interacción de la combinación ijk

ϵ_{ijk} representa el error aleatorio que, se supone, sigue una distribución normal con $\mu=0$ y $\sigma^2=$ Constante, además de que son independientes entre sí.

A partir del modelo estadístico se procede a realizar el análisis lineal del modelo en R, con el fin de visualizar el impacto de los factores en las variables de respuesta.

Tabla 7, análisis lineal para la prueba de flexión.

```
Coefficients:
Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) 8.2240 0.1663 49.463 3.09e-11 ***
f_Biosolvente1 -0.6390 0.2351 -2.718 0.02635 *
f_Tiempoproceso1 -4.1340 0.2351 -17.582 1.12e-07 ***
f_tempProceso1 -2.2490 0.2351 -9.565 1.18e-05 ***
f_Biosolvente1:f_Tiempoproceso1 -0.3810 0.3325 -1.146 0.28501
f_Biosolvente1:f_tempProceso1 -0.4460 0.3325 -1.341 0.21667
f_Tiempoproceso1:f_tempProceso1 1.1290 0.3325 3.395 0.00943 **
f_Biosolvente1:f_Tiempoproceso1:f_tempProceso1 0.3260 0.4703 0.693 0.50779
---
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.2351 on 8 degrees of freedom
Multiple R-squared: 0.994, Adjusted R-squared: 0.9887
F-statistic: 188.8 on 7 and 8 DF, p-value: 3.04e-08
```

Tabla 8, análisis lineal para la prueba de tensión.

```
Coefficients:
Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) 66.9800 0.6323 105.934 7.04e-14 ***
f_Biosolvente1 -17.4000 0.8942 -19.459 5.05e-08 ***
f_Tiempoproceso1 -37.5350 0.8942 -41.977 1.14e-10 ***
f_tempProceso1 -21.4950 0.8942 -24.039 9.56e-09 ***
f_Biosolvente1:f_Tiempoproceso1 14.9150 1.2646 11.795 2.44e-06 ***
f_Biosolvente1:f_tempProceso1 12.9300 1.2646 10.225 7.19e-06 ***
f_Tiempoproceso1:f_tempProceso1 15.5700 1.2646 12.313 1.76e-06 ***
f_Biosolvente1:f_Tiempoproceso1:f_tempProceso1 -12.3900 1.7884 -6.928 0.000121 ***
---
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.8942 on 8 degrees of freedom
Multiple R-squared: 0.9981, Adjusted R-squared: 0.9965
F-statistic: 612.3 on 7 and 8 DF, p-value: 2.815e-10
```

Tabla 9, análisis lineal para la prueba de compresión.

```

coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)    297.4555    0.7993  372.13 < 2e-16 ***
f_Biosolvente  -117.3725    1.1304 -103.83 8.27e-14 ***
f_Tiempoproceso -182.0645    1.1304 -161.06 2.47e-15 ***
f_tempProceso  -122.4005    1.1304 -108.28 5.91e-14 ***
f_Biosolvente:f_Tiempoproceso  102.8780    1.5986   64.35 3.78e-12 ***
f_Biosolvente:f_tempProceso    84.2985    1.5986   52.73 1.85e-11 ***
f_Tiempoproceso:f_tempProceso   91.8995    1.5986   57.49 9.31e-12 ***
f_Biosolvente:f_Tiempoproceso:f_tempProceso -74.4790    2.2608  -32.94 7.86e-10 ***
---
signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

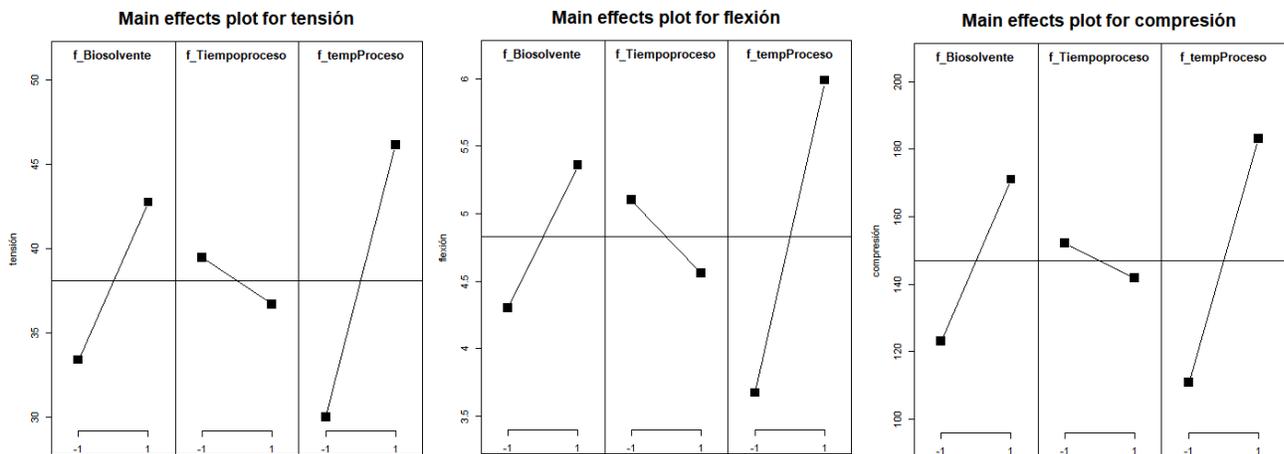
Residual standard error: 1.13 on 8 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.9999, Adjusted R-squared:  0.9997
F-statistic: 8046 on 7 and 8 DF, p-value: 9.541e-15
    
```

Teniendo en cuenta la información obtenida, se puede evidenciar mediante los códigos de significancia (ubicados debajo de cada matriz) en qué medida los factores tienen efectos negativos o positivos sobre las variables de respuesta o si la interacción entre estos factores tiene afección sobre las variables de respuesta evaluadas. En el caso de la prueba mecánica de flexión aplicada a las probetas, se evidencia que los factores de tiempo de proceso y temperatura de proceso son las más significantes, por ende, prima su interacción y por eso es más significativa. Por otra parte, para las variables de respuesta de tensión y compresión los tres factores tienen una amplia interacción la cual influye con las propiedades del material.

En vista que el p-value obtenido a partir de la regresión lineal en los tres casos es menor a 0.05, se comprueban las hipótesis para los efectos de los factores Biosolvente, temperatura de proceso y tiempo de proceso, es decir, en los tres casos de análisis lineal se evidencia que existen factores cuyas interacciones priman respecto a los resultados de las variables de respuesta.

El paso siguiente para continuar con este análisis, corresponde a evaluar de forma individual en qué magnitud afectan los parámetros de cada factor en las variables de respuesta establecidas, para esto se utilizaron las siguientes gráficas de efectos individuales:

Tabla 10, gráfica de efectos individuales.



Como se puede observar, estas gráficas permiten tener mayor claridad con respecto a los efectos individuales realmente significativos en cada variable de respuesta, de forma general se puede afirmar que los tres factores influyen en los valores obtenidos de cada prueba mecánica, sin embargo, en la mayoría de los casos, los factores de la temperatura de proceso y biosolvente presentan una mayor influencia individual en los resultados.

A continuación, se presentan las tablas ANOVA de cada una de las variables de respuesta, con el fin de aportar información relevante y complementaria sobre la significancia de las interacciones entre factores.

Tabla 11, ANOVA1 prueba mecánica de Flexión.

```

              Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
f_Biosolvente  1  3.77    3.77  68.214 3.47e-05 **
f_Tiempoproceso  1 54.13   54.13 978.982 1.18e-09 ***
f_tempProceso  1 13.34   13.34 241.232 2.94e-07 ***
f_Biosolvente:f_Tiempoproceso  1  0.05    0.05  0.860 0.380977
f_Biosolvente:f_tempProceso  1  0.08    0.08  1.449 0.263157
f_Tiempoproceso:f_tempProceso  1  1.67    1.67  30.192 0.000577 ***
f_Biosolvente:f_Tiempoproceso:f_tempProceso  1  0.03    0.03  0.481 0.507791
Residuals      8  0.44    0.06
---
signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
    
```

Tabla 12, ANOVA2 prueba mecánica de tensión.

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
f_Biosolvente	1	172.9	172.9	216.28	4.49e-07 **
f_Tiempoproceso	1	2578.6	2578.6	3225.07	1.03e-11 ***
f_tempProceso	1	427.9	427.9	535.14	1.29e-08 ***
f_Biosolvente:f_Tiempoproceso	1	76.0	76.0	95.10	1.02e-05 ***
f_Biosolvente:f_tempProceso	1	45.4	45.4	56.73	6.72e-05 ***
f_Tiempoproceso:f_tempProceso	1	87.9	87.9	109.92	5.96e-06 ***
f_Biosolvente:f_Tiempoproceso:f_tempProceso	1	38.4	38.4	48.00	0.000121 ***
Residuals	8	6.4	0.8		

 Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Tabla 13, ANOVA3 prueba mecánica de compresión.

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
f_Biosolvente	1	7192	7192	5629	1.11e-12 **
f_Tiempoproceso	1	42680	42680	33400	8.99e-16 ***
f_tempProceso	1	11203	11203	8767	1.89e-13 ***
f_Biosolvente:f_Tiempoproceso	1	4308	4308	3372	8.59e-12 ***
f_Biosolvente:f_tempProceso	1	2215	2215	1733	1.22e-10 ***
f_Tiempoproceso:f_tempProceso	1	2988	2988	2338	3.70e-11 ***
f_Biosolvente:f_Tiempoproceso:f_tempProceso	1	1387	1387	1085	7.86e-10 ***
Residuals	8	10	1		

 Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Teniendo en cuenta la información de las tablas ANOVA, se identifica que para las tres variables de respuesta los factores evaluados y sus interacciones entre el tiempo de proceso y temperatura de proceso son significativos frente a los resultados de las variables de respuesta.

A partir de los resultados obtenidos de cada una de las pruebas mecánicas (ver anexos II, III, IV), se puede observar que la interacción de los parámetros de las probetas ocho y catorce (limoneno a 150° C por 20 min), seguidos de las probetas cuatro y trece (Eucaliptol a 150° C por 20 min) fueron los más significativos frente a las tres variables de respuesta. A partir de esta información se concluye que los parámetros más significativos frente a las variables de respuesta son el tiempo de proceso y la temperatura de proceso para los tres casos.

Finalmente se establece que el método para obtener la probeta con mayor resistencia en las pruebas mecánicas de tensión, compresión y flexión, corresponde al proceso descrito para la elaboración de la probeta 8, el cual consiste en disolver el EPS en limoneno a una temperatura de 150° C por 20 min.

Objetivo 4: Análisis técnico-económico para la escalabilidad del proceso en un rango piloto de la producción del nuevo material.

Con el fin de escalar el proceso de transformación a un rango de producción piloto, se definieron los usos potenciales y el mercado objetivo para el EPS transformado, que según sus propiedades mecánicas, se asemeja a algunos polímeros derivados del polimetilmetacrilato (PMMA según sus siglas en inglés) siendo un material utilizado en los sectores industriales de señalización, utensilios de cocina, artículos de baño, embalaje, decoración y luminotecnía.

En el primer trimestre del año 2020 se identificó la existencia de alrededor de 3.600 empresas dedicadas a la producción de plásticos, industria en la cual se reportó un crecimiento del 22,2% para el año 2021, dentro del cual los productos más demandados fueron los polietilenos con el 39%, los polímeros de polimetilmetacrilato (PMMA) con el 19,5% y el policloruro de vinilo con un 16% (La República, 2021).

El mercado al cual se apunta corresponde al de señalización de riesgo laboral, puesto que este mercado constituye alrededor del 53.79% del uso de PMMA en Colombia (Fuente), Adicionalmente, según la ley 9 de 1979 y la resolución 2400 expedidas por el ministerio de salud, donde especifica que “en todos los establecimientos de trabajo donde se lleven a cabo operaciones y/o procesos que integren aparatos, máquinas, equipos, tuberías, (...), se deberá utilizar la señalización reglamentada bajo los estándares establecidos”, teniendo en cuenta la necesidad de este mercado, se evidencia la oportunidad de ofrecer un material proveniente de desechos posconsumo de EPS transformado a partir de biosolventes, que disminuye el impacto ambiental negativo causado por el EPS y aporte al desarrollo sostenible de la economía en el país.

Actualmente en Colombia se produce cerca de 1.4 millones de toneladas de plástico al año (Rodríguez, 2022), de las cuales un 19% o 266.000 toneladas aproximadamente, corresponde al polimetilmetacrilato, el cual

presenta una amplia gama de aplicaciones, en las cuales destaca la construcción, decoración y medicina. Se optó por enfocar el material hacia los usos referentes a la construcción debido a la alta demanda de polímeros en el sector, ya que son materiales versátiles y pueden ser utilizados con diferentes objetivos, como, por ejemplo: aislar, sellar una superficie, creación de paneles para recubrimiento de zonas comunes (Gres, 2017)

El PMMA en la construcción corresponde al 9% de los polímeros utilizados (Rodríguez, 2022), o 23.940 toneladas, sin embargo, dada la cantidad de empresas competidoras en el mercado de polímeros sólidos se decidió tomar como rango objetivo el 0,1% del mercado descrito para la realización de un estimado de costos. Por lo tanto, el rango de estudio corresponde a 239 Ton de EPS transformado, que, con una densidad aproximada de 0,9kg/L corresponde a 265,600L.

Teniendo en cuenta las proporciones definidas para la producción del nuevo material, 1.5 g de solvente por cada 1g de EPS se definió que la producción a realizar serían 10.000 láminas del EPS transformado con medidas de 10 cm x 30 cm y un espesor de 0.5 cm, posteriormente se realizó un estimado de costos de acuerdo con esto. Con base a los experimentos realizados y descritos en el punto 5 se obtiene la relación entre los insumos y el material producido, el cual, se obtiene al identificar el volumen promedio de las probetas elaboradas y calcular la relación con los insumos utilizados para la elaboración de estas.

Material necesario = Cantidad Producto final * relación del insumo y la solución obtenida.

En donde se presentaría el análisis de unidades para el caso del EPS

$$L \cdot \frac{mm^3}{L} \cdot \frac{g \text{ eps}}{mm^3 \text{ solución}} = g \text{ eps}$$

Y para los aceites esenciales debemos tener en cuenta la densidad de los insumos para hallar la cantidad necesaria en gramos.

$$L \cdot \frac{mm^3}{L} \cdot \frac{ml \text{ aceite}}{mm \text{ solución}} \cdot \frac{g}{ml} = g \text{ aceite}$$

Los cuales son:

$$\text{Densidad EPS} = 30 \frac{g}{L}$$

$$\text{Densidad Limoneno} = 841 \frac{g}{L}$$

Por lo tanto,

Cantidad de EPS necesario en gramos para la producción de 1 lámina = 151.2 g

Cantidad de Limoneno en gramos para la producción de 1 lámina = 226.8 g

Para la producción de las 10.000 láminas de EPS transformado, es necesario tener 1.512 kg de EPS y 2.268 kg de limoneno, teniendo en cuenta estos valores se procedió a realizar la búsqueda de información pertinente para la instauración de una cadena de proceso acorde a la necesidad de transformación del EPS reciclado. En donde se pudo identificar diferentes equipos necesarios para la producción del material a nivel industrial de acuerdo con el rango piloto. Según esto se reconoció la necesidad de contar con los equipos listados a continuación, para una capacidad de producción diaria.

- Hornos
- Moldes (según se desee el producto final)
- Tanques de mezclado.
- Trituradora
- Camión de recolección

Para esto, se realizó una búsqueda de información respecto a los precios buscando un tamaño de entre 1 y 2 metros cuadrados ocupados por cada máquina (hornos, tanques de mezclado y trituradora) mientras que para los tanques de mezclado se buscó una capacidad de mil litros, debido a la baja densidad del EPS y por consiguiente su alto volumen. De esta búsqueda se encontró el valor promedio informado en la tabla 12, cabe aclarar que los valores de “precio promedio de mercado” corresponden al precio promedio de equipos con características similares en cuanto a las capacidades de funcionamiento y de volumen de proceso.

Tabla 14. Promedio de precios de mercado de equipos necesarios. (Elaboración propia)

Equipo	Cantidad necesaria (Uni)	Precio promedio de mercado (\$)	Precio total (\$)
Hornos	1	39.324.624	39.324.624
Moldes:	10	500.000	5.000.000
Tanque de mezclado.	2	7.330.000	14.660.000
Trituradora	1	7.216.633	7.216.633
Camión de recolección	1	101.493.333	101.493.333
Total			167.694.590

Una vez identificados los equipos y la cantidad necesaria de acuerdo con la capacidad de producción estimada se llegó a la decisión de cuáles y cuantos equipos se utilizarán para la creación de la planta de producción de EPS transformado, se tomó como criterio principal el factor económico asociado a la cantidad de máquinas necesarias, es decir, cubrir la demanda estimada con la menor cantidad de equipos y un precio. En la tabla 15 se presenta el listado de equipos que se compraran en el periodo 0, es importante aclarar que el rubro “moldes” se presentan diferentes moldes que van a ser personalizados y por esto puede generar un sobre costo a largo plazo, pero así mismo genera la posibilidad de entrada a diferentes mercados de producto final o como materia prima.

Tabla 15. Listado de equipos escogidos para la creación de una planta de producción de EPS transformado (Elaboración propia).

Equipos	Referencia	Unidades	Precio unitario	Total (\$)
Horno	Horno Cheftop Plus 10GN1 Unox XEVC-1011-EPRM	1	\$ 50.575.000	\$ 50.575.000
Moldes	Opciones personalizadas	1	\$ 500.000	\$ 5.000.000
Tanque de mezclado.	Tanque homogeneizador y mezclador en acero inoxidable	2	\$ 6.000.000	\$ 12.000.000
Trituradora	Licadora industrial acero inoxidable 100 litros	1	\$ 11.340.000	\$ 11.340.000
Camión de recolección	Vehículo usado Foton FKR 3.5	1	\$ 62.500.000	\$ 62.500.000
Total				\$ 141.415.000

Además, se reconoce el consumo energético de los equipos, cuya tarifa depende de la ubicación de la planta y, dado que la mayor parte del reciclaje de la capital de Colombia se ubica al sur de ella y parte de Soacha en donde principalmente se encuentra estratos 1 y 2 (Rocha, 2011) se selecciona como punto para la puesta en marcha al barrio “La María” de Soacha, ya que actualmente ya se encuentran diferentes centros de acopio de material reciclable y esto podría implicar una facilidad de acceso al EPS. Ya identificado un lugar se toman las tarifas asociadas a los servicios industriales en la zona, desde un alquiler de una bodega con media de 80 m2 que ronda \$1.000.000 COP (valor identificado yendo a la zona escogida) hasta el gasto en servicios públicos asociados a los equipos en funcionamiento, además, al ser un barrio de estrato 1, se mantienen las tarifas para el consumo de servicios públicos en donde al cumplir la demanda se genera un gasto energético total mostrado en la tabla 16, de igual forma, en esta tabla vemos los recargos de aseo correspondiente a la recolección de desechos pequeños. Cabe recalcar que en el rubro “gas” se deja en blanco porque el horno es completamente eléctrico y no se va a destinar espacio para una cocina y las tarifas utilizadas para el análisis corresponden a los dados por la empresa prestadora del servicio.

Tabla 16. Descripción de consumo en servicios públicos mensualizado para la producción de 200L de EPS transformado.

Servicio publico	Equipo	Potencia (kW)	Consumo mensual	Tarifa (\$)	Total (\$)	
Electricidad	Horno	18,5	3.552,0	723	2.568.387	
	Trituradora	5,1	988,4	723	714.706	
	Iluminación interna	-	1.000,0	723	723.082	
	Tanque de mezcla	40	3.840,0	723	2.776.634	
	Aseo	-	NA	24.000	24.000	
Acueducto	Baño	-	5,0	Cargo fijo:	2.172	7.248
				Cargo variable:	1.015,24	
Total					6.814.057	

Para la puesta en marcha de la planta se requerirá una inversión en materia prima que como se mencionó anteriormente, el valor de la inversión corresponde a \$392.741.021 COP, es importante reconocer la necesidad que se genera al tener como materia prima al EPS reciclado ya que es un elemento que no es común y tampoco se encuentra un mercado activo actualmente en Colombia, y por tal motivo, la propuesta es emplear recolectores de EPS directamente para que ellos puedan traer una cuota semanal de material, y que de esta forma se asegure la obtención del insumo necesario para cumplir con la demanda proyectada.

Tabla 17. Costo de materias primas para la producción de 1500 láminas de EPS transformado.

Materia prima	Costo por gramo (COP/g)	Cantidad necesaria (g)	Costo Total (COP/lámina)
EPS	0.5	151.2	76
Limoneno	172.80	226.8	39.198

En este punto se han identificado los puntos de gasto económico a nivel capital, pero se requiere la fuerza humana para la correcta ejecución de los procesos, es decir, las personas que estarán manipulando y llevando el control de los procesos dentro de la planta. Se logro identificar la necesidad de tener 3 personas en planta que

estarían encargadas de cada una de las maquinarias, 3 “recolectores” encargados de proveer a la empresa con el EPS, el Auxiliar de bodega y finalmente el administrador. Posteriormente, se definió un monto de pago para los cargos mencionados de acuerdo con el precio de mercado actual generando el gasto recurrente descrito en la tabla 18, en el cual se utiliza el monto promedio ofrecido para los cargos descritos anteriormente, estos salarios promedio fueron identificados gracias a la herramienta “CompuTrabajo” ya que cuenta con una cantidad importante de ofertas similares.

Tabla 18. Descripción de fuerza humana necesaria

Cargo	Monto mensual	Dotación	Prestaciones de ley	Cantidad	Total
Administrador	2.397.950	No	SI	1	2.397.950
Recolectores	1.023.500	SI	SI	3	3.070.500
Trabajadores de planta, auxiliar de producción	1.414.495	SI	SI	3	4.243.485
Auxiliar de bodega	1.000.000	SI	SI	1	1.000.000
				Total	10.711.935

Finalmente se hace la consolidación de todos los costos necesarios para la implementación de la planta, es importante reconocer que este monto de \$551.682.013 COP corresponde al periodo 0, pues contempla la compra de equipos, a la materia prima, mano de obra y servicios públicos consumidos durante el mes. Como se ve en la tabla 19.

Tabla 19. Consolidado de gastos correspondientes a la instauración de la planta de producción de EPS transformado.

Descripción	Monto (\$ COP)
Equipos	141.415.000
Servicios públicos	6.814.057
Mano de obra	10.711.935
Materia prima	392.741.020
Total	551.682.013

Teniendo en cuenta esto, y las pruebas realizadas a los materiales que se habían reconocido como “similares” o posibles candidatos a ser sustituidos, se reconocen diferentes polímeros utilizados principalmente en la industria de la construcción como lo son: polimetilmetacrilato, polipropileno, o poliestireno sin relleno.

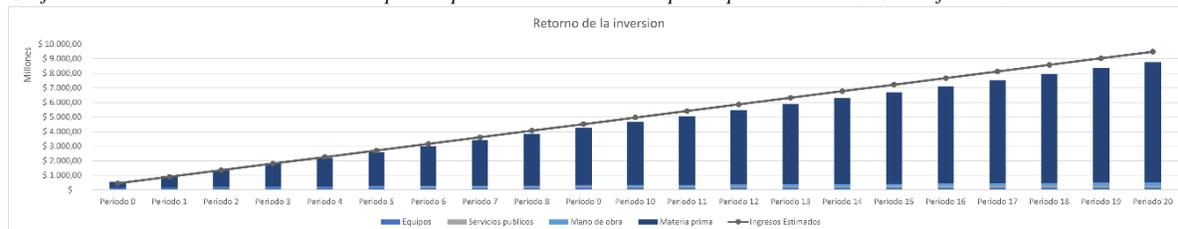
Actualmente en Colombia y en todo el mundo se encuentra un crecimiento en el mercado del plástico y se ofrece al EPS transformado como opción para reducir el impacto de este mercado. Con el correspondiente estudio de precios ofrecidos actualmente por los productos presentes en el mercado se pudo identificar un valor promedio de 0.2 COP por cada milímetro cubico del material. Se llegó a este valor tomando las medidas de 3 láminas ofrecidas en el mercado y dividiendo su volumen en milímetros en el precio de la lámina.

Finalmente, para definir el precio al cual se venderá el EPS transformado se realiza el comparativo de los insumos necesarios para cada pieza y en este se encontró que para la producción de las 10.000 láminas de EPS transformado mensualmente se necesita una inversión de \$392.741.021 COP, además de esto, se espera una rentabilidad del 10%, dado que es un mercado en ascenso y en un principio se mantendrá una relación de ingreso

costo limitado. Por esta razón se llega a un monto aproximado de \$451.293.714 COP mensuales, lo que indicaría un precio unitario de cada lámina de \$45.129 COP.

Con una demanda mensual de las 10.000 láminas de producto se espera un ingreso de \$451.293.714 COP que como se ve en el gráfico 4, generará un retorno de la inversión una vez finalizado el periodo 5 (5° mes), cabe aclarar que, durante el transcurso de este periodo se deben realizar estudios de ventas para poder ajustar estos números según sea necesario.

Grafica 4. Retorno de la inversión estimada para la puesta en marcha de una planta productora de EPS transformado



Objetivo 5: Análisis comparativo entre el EPS transformado y polímeros con propiedades mecánicas similares.

Teniendo en cuenta los resultados recolectados en el diseño de experimentos, la probeta ocho presenta las mejores propiedades mecánicas, por lo tanto, se establece como el material que será utilizado para el análisis comparativo del presente objetivo.

Se propone analizar materiales fabricados a partir de PMMA (Polimetilmetacrilato) como el Polycril Recicled y el Metacrilato Acrilonitrilo Butadieno Estireno (MABS según sus siglas en inglés). Se seleccionan estos materiales puesto que sus propiedades mecánicas son similares a las del EPS transformado producido en el diseño experimental de este estudio.

El Polycril Recicled se obtiene a partir de Polimetilmetacrilato reciclado, el cual tiene un proceso de trituración, destilación y despolimerización con el fin de reintegrar el material a la industria, su aplicación principal se encuentra en los sectores de construcción, señalización, decoración y luminotecnía (IRPEN, 2020).

MABS es un copolímero del PMMA, está compuesto por metacrilato de metilo, acrilonitrilo, butadieno y estireno. Este polímero tiene una amplia aplicación industrial en los sectores de utensilios de cocina, artículos de baño, señalización y embalaje.

Para medir las propiedades de flexión, tensión y compresión, ambos materiales fueron sometidos a los ensayos descritos bajo las mismas condiciones que las probetas fabricadas para el presente estudio y bajo las normas ASTM D7264M-07, ASTM D3039, 2008 y ASTM D5628-10, 2010 respectivamente.

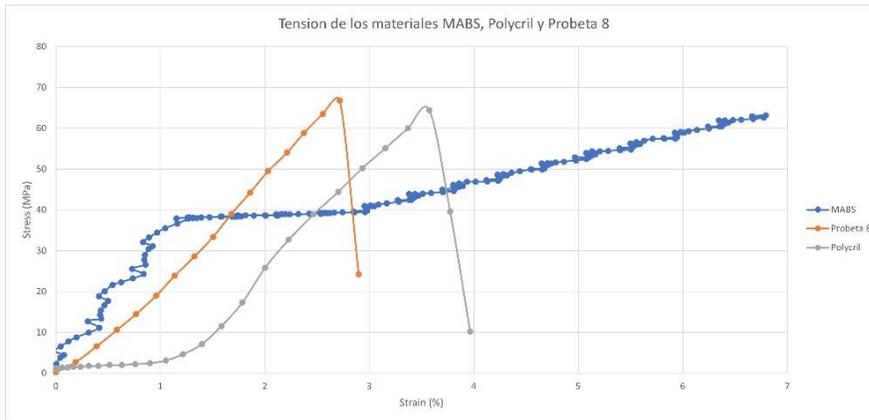
Con el fin de comparar los resultados de las pruebas mecánicas de cada material con las del EPS transformado, se propone una matriz de ponderación con rangos de 3 a 5 siendo 3 el valor más bajo de las propiedades mecánicas y 5 el más alto, los resultados de cada una de las probetas se aprecian a continuación.

Tabla 20, resultados de las pruebas mecánicas de los materiales MABS, Polycril Recicled y EPS transformado (Autoría propia).

Material	Flexión (Mpa)	Tensión (Mpa)	Compresión (Mpa)
MABS	31,00	63,15	153,00
Polycril Recicled	30,67	64,44	304,00
EPS transformado	8,20	66,75	298,43

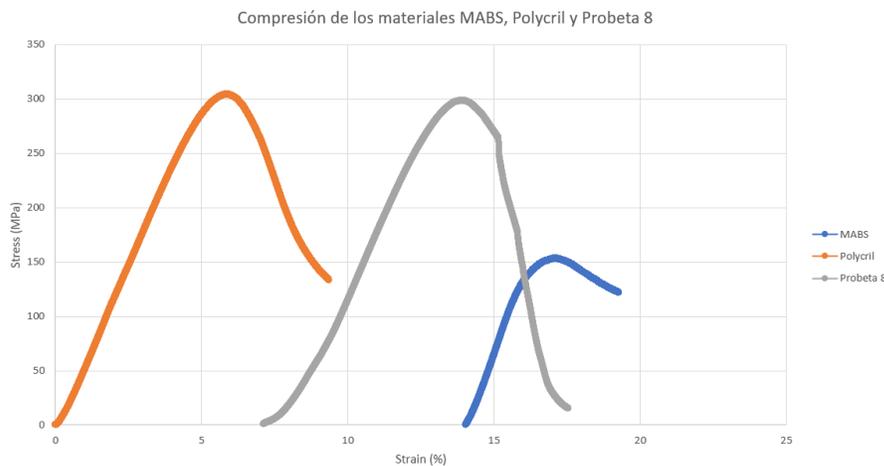
A continuación, se presentan las gráficas de cada una de las pruebas mecánicas realizadas en el laboratorio a los materiales descritos anteriormente.

Grafica 5. Datos de tensión de los materiales Polycril Recicled, MADS y EPS transformado.



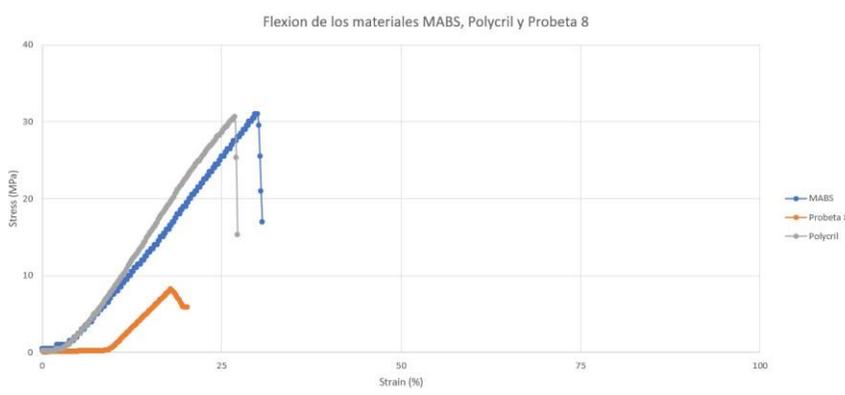
Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el ensayo de tensión aplicado a los materiales propuestos, se puede apreciar la similitud de esfuerzo máximo de tensión que soportan los tres materiales, la probeta 8 logró superar en resistencia por 3,31 Mpa a la tensión al MABS y en 4,60 Mpa a la probeta de Polycril Recicled.

Gráfico 6. Resultados de compresión de los materiales Polycril Recicled, MADS y EPS transformado.



Del mismo modo, en la prueba mecánica de compresión, los datos recolectados presentan similitud para el caso del Polycril Recicled con un valor de 304,00 Mpa y la probeta 8 con un valor de 298.43 Mpa, por otra parte la probeta de MABS presento una capacidad menor sobre el esfuerzo imprimido con un valor de 153,00 Mpa.

Gráfico 7. Resultados de flexión de los materiales Polycril Recicled, MADS y EPS transformado.



En el ensayo de flexión se puede apreciar que de forma contraria a los demás ensayos, las probetas de MABS y Polycril Recicled tienen una mayor resistencia para soportar el esfuerzo imprimido en esta prueba mecánica, con valores de 31,00 Mpa y 30,67 Mpa respectivamente, con respecto al de la probeta 8 con un valor de 8,20 Mpa.

Por último, se procede a realizar la asignación de valores en la matriz de ponderación con el fin de analizar los resultados y posteriormente brindar un análisis de datos.

Tabla 21, matriz de ponderación frente a los resultados recolectados para las pruebas mecánicas de los materiales MABS, Polycril Recicled y EPS transformado (Autoría propia).

Material	Flexión (Mpa)	Tensión (Mpa)	Compresión (Mpa)	Total
MABS	5,00	1,00	1,00	2,33
Polycril Recicled	4,00	4,00	5,00	4,33
EPS transformado	3,00	5,00	4,00	4,00

Teniendo en cuenta los resultados de la matriz, se puede evidenciar que el EPS transformado tiene una puntuación cercana al Polycril Recicled y superior al MABS, a partir de esto se puede validar el mercado meta de señalización de riesgo laboral, planteado en el objetivo anterior y concluir que el EPS transformado tiene las características necesarias para ser reincorporado en un sector industrial y así contribuir al desarrollo sostenible del país y el bienestar del medio ambiente.

5. Componente de Diseño en ingeniería

5.1 Declaración de Diseño:

Este proyecto determinó un proceso de transformación de EPS mediante biosolventes con el fin de obtener un polímero con propiedades mecánicas diferentes a las del EPS posconsumo. Los procesos de transformación aplicados al EPS fueron obtenidos partiendo por la revisión de la literatura mencionada en los antecedentes y así mismo fueron integrados con el diseño y desarrollo de experimentos propios. Finalmente, según las propiedades mecánicas y físicas resultantes del EPS transformado se planteó un análisis técnico económico de mercado en una escala piloto dónde se exploraron los distintos usos y aplicaciones factibles con el fin de reintegrar el EPS transformado a la industria.

5.2 Requerimientos de desempeño:

Con respecto al primer requerimiento planteado en el proyecto de grado: *“teniendo en cuenta las propiedades del nuevo material, analizar sus posibles aplicaciones industriales y determinar mediante indicadores de costos de producción, partiendo de un rango piloto, su factibilidad para ampliar su aplicación en la industria”*, se considera como satisfecho a través del desarrollo del objetivo IV y V de la presente investigación.

Respecto al segundo requerimiento planteado en el proyecto de grado: *“Evaluar el impacto ambiental preliminar que se puede lograr a partir de la reinserción del EPS transformado según los parámetros de producción piloto mencionados y mediante el cumplimiento de los estándares establecidos en la norma ISO 14060”*, se considera como satisfecho, puesto que se cumple con el incentivo de reducir o mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero, en este caso haciendo uso de EPS posconsumo y biosolventes amigables con el medio ambiente para reducir la emisión de gases con efectos invernadero y todos sus efectos adversos planteados en la justificación y planteamiento de esta investigación.

5.3 Restricciones:

A continuación, se enuncian las restricciones planteadas en el proyecto de grado:

El diseño del método para la obtención del material se vio limitado principalmente al carácter económico, puesto que, en el caso de la industria colombiana de producción de biosolventes, no existe un amplio

catálogo de proveedores minoristas lo que produce un elevado costo de este insumo, debido a este factor, en caso de no encontrar un proveedor que se ajuste a las necesidades y parámetros del proyecto se contemplaría la posibilidad de extraer de forma autónoma los biosolventes necesarios para llevar a cabo la producción a escala piloto.

Para el desarrollo de este estudio se encontró un proveedor de biosolventes y a partir de un acuerdo mutuo se logró la adquisición de los aceites esenciales de naranja y eucalipto con un costo moderado por ml de \$216 y \$300 respectivamente, en comparación con el precio promedio del mercado de \$857 por ml de cada solvente.

Otro aspecto para tener en cuenta será la disponibilidad e integridad de los espacios físicos necesarios para llevar a cabo los experimentos, este factor puede limitar el desempeño y avance del diseño en caso de no satisfacer los requerimientos de los procesos productivos planteados.

La disponibilidad de espacios con la que el grupo investigador contó para el desarrollo del presente estudio, satisfizo las necesidades del proyecto.

5.4 Cumplimiento del estándar:

Dada la naturaleza del proyecto y el enfoque establecido, se mantuvo un nivel mínimo frente a la afección que el proceso de transformación de EPS a través de biosolventes pudo generar al medio ambiente y así mismo, se veló por brindar un impacto positivo al entorno. Teniendo en cuenta esta premisa se seleccionó la norma ISO14060 como estándar a trabajar. La norma ISO14060 busca evidenciar la relación entre las normas y la forma en que los diferentes productos tienen un impacto en el medio ambiente independientemente de en qué fase de su ciclo de vida se encuentre.

Teniendo en cuenta la necesidad de conocer las propiedades mecánicas del material después del proceso de transformación, se identificaron las normas ASTM D7264M-07, ASTM D3039, 2008 y ASTM D5628-10, 2010, las cuales fueron cumplidas en el desarrollo experimental del presente estudio, para garantizar la veracidad de los resultados obtenidos en las pruebas mecánicas y los objetivos desarrollados a partir de estos.

6. Conclusiones:

A partir de los entornos altamente consumistas y su creciente demanda de recursos en la actualidad, se evidencia el incremento de producción de los polímeros de un solo uso. Dicho esto, se identifica la necesidad de diseñar un método para la obtención de un polímero transformado a partir del EPS y biosolventes que presente propiedades que permitan modificar su campo de aplicación en la industria.

En primer lugar, se identificaron los procesos de transformación existentes de EPS mediante la revisión de literatura y estado del arte. Definiendo el biosolvente (limoneno y eucalipto) la temperatura (150°C y 180°C) y el tiempo de proceso (20 min y 30 min) como los factores aplicables en la presente investigación. A partir de esto, se implementa el diseño factorial 2^3 el cual consta de ocho experimentos independientes y dos réplicas por corrida, es decir, dieciséis experimentos en total. Para cada prueba se producen tres probetas para muestreos destructivos.

El desarrollo experimental, inicia con la obtención de EPS posconsumo proveniente de embalaje de electrodomésticos, el cual se tritura para facilitar la disolución del biosolvente. Una vez añadido el biosolvente, se agita la mezcla hasta obtener una consistencia uniforme (se usa etanol al 70% como catalizador de la mezcla). Luego, se usa un molde metálico para calentar la mezcla, una vez finalizado este proceso, se deja enfriar a temperatura ambiente para facilitar el desmolde para finalmente cortar y lijar el material obtenido. Para calcular las variables de respuesta correspondientes a las pruebas mecánicas realizadas de flexión, tensión y compresión, se emplearon los tratamientos normalizados por las normas ASTM.

Posteriormente, se aplica el modelo estadístico del diseño de experimentos factoriales 2^3 en lenguaje R y a partir del resultado de las tablas ANOVA, se identifica que, para las tres variables de respuesta, los factores evaluados y sus interacciones entre el tiempo y temperatura de proceso son significativos.

Finalmente, a partir de los resultados obtenidos se realiza el análisis técnico económico a escala piloto y se diseña una matriz de ponderación en la cual se evidencia que el EPS transformado tiene una puntuación cercana al Polycril Recycled y superior al MABS, entonces, se concluye que el EPS transformado tiene las características necesarias para ser reincorporado en un sector industrial y así contribuir al desarrollo sostenible del país y el bienestar del medio ambiente.

Recomendaciones:

En este estudio se diseñó un método para la obtención de un polímero transformado a partir de poliestireno expandido y biosolventes. La probeta 8 (cuyo procedimiento de fabricación se aprecia en el objetivo III) corresponde al experimento con mejores resultados, teniendo en cuenta su resistencia en las pruebas mecánicas de tensión, flexión y compresión, sin embargo, se realizaron siete experimentos adicionales de los cuales se obtuvieron materiales con propiedades mecánicas diferentes, es decir que, estos materiales pueden ser candidatos para reemplazar otros materiales no contemplados en este estudio.

Según la aplicación que se quiera dar al material resultante a partir del método planteado, se recomienda realizar un diseño factorial con más repeticiones, con el fin de tener una mayor exactitud al momento de llevar a cabo las mediciones de las propiedades mecánicas.

Teniendo en cuenta las normas ASTM D7264M-07, ASTM D3039, 2008 y ASTM D5628-10 correspondientes a la medición de las propiedades mecánicas de flexión, tensión y compresión, se recomienda tener en cuenta la relación entre el área transversal y la longitud de las probetas, con el fin de mantener una distorsión mínima en el resultado de cada ensayo mecánico.

Anexos

Anexo	Descripción	Link
Anexo I	Diagrama de proceso industrial	Diagrama proceso.pdf
Anexo II	Resultados de flexión	Resultados de flexión
Anexo III	Resultados de tensión	Resultados de tensión
Anexo IV	Resultados de compresión	Resultados de compresión
Anexo V	Matriz de decisión	Matriz decision.xlsx
Anexo VI	Resultados de tensión de los materiales PMMA	Resultados de tensión PMMA's
Anexo VII	Resultados de flexión de los materiales PMMA	Resultados de flexión PMMA's
Anexo VIII	Resultados de compresión de los materiales PMMA	Resultados de compresión PMMA's
Anexo IX	Costo de biosolventes	Costos de biosolventes.pdf
Anexo X	Costos de producción	Costos de producción

Referencias

- Archdaily (2019). Cómo reciclar el poliestireno expandido (EPS) para convertirlo en pintura. Recuperado de: <https://www.archdaily.co/co/912676/como-reciclar-el-poliestireno-expandido-eps-para-convertirlo-en-pintura> Consultado en: 08-02-2022
- Askeland Fulay, P. (2006) The Science & Engineering of Materials en M.A. Cengage Learning (Ed.), pp (612-646).
- Benavides, A. (2019). Congreso debatirá proyecto de ley para prohibir el uso del Icopor en el país. Recuperado de: <https://www.asuntoslegales.com.co/actualidad/congreso-de-la-republica-debatiraproyecto-de-ley-para-prohibir-el-uso-del-icopor-en-el-territorio-nacional-2890917> Consultado en: 08-02-2022.

- Editorial La República S.A.S. (2021). La industria del plástico creció 22,2% frente a 2020 en el primer semestre. Diario La República. <https://www.larepublica.co/especiales/la-revolucion-del-plastico/la-industria-del-plastico-crecio-22-2-frente-a-2020-en-el-primer-semestre-3233461>
- Martínez. (2017). Por medio del cual se prohíbe la utilización del poliestireno expandido (icopor) en actividades de comercialización de alimentos, se ordena la implementación de un Plan Nacional de Reciclaje del Icopor de uso industrial y se dictan otras disposiciones. Recuperado de: https://www.andi.com.co/uploads/pl%20005-17%20prohibicion%20del%20icopor_636540265379054429.pdf Consultado en: 10-08-2022.
- MADS. (2021). PLAN NACIONAL PARA LA GESTIÓN SOSTENIBLE DE LOS PLÁSTICOS DE UN SOLO USO. Recuperado de: <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/02/plan-nacional-para-la-gestion-sostenible-de-plasticos-un-solo-uso-minambiente.pdf> Consultado en: 10-08-2022.
- Rodríguez & Montilla. (2021). ICOPOR ASESINO SILENCIOSO DE LA VIDA. Recuperado de: <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/19206/Icopor%20asesino%20silencioso%20de%20la%20vida.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Consultado en: 10-08-2022
- Angulo. (2016). Icopor: el útil material que está lleno de problemas. Recuperado de: <https://www.enter.co/cultura-digital/ciencia/icopor-el-util-material-que-esta-lleno-de-problemas/> Consultado en: 10-08-2022.
- Flores. (2016). INICIATIVA CON PROYECTO DE DECRETO POR EL QUE SE REFORMAN LOS ARTÍCULOS 7, 19, 33, 98 y 106 DE LA LEY GENERAL PARA LA PREVENCIÓN Y GESTIÓN INTEGRAL DE LOS RESIDUOS, en materia de reciclaje de unicele. Recuperado de: [http://www.gepsie.com.mx/ArchivosProyecto/111016\(Inic_PVEM_Gerardo_Residuos_Unicel\).pdf](http://www.gepsie.com.mx/ArchivosProyecto/111016(Inic_PVEM_Gerardo_Residuos_Unicel).pdf) Consultado en: 10-08-2022.
- Caamal, J. (2018). OBTENCIÓN DE UN LÁTEX A BASE DE POLIESTIRENO EXPANDIDO / ACRILATOS EVALUADO EN UN PAPEL KRAFT-. Recuperado de: <http://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1003/1191>
- Cerón Mosquera, A. R., & Villada Castillo, H. S. (2019). Introducción a la química de los polímeros. En GUTIERREZ VALENCIA, T. M. (Eds.). Polímeros : generalidades y tendencias de investigación en Colombia. Universidad del Cauca. Recuperado de: <https://search.ebscohost.com.ezproxy.javeriana.edu.co/login.aspxdirect=true&AuthType=ip&db=nlbk&AN=2254375&lang=es &site=eds-live>
- Changyun Shin, & George G. Chase. (2005). Nanofibers from recycle waste expanded polystyrene using natural solvent. *Polymer Bulletin*, 55(3), 209–215.
- Connor, N. (2019). Qué es el poliestireno expandido EPS. Recuperado de: <https://www.thermalengineering.org/es/que-es-el-poliestireno-expandido-eps-definicion/> Consultado en: 15-02-2022
- CONPES. (2016). Política Nacional Para La Gestión Integral De Residuos Sólidos. Colombia. Recuperado de: <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%20C3%B3micos/3874.pdf>
- Cowie, J., & Arrighi, V. (2008). *Polymers: Chemistry and Physics of Modern Materials* (3 ed.). Boca Raton, Florida, USA: Taylor & Francis Group.
- Ecoembres. (2022) Envases y embalajes de poliestireno expandido. Recuperado de: <https://www.amarilloverdeyazul.com/envases-y-embalajes-de-poliestireno-expandido-poliespan-ocorcho-blanco/> Consultado en: 15-02-2022
- Excell, C. (2021). 4 formas de reducir la contaminación por plásticos. México. Recuperado de: <https://wrimexico.org/bloga/4-formas-de-reducir-la-contaminación-por-plásticos> Consultado en: 18-02-2022
- García, M. T., Gracia, I., Duque, G., Lucas, A. de, & Rodríguez, J. F. (2009). Study of the solubility and stability of polystyrene wastes in a dissolution recycling process. *Waste Management (New York, N.Y.)*, 29(6), 1814–1818. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.01.001>
- García, N. (2019). Evaluación del impacto ambiental de la aplicación de un plan de gestión posconsumo de Poliestireno Expandido (EPS) utilizado en el envase de alimentos en Colombia [Tesis de maestría, Universidad EAN]. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10882/9794>.
- Gómez Rodríguez, C. A. (2014). Icopor o unicele le ponen el cáncer a tu comida. Material de uso diario que nos mata poco a poco. Recuperado de <https://masd.unbosque.edu.co/article/view/122>
- González, M. (2020). Propiedades físicas y químicas de polímeros. Recuperado de: https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/9641/CC_32_art_3.pdf;sequence=1 13

- Gupta, A., Jeyakumar, E., & Lawrence, R. (2021). Journey of Limonene as an Antimicrobial Agent. *Journal of Pure & Applied Microbiology*, 15(3), 1094–1110. Recuperado de: <https://doi.org.ezproxy.javeriana.edu.co/10.22207/JPAM.15.3.01>
- Hearon, K. (1), Nash, L. D. (1), Rodriguez, J. N. (1), Maitland, D. J. (1), Lonnecker, A. T. (2), Raymond, J. E. (2), Wooley, K. L. (2), & Wilson, T. S. (3). (2014). A high-performance recycling solution for polystyrene achieved by the synthesis of renewable poly(thioether) networks derived from d - limonene. *Advanced Materials*, 26(10), 1552-1558–1558. <https://doi.org/10.1002/adma.201304370>
- Kan, Abdulkadir, & Demiborga, Ramazan (2009). A new technique of processing for waste-expanded polystyrene foams as aggregates. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.07.017>
- Knauf Industries (2022). Perlas de poliestireno: usos y opciones para empresas. Recuperado de: <https://knauf-industries.es/perlas-poliestireno-usos-> Consultado en: 12-03-2022
- La República (2020) Desde reciclarlo hasta prohibirlo, conozca las iniciativas para reducir el uso de icopor. Recuperado de: <https://www.larepublica.co/responsabilidad-social/desde-reciclarlo-hasta-prohibirloconozca-las-iniciativas-para-reducir-el-uso-de-icopor-2970160> Consultado en: 18-02-2022
- Noguchi, T., Miyashita, M., Lmagaki, Y., & Watanabe, H. (1998). A new recycling system for expanded polystyrene using a natural solvent. Part 1. A new recycling technique. *Packaging Technology and Science*, 11(1), 19-27–27. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1522\(199802\)11:1<19::AID-PTS414>3.0.CO;2-5](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1522(199802)11:1<19::AID-PTS414>3.0.CO;2-5)
- ONU Medio Ambiente (2018). PLÁSTICOS DE UN SOLO USO: Una hoja de ruta para la sostenibilidad (Rev. ed., págs. vi; 6). Recuperado de: https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/25496/singleUsePlastic_SP.pdf?isAllowed=y&sequence=2
- ONU. (2018). Obtenido de https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/25496/singleUsePlastic_SP.pdf?isAllowed=y&sequence=2
- Palma, M., Briceño, L., Idrovo, A. & Varona, M. (2015). Evaluación de la exposición a solventes orgánicos en pintores de carros de la ciudad de Bogotá. Recuperado de: <https://revistabiomedica.org/index.php/biomedica/article/view/2268>
- Palma, M., Briceño, L., Idrovo, A., & Varona, M. (10 de 08 de 2015). *Biomédica*. Obtenido de Revista del Instituto Nacional de Salud: <https://revistabiomedica.org/index.php/biomedica/article/view/2268>
- Poletto, Matheus & Dettenborn, Juliane & Zeni, Mara & Zattera, Ademir. (2011). Characterization of composites based on expanded polystyrene wastes and wood flour. *Waste management (New York, N.Y.)*. 31. 779-84. [10.1016/j.wasman.2010.10.027](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.10.027). Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/49697212_Characterization_of_composites_based_on_expanded_polystyrene_wastes_and_wood_flour
- Polímeros, T. E. (2018, 14 octubre). Polaridad. WordPress.com. Recuperado de: <https://todoenpolimeros.com/2019/02/18/polaridad/> Consultado en: 02-04-2022
- R. O. Kuehl. “Diseño de experimentos: Principios estadísticos para el diseño y análisis de investigaciones”. 2ª Ed. Thomson Learning. México. 2001.
- Rosas, L. (2009). tipos de reciclaje. Recuperado de: <https://tiposdereciclaje.com/2009/12/recicladomecanico.html> Consultado en: 10-03-2022
- Tecnología de los Plásticos (2011). Fibra de vidrio. Recuperado de: <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/12/fibra-de-vidrio.html> Consultado en: 15-05-2022
- Universidad Católica Argentina (2008). El PVC (Policloruro de Vinilo). Recuperado de: <https://estudioyensayo.files.wordpress.com/2008/11/pvc.pdf> Consultado en: 15-05-2022
- Zhao, Y.-B., Lv, X.-D., & Ni, H.-G. (2018). Solvent-based separation and recycling of waste plastics: A review. *Chemosphere*, 209, 707–720. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.06.095>
- ¿Qué es el plástico pmma? (2022). Recuperado de: <https://www.rotolia.com/blog/que-es-el-plastico-pmma/> Consultado en: 10-11-2022
- IRPEN. (2020). Polycril Recycled, Recuperado de: <https://irpen.wordpress.com/2020/11/30/polycril-recycled/> Consultado en 10-11-2022
- Rodriguez, Diana (2022). Portafolio. Recuperado de: <https://www.portafolio.co/economia/colombia-produce-1-4-millones-de-toneladas-de-plastico-al-ano-566367>

- JOP AVISOS (2021) Los materiales para la dotacion de tu empresa. Recuperado de: <https://jopavisos.com/materiales-para-senalizacion/>
- Grees (2017) Usos del metacrilato. Recuperado de: <https://www.faberplast.net/blog/usos-del-metacrilato/>
<https://serveiestacio.com/blog/conoce-las-aplicaciones-y-usos-del-metacrilato/>
- Enel (Noviembre, 2022) Tarifas de energia electrica. Recuperado de: <https://www.enel.com.co/content/dam/enel-co/esp%C3%B1ol/personas/1-17-1/2022/tarifario-noviembre-2022.pdf>
- Rocha, G. Cubillos, R. (2011) Caracterizacion de la actividad del reciclaje en bogotá. Recuperado de: <https://www.habitatbogota.gov.co/sites/default/files/archivos-adjuntos/CARACTERIZACION DE LA ACTIVIDAD DEL RECICLAJE EN BOGOTA%20%281%29.pdf>
- ISO (2018) ISO 14067:2018 (es) Gases de efecto invernadero – Huella de carbono de productos – Requisitos y directrices para cuantificacion. Recuperado de: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14067:ed-1:v1:es>
- ICONTEC (2015) SISTEMAS DE GESTION AMBIENTAL. REQUISITOS CON ORIENTACION PARA SU USO. Recuperado de: https://informacion.unad.edu.co/images/control_interno/NTC_ISO_14001_2015.pdf
- Barrera, R. LAS PROPIEDADES OPTICAS DE LOS MATERIALES. Recuperado de: <https://www.fisica.unam.mx/personales/rbarrera/pdf/pub/pre/propiedades-opticas.pdf>
- Rotolia (2022) ¿QUÉ ES EL PLÁSTICO PMMA?. Recuperado de: <https://www.rotolia.com/blog/que-es-el-plastico-pmma/>
- Mexplimeros. PMMA Polimetacrilato de metilo. Recuperado de: <https://www.mexpolimeros.com/etp/pmma.html>
- Mexpolimeros. MABS metacrilato-butilacrilato-estiren. Recuperado de: <https://www.mexpolimeros.com/etp/mabs.html>
- Pardo Mendoza, I. D., & León Pulido, J. (2021). Efecto de la concentración y temperatura en la disolución de poliestireno expandido usando solventes naturales. Recuperado de: <https://revistas.unilibre.edu.co/index.php/avances/article/view/7420/7086>