

**“OPTIMIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE
POLÍMEROS COMPUESTOS RECICLADOS”**

**CARRERA: ESPECIALIZACIÓN EN RADIOQUÍMICA Y
APLICACIONES NUCLEARES**

Alumno: Natalia Aizpeolea

Director: Esp. María Celeste Cingolani

Resumen

La acumulación de residuos plásticos constituye un problema ambiental global. En respuesta a esto, surge la iniciativa NUTEC Plastics por parte del Organismo Internacional de Energía Atómica, donde se promueve la aplicación de las radiaciones ionizantes dentro del proceso de recuperación y/o transformación de materiales poliméricos reciclados (1). El presente trabajo se enmarca dentro de dicha iniciativa, proponiendo la caracterización de las propiedades mecánicas de un material compuesto de polímeros reciclados, el cual es tratado con radiación ionizante. El potencial uso de dicho compuesto, es como material estructural, que sería de utilidad en el desarrollo de durmientes sintéticos para uso ferroviario.

El objetivo es analizar la influencia de la adición de polipropileno de alta densidad irradiado (HDPEi) y de la adición de caucho, en las propiedades mecánicas de un polímero compuesto.

Las muestras de HDPE fueron irradiadas a temperatura ambiente en un equipo auto blindado Gamma Cell con fuente de Co-60. Las mezclas de cada muestra se procesaron utilizando un extrusora de doble tornillo (Cowell). Las imágenes se obtuvieron con un microscopio electrónico de barrido (SEM). El módulo de Young y la resistencia a la flexión se realizaron según la norma ASTM D790 en una máquina de testeo universal (INSTRON modelo 3366). Para el ensayo de impacto se utilizó un péndulo de 2,7J (Pendulum Impact Tester CSI-137). De acuerdo a la norma ASTM D256. El análisis estadístico se realizó a través de ANOVA simple y se aplicó posteriormente el test de Fisher, por medio del software estadístico "R".

Con el SEM se vio una creciente uniformidad de las interfaces a mayor agregado de caucho. En contraste, la resistencia a la flexión y el módulo elástico, disminuyeron con este, aunque este descenso fue menor en las muestras irradiadas. En contraparte, la resistencia al impacto aumentó significativamente con la adición de caucho, alcanzando su mayor valor con el agregado de un 10%. Concluyendo que dentro de las muestras estudiadas el agregado de un 10% de caucho un aumento considerable de la resistencia al impacto sin comprometer las propiedades mecánicas en gran medida.

Abreviaturas

PP: Polipropileno

PE: Polietileno

HDPE: Polietileno de alta densidad

HDPEi: Polietileno de alta densidad irradiado

LDPE: Polietileno de baja densidad

LLDPE: Polietileno lineal de baja densidad

UHMWPE: Polietileno de ultra alta densidad

EPDM: Caucho etileno-propileno-dieno

PET: Polietileno tereftalato

PVC: Policloruro de vinilo

OIEA: Organismo Internacional de Energía Atómica

CNEA: Comisión Nacional de Energía Atómica

C 0%: Control sin agregado de caucho

C 5%: Control con agregado de 5% de caucho

C 10%: Control con agregado de 10% de caucho)

C 15%: Control con agregado de 15% de caucho

M 0%: Muestra sin agregado de caucho

M 5%: Muestra con agregado de 5% de caucho

M 10%: Muestra con agregado de 10% de caucho

M 15%: Muestra con agregado de 15% de caucho

Agradecimientos

Gracias...

A mis padres, por su incondicional apoyo y comprensión a lo largo de este camino.

A mi hermano, por estar siempre a mi lado y brindarme su aliento inquebrantable.

Al Tío Luis, la Tía Bety y Romina, cuya amabilidad hizo posible que pudiera aprovechar esta oportunidad. Les debo todo mi agradecimiento por su cariño y compañía.

A Celeste, Verónica y Brian, por su dedicación, paciencia y por compartir conmigo sus valiosos conocimientos.

Al equipo de investigación y a todas las personas que, de una u otra manera, contribuyeron a la realización de este trabajo.

A mis compañeros, a quienes tuve la suerte de conocer, por su amistad, compañía y por los recuerdos imborrables que llevaré siempre conmigo. Sin ustedes, este viaje no habría sido el mismo.

A los profesores, que a lo largo del año dieron lo mejor de sí para transmitirnos su saber y guiarnos en nuestro aprendizaje.

Al Instituto Dan Beninson y a la CNEA, por brindarnos, a mis compañeros y a mí, no solo la oportunidad de formarnos, sino también un espacio donde crecer y aprender.

Y a todas las personas que, de alguna manera, me acompañaron en este camino. Cada pequeño gesto y cada palabra de aliento fueron un pilar en los momentos difíciles y me ayudaron a llegar hasta este día.

Índice

Resumen	1
Abreviaturas	2
Agradecimientos	3
Formulación Del Problema	7
Introducción	9
Uso de plásticos	9
Polución y residuos plásticos	11
Proceso de reciclado	13
Economía circular	17
Durmientes reciclados	19
Polímeros	20
Polímeros e irradiación	20
Polipropileno	24
Polietileno	25
Carbonato de calcio	26
Objetivos	28
Materiales y métodos	29
Materiales	29
Métodos	29
Irradiación del HDPE	29
Preparación de la muestra	30
Microscopía	32
Propiedades de Tensión	33
Análisis estadístico	34
Resultados y Discusión	35
Microscopía	35
Propiedades de Tensión	37
Ensayo de impacto	44
Conclusiones	48
Bibliografía	49

Índice de figuras y gráficas

Figura 1. Producción Plástica Global	11
Figura 2. Contaminación en los océanos	12
Figura 3. Representación esquemática del proceso de reciclado mecánico	14
Figura 4. Separación de plásticos por medio de diferentes técnicas separación	15
Figura 5. Flujograma de la economía circular de los plásticos	18
Figura 6. Efecto de irradiación de alta energía (gamma) en polímeros	21
Figura 7. Reciclado mediante radiación	23
Figura 8. Equipo Autoblindado Gamma Cell. Fuente Propia	30
Figura 9. Extrusora de doble tornillo marca Cowell	31
Figura 10. Maquina de testeo universal Instron 3366	33
Figura 11. Formato de probeta de ensayo de impacto	34
Figura 12. Posible mecanismo de la compatibilización en la mezcla PP/HDPE producto de Irradiación gamma	44
Gráfica 1. Composición de las muestras	32
Gráfica 2. Resistencia a la flexión en muestras sin material irradiado	37
Gráfica 3. Resistencia a la flexión en muestras con material irradiado	38
Gráfica 4. Módulo de elasticidad en muestras no irradiadas	40
Gráfica 5. Módulo de elasticidad en muestras irradiadas	41
Gráfica 6. Variación del módulo de elasticidad con la adición de HDPEi	42
Gráfica 7. Resistencia al impacto en muestras irradiadas	45
Gráfica 8. Parámetros estudiados en muestras irradiadas expresados porcentualmente	47

Índice de tablas

Tabla 1. Principales plásticos usados en la industria	10
Tabla 2. Composición porcentual de las muestras preparadas en base a polímeros reciclado	31
Tabla 3. Perfil de temperatura de la extrusora	32
Tabla 4. Resultados de Resistencia a la Flexión de las muestras sin agregado de 5% HDPEi	38
Tabla 5. Resultados de Resistencia a la Flexión de las muestras con agregado de 5% HDPEi	39
Tabla 6. Resultados del módulo de elasticidad de las muestras sin agregado de 5% HDPEi	40
Tabla 7. Resultados de Módulo de Elasticidad de las muestras con agregado de 5% HDPEi	41
Tabla 8. Resultados del ensayo de impacto de las muestras con agregado de 5% HDPEi	45

Formulación Del Problema

El plástico se originó en el siglo XIX como resultado de la búsqueda de materiales alternativos a recursos naturales escasos, como lo eran en la época el marfil y la goma natural. Desde su descubrimiento en el año 1869 hasta la actualidad, el plástico sintético ha sido un material que ha revolucionado el mundo, de forma tal que la vida moderna nos resulta inconcebible sin su uso. Algunas de las grandes ventajas tecnológicas que presenta el plástico, es su versatilidad, variedad y accesibilidad, que, al combinarse con un bajo costo, permitió su aplicación a diferentes grados en multiplicidad de industrias como son la alimentaria, la automotriz, la médica, entre otras (2).

Sin embargo, esta revolución del plástico no está exenta de consecuencias, estando entre la más relevantes el tratamiento posterior a la vida útil.

Actualmente se estima que, del total de los residuos sólidos generados en el mundo, un 40% son plásticos. Se calcula que, en las últimas dos décadas, se ha duplicado la producción de estos residuos, pasando de generar 180 millones de toneladas en el año 2000 a unos 350 millones de toneladas en el año 2019. Lo que demuestra, la urgencia que representa encontrar formas alternativas de dar soluciones que eviten la acumulación y el desperdicio de los recursos (3).

Para enfrentar desafíos de este calibre, se requiere de acciones múltiples y conjuntas entre naciones, que impliquen a todos los participantes en la cadena de producción y consumo de los plásticos.

Por su parte, desde el Organismo Internacional de Energía Atómica, se impulsa el proyecto NUTEC Plastics, como una iniciativa que busca colaborar mediante los diferentes aportes que pueden brindar la tecnología nuclear. Estos se dividen en dos grandes ramas, una de ellas, asociada a la medición de microplásticos por medio de técnicas de detección nuclear; la otra, se basa en la contribución tecnológica de la irradiación de polímeros para la mejora de la calidad estructural con su consecuente adición de valor agregado (1).

Es dentro del marco de este proyecto, donde surge la propuesta de la incorporación de polímeros irradiados en la fabricación de durmientes ferroviarios elaborados con polímeros reciclados.

Introducción

Uso de plásticos

El uso de plásticos ha mostrado una tendencia global en aumento en los últimos tiempos (3). Algunas de las causas que lo explican, se asocian a los cambios en los modos de consumo, el crecimiento de la poblacional mundial y el incremento de los ingresos per cápita en los países emergentes.

En el caso específico de las fibras de polímeros sintéticos, su producción ha crecido a un ritmo tal, que ha superado el crecimiento de materias primas convencionales como el acero, el aluminio o hasta el cemento (3).

Durante la pandemia, haciendo énfasis en el año 2020, los usos de los plásticos se modificaron. En particular, se produjo un aumento drástico en la demanda equipo de protección personal, mayoritariamente de naturaleza descartable. En adición, se produjo cambios en los patrones de consumo, como pueden ser el retiro de los alimentos en reemplazo de la consumición en los locales y el aumento del uso de los plásticos de un solo uso. Cuestiones que durante ese mismo año no se evidenciaron por la disminución de consumo producto de la recesión económica. Provocando que las consecuencias se comenzaron a evidenciar con mayor claridad desde el año 2021 (3).

Los plásticos más utilizados son los denominados vírgenes, los cuales se han fabricado por medio de materias primas nuevas, y cuyo origen suele ser derivado del petróleo. Adicionalmente, su producción desde cero consume grandes cantidades de energía, siendo su refinamiento, el paso que produce gran parte de los gases de efecto invernadero.

Existen otros orígenes de plásticos que representan alternativas minoritarias como los bioplásticos que son derivados de la biomasa. Ambos casos antes descriptos, entran en la categoría de plásticos primarios; en cambio, cuando se utiliza materias primas a base de polímeros ya formados se consideran secundarios, los cuales en el año 2019 representaban solamente el 6% del total de plásticos (4).

Los polímeros sintéticos abarcan múltiples clases, las cuales se agrupan según sus características. La diversidad entre ellos les confiere una notable adaptabilidad. En la Tabla 1 se resumen algunas de sus propiedades, así como sus usos más comunes.

Tabla 1. Principales plásticos usados en la industria

Tipo de plástico	Nombre completo	Propiedades principales	Usos comunes
PET	Tereftalato de polietileno	Transparente, resistente, reciclable, ligero, barrera contra gases.	Botellas, envases de alimentos, fibras textiles (poliéster).
LDPE	Polietileno de baja densidad	Flexible, resistente a la humedad, ligero, no tóxico.	Bolsas de plástico, films agrícolas, envases flexibles, botellas exprimibles.
HDPE	Polietileno de alta densidad	Resistente a impactos, rígido, buena barrera química, reciclable.	Bidones, envases de detergentes, tuberías, juguetes.
PVC	Policloruro de vinilo	Resistente, duradero, versátil, aislante eléctrico.	Tuberías, ventanas, revestimientos de paredes, tarjetas de crédito, bolsas de sangre.
PP	Polipropileno	Ligero, resistente al calor, rígido, resistente a productos químicos.	Envases de alimentos, utensilios de cocina, piezas automotrices.
PS	Poliestireno	Rígido, aislante térmico, ligero (en forma de espuma).	Vasos desechables, bandejas de alimentos, aislamiento térmico, juguetes.
ABS	Acrilonitrilo butadieno estireno	Resistente a impactos, rígido, fácil de moldear, buen acabado superficial.	Carcasas de electrodomésticos, piezas de automóviles, juguetes.
PC	Polycarbonato	Transparente, resistente a impactos, buen aislante eléctrico, resistente al calor.	Lentes, discos compactos, equipos médicos, carcasas electrónicas.
PU	Poliuretano	Flexible o rígido, excelente aislante térmico, resistente al desgaste.	Espumas para colchones, aislamiento, ruedas de patines, adhesivos.
PMMA	Polimetilmetacrilato	Transparente, resistente a impactos y a la intemperie, ligero.	Vidrios acrílicos, señalización, carcasas de lámparas, pantallas electrónicas.
PA (Nailon)	Poliamida	Alta resistencia mecánica, flexible, resistente al desgaste y a productos químicos.	Ropa, engranajes, cuerdas, cepillos, piezas técnicas.
EVA	Etileno acetato de vinilo	Flexible, ligero, resistente al agua, buen aislamiento térmico.	Plantillas de calzado, juguetes, alfombras, empaques acolchados.

Tabla modificada (5)

Polución y residuos plásticos

Se estima que en el año 1950 se produjeron 2 millones de toneladas de residuos plásticos y que en la actualidad 450 millones de toneladas de plásticos son desechados anualmente, cifra que sigue una tendencia creciente con el tiempo (6).

El aporte del plástico en la vida diaria es innegable, ya que forma parte de la construcción, del uso doméstico, de los usos médicos y de la industria alimenticia (5).

La cuestión es que la velocidad de producción de estos residuos está lejos de equipararse con la velocidad de tratamiento de los mismos, lo que deriva en un mal manejo de los desechos, que se agrava en los países con escasez de recursos, donde los plásticos en desuso ni llegan a ser reciclados, ni tampoco se los lleva a un depósito final o siquiera se los incineran, con los riesgos ambientales y para la salud humana que esta última estrategia conlleva (3).

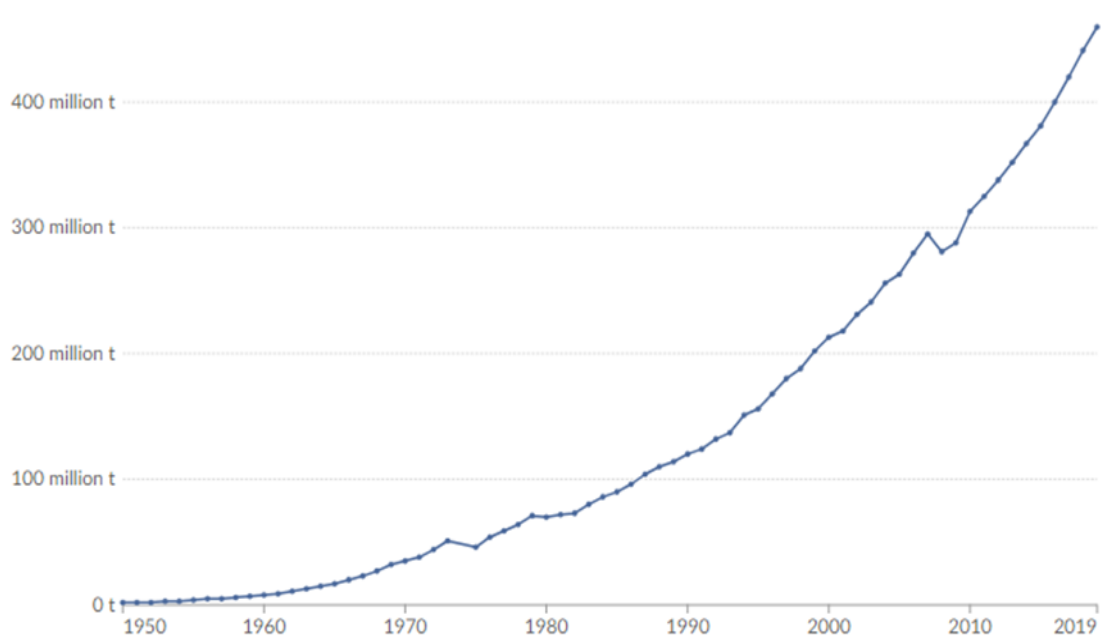


Figura 1. Producción Plástica Global (3).

Los residuos plásticos mal manejados terminan por convertirse en polución ambiental, y en estas últimas décadas se ha comenzado a redimensionar el daño ambiental que generan los plásticos en ecosistemas como el marino, y como esta contaminación puede dañar además la salud humana (7).

Y es así como los residuos terminan en vertederos no regulados o basureros a cielo abierto, donde terminan alcanzando por medio de ríos, aguas subterráneas o por la acción de vientos y mareas a los lechos marinos. Donde pueden producir o complicaciones como afectaciones a los medios de transporte marítimos, reducción de la pesca, obstrucción de represas por acumulación y sistemas de drenaje de las ciudades además de afectar el turismo de la zona (8).



Figura 2. Contaminación en los océanos (11).

Los países de latinoamericanos son especialmente afectados por la polución de plástico, como resultado de una combinación de factores, donde se combina la

falta de organismos de control y de infraestructura adecuada para el tratamiento de residuos, a la par de sistemas ineficientes de recolección de basura. Todo esto adicionado a la alta dependencia del turismo y a los casi 40 millones de personas que carecen de los más básicos servicios de recolección, con la ausencia de políticas públicas y de concientización sobre el tema, lo que provoca que los países más vulnerables sean a su vez los que más se expongan a las consecuencias de la polución (10).

Cabe también aclarar que los países asiáticos, principalmente Filipinas, son los que mayor aporte hacen a la polución por plásticos, esto ocurre por la alta dependencia al uso de plásticos de un solo uso, a la falta de normativa que lo regule y la combinación de las presiones de corporaciones multinacionales que tienen sedes en este país, asociándose a su vez su geografía y densidad poblacional, lo que terminan por convertirlo en el país con mayor aporte a los residuos plásticos que contaminan los lechos marítimos (11,12).

Proceso de reciclado

El proceso de reciclado mecánico es el más utilizado a la hora de tratar los residuos plásticos. Dicho proceso cuenta cinco pasos, los que son recolección, separación, limpieza, molienda y reprocesamiento (12)

El método manual de separación, consiste en la identificación por forma y color del plástico por inspección visual, dicha técnica es práctica para plásticos grandes y de sencilla clasificación. Siendo el método más económico, y que requiere de mayor número de recursos humanos, por lo que se lo considera ineficiente y está sujeto a un porcentaje considerable de errores. También existen métodos físicos de separación, basados en la densidad específica o en la constante dieléctrica, pero no siempre son aplicables (12).

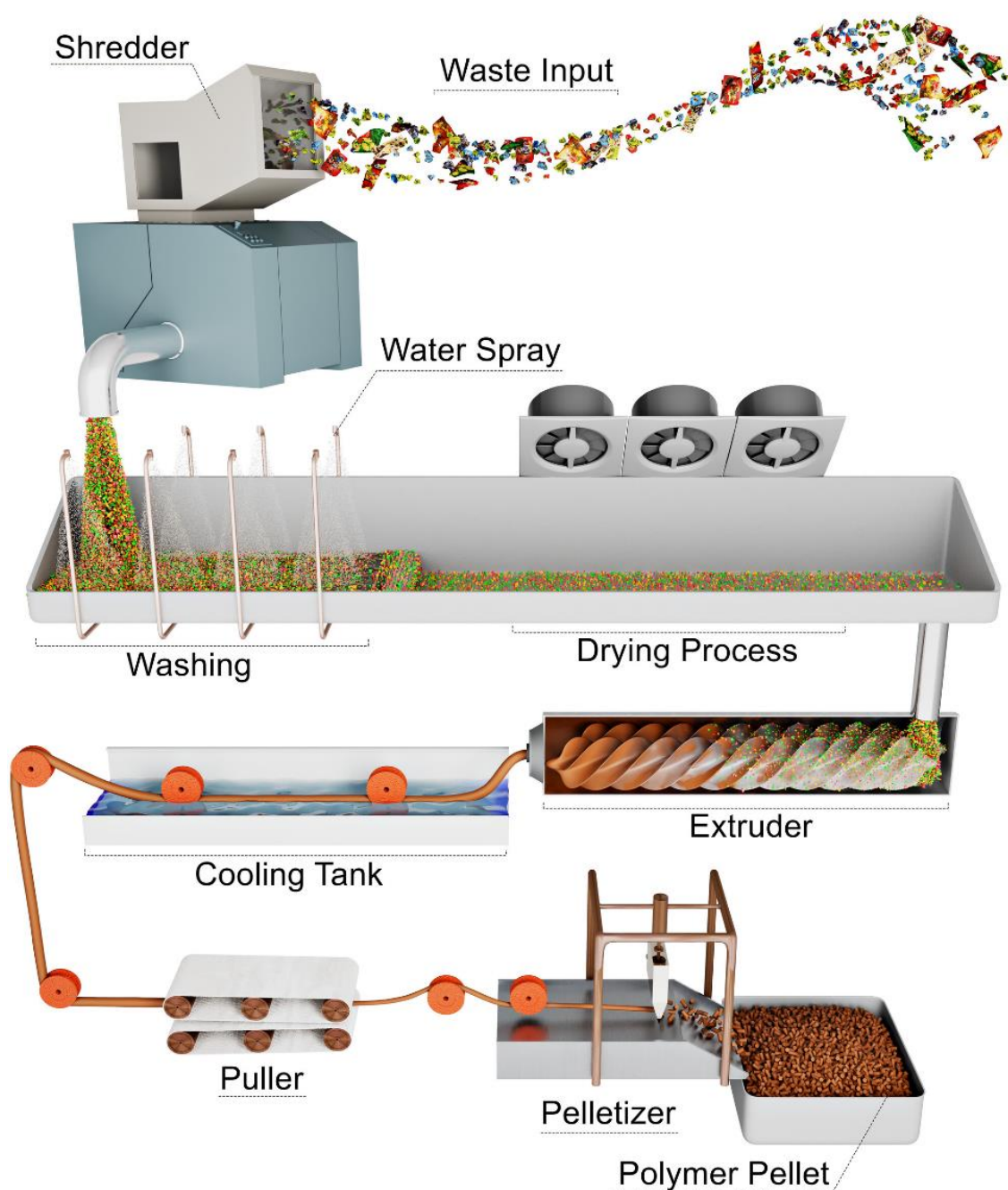


Figura 3. Representación esquemática del proceso de reciclado mecánico (12).

Por otra parte, hay métodos separativos que se fundamentan en el uso de radiaciones cerca del espectro infrarrojo o de los rayos X. Estos métodos se basan en la emisión de espectro característico producto de la incidencia de la radiación en los polímeros. De forma similar funciona la separación basada en la espectroscopia de fluorescencia de rayos X, con la ventaja de poder identificar además la composición de otros materiales como pueden ser metal, cemento, aceite, etc (12).

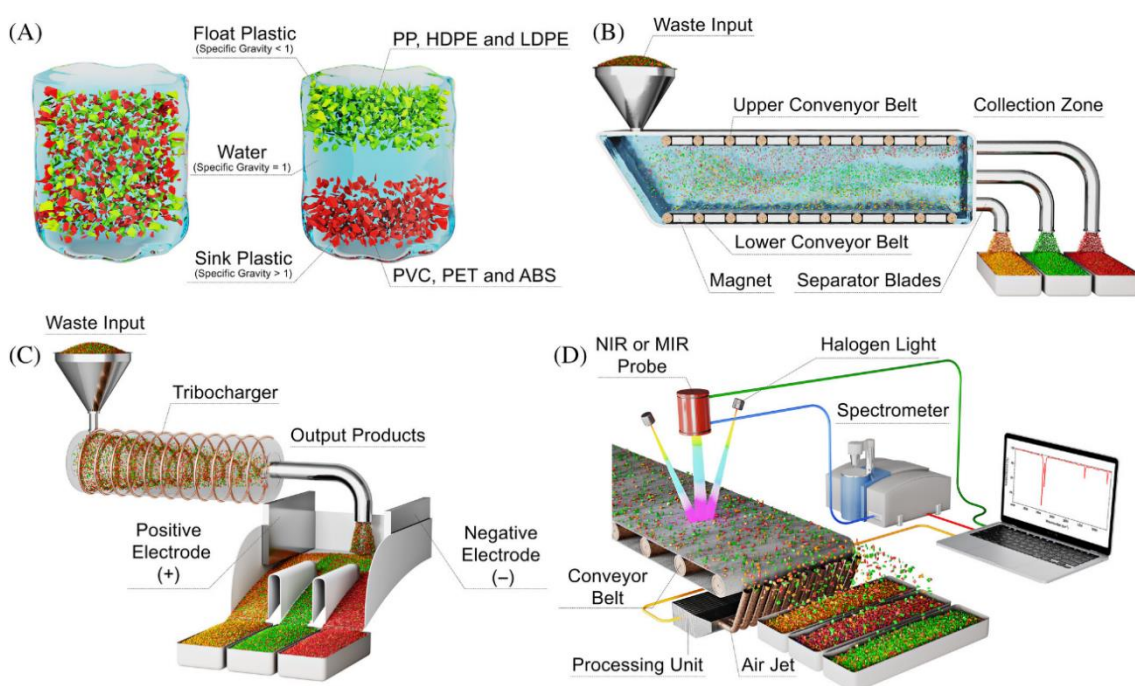


Figura 4. Separación de plásticos por medio de diferentes técnicas separación (A) separación por flotación, (B) separación por densidad magnética (C) separación triboelectrostática y (D) separación por espectro infrarrojo (12).

Una vez clasificados los plásticos se muelen en trozos más pequeños, en lo que se conoce como la molienda que a su vez se combina con múltiples lavados. Dentro de los lavados se encuentran diferentes alternativas como el prelavado, lavado en caliente, lavado por fricción, o lavados químicos en caso de que sean necesarios. Asociados a ciclos de enjuague y secado, pudiendo ser este último por técnicas centrífugas o por aplicación de aire caliente. (12)

Una vez acondicionada la materia prima, se puede iniciar el reprocesamiento, el cual se divide en etapas como secado, extrusión, aglutinación y granulación (12,14).

Durante la extrusión y aglutinación lo que se pretende es aumentar la densidad de los materiales para facilitar su posterior manejo. Esto se puede hacer por la aplicación de diferentes metodologías que se fundamentan en la aplicación de calor por fricción, por debajo de la temperatura de fusión del polímero (14,15).

En la etapa de granulación, se hace uso de peletizadoras, es decir, equipamiento que reduce la materia prima a piezas pequeñas prensadas, que se denominan pellets, los que mezclan y comprimen para dar forma al material por medio de una matriz. Una vez que sale de la matriz, el material se enfría y se lo pasa a través de una cuchilla rotatoria para cortar el pellet a la longitud deseada (14).

El reprocesamiento busca conservar la composición básica de la estructura polimérica del material, es decir, sus monómeros, para luego reincorporarlo a la cadena productiva. Esto permite reducir el costo energético, disminuir la huella ambiental y minimizar los residuos plásticos (12,13).

El reciclaje de plásticos enfrenta diversos desafíos tecnológicos. La gran variedad de polímeros, sus combinaciones y propiedades dificultan el proceso de reciclado. Además, la clasificación de los materiales sigue siendo un proceso complejo y lejos de estar optimizado, lo que impacta tanto en la cantidad como en la calidad de la materia prima disponible para el reciclaje (14).

Entre los plásticos que se reciclan generalmente por medios convencionales, se encuentran el polietileno tereftalato (PET) y el polietileno de alta densidad (HDPE), que mantiene sus propiedades mecánicas estables incluso luego de varios ciclos de reciclado. Sin embargo, no todos los plásticos son sencillos de reciclar, por ejemplo, el policloruro de vinilo (PVC) libera sustancias tóxicas

durante el reprocesamiento y otros plásticos no logran conservar sus propiedades posteriormente al reciclado (16).

Economía circular

Cuando nos referimos a la economía circular, hacemos referencia a un modelo de producción y consumo que busca la optimización de recursos, que promueve la reutilización, el reciclaje y la reducción de residuos, con el objetivo de crear un sistema cerrado en el cual todos los recursos sean utilizados con la mayor eficiencia posible. En las últimas décadas, el modelo de producción predominante ha sido el de la economía lineal, en el cual los recursos, una vez utilizados, se desechan, y se tratan como residuos sin valor. Un claro ejemplo de esto son los plásticos de un solo uso (16,17).

En las últimas décadas, y con el avance de la tecnología de detección, somos más conscientes de las consecuencias que tiene el modelo de producción actual y de la necesidad de avanzar a hacia un enfoque más sostenible. Esto es especialmente relevante en el manejo de plásticos ya que pueden tardar milenios en degradarse. Además, su durabilidad y versatilidad han impulsado un aumento en su uso global, lo que a su vez aumenta su acumulación (9,17).

En el caso de los plásticos, la economía circular se enfoca en reducir el consumo de materiales vírgenes, fomentar el reciclaje y reutilizar productos al final de su vida útil, además de mejorar los procesos de diseño para facilitar estas prácticas. Se estima que el 70 % de los plásticos que se produjeron hasta el día de hoy se tratan como residuos y solamente el 9 % se ha logrado reciclar (11).

El reciclaje de plásticos enfrenta a desafíos significativos que limitan la eficacia de los sistemas de reciclaje tradicionales. Por lo tanto, se ha propuesto

que se desarrollen soluciones innovadoras en la forma en que los plásticos sean diseñados para ser más fácilmente reciclables (16).

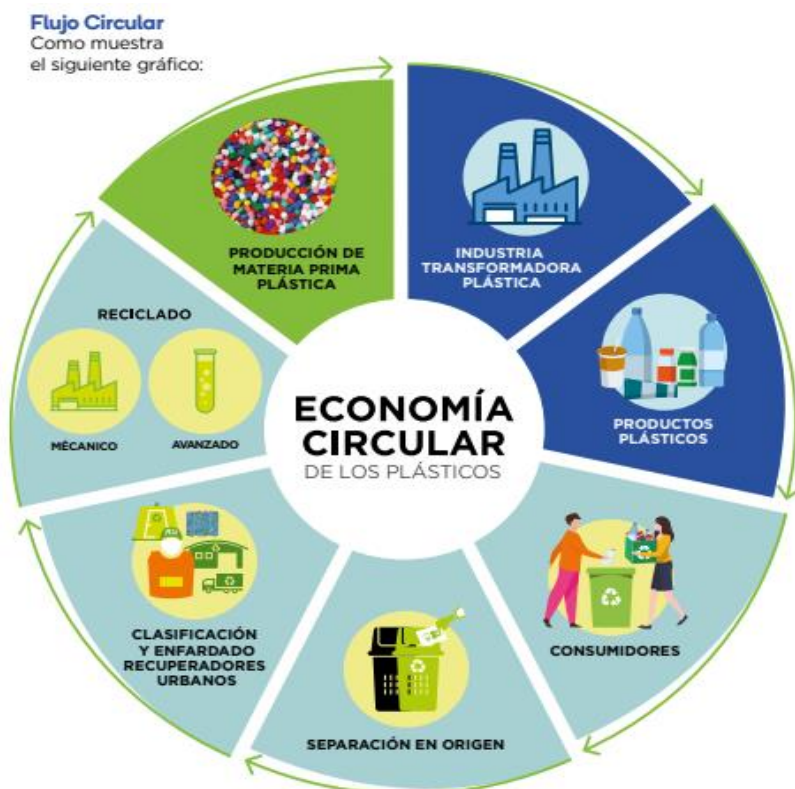


Figura 5. Flujograma de la economía circular de los plásticos (19).

La economía circular presenta múltiples beneficios tanto económicos como ambientales y sociales.

Por un lado, se hace un uso más racional del recurso, por lo que no se utiliza materia prima nueva, lo que reduce el costo energético de producción como la acumulación de residuos. Por otro lado, disminuyen las emisiones de gases generadas en la fabricación de plásticos, ofreciendo una alternativa más sostenible que la incineración de desechos plásticos (18).

Además, al reducir la cantidad de plásticos desechados, se disminuye el impacto ambiental, evitando la contaminación por micro y nanoplásticos. Estos han sido detectados en múltiples ecosistemas y en estudios poblacionales, aunque aún se investiga cuáles podrían ser sus repercusiones a largo plazo (7,19).

A medida que la reutilización de los plásticos se vuelva una práctica habitual, todos los actores involucrados mejoraran su eficacia. Un ejemplo de ello es la clasificación de plásticos, que se verá optimizada tanto por el público en general como por quienes participan activamente en el sector. Esta mejora en la clasificación de los residuos facilita el reprocesamiento, reduciendo costos y simplificando la producción. Como resultado, se obtiene un producto final de mayor calidad, lo que a su vez incentiva su uso. En simultaneo, la investigación y el desarrollo impulsarán nuevas estrategias y tecnologías para optimizar el sistema (18).

Otro punto clave es que, junto con los avances tecnológicos y productivos, también se requiere que la legislación y las normativas complementen estos progresos. Es fundamental el acompañamiento de políticas públicas y organismos de control que incentiven y regulen estas prácticas. Sin dejar de lado la importancia de la colaboración internacional para encontrar soluciones conjuntas a una problemática global.

Durmientes reciclados

En la Argentina y en el mundo, los trenes representan un medio de transporte eficiente y de bajo impacto ambiental. A pesar de esto, el desarrollo ferroviario en el país tuvo un impacto negativo sobre los bosques nativos, por medio de la producción de durmientes de madera (20).

Durante el siglo XX la producción de durmientes de madera promovió la deforestación de la zona centro y norte de la Argentina; lo que resultó de la tala indiscriminada de árboles, que actualmente se encuentran en peligro, como el quebracho colorado. Se estima que para el año 1945 se llevaban talados 350 millones de quebrachos colorados con el fin de elaborar durmientes de ferrocarril, además de la extracción de taninos y la obtención de postes, leña y carbón. Como consecuencia 10 millones de hectáreas de bosque nativo fueron deforestadas (21).

En diferentes partes del mundo se ha optado por alternativas sintéticas para la producción de durmientes, y dentro de la variedad de opciones existen los

durmientes compuestos por plásticos reciclados como alternativa sustentable (22).

Esta iniciativa que se está llevando a cabo también en nuestro país, donde se busca la implementación de durmientes hechos a base de polímeros reciclados, que conllevan múltiples beneficios como son la promoción de la industria nacional, la revalorización de los residuos plásticos, la recuperación del sistema ferroviario, que es un medio de transporte de carácter limpio y eficiente, lo que incentiva la mejora del circuito productivo de plásticos secundarios, lo que puede fomentar alianzas estratégicas para que el proyecto pueda escalar y ser un producto de exportación al largo plazo, entre otros beneficios (22).

Polímeros

Los polímeros son macromoléculas que se componen de unidades repetitivas las cuales se denominan monómeros, que forman largas cadenas por medio de enlaces covalentes (23).

Existen una gran variedad de polímeros y a su vez múltiples criterios por los cuales clasificarlos. Como pueden ser las fuentes de obtención donde se subdividen entre naturales, semisintéticos y sintéticos. O su comportamiento térmico, clasificación que además es de gran utilidad cuando referimos a sus propiedades mecánicas, clasificándose como polímeros tipo termoplásticos, termofijos y elásticos (23).

Adicionalmente, podemos diferenciarlos a nivel molecular, según la estructura química que posean, en este caso se clasificaría en lineal, ramificada y reticulada. Otro criterio se asocia a la composición monomérica, que divide a los compuestos en homopolímeros, si se componen por un único monómero, o en copolímeros, si están compuestos por más de un monómero (23).

Polímeros e irradiación

La irradiación de polímeros con radiación de alta energía, como pueden ser los rayos gamma, los rayos X o los haces de electrones produce intermediarios

de gran reactividad como consecuencia de formación de estados excitados, ionizaciones y radicales libres (24).

Los intermediarios que se forman producen diversas reacciones que pueden conllevar a un reordenamiento de la estructura tridimensional de los polímeros. Dentro de las reacciones que ocurren esta la oxidación, el entrecruzamiento y la escisión de cadenas, adicionando la posibilidad de injertar grupos funcionales deseados a un polímero. Tanto la predominancia como la ocurrencia de las reacciones mencionadas, estarán determinadas por una serie de factores que modificarán la incidencia de las reacciones sobre el polímero (24).

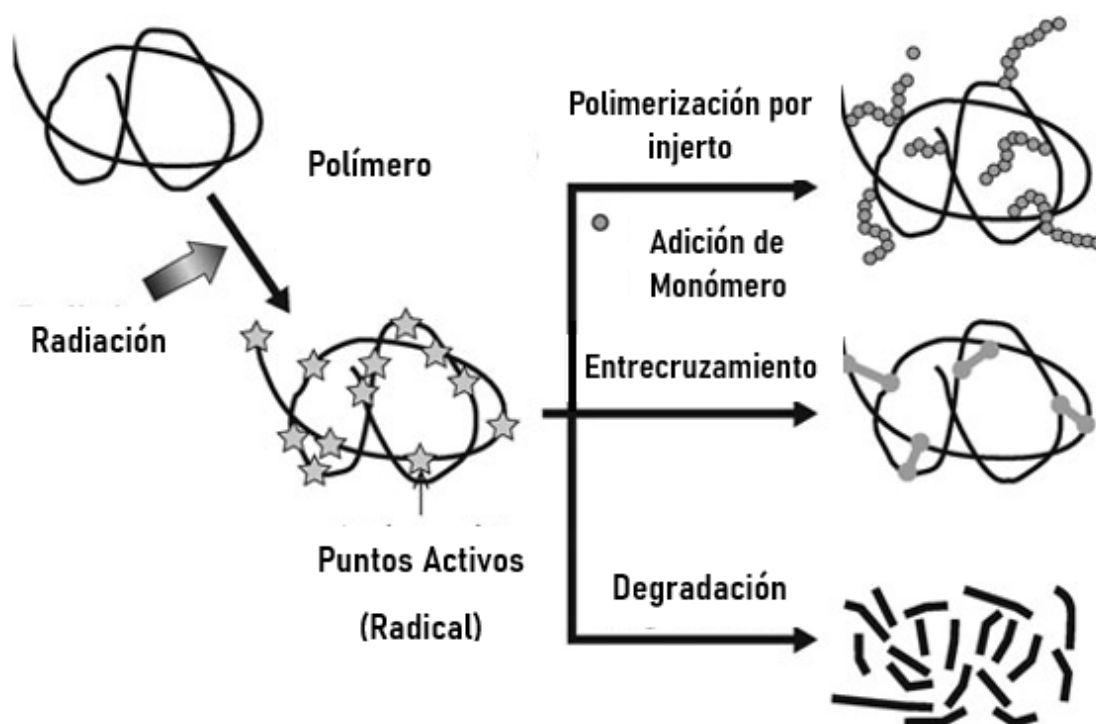


Figura 6. Efecto de irradiación de alta energía (gamma) en polímeros. (25).

Los procesos inducidos por radiación ionizante presentan numerosas ventajas sobre los métodos convencionales, muchas de ellas relacionadas con la naturaleza física del proceso, como la eliminación del uso de aditivos para la inducción de reacciones o la estabilidad de las temperaturas de trabajo. Como resultado, en la actualidad existe muchos procesos a gran escala que utilizan las radiaciones ionizantes, aplicados tanto en la industria polimérica como en otros sectores (12).

Desde el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) surge una iniciativa denominada NUTEC Plastics la cual busca incentivar la colaboración entre países con el fin de aplicar la tecnología nuclear para colaborar con el control de la contaminación plástica mundial (1).

Esta iniciativa abarca diferentes vertientes, como son el uso de distintas técnicas de detección nuclear para evaluar la presencia de micro plásticos en los lechos marítimos de diferentes países.

Dentro de las técnicas utilizadas destacan las isotópicas, que cuentan con las ventajas, de tener una mayor precisión y obtener información complementaria a la hora de cuantificar tanto la abundancia como la distribución de los microplásticos y nanoplásticos en comparación a las otras técnicas. También aportan información diversas técnicas de imagenología nuclear, con el uso de radiotrazadores que permiten la valoración del impacto en la biota marina, la medición de la toxicidad y la evaluación de efectos sobre organismos vivos que sean producto de la presencia de los microplásticos (1).

Por otra parte, se busca incentivar la investigación de los efectos de las radiaciones de alta energía en polímeros. Dado que según las dosis aplicadas los polímeros sufrirán diferentes modificaciones estructurales y aumentara su reactividad, siendo esta última una cualidad beneficiosa cuando se considera los desafíos del reciclado de plástico (24).

Otra cuestión en la que se enfoca indirectamente, es a la divulgación de la tecnología nuclear y sus aplicaciones, ya que muchas veces dicha información no trasciende de los grupos especialistas en el área. Con el objetivo de potenciar el aprovechamiento de dichas técnicas en la reducción mundial de los residuos plásticos, se debe entretener relaciones con los distintos participantes de la industria del reciclaje y así hacer progresos conjuntos con la finalidad de buscar nuevas soluciones a problemáticas globales (1).

Un desafío tecnológico que presenta el uso de polímeros reciclados es que sus propiedades originales se ven modificadas, viéndose una falta de cohesión entre los monómeros (11).

La radiación ionizante es una alternativa para la mejora de la polimerización, ya que aumenta la estabilidad de la red estructural, optimizando el tratamiento de los plásticos descartados. Esto permite avances tecnológicos que favorecen el aprovechamiento de polímeros secundarios y amplían su versatilidad en aplicaciones (12,24).



Figura 7. Reciclado mediante radiación (1).

Asimismo, la irradiación presenta soluciones a problemáticas existentes en los métodos convencionales de reciclaje mecánico. Puede ser de utilidad a distintos niveles de la cadena de reciclaje, permitiendo una separación eficaz para una de los residuos plásticos, lo que colabora en una correcta separación según el tipo de polímero derivando en una mejor calidad de materia prima (13).

También se puede utilizar con el fin de generar diferentes subproductos como rellenos o aglomerantes que se suelen utilizar en la construcción. A su vez se aplica para acelerar la degradación del plástico. Se puede lograr a su vez la obtención de materias primas químicas, que sirvan para la fabricación de diversos productos, utilizándolas como única materia prima o incorporándolas a polímeros vírgenes. Otras alternativas son la producción de biopolímeros catalizado por la irradiación, lo que le da características de biodegradación para ser empleados como reemplazo de plásticos derivados del petróleo, lo que conlleva a una reducción drástica en el tiempo de espera para la degradación del polímero en comparación a sus análogos (26).

Polipropileno

El polipropileno (PP) es un polímero sintético derivado del monómero propeno (C_3H_6). Es uno de los polímeros termoplásticos más utilizados debido a sus características versátiles, propiedades mecánicas y facilidad de procesamiento (23).

Entre las propiedades mecánicas más destacadas del PP se encuentran su alta rigidez y resistencia a la deformación. Adicionalmente, presenta una elevada resistencia a la tracción (23).

El PP es un material con buena resiliencia, lo que significa, que puede recuperar su forma original tras una deformación moderada. A su vez, posee una densidad relativamente baja (0.90 g/cm^3), lo que le confiere una excelente relación entre su peso y resistencia (27).

Otra cuestión a destacar es su resistencia al impacto, que disminuye con las bajas temperatura. Con el objetivo de soslayar este aspecto, se emplea la adición de modificadores o la copolimerización con otros monómeros (28).

En cuanto a las propiedades térmicas, el PP destaca por su elevada resistencia al calor. Presenta una temperatura de transición vítrea de aproximadamente $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ y un rango de temperatura de fusión de $165 \text{ }^\circ\text{C}$ aproximadamente.

Una de las características químicas más conocida del PP es su resistencia frente a una amplia gama de sustancias, incluidos ácidos, bases, alcoholes e incluso algunos disolventes orgánicos. Sin embargo, no es resistente a disolventes aromáticos ni clorados (23).

Hay que destacar también su elevada resistencia a la biodegradación, lo que significa que no se ve afectado por microorganismos como bacterias y hongos (26).

Además de las propiedades ya mencionadas, el PP presenta excelentes características como aislante eléctrico y una baja conductividad térmica.

En cuanto a sus propiedades ópticas, el PP es opaco en su forma cristalina y tiene buena resistencia a la decoloración causada por la exposición a la luz. Por otra parte, posee baja higroscopicidad, lo que resulta ventajoso en situaciones donde la estabilidad dimensional y la resistencia a la humedad son esenciales. Ambas propiedades son convenientes a la hora de exponer el material a la intemperie (23).

Desde el punto de vista tecnológico, el PP es fácil de moldear mediante diversas técnicas como inyección, extrusión, termoformado y soplado (29), lo que le otorga gran versatilidad en diversas aplicaciones industriales.

Poliétileno

El polietileno (PE) es un termoplástico derivado del monómero etileno (C_2H_4) que pertenece a la familia de los polímeros olefínicos debido a su estructura química. Las propiedades del PE dependen en gran medida de su estructura, lo que genera variaciones significativas según el tipo de polietileno y su densidad (23).

Los principales tipos de polietileno se clasifican según su estructura y condiciones de polimerización:

Poliétileno de baja densidad (LDPE): Su estructura está compuesta por cadenas ramificadas, lo que le confiere flexibilidad, transparencia y facilidad de procesamiento. Sin embargo, estas características reducen su resistencia mecánica y térmica.

Poliétileno de alta densidad (HDPE): Está formado principalmente por cadenas lineales o con un bajo grado de ramificación. Esta estructura le proporciona rigidez y alta resistencia mecánica, térmica y química.

Poliétileno lineal de baja densidad (LLDPE): Presenta características estructurales intermedias, con cadenas lineales y algunas ramificaciones cortas. Esto les confiere una buena flexibilidad y resistencia a los impactos.

Polietileno de ultra alta densidad (UHMWPE): Tiene un mayor grado de ramificaciones que el LDPE, lo que resulta en una elevada flexibilidad y suavidad, aunque con menor resistencia a la tracción y dureza (30).

Las propiedades mecánicas del PE varían considerablemente según el tipo al que nos refiramos, pero hay propiedades comunes entre ellos, como:

Una moderada resistencia térmica, que se estabiliza a bajas temperatura. Su coeficiente de expansión térmica es ligeramente mayor que el del polipropileno (28).

Asimismo, es un material hidrofóbico, por lo que repele el agua y no absorber humedad, lo que es tecnológicamente beneficiosos cuando pensamos en aplicaciones del material en ambientes exteriores. En adición, el polietileno resiste la decoloración causada por la exposición al aire y la luz, lo que lo hace adecuado para su uso a la intemperie (26).

El HDPE posee una buena capacidad de recuperación tras la deformación, debido a su mayor rigidez, lo que le permite soportar más ciclos de carga sin deteriorarse. En general, el polietileno muestra una buena resistencia a la fatiga bajo condiciones normales, aunque el HDPE puede ser más susceptible a la fisuración por fatiga en circunstancias específicas, como es el caso en ciertas condiciones de tensión prolongada (28).

Carbonato de calcio

El carbonato de calcio (CaCO_3) representa el 90% de los rellenos utilizados en la industria polimérica debido a su bajo costo, amplia disponibilidad mundial y su capacidad para mejorar diversas propiedades mecánicas, térmicas y tecnológicas (31). Principalmente se emplea como aditivo para plásticos, cauchos y polímeros compuestos, donde se lo utiliza como un refuerzo, agente opacificante y modificador reológico (32). Además de ser un material no abrasivo que puede dispersarse como vidrio o talco de manera directa al momento de la extrucción o la inyección, según sea el método de fabricación (5).

La inclusión de carbonato de calcio mejora la rigidez, la resistencia a la compresión y la estabilidad dimensional del polímero. En los casos del, polietileno y polipropileno, la incorporación de CaCO_3 aumenta la rigidez del material y reduce su deformación bajo carga. (33).

Caucho

Todos los años se crean miles de millones de residuos de neumáticos como resultado del incremento en la industria automotriz, estos residuos muchas veces son ilegalmente desechados o acumulados de formas inapropiadas lo que pone en riesgo al ambiente y a la salud de las personas. Por dicha razón es de importancia encontrar formas y usos de reciclar este material (34).

El caucho reciclado de neumáticos tiene la característica de ser un producto con una estructura tridimensional con una gran cantidad de entrecruzamientos, lo que complejiza su reaprovechamiento por la dificultad que esto genera para compatibilizar con otros polímeros (12).

Una estrategia de aplicación utilizada, es su uso para la fabricación de termoplásticos. Aunque generalmente se utiliza en porcentajes relativamente bajos, por debajo del 10%, su integración en materiales de alta demanda productiva resulta en el consumo significativo de caucho reciclado, contribuyendo así a su valorización y aprovechamiento a gran escala (27).

Existen otros copolímeros en que se usan proporciones mayores del material reciclado. En general, la adición del caucho ayuda a modificar la rigidez de los termoplásticos (35).

Objetivos

El presente trabajo tiene como objetivo optimizar las propiedades mecánicas de un polímero compuesto mediante la incorporación de caucho y la aplicación de irradiación. Para ello, se analizarán cuatro muestras con diferentes composiciones, junto con sus respectivos controles. Todas las muestras parten de un polímero con la misma composición inicial, al que se añade caucho en concentraciones variables (0%, 5%, 10% y 15%) y un 5% de HDPE, previamente irradiado a 5 kGy.

Objetivos generales:

- Analizar el efecto de la incorporación de HDPE irradiado y diferentes porcentajes de caucho en las propiedades mecánicas de un material compuesto elaborado a partir de polímeros reciclados.

Objetivos específicos:

- Observar la morfología superficial por medio de un microscopio electrónico de barrido.
- Evaluar la incidencia de la adición de polipropileno de alta densidad irradiado en las propiedades mecánicas a través de la medición de los siguientes parámetros: resistencia a la flexión, módulo de elasticidad y la prueba de impacto Charpy.

Materiales y métodos

El presente trabajo forma parte de los estudios realizados en el marco del Proyecto Coordinado de Investigación del OIEA titulado “Reciclado de residuos de polímeros para materiales estructurales y no estructurales mediante el uso de radiación ionizante (F23036)”, el cual se lleva a cabo en el Departamento de Procesos por Radiación de la Gerencia de Aplicaciones y Tecnología de las Radiaciones, de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA). Por lo tanto, parte de los materiales y composiciones fueron previamente seleccionados y estudiados, y en el presente trabajo se continuará trabajando en la formulación, con el objetivo de optimizar el proceso y mejorar las propiedades del material desarrollado.

Materiales

El PP y HDPE se obtuvieron de RECICLAR S.A., el caucho proviene de REGOMAX, una recicladora local de neumáticos usados (granulometría: 90 – 120 μm). El carbonato de calcio es de grado industrial con una granulometría de entre 25 a 30 μm . Todos los materiales utilizados para la elaboración de las muestras, exceptuando el carbonato de calcio son reciclados.

Métodos

Irradiación del HDPE

Las muestras de HDPE fueron irradiadas a temperatura ambiente en un equipo auto blindado Gamma Cell con fuente de Co-60, en el Laboratorio de Altas Dosis del Departamento de Dosimetría de Radiaciones Ionizantes pertenecientes al Centro Atómico Ezeiza - Argentina que cuenta con una actividad de 5648 Ci y se trabajó con una tasa de dosis de 6 kGy/h. La dosis de tratamiento fue de 5 kGy.



Figura 8. Equipo Autoblindado Gamma Cell. Fuente Propia

Preparación de la muestra

Inicialmente se hizo mezcla de los componentes de la siguiente manera:

- *Paso 1.* Mezcla de PP reciclado y HDPE en una proporción 80:20.
- *Paso 2.* Adición de un carbonato de calcio (CaCO_3) para aumentar el módulo de elasticidad (15% de la masa de PP + HDPE).
- *Paso 3.* Adición de partículas de caucho, a diferentes concentraciones según la muestra.
- *Paso 4.* Añadido de HDPEi como compatibilizador (5% de la masa de PP + HDPE).

En la tabla a continuación se observan las cantidades en porcentaje que se añadieron de cada uno de los componentes en cada muestra, el caucho se adiciono considerando que fuera 5, 10 y 15% con respecto al peso total de PP y HDPE.

Tabla 2. Composición porcentual de las muestras preparadas en base a polímeros reciclado

Componentes [%]	Composición porcentual total de las muestras de estudio							
	C0%	C5%	C10%	C15%	M 0%	M 5%	M 10%	M 15%
PP	70	67	64	62	67	64	62	59
HDPE	17	17	16	15	17	16	15	15
CaCO ₃	13	13	12	12	13	12	12	11
HDPEi	0	0	0	0	4	4	4	4
Caucho	0	4	8	12	0	4	8	11

PP: Polipropileno; HDPE: Polietileno de alta densidad, CaCO₃ : Carbonato de calcio y HDPEi: Polietileno de alta densidad irradiado. C 0% (control sin agregado de caucho); C 5% (control con agregado de 5% de caucho); C 10% (control con agregado de 10% de caucho); C 15% (control con agregado de 15% de caucho); M 0% (muestra sin agregado de caucho); M 5% (muestra con agregado de 5% de caucho); M 10% (muestra con agregado de 10% de caucho) y M 15% (muestra con agregado de 15% de caucho).

Las mezclas de cada muestra se procesaron utilizando un extrusora de doble tornillo (Cowell), con un perfil de temperatura de 180 a 200 grados Celsius y una velocidad de rotación de 10 +2 rpm. El filamento obtenido fue pelletizado y se repitió el proceso una vez más, posteriormente se reproceso en una prensa hidráulica (con una presión uniaxial de 20 kg/cm² a 190°C) para formar placas.



Figura 9. Extrusora de doble tornillo marca Cowell (35).

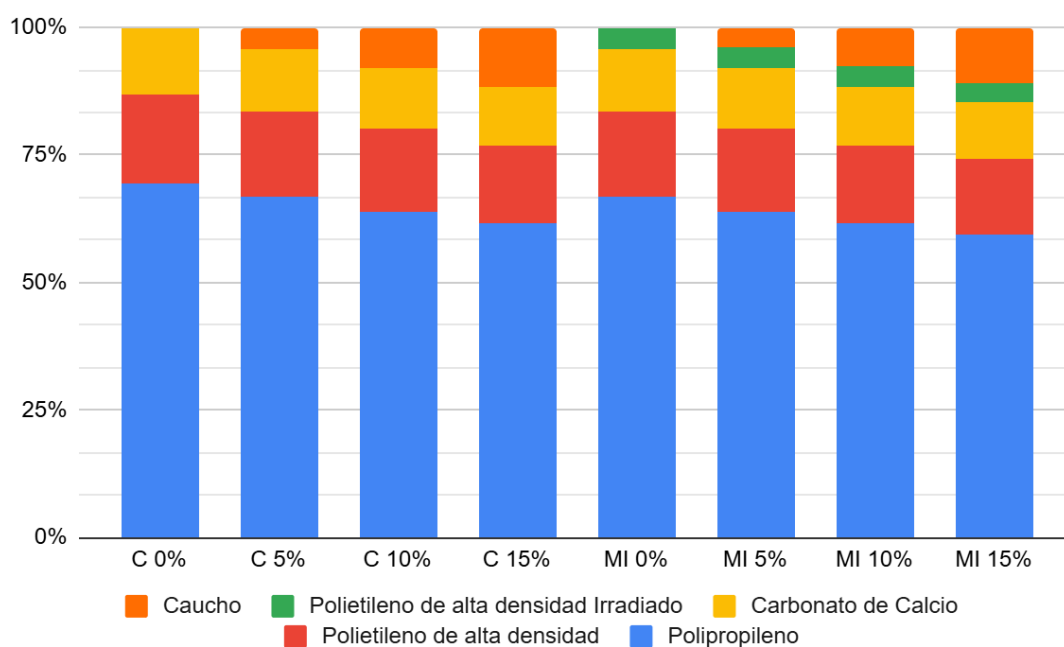
A continuación, la Tabla 3, muestra el perfil de temperatura con el que se operó la extrusora.

Tabla 3. Perfil de temperatura de la extrusora

Cabezal	Zona 5	Zona 4	Zona 3	Zona 2	Zona 1
200 °C	195 °C	190 °C	190 °C	180 °C	180 °C

La composición de las diferentes muestras obtenidas se muestra en la siguiente gráfica:

Gráfica 1. Composición de las muestras



C 0% (control sin agregado de caucho); C 5% (control con agregado de 5% de caucho); C 10% (control con agregado de 10% de caucho); C 15% (control con agregado de 15% de caucho); MI 0% (muestra sin agregado de caucho); MI 5% (muestra con agregado de 5% de caucho); MI 10% (muestra con agregado de 10% de caucho) y MI 15% (muestra con agregado de 15% de caucho)

Microscopía

Las muestras a estudiar fueron sometidas a un proceso de criogenización mediante la aplicación de nitrógeno líquido, con el objetivo de fragilizarlas y garantizar cortes precisos y uniformes. Este tratamiento previo permitió preparar las muestras adecuadamente antes de su examen con el microscopio electrónico de barrido (FEI - Quanta 200) del Laboratorio de Microscopia Electrónica

perteneciente a la gerencia de Materiales del Centro Atómico Constituyentes-Argentina.

Propiedades de Tensión: Resistencia a la flexión y Módulo de elasticidad

La resistencia a la flexión y el módulo de Young y se realizaron según la norma ASTM D790 en una máquina de testeo universal (INSTRON modelo 3366). Las pruebas de tracción se llevaron a cabo a temperatura ambiente con una velocidad de cabeza de 0.853 mm/min. Los resultados reportados son valores promedio de cinco repeticiones por muestra.



Figura 10. Máquina de testeo universal Instron 3366. ResearchGate (37).

Ensayo de impacto

Para este estudio se confeccionaron probetas rectangulares de 64 mm de largo con un grosor promedio de 3 mm de espesor y como muestra la Fig. 11 con una entalladura tipo V para que actúe como concentrador de esfuerzos y garantice una fractura controlada. Se realizaron los ensayos por sextuplicado a temperatura ambiente con un péndulo una longitud 42 cm y una energía 2,7J (Pendulum Impact Tester CSI-137). De acuerdo a la norma ASTM D256.

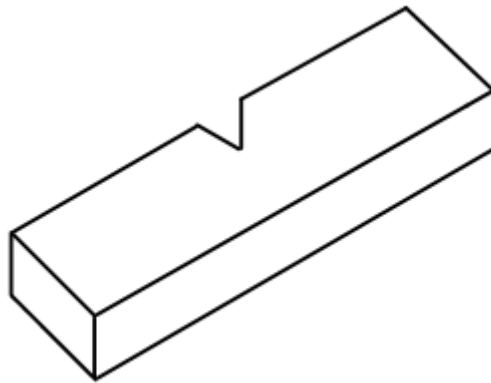


Figura 11. Formato de probeta de ensayo de impacto Fuente propia.

Análisis estadístico

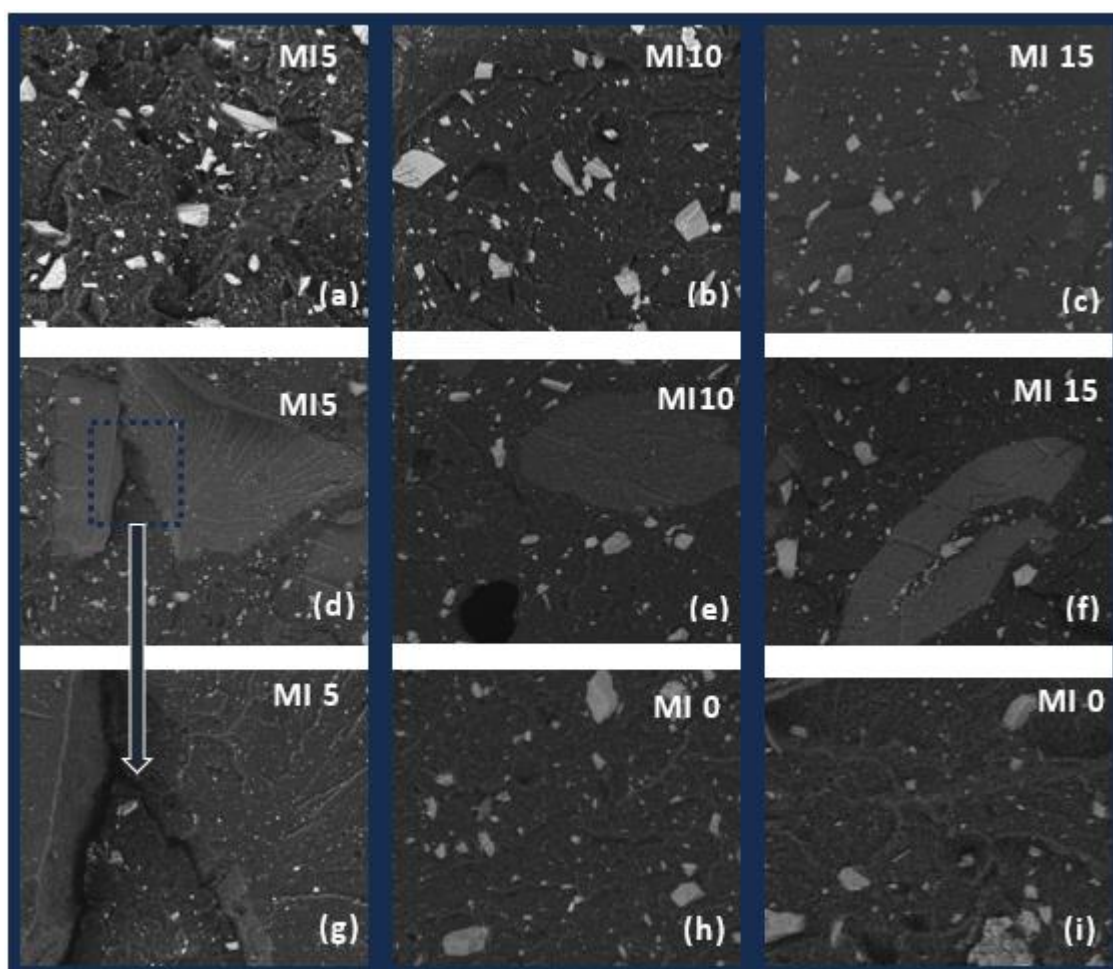
Los resultados se analizaron a través de ANOVA simple por medio del software estadístico “R” y mediante test de Fisher (LSD), con un nivel de confianza del 95%.

Resultados y Discusión

Microscopía

Las imágenes obtenidas, a través del microscopio óptico de barrido, de las diferentes muestras irradiadas, se presentan a continuación:

Imágenes 1. Muestras con agregado de HDPEi



MI 0 (muestra sin agregado de caucho); MI 5 (muestra con agregado de 5% de caucho); MI 10 (muestra con agregado de 10% de caucho) y MI 15 (muestra con agregado de 15% de caucho)

Se observó en las imágenes obtenidas que el agregado de caucho en un 15% (Fig. C y F) mostro una fase de mayor homogeneidad y menor porosidad, en comparación a MI 5% y MI 10% (Fig. A y B), siendo MI 5%, la muestra que demostró un mayor grado de agrietamiento superficial y de porosidad. En todas las fotografías se observa una fase continua, compuesta por una matriz de PP y HDPE; y una fase dispersa que contiene carbonato de calcio, y partículas de

caucho en MI 5%, MI 10% y MI 15%. Estas dos fases dan lugar a la formación de estructuras tipo “*core-shell*”, en la cual el *core* está dado por la fase dispersa y se recubre con la fase continua, que cumple el rol de “*shell*”.

En contraste a las imágenes presentadas, donde las partículas PP y HDPE forman parte de una sola matriz indiferenciada, Wang y col (38), observaron estructuras tipo Core-Shell y especularon que la “*shell*” estaba dada por la matriz de PP mientras de el “*core*” podría ser el HDPE disperso. Estas diferencias podrían atribuirse a la incorporación de un 5% de HDPEi y al posterior procesamiento por extrusión, lo que favorecería la compatibilización entre PP y HDPE, promoviendo una distribución más homogénea de las fases.

Dichos autores, expresaron además que la estructura en *core shell* permite a la matriz de PP manejar de forma más eficiente la fase dispersa cuando ocurre la deformación durante los ensayos de impacto, lo que mejora los resultados y cuando se adiciona la irradiación gamma se mejora la compatibilidad lo que se observa en el SEM.

Por otra parte, Stehling y col (38), estudiaron las estructuras y propiedades de una mezcla ternaria de PP/HDPE y caucho donde evidenciaron que hay una tendencia de las partículas de caucho a rodear al HDPE, en lugar de viceversa, dentro de una matriz de PP lo que es razonable teniendo en cuenta la energía interfacial. Ya que un núcleo de HDPE rodeado por el caucho es una disposición termodinámicamente favorable. Sin embargo, en este estudio, no se observa dicha disposición, lo que sugiere que el HDPE irradiado podría estar desempeñando un papel como aditivo compatibilizante, modificando la interacción entre las fases y evitando el efecto descrito por Stehling y col.

Mediante las imágenes SEM obtenidas, podemos notar una buena dispersión de caucho a los porcentajes añadidos, sin generación de aglomeraciones; caso contrario a lo reportado por Mujal – Rosas, donde la incorporación de caucho en HDPE, interfirió negativamente con la microestructura formando aglomerados, que produjeron grietas y poros de considerable tamaño en la superficie (40).

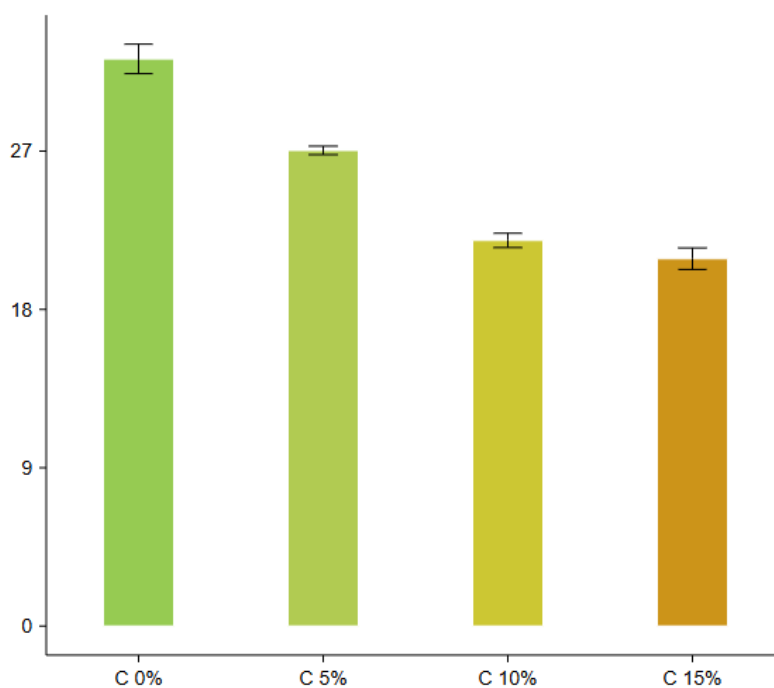
Donde sí se observó un principio de aglomeración, fue con el carbonato de calcio en torno a las partículas de caucho, específicamente en MI 15.

Propiedades de Tensión:

Resistencia a la flexión

En los Gráficos 2 y 3, se observa el efecto de la incorporación de partículas de caucho en las muestras, tanto sin como con material irradiado, sobre la resistencia a la flexión.

Gráfica 2. Resistencia a la flexión en muestras sin material irradiado



Los valores son expresados en [MPa]

En la siguiente tabla se analiza en más detalle el análisis estadístico de las muestras sin adición de HDPE_i:

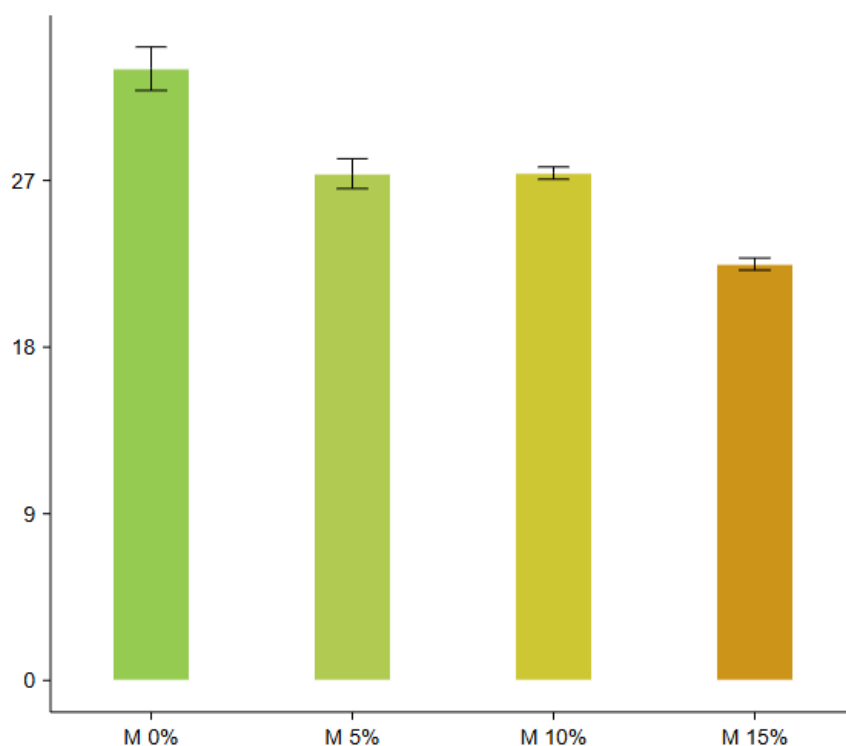
Tabla 4. Resultados de Resistencia a la Flexión expresados en valores medios y desvíos estándares de las muestras sin agregado de 5% HDPEi

	C 0%	C 5%	C 10%	C 15%
Promedio	32,2 ^A	27,0 ^B	21,9 ^C	20,9 ^C
DS	0,8	0,2	0,4	0,6

*Diferentes letras indican diferencias significativas ($p < 0,05$). C 0% (control sin agregado de caucho); C 5% (control con agregado de 5% de caucho); C 10% (control con agregado de 10% de caucho); C 15% (control con agregado de 15% de caucho).

Se observa que, para las muestras, sin material irradiado adicionado, conforme aumenta el contenido de caucho, disminuye significativamente la resistencia a la flexión. C 10% y C 15% presentaron valores similares, de 21,9 MPa y 20,9 MPa, respectivamente, sin diferencias estadísticamente significativas entre estas dos condiciones.

Gráfica 3. Resistencia a la flexión en muestras con material irradiado



Los valores son expresados en [MPa]

A continuación (Tabla 5), se presentan los resultados de resistencia a la flexión para las muestras con diferentes porcentajes de caucho con el agregado de 5% de HDPEi, expresados en valores promedio y desviaciones.

Tabla 5. Resultados de Resistencia a la Flexión expresados en valores medios y desvíos estándares de las muestras con agregado de 5% HDPEi

	M 0%	M 5%	M 10%	M 15%
Promedio	33,0 ^A	27,4 ^B	27,4 ^B	22,5 ^C
DS	1,2	0,8	0,3	0,3

**Diferentes letras indican diferencias significativas ($p < 0,05$). M 0% (muestra sin agregado de caucho); M 5% (muestra con agregado de 5% de caucho); M 10% (muestra con agregado de 10% de caucho) y M 15% (muestra con agregado de 15% de caucho).*

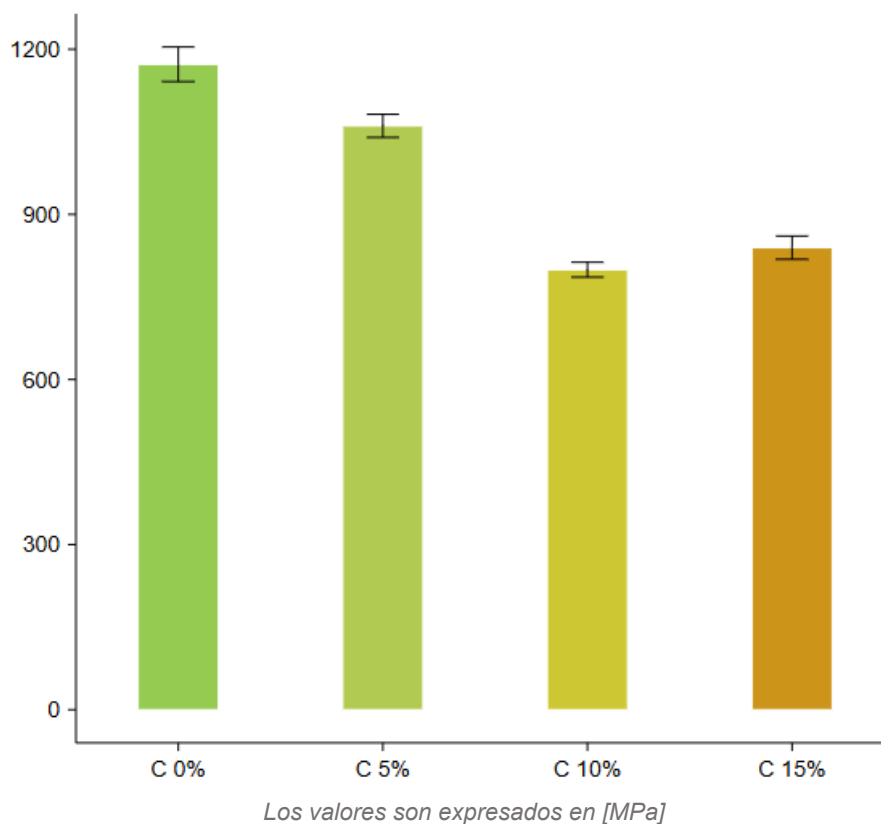
Las muestras M 5% y M10% presentan valores similares y no muestran diferencias estadísticamente significativas. En M 15%, la resistencia disminuye significativamente en comparación con M 5% y M 10%, lo que evidencia el efecto del aumento de caucho sobre las propiedades mecánicas. Dichos resultados indicarían, que el agregado de material irradiado colabora en la atenuación de la pérdida de las propiedades mecánicas ocasionada por la adición de caucho.

Este comportamiento puede ser resultado de entrecruzamientos entre el PE irradiado y el caucho que refuerza la estructura tridimensional de la mezcla de polímeros.

Módulo de elasticidad

En los gráficos que se presenta a continuación se observan los resultados del módulo de la Elasticidad en Flexión de las muestras con diferentes porcentajes de caucho y sin agregado de HDPEi y posteriormente las que sí se le adiciono material irradiado.

Gráfica 4. Módulo de elasticidad en muestras no irradiadas



En la siguiente tabla se analiza en más detalle el análisis estadístico de los valores de módulo de elasticidad de las muestras sin agregado de HDPEi.

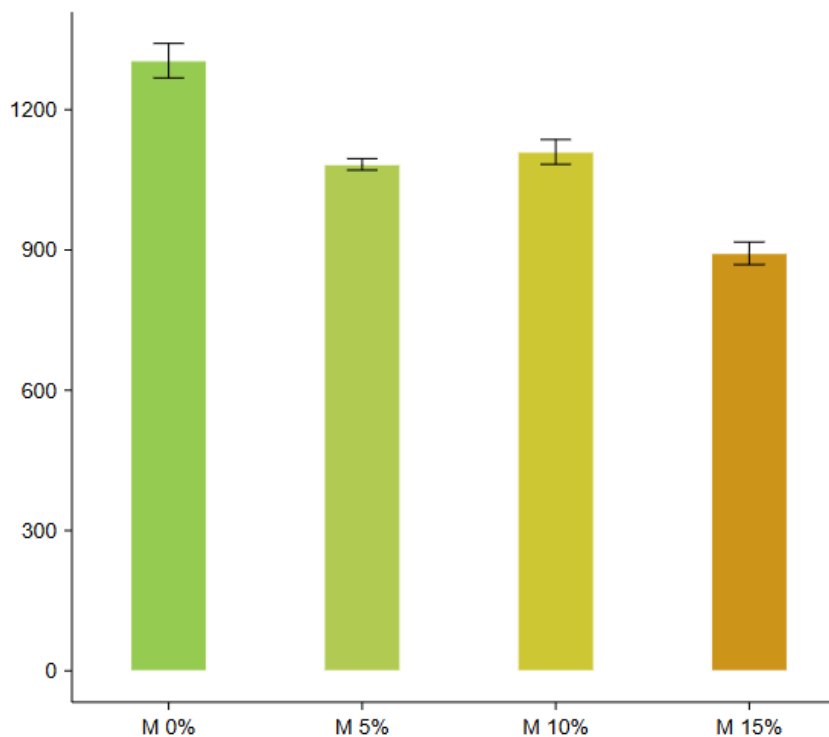
Tabla 6. Resultados del módulo de elasticidad expresados en valores medios y desvíos estándares de las muestras sin agregado de 5% HDPEi

	C 0%	C 5%	C 10%	C 15%
Promedio	1172,7 ^A	1060,8 ^B	799,5 ^C	839,5 ^C
DS	31,4	21,0	13,6	21,1

*Diferentes letras indican diferencias significativas ($p < 0,05$). C0% (control sin agregado de caucho); C 5% (control con agregado de 5% de caucho); C 10% (control con agregado de 10% de caucho); C 15% (control con agregado de 15% de caucho).

Tal como la resistencia a la flexión, que se vio atenuada por la incorporación del caucho, el módulo de elasticidad se vio influenciado por el agregado de caucho, y la incidencia del caucho fue máxima en C 10% y C 15%.

Gráfica 5. Módulo de elasticidad en muestras irradiadas



Los valores son expresados en [MPa]

En la siguiente tabla se analiza en más detalle el análisis estadístico de las muestras con adición de material irradiado:

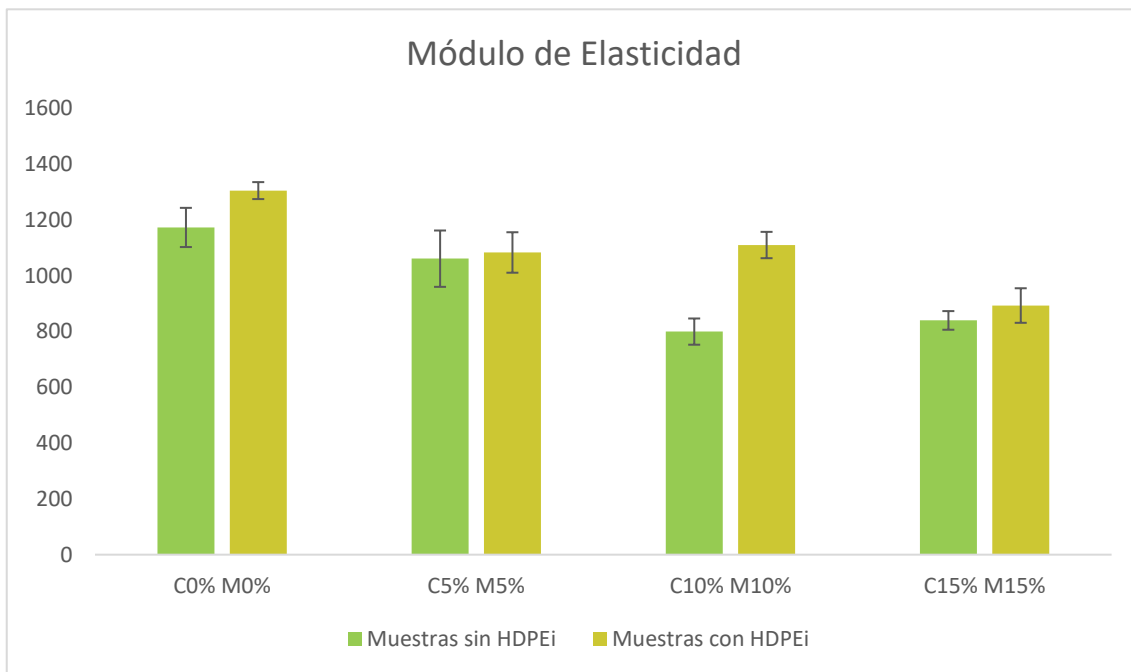
Tabla 7. Resultados de Módulo de Elasticidad expresados en valores medios y desvíos estándares de las muestras con agregado de 5% HDPEi

	M 0%	M 5%	M 10%	M 15%
Promedio	1304,9 ^A	1083,1 ^B	1109,7 ^B	892,9 ^C
DS	36,9	12,3	26,5	24,2

*Diferentes letras indican diferencias significativas ($p < 0,05$). M 0% (muestra sin agregado de caucho); M 5% (muestra con agregado de 5% de caucho); M 10% (muestra con agregado de 10% de caucho) y M 15% (muestra con agregado de 15% de caucho).

Se observa en las muestras con adición de HDPEi que el módulo de elasticidad alcanza su menor expresión en M 15%. Por su parte, M 5% y M 10% no muestran diferencias significativas, lo que se asemeja a la resistencia a la flexión, resultados que eran de esperar ya que son parámetros interrelacionados.

Gráfica 6. Variación del módulo de elasticidad con la adición de HDPEi



Los valores son expresados en [MPa]

En todos los casos, las muestras sin agregado de caucho tuvieron un mayor módulo de flexión y de resistencia a la flexión.

Si bien, el módulo de elasticidad al igual que la resistencia a la flexión disminuye a medida que aumenta el porcentaje de caucho, el efecto es más atenuado respecto de las muestras sin material irradiado, diferenciando significativamente en M 10%, como se ve en la gráfica 6.

La medición del módulo de Young como la resistencia a la flexión son dos parámetros que buscan evaluar de formas diferentes la rigidez de un compuesto determinado, el primero por medio de la determinación de la tensión máxima experimentada dentro de la muestra al momento de la fractura, y el segundo nos

permite describir la deformación un material bajo una carga de tracción o compresión.

La mezcla de HDPE con PP, es una estrategia comúnmente utilizada para compensar la fragilidad característica del polipropileno, pero en contrapartida si la compatibilidad de ambos componentes de la mezcla no es buena, va a afectar a las propiedades mecánicas provocando una disminución de sus propiedades mecánicas. Por esta razón el uso de radiación gamma permite mejorar la compatibilidad de los componentes de la mezcla lo que resulta en una mejora de las propiedades (38). Lo que se pudo evidenciar en las muestras estudiadas.

Con resultados similares a los presentados en este trabajo, otros autores que estudiaron mezclas de caucho con HDPE y HDPE/PPi respectivamente (40,41), observaron que al adicionar caucho a la matriz las propiedades mecánicas disminuían, comportamiento que se acentuó con el incremento en la concentración de caucho; y el tamaño de las partículas de dicho material (40).

Por otro lado, Sonnier y col (42), observaron que al trabajar con una mezcla de HDPE y caucho etileno propileno dieno (EPDM), se mejoraron las propiedades mecánicas, como la elongación y la resistencia al impacto (ensayo de Charpy), con la adición de caucho cuando se aplicaron dosis de entre 25 y 50 kGy. Sin embargo, el módulo de Young disminuyó ligeramente debido a la compatibilización inducida por la formación de entrecruzamientos, lo que afectó tanto el módulo de Young como la resistencia al estiramiento. Además, se observó que el entrecruzamiento se volvía un factor predominante al aplicar una dosis de 100 kGy.

En otro estudio, Sonnier y colaboradores analizaron la compatibilización de una mezcla de polímeros mediante radiación gamma, utilizando un copolímero de PP/HDPE en la misma proporción que en el presente trabajo (80:20). Observaron la inmiscibilidad entre las partículas de PP y HDPE, lo cual lo atribuyeron a la naturaleza de ambos polímeros. Sin embargo, al aplicar irradiación gamma al copolímero, evidenciaron una mejora en los parámetros mecánicos de la mezcla, como resultado de los entrecruzamientos químicos y

físicos inducidos por la radiación. Esta mejora en la compatibilidad entre fases también se reflejó en las imágenes obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (43).

Por otra parte, se sabe que múltiples factores influyen los efectos de endurecimiento, como las propiedades de la matriz, la estructura de la mezcla polimérica y compatibilidad entre la fase continua y la de dispersión. Usualmente entre ambas fases se crea una estructura denominada "core shell", lo que incrementa las propiedades mecánicas del PP. Wenzhao Wang y col (38), representaron la afectación de la radiación como se observa en la Fig. 12.

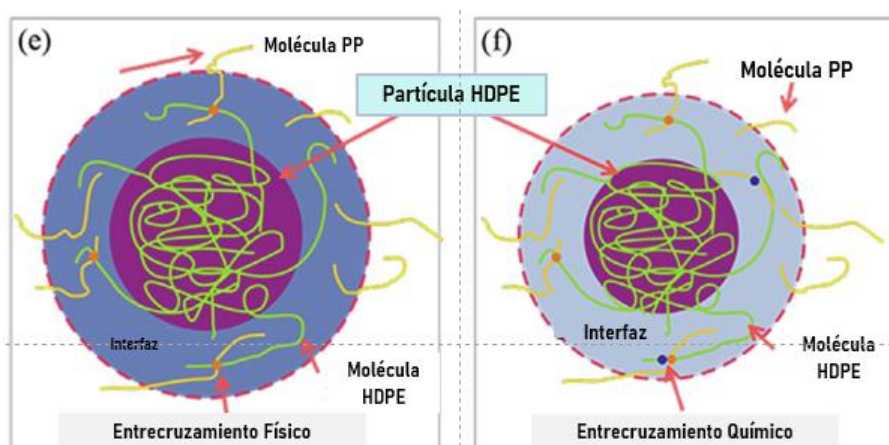
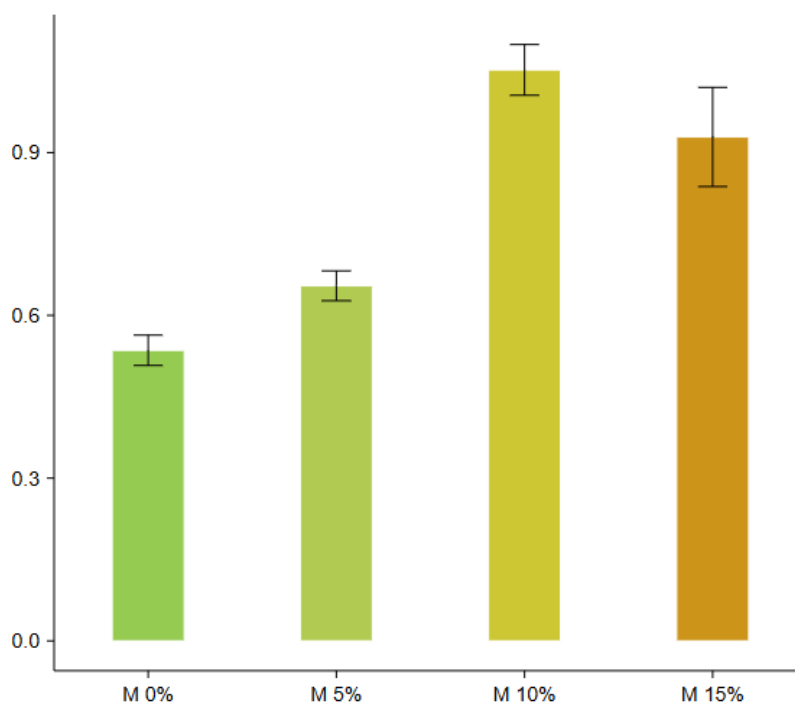


Figura 12. Posible mecanismo de la compatibilización en la mezcla PP/HDPE producto de Irradiación gamma (38).

Ensayo de impacto

Tanto el PP como el HDPE son termoplásticos que se caracterizan por su rigidez lo que conlleva a tener una baja resistencia al impacto, por lo que se adiciona caucho con la finalidad de poder solventar esta cuestión (44). En el siguiente gráfico se comparan los valores de resistencia al impacto, de las muestras con agregado de material irradiado en todos los casos, y diferentes cantidades de caucho.

Gráfica 7. Resistencia al impacto en muestras irradiadas



Los resultados se expresan en unidades de Energía [J].

En la siguiente tabla se analiza en más detalle el análisis estadístico de los valores obtenidos en el ensayo de impacto que se realizó a las muestras con adición de material irradiado:

Tabla 8. Resultados del ensayo de impacto expresados en valores medios y desvíos estándares de las muestras con agregado de 5% HDPEi. Los resultados se expresan en unidades de Energía [J].

	M 0%	M 5%	M 10%	M 15%
Promedio	0.5356 ^A	0.6545 ^A	1.0525 ^B	0.9289 ^B
DS	0.0279	0.0275	0.0468	0.0914

*Diferentes letras indican diferencias significativas ($p < 0,05$). M 0% (muestra sin agregado de caucho); M 5% (muestra con agregado de 5% de caucho); M 10% (muestra con agregado de 10% de caucho) y M 15% (muestra con agregado de 15% de caucho)

Se observan que los valores obtenidos en los ensayos de impacto aumentaron significativamente con el agregado de caucho, obteniendo el valor máximo con M 10% y M 15%, que no se diferenciaron estadísticamente. Tampoco se hallaron

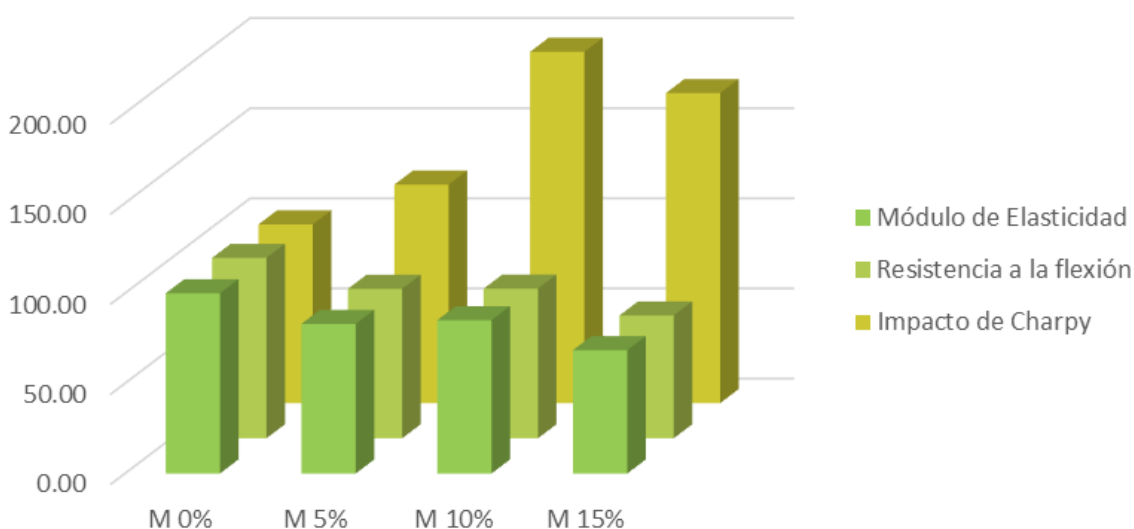
diferencias estadísticas entre los valores de la muestra control que no contenía caucho y la que tenía un 5%.

En coincidencia, el estudio de copolímeros formados por PP/HDPE/EPDM demostró la interacción sinérgica en el efecto sobre la resistencia al impacto. Según estos autores el HDPE tiene poca incidencia en este parámetro. Esto se atribuye a la dispersión de la fase de EPDM lo que forma la estructura de Core Shell y tiene mayor incidencia en el parámetro de impacto (44).

En contraste, Sonnier (42), estudio una mezcla de caucho con HDPE, donde observo que la mezcla de ambos polímeros decrecía la resistencia a la elongación al igual que los resultados de resistencia al impacto; pero que estos valores se incrementaron cuando se trabajó con HDPEi. También estudiaron la significancia de trabajar con diferentes dosis (0 kGy, 15kGy, 25 kGy, 50 kGy y 100 kGy), midiendo valores del ensayo de impacto significativamente mayores al trabajar con dosis más elevadas, siendo a 50 kGy el valor óptimo, dentro de las dosis estudiadas, ya que duplicando esta dosis se obtenían resultados equivalentes.

Por otro lado, Sonnier observó en sus ensayos con una mezcla de HDPE y caucho, una mejora sus propiedades mecánicas como la elongación y el ensayo de Charpy con el agregado de caucho, cuando se trabajó con dosis de entre 25 y 50 kGy (42). El módulo de Young disminuye ligeramente por la compatibilización que induce a la formación de entrecruzamientos que repercute tanto este parámetro como la resistencia al estiramiento. Además, se observó que el entrecruzamiento se volvía un factor predominante cuando se irradió con una dosis de 100 kGy. En nuestro trabajo, dichos efectos no fueron tan significativos, ya que la dosis aplicada fue mucho menor y, posiblemente, la forma de aplicar la radiación fue diferente. En nuestro caso, la radiación se aplicó solo al HDPE, mientras que en el estudio de Sonnier se irradiaron las mezclas.

Gráfica 8. Parámetros estudiados en muestras irradiadas expresados porcentualmente



Los valores son expresados porcentualmente considerando M 0% como el 100%.

Analizando los 3 parámetros en conjunto podemos notar la influencia de las partículas de caucho en la composición afecta las propiedades mecánicas y la mejora de la resistencia al impacto cuando el caucho se adiciona a una matriz de PP, resulta en una reducción de la rigidez que se asocia a la disminución del módulo de elasticidad, resistencia a la flexión y aumenta el límite elástico. Estas modificaciones de las propiedades mecánicas se asocian al tamaño de la partícula de caucho, a su composición y al contenido del mismo (5).

Como se mencionó previamente, se vio una disminución en la rigidez lo que se correlaciona con el aumento de la resistencia al impacto, es decir, con la mejora en la capacidad que tiene la mezcla de polímeros para soportar fuerzas repentinas sin romperse o agrietarse; Lo que es una cualidad deseable para la aplicación en los durmientes de trenes (44).

Varios factores se asocian al desempeño del copolímero, entre ellos están la cantidad de elastómero que forme parte de la matriz de PP y la distribución de sus partículas. Por ejemplo, una distribución homogénea de las partículas de caucho conllevara al grado más alto de dispersión de energía (5).

Conclusiones

La incorporación de polietileno de alta densidad irradiado a baja dosis contribuye a la compatibilización de la mezcla PP/HDPE con carbonato de calcio y caucho, mejorando la homogeneidad de la microestructura, lo que se observó en las fotografías SEM y se evidencia una mejora en las propiedades mecánicas del polímero compuesto reciclado con la radiación.

La adición de caucho incrementa la resistencia al impacto, aunque conlleva a una reducción en el módulo de Young y la resistencia a la flexión. No obstante, en las muestras con HDPE irradiado, esta disminución es menos pronunciada, lo que sugiere un efecto estabilizador y compatibilizante. La necesidad de mejorar la resistencia al impacto en aplicaciones estructurales, como los durmientes de tren (45), donde esta propiedad es esencial, lleva a explorar estrategias como la incorporación de hasta un 10% de caucho en formulaciones con un 5% de HDPEi. Esta combinación permite optimizar el desempeño mecánico del material sin comprometer significativamente las propiedades de tensión, ofreciendo una alternativa viable y sostenible mediante el uso de materiales reciclados y tratamientos de irradiación.

La investigación destaca la importancia de desarrollar materiales alternativos que optimicen el uso de residuos plásticos. En este contexto, la irradiación se presenta como una herramienta eficaz para mejorar las propiedades de polímeros reciclados, favoreciendo su incorporación en aplicaciones industriales sostenibles.

Bibliografía

1. IAEA. Nutech Plastics Una solución nuclear a la contaminación por plásticos. [Internet] 2021; 21-01671S. [citado 25 de noviembre de 2024]. Disponible en: https://www.iaea.org/sites/default/files/21/07/nutech-plastics_flyer_sp.pdf
2. Feldman D. Polymer History. Des Monomers Polym. 2008;11(1):1-15
3. OECD. Global Plastics Outlook: Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options [Internet]. Organisation for Economic Co-operation and Development; 2022 [citado 25 de noviembre de 2024]. Disponible en: https://www.oecd-ilibrary.org/environment/global-plastics-outlook_de747aef-en
4. Geyer R, Jambeck JR, Law KL. Production, use, and fate of all plastics ever made. Sci Adv. 2017;3(7):e1700782.
5. Kutz M. Applied Plastics Engineering Handbook: Processing and Materials. William Andrew; 2011. 661 p.
6. Ritchie H, Samborska V, Roser M. Plastic Pollution. Our World Data [Internet]. 2023 [citado 25 de noviembre de 2024]; Disponible en: <https://ourworldindata.org/plastic-pollution>
7. Gündoğdu S, Bour A, Köşker AR, Walther BA, Napierska D, Mihai FC, et al. Review of microplastics and chemical risk posed by plastic packaging on the marine environment to inform the Global Plastics Treaty. Sci Total Environ. 10 de octubre de 2024; 946:174000.
8. Argentina.gob.ar. Basura marina. [Internet]. 2021 [citado 25 de noviembre de 2024]. Disponible en: <https://www.argentina.gob.ar/ambiente/basuramarina>

9. Husaini DC, Mendez RK, Arzu M, Harris-Thurton L. Plastic Waste in Latin America and the Caribbean (LAC): Impact on the Environment and Public Health—A Systematic Review. *J Toxicol*. 2024;(1): 5698516.
10. Statista Daily Data [Internet]. 2023 [citado 6 de febrero de 2025]. Infografía: Los países que más contaminan con plástico los océanos. Disponible en: <https://es.statista.com/grafico/29504/cantidad-anual-de-residuos-plasticos-que-llegan-a-los-oceano-por-pais>
11. Sambyal P, Najmi P, Sharma D, Khoshbakhti E, Hosseini H, Milani AS, et al. Plastic recycling: Challenges and opportunities. *Can J Chem Eng* [Internet]. [citado 25 de enero de 2025];n/a(n/a). Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/cjce.25531>
12. Burillo G, Clough RL, Czvikovszky T, Guven O, Le Moel A, Liu W, et al. Polymer recycling: potential application of radiation technology. *Radiat Phys Chem*. 2002;64(1):41-51.
13. Makenji K. Mechanical methods for recycling waste composites. En: *Management, Recycling and Reuse of Waste Composites* [Internet]. Elsevier; 2010 [citado 25 de enero de 2025]. p. 217-52. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9781845694623500091>
14. Shen L, Worrell E. Chapter 31 - Plastic recycling. En: Meskers C, Worrell E, Reuter MA. *Handbook of Recycling (Segunda Edición)* [Internet]. Elsevier; 2024 [citado 20 de noviembre de 2024]. p. 497-510. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323855143000142>
15. Chen DC, Chen DF, Huang SM, Shyr WJ. The Investigation of Key Factors in Polypropylene Extrusion Molding Production Quality. *Appl Sci*. 2022;12(10):5122.
16. Geissdoerfer M, Savaget P, Bocken NMP, Hultink EJ. The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *J Clean Prod*. 2017;143: 757-68.

17. ECOPLAS. Los Plásticos en la Economía Circular ECOPLAS. 2023. [Internet]. [citado 25 de enero de 2025]. Disponible en: <https://ecoplas.org.ar/site2020/wp-content/uploads/2023/08/Guia-Los-Plasticos-en-la-Economia-Circular-ECOPLAS-2023-1.pdf>
18. Guia-Los-Plasticos-en-la-Economia-Circular-ECOPLAS-2023-1.pdf [Internet]. [citado 25 de enero de 2025]. Disponible en: <https://ecoplas.org.ar/site2020/wp-content/uploads/2023/08/Guia-Los-Plasticos-en-la-Economia-Circular-ECOPLAS-2023-1.pdf>
19. Andrady AL. Microplastics in the marine environment. Mar Pollut Bull. 2011;62(8):1596-605.
20. Argentina.gob.ar. Durmientes sintéticos: la CNRT participa en la aprobación del cambio de maderas por plástico reciclado en vías de tren. [Internet]. 2023 [citado 20 de noviembre de 2024]. Disponible en: <https://www.argentina.gob.ar/noticias/durmientes-sinteticos-la-cnrt-participa-en-la-aprobacion-del-cambio-de-maderas-por-plastico>
21. Zarrilli AG. Transformaciones ambientales y producción agroforestal: El Gran Chaco Argentino en el siglo XX. Rev História Debates E Tendências [Internet]. 2016 [citado 25 de noviembre de 2024];16(1). Disponible en: <http://seer.upf.br/index.php/rhdt/article/view/6253>
22. Frola F. Fabricación de durmientes sintéticos a partir de plásticos reciclados: alternativa sostenible para la recuperación del sistema ferroviario. RSO - Rev Segur Oper. 2023;(2):58-61.
23. Malcon P. S. Polymer Chemistry An Introduction 3º Edición [Internet]. 1999 [citado 20 de noviembre de 2024]. Disponible en: https://pearl-hifi.com/06_Lit_Archive/14_Books_Tech_Papers/03_Polymer_Science/03_Polymer_Chemistry__An_Introduction_3rd_Edin.pdf

24. Naikwadi AT, Sharma BK, Bhatt KD, Mahanwar PA. Gamma Radiation Processed Polymeric Materials for High Performance Applications: A Review. *Front Chem.* 2022; 10:837111.
25. Tamada M. Radiation Processing of Polymers and Its Applications. En: Kudo H, editor. *Radiation Applications* [Internet]. Singapore: Springer Singapore; 2018 [citado 19 de febrero de 2025]. p. 63-80. (An Advanced Course in Nuclear Engineering; vol. 07). Disponible en: http://link.springer.com/10.1007/978-981-10-7350-2_8
26. Hisham A. M. Polypropylene, UNIPOL Technology, Dow, Applications, Properties, Plastic, Polymer, Thermoplastic. 2016. *American Journal of Polymer Science*. DOI: 10.5923/j.ajps.20160601.01.
27. Landel RF, Nielsen LE. *Mechanical Properties of Polymers and Composites*. CRC Press; 1993. 573 p.
28. Gaspar-Cunha A, Covas JA, Sikora J. Optimization of Polymer Processing: A Review (Part II-Molding Technologies). *Materials*. 2022;15(3):1138.
29. Gaspar-Cunha A, Covas JA, Sikora J. Optimization of Polymer Processing: A Review (Part II-Molding Technologies). *Materials*. 1 de febrero de 2022;15(3):1138.
30. Vasile C, Pascu M. *Practical Guide to Polyethylene*. iSmithers Rapra Publishing; 2005. 192 p.
31. Thenepalli T, Jun AY, Han C, Ramakrishna C, Ahn JW. A strategy of precipitated calcium carbonate (CaCO₃) fillers for enhancing the mechanical properties of polypropylene polymers. *Korean J Chem Eng*. 2015;32(6):1009-22.
32. Leong YW, Ishak ZAMohd, Ariffin A. Mechanical and thermal properties of talc and calcium carbonate filled polypropylene hybrid composites. *J Appl Polym Sci*. 2004;91(5):3327-36

33. Sahebian S, Zebarjad SM, Khaki JV, Sajjadi SA. The effect of nano-sized calcium carbonate on thermodynamic parameters of HDPE. J Mater Process Technol. 2009;209(3):1310-7.
34. Zhang ZL, Zhang YH, Meng XH. Mechanical Properties of the Regenerated Rubber Prepared by Waste Tire Powders and Fillers. Adv Mater Res 2012; 487:33-7.
35. Karger-Kocsis J, Mészáros L, Bárány T. Ground tyre rubber (GTR) in thermoplastics, thermosets, and rubbers. J Mater Sci. 2013;48(1):1-38.
36. Cowell. What Makes A Complete Twin Screw Extruder? - COWELL EXTRUSION [Internet]. 2023 [citado 27 de enero de 2025]. Disponible en: <https://www.cowellextrusion.com/what-makes-a-complete-twin-screw-extruder/>
37. ResearchGate. Instron 3366 Universal Testing Machine. [Internet]. 2017. [citado 27 de enero de 2025]. Disponible en: https://www.researchgate.net/figure/instron-3366-Universal-Testing-Machine-Courtesy-of-Instron-Website_fig4_322011648
38. Wang W, Zhang X, Mao Z, Zhao W. Effects of gamma radiation on the impact strength of polypropylene (PP)/high density polyethylene (HDPE) blends. Results Phys. 2019; 12:2169-74.
39. Stehling FC, Huff T, Speed CS, Wissler G. Structure and properties of rubber-modified polypropylene impact blends. J Appl Polym Sci. 1981;26(8):2693-711.
40. Mujal-Rosas R, Marin-Genesca M, Orrit-Prat J, Rahhali A, Colom-Fajula X. Dielectric, mechanical, and thermal characterization of high-density polyethylene composites with ground tire rubber. J Thermoplast Compos Mater. 2012;25(5):537-59.

41. Vranjes N, Rek V. Effect of EPDM on Morphology, Mechanical Properties, Crystallization Behavior and Viscoelastic Properties of iPP+HDPE Blends. *Macromol Symp.* 2007;258(1):90-100.
42. Sonnier R, Massardier V, Clerc L, Lopez-Cuesta JM, Bergeret A. Reactive compatibilization of polymer blends by γ -irradiation: Influence of the order of processing steps. *J Appl Polym Sci.* 2010;115(3):1710-7.
43. McKeen LW. The Effect of Long Term Thermal Exposure on Plastics and Elastomers. William Andrew; 2021. 346 p.
44. Zhou Y, Yin B, Li L peng, Yang M bo, Feng J min. Characterization of PP/EPDM/HDPE Ternary Blends: The Role of Two EPDM with Different Viscosity and Processing Method. *Polym-Plast Technol Eng.* 2012;51(10):983-90.
45. Ferdous W, Manalo A, Van Erp G, Aravinthan T, Kaewunruen S, Remennikov A. Composite railway sleepers – Recent developments, challenges and future prospects. *Compos Struct.* 2015;134:158-68.