UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DEL POLÍMERO PET-G-PEGMEMA MEDIANTE RADIACIÓN GAMMA PARA SU USO COMO MATERIAL CON PROPIEDADES DE ANTIFOULING

T E S I N A

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE :

INGENIERO QUÍMICO

P R E S E N T A:

ESTEBAN EMILIANO CASTRO ÁVILA

JURADO DE EXAMEN

DIRECTORA: DRA. SOFÍA GUILLERMINA BURILLO AMEZCUA

ASESOR: DR. LUIS ALBERTO VERDUZCO MORA

ASESOR: I.Q. ALEXIS MARCO ANTONIO ROMERO PÉREZ

SINODAL: MTRA. ATENEA JOSEFINA CHONG SANTIAGO

SINODAL: Q.A. EDUARDO GILES VELAZQUEZ

CIUDAD DE MÉXICO.

FECHA DE EXAMEN: 13/AGOSTO/2024

Universidad Nacional Autónoma de México
UNAM
Biblioteca Central
Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos.

Con especiales agradecimientos a Benjamín Leal, Luz María Escamilla, Enrique Palacios y a la Dra. Alejandra Ortega del ICN UNAM por la asistencia técnica recibida, al proyecto DGAPA-PAPIIT IN200322 por su apoyo financiero, a mis padres, quienes me han apoyado en todo, a mis hermanos quienes fueron una inspiración constante y a mis amigos.

Resumen.

En el ámbito de la ingeniería de materiales, la búsqueda de polímeros con mejores propiedades y funciones específicas es un objetivo constante para satisfacer demandas en diversas aplicaciones industriales y biomédicas. El polietilentereftalato (PET) es ampliamente usado en envases, fibras y películas por su alta resistencia mecánica y térmica. Sin embargo, su uso se limita en algunas aplicaciones, principalmente a envases de alimentos y botellas. Para superar esto, modificar el PET con monómeros hidrofílicos y biofuncionales es una estrategia prometedora. El polietilenglicol metileter metacrilato (PEGMEMA) destaca entre estos por su hidrofilicidad y biocompatibilidad, haciendo que sea atractivo para aplicaciones biomédicas y farmacéuticas. La preirradiación oxidativa genera radicales en la superficie del PET, facilitando el injerto del PEGMEMA durante la irradiación gamma. Esta estrategia mejora la compatibilidad del PET con sistemas acuosos, haciéndolo hidrofílico.

Este estudio se enfoca en la síntesis y optimización del PET-g-PEGMEMA por preirradiación oxidativa, así como en caracterizar y evaluar el copolímero resultante. Variables experimentales como dosis de radiación, concentración de PEGMEMA, temperatura, tiempo de reacción y tipo de solvente serán exploradas para optimizar las condiciones y obtener material mejorado. También se analizarán las caracterizaciones del material que determinarán sus posibles usos. A través de este estudio, se espera avanzar en el desarrollo de un material innovador con aplicaciones prácticas y beneficios para la sociedad e industria.

Introducción.

Dentro del ámbito de la química de radiaciones aplicada a polímeros, encontramos investigaciones recurrentes centradas en la búsqueda de materiales especializados para usos específicos. En esta instancia, se destaca el Polietilentereftalato como polímero base, ampliamente empleado en envases de alimentos por su biocompatibilidad y seguridad. Paralelamente, se considera el Polietilenglicol metileter metacrilato (PEGMEMA) para su injerto en el PET, con el objetivo de aprovechar su propiedad distintiva de "antifouling" o resistencia a la adhesión de microorganismos en la superficie del PET debido a su hidrofobicidad. Si logramos este injerto, se abrirían aplicaciones en la industria alimentaria, procesos específicos y material quirúrgico, como catéteres, aprovechando la biocompatibilidad del PET con el cuerpo humano y la capacidad del PEGMEMA de prevenir la adhesión bacteriana.

La radiación ionizante se ha aplicado en diversas industrias, incluso en la síntesis de polímeros a través de la técnica de "grafting" o injerto por radiación. Este proceso implica exponer el polímero base y el monómero a injertar (o, en nuestro caso, otro polímero) a la radiación ionizante, generando radicales libres en la cadena del polímero base que reaccionan con el monómero, formando un nuevo polímero. Sin embargo, la elección del material a injertar y la matriz de injerto pueden influir en la efectividad de un método sobre otro. Los métodos más comunes de injerto por radiación incluyen el injerto directo, la preirradiación y la preirradiación oxidativa. Los polímeros sintetizados con esta técnica ofrecen propiedades mejoradas y específicas, como resistencia a la corrosión, mejoras en sus propiedades mecánicas y resistencia a la radiación, haciéndolos ideales para aplicaciones industriales. Adicionalmente, esta técnica también se ha empleado en la formación y prevención de biofilms en superficies, según sea la necesidad y propiedades específicas de cada material.

Índice.

Agradecimientos **1**
Resumen **2**
Introducción **3**
Índice **4**
Marco teórico **6**
Química de radiaciones 6
Radiación ionizante 6
Radicales libres 7
Tiempo de vida media de los radicales libres 7
Química de Radiaciones 7
Radioactividad 8
Isótopos radioactivos 8
Cobalto-60 9
Monómeros 9
Síntesis de polímeros 9
Polímeros 10
Polietilenglicol metileter metacrilato 10
Polietilentereftalato 11
Radiación en polímeros 11
Injerto por radiación o radiation grafting 12
Métodos de injerto por radiación 14
Productos radiolíticos 14
Hidrofilicidad e hidrofobicidad 15
Antibiofouling o antibioadherencia 15
Solventes 16
Tolueno 16
Dimetil sulfóxido 17
Dimetil formamida 17
Isopropanol 18
Etanol 18
Planteamiento del problema y pregunta de investigación **20**
Hipótesis **20**
Objetivo general **20**
Objetivos particulares 20
Materiales, Métodos y Diseño de estudio **20**
Materiales 21
Universo (Población o muestra) 21
Variables 21
Técnicas o Instrumentos **22**
Método de injerto (Preirradiación oxidativa) 22

Pruebas de hinchamiento....26
Ángulo de contacto....27
Análisis Termogravimétrico.... 28
Análisis Infrarrojo....29
Resultados....30
Tablas....30
Gráficas....33
Caracterizaciones.... 40
FTIR.... 40
Ángulo de contacto....42
TGA....44
Conclusiones....46
Anexo 1....47
Referencias....48

Marco teórico.

Química de radiaciones.

La química de radiaciones es la rama de la química que se encarga de estudiar los efectos de la radiación ionizante sobre los materiales y los procesos químicos. La radiación ionizante es una forma de energía que puede ionizar átomos y moléculas, lo que significa que puede arrancar electrones de sus orbitales y producir iones cargados *(Ivanov & Koroleva, 1991)*.

En la química de radiaciones, se estudian los efectos de la radiación sobre los materiales, como polímeros, plásticos, vidrios, metales y otros materiales que se utilizan en la industria y en la medicina. También se estudia el comportamiento de los radicales libres y las especies reactivas generadas por la radiación en los procesos químicos, como la síntesis de compuestos químicos y la polimerización.

La química de radiaciones es también un área interdisciplinaria que combina la química, la física, la biología y la ingeniería. Los conocimientos y las técnicas desarrolladas en la química de radiaciones se aplican en una amplia gama de áreas, como la medicina nuclear, la industria alimentaria, la industria química y la industria del petróleo, entre otras *(Belloni et al., 2012)*.

Radiación ionizante.

La radiación ionizante es un tipo de radiación electromagnética o partículas subatómicas que tienen suficiente energía para ionizar átomos y moléculas, es decir, para arrancar electrones de sus orbitales y producir iones cargados. Esta radiación puede ser generada de forma natural, como en el caso de la radiación cósmica, la radiación solar y la radiación terrestre, o de forma artificial, como en la radiación producida por reactores nucleares, o por isótopos radiactivos como el Co-60 y Cs-137, así como en la radiación utilizados en la medicina nuclear y la radioterapia *(Navarrete y Cabrera, 1993)*.

Los efectos de la radiación ionizante sobre los seres vivos y los materiales dependen de varios factores, como el tipo de radiación, la energía de la radiación, la duración de la exposición y la sensibilidad del organismo o material a la radiación. Los efectos a corto plazo de la exposición a la radiación ionizante pueden incluir quemaduras, náuseas y otros síntomas similares a los de la radiación solar intensa. A largo plazo, la exposición a la radiación ionizante puede aumentar el riesgo de desarrollar cáncer y otros trastornos de salud.

Debido a los riesgos asociados con la exposición a la radiación ionizante, se utilizan medidas de protección y seguridad en todas las áreas donde se utiliza esta radiación, desde la industria nuclear hasta la medicina nuclear. Esto incluye la protección personal, la contención de la radiación y la eliminación segura de los residuos radiactivos *(Braestrup & Mooney, 1958)*.

Radicales libres.

Los radicales libres son moléculas o átomos que tienen un electrón no apareado en su capa externa. Esto les confiere una gran reactividad, ya que los electrones tienden a estar emparejados y los radicales libres buscan emparejar su electrón no apareado con otro electrón. Esta reactividad los hace capaces de reaccionar con otras moléculas y átomos en una amplia variedad de procesos químicos, tanto beneficiosos como perjudiciales. *(Navarrete & Cabrera, 1993; Makuchi & Cheng, 2012)*

Los radicales libres también son importantes en la industria y en la síntesis química, donde se utilizan para llevar a cabo reacciones de oxidación y polimerización.

Tiempo de vida media de los radicales libres.

El tiempo de vida media de los radicales libres es el tiempo que tarda la mitad de los radicales en una muestra en reaccionar o descomponerse. El cálculo teórico del tiempo de vida media de los radicales se realiza a través de la teoría cinética de las reacciones químicas. Este parámetro es importante en diversas áreas de la química, incluyendo la polimerización por radicales libres y la radiólisis de materiales. *(Ashfaq et al., 2020; Ivanov & Koroleva, 1991)*

El tiempo de vida media de los radicales libres es un parámetro importante a considerar en el proceso de injerto por el método de preirradiación o preirradiación oxidativa ya que determina la velocidad a la que los radicales libres se descomponen en el polímero antes de reaccionar con el monómero, lo que a su vez afecta la eficiencia del proceso de injerto *(Mariani et al., 2007)*. Si el tiempo de vida media de los radicales libres es demasiado corto, puede ser difícil lograr una alta eficiencia de injerto, ya que los radicales libres se descomponen antes de poder reaccionar con el monómero o polímero a injertar.

Química de Radiaciones.

La química de radiaciones es una rama de la química que se ocupa del estudio de la radiactividad y sus efectos químicos. Esta disciplina se enfoca en la investigación de la estructura, las propiedades y la reactividad de los átomos radiactivos, los isótopos y las partículas subatómicas, y cómo interactúan con los compuestos químicos. *(Battacharya, 2000; Clough, 2001)*

La química de radiaciones es una disciplina fundamental para la investigación en la física nuclear, la medicina nuclear, la geología, la biología y la química de materiales. En la radioquímica, se estudia cómo la radiactividad puede cambiar la estructura química de un compuesto y cómo puede ser utilizado para desarrollar y entender una amplia gama de procesos químicos. *(Navarrete & Cabrera, 1991)*

Los radioisótopos se utilizan en la investigación científica, la industria y la medicina, incluyendo la terapia y el diagnóstico de enfermedades. Además, la química de radiaciones

es importante para la seguridad nuclear, ya que se utiliza para medir y controlar la radiación en la producción y el manejo de materiales nucleares.

Radioactividad.

La radioactividad es un proceso natural de desintegración en el que un núcleo atómico inestable emite radiación en forma de partículas y/u ondas electromagnéticas con el fin de alcanzar un estado más estable. Este proceso se produce en los elementos químicos que tienen un núcleo inestable debido a un desequilibrio entre las fuerzas nucleares fuertes (que mantienen unidos los protones y neutrones del núcleo) y las fuerzas electromagnéticas repulsivas (entre los protones) *(Friedlander et al., 1981).*

Los núcleos inestables pueden emitir tres tipos de radiación: partículas alfa (núcleos de helio), partículas beta (electrones o positrones) y rayos gamma (ondas electromagnéticas de alta energía). Este proceso de emisión de radiación es aleatorio, lo que significa que no se puede predecir cuándo se producirá la desintegración de un núcleo específico. *(Battacharya, 2000)*

La radioactividad es importante en muchos campos, incluyendo la medicina, la energía nuclear, la investigación científica y la datación de materiales antiguos. Por ejemplo, en medicina, se utilizan isótopos radiactivos para diagnóstico y tratamiento de enfermedades. En la energía nuclear, se recurre a la fisión nuclear para generar energía eléctrica. En la investigación científica, la radioactividad es utilizada para estudiar la estructura atómica y la física de partículas subatómicas.

Isótopos radioactivos.

Los isótopos radiactivos son átomos con núcleos inestables y emiten partículas subatómicas o radiación electromagnética para alcanzar la estabilidad nuclear. Los isótopos radioactivos se encuentran naturalmente en la Tierra, en los alimentos y en los cuerpos vivos. También pueden ser creados artificialmente en los laboratorios *(Jarret, 2018).*

Los isótopos radioactivos tienen muchos usos en la ciencia, la medicina y la industria. En la medicina, se utilizan isótopos radiactivos para el diagnóstico y tratamiento de enfermedades. Por ejemplo, se pueden utilizar para la identificación de tumores o para la destrucción de células cancerosas. En la industria, los isótopos radioactivos se utilizan para medir la densidad, espesor, humedad y otros parámetros de los materiales *(Belloni et al., 2012).* La reacción general que se produce en los isótopos radioactivos es la emisión de partículas subatómicas o radiación electromagnética para lograr la estabilidad nuclear. Estos procesos se conocen como desintegración radiactiva. La desintegración puede ser alfa, beta o gamma, dependiendo del tipo de partícula que se emita. La desintegración alfa ocurre cuando el núcleo del átomo emite una partícula alfa, que está compuesta por dos protones y dos neutrones. La desintegración beta se produce cuando el núcleo emite una partícula beta, que puede ser un electrón o un positrón. La desintegración gamma implica la emisión de radiación electromagnética de alta energía *(Jarret, 2018)*.

Cobalto-60.

El Cobalto-60 (Co-60) es un isótopo radiactivo del cobalto que se produce artificialmente mediante la radiación del isótopo natural de cobalto-59 con neutrones térmicos, en un reactor nuclear. La exposición al Co-60 puede tener efectos nocivos en la salud debido a su alta energía de radiación y larga vida media. Sin embargo, a pesar de sus riesgos, el Co-60 tiene varios usos importantes en la industria y la medicina. En la industria, se utiliza como fuente de radiación en la irradiación de alimentos para prolongar su vida útil y evitar la contaminación microbiana. También se utiliza en la radiografía industrial para detectar defectos en materiales y componentes (*Braestrup & Mooney, 1958; Hochanadel, 1952)*. Es de señalar que existen fuentes o equipos de irradiación gamma de Co-60 con máximas condiciones de seguridad, que evitan cualquier exposición mayor a la dosis de radiación permitida en los seres vivos y son muy seguras. En medicina, el Co-60 se utiliza en la radioterapia para tratar el cáncer. Se puede utilizar para irradiar tumores localizados, como en el caso de la braquiterapia, o para irradiar todo el cuerpo en el caso de la radioterapia de haz externo. La radiación del Co-60 puede dañar las células cancerosas y reducir o eliminar el tumor *(Schreiner et al., 2009)*.

Monómeros.

Los monómeros son moléculas pequeñas y simples que pueden unirse mediante enlaces covalentes para formar una molécula más grande y compleja llamada polímero. Los monómeros se caracterizan por tener una o varias unidades repetitivas, que se pueden unir en una reacción química conocida como polimerización *(Ashfaq et al., 2020)*. La mayoría de los polímeros naturales y sintéticos están compuestos por monómeros. Por ejemplo, la proteína es un polímero que está formado por aminoácidos como monómeros, y el plástico es un polímero sintético que se forma a partir de monómeros como el etileno.

Los monómeros pueden ser orgánicos o inorgánicos, y su estructura química influye en las propiedades del polímero resultante *(Gao & Yan, 2004)*. Los monómeros son importantes en la química de los polímeros, ya que permiten la síntesis de materiales con propiedades y características específicas que se adaptan a diferentes aplicaciones en la industria y en la vida cotidiana.

Síntesis de polímeros.

La síntesis de polímeros es el proceso por el que se producen polímeros a partir de monómeros. La síntesis puede hacerse con diferentes métodos y técnicas, dependiendo del tipo de polímero que se desee obtener. Uno de los métodos más comunes para la síntesis de polímeros es la polimerización por adición *(Sadasivan et al., 2023)*. Este método implica la reacción química de monómeros insaturados, como alquenos, dienos y alquinos, con un iniciador que provoca la formación de radicales libres. Estos radicales libres se combinan con los monómeros para formar una cadena polimérica.

Otro método de síntesis de polímeros es la polimerización por condensación. Este método implica la reacción química de dos o más monómeros que contienen grupos funcionales reactivos, como los grupos carboxilo y los grupos amino. Estos grupos funcionales reaccionan entre sí, eliminando una molécula pequeña, como agua, y formando enlaces covalentes para crear una cadena polimérica.

Además, existen otros métodos de síntesis de polímeros, como la polimerización por injerto, la polimerización por copolimerización y la polimerización por apertura de anillo *(Young & Lovell, 2011)*. La síntesis de polímeros puede hacerse a diferentes escalas, desde pequeñas cantidades en un laboratorio hasta grandes cantidades en una planta industrial. Además, el proceso de síntesis de polímeros puede ser modificado para obtener diferentes propiedades y características en el polímero final, lo que permite la producción de polímeros para una amplia gama de aplicaciones y usos en diferentes sectores industriales (*Saldivar-Guerra & Vivaldo-Lima, 2013)*.

Polímeros.

Los polímeros son moléculas grandes compuestas por la repetición de unidades más pequeñas llamadas monómeros. Los polímeros son comunes en la naturaleza, y se encuentran en una amplia variedad de materiales como proteínas, ADN y celulosa. También se pueden sintetizar artificialmente y se usan en muchos productos y aplicaciones de la industria y en la vida cotidiana, como plásticos, fibras sintéticas, adhesivos, recubrimientos, entre otros (Gao & Yan, 2004).

La estructura química de los polímeros influye en sus propiedades físicas y químicas, como la densidad, la solubilidad, la elasticidad, la resistencia mecánica, la resistencia a la corrosión y la conductividad eléctrica. Los polímeros pueden ser termoplásticos, que se pueden fundir y moldear a altas temperaturas, o termoestables, que se vuelven irreversiblemente rígidos y resistentes después de ser moldeados y curados *(Sadasivan et al., 2023)*. Los polímeros son un campo de investigación y desarrollo importante en la química de materiales, y se están investigando constantemente nuevos materiales y aplicaciones. Además, el impacto ambiental de los polímeros en la producción y el desecho es un tema de preocupación, y se están buscando alternativas más sostenibles y biodegradables.

Polietilenglicol metileter metacrilato.

El polietilenglicol metileter metacrilato (PEGMEMA) es un polìmero derivado del metacrilato que se utiliza ampliamente en la síntesis de polímeros y la modificación de superficies *(Abednejad et al., 2014; Xu et al., 2018)*. Es también utilizado para la carga de fármacos que restringen la proliferación de microorganismos *(Chang et al., 2016)*. Su síntesis generalmente implica la reacción de un éter de polietilenglicol (PEG) con cloruro de metacrililo en presencia de un catalizador. La estructura química del PEGMEMA incluye un grupo metacrilato y un grupo éter de PEG, lo que lo hace altamente reactivo en procesos de injerto de polímeros *(Sadasivan et al., 2023; Saldivar-Guerra & Vivaldo-Lima, 2013)*. El

PEGMEMA se utiliza comúnmente en la síntesis de polímeros para mejorar las propiedades de un material como la estabilidad y la biocompatibilidad, siendo esta una característica importante para el diseño de materiales biomédicos *(Choi et al., 1998)*. También se utiliza en la modificación de superficies para mejorar la adhesión y la capacidad de unión, así como en la fabricación de hidrogeles, recubrimientos y materiales biomédicos *(Chang et al., 2016)*. La característica que nos puede interesar más en este estudio es su propiedad de antifouling, que no permite que se adhieran las proteínas a su superficie, haciendo que las bacterias no tengan las condiciones para adherirse *(Jing et al., 2012; Kingshott et al., 2003)*.

Polietilentereftalato.

El polietilentereftalato (PET) es un polímero termoplástico que se utiliza comúnmente en la fabricación de envases y botellas para alimentos, bebidas, productos farmacéuticos y cosméticos. Es un polímero lineal que se forma por la polimerización del ácido tereftálico y el etilenglicol *(Cruz & Zanin, 2005)*. Es un material transparente, resistente, ligero y de bajo costo que ha reemplazado a otros materiales como el vidrio, el aluminio y otros plásticos en la fabricación de envases. Además, es reciclable y tiene una alta resistencia al impacto, lo que lo hace ideal para su uso en aplicaciones donde se requiere resistencia y durabilidad; a su vez es resistente a altas dosis de radiación con lo cual es posible tener una amplia gama de opciones en cuanto a esta *(Mariani et al., 2007; Zaharescu & Ciuprina, 2005)*.

Este posee una alta biocompatibilidad con el cuerpo humano *(Gawlikowsky et al., 2020; Jafari et al., 2019; Yang et al., 2009)* además de que es un material barato, sin embargo, es relativamente difícil de injertar mediante radiación gamma. Es conveniente utilizar un material de alta pureza si se requiere sintetizar un material para uso biomédico *(Çaykara et al., 2020; Seitz et al., 1996)*, sin embargo, el uso de un PET reciclado tampoco se puede descartar puesto que al darle un tratamiento térmico o de algún otro tipo de purificación es posible obtener un PET de alta pureza, sería conveniente también realizar pruebas de biocompatibilidad si fuese el caso. Se han logrado sintetizar materiales por métodos diversos como plasma, blend o métodos químicos *(Chen & McCarthy, 1998; El-Saftawy et al., 2014; Meng et al; 2004)*.
Es posible también injertar mediante radiación gamma a esta base polimérica, a pesar de su alta estabilidad, modificando y mejorando así sus propiedades *(Ping et al., 2011; Wang et al., 2000)*.

Radiación en polímeros.

La radiación puede tener diferentes efectos en los polímeros, dependiendo del tipo de radiación, la dosis y la composición química del polímero *(Ashfaq et al., 2014)*. En general, la radiación puede provocar la rotura de los enlaces químicos en el polímero, lo que resulta en una disminución de la masa molecular y un cambio en las propiedades físicas y químicas del material *(Battacharya, 2000; Dargaville et al., 2003)*. La radiación también puede causar la formación de radicales libres en el polímero, que pueden provocar reacciones químicas adicionales y aumentar la degradación del material o su entrecruzamiento (reticulación). Por otro lado, la radiación también puede tener efectos positivos en los polímeros, como la

modificación de las propiedades del material para mejorar su resistencia, durabilidad y capacidad de absorción de energía *(Nasef & Güven, 2012)*.

La exposición a la radiación ionizante, como los rayos gamma y los electrones acelerados, puede tener un efecto especialmente significativo en los polímeros. La radiación ionizante puede causar daño molecular en los polímeros, lo que puede afectar a la estructura y a las propiedades del material. Además, la exposición prolongada a la radiación puede provocar la acumulación de defectos en el polímero, lo que puede resultar en una disminución de la resistencia mecánica y de la durabilidad del material *(Zaharescu & Ciuprina, 2005)*. En cuanto a su reticulación, mejora sus propiedades de resistencia térmica, propiedades mecánicas y de absorción.

Los efectos de la radiación en los polímeros pueden ser beneficiosos o perjudiciales, dependiendo de las condiciones de exposición y de las propiedades del material *(Hegazy et al., 2001)*.

Injerto por radiación o radiation grafting.

El injerto por radiación es un proceso de polimerización que involucra la unión covalente de un monómero a un polímero base mediante la exposición a la radiación ionizante, como los rayos gamma o los electrones acelerados *(Belloni & Mostafavi, 2012)*. Este proceso es utilizado en la síntesis de materiales compuestos, como membranas, recubrimientos y fibras, con propiedades específicas y mejoradas.

Durante el proceso de injerto, el polímero base se expone a la radiación ionizante, lo que produce radicales libres en la cadena del polímero *(Hegazy et al., 2001)*. Luego se introduce un monómero o polímero, que se une covalentemente a los radicales libres del polímero base para formar una nueva cadena polimérica. La reacción química que tiene lugar produce una nueva red polimérica que tiene propiedades diferentes a las del polímero base (generalmente propiedades de ambos).

Los materiales producidos mediante injerto por radiación tienen una amplia variedad de aplicaciones, como en la industria del agua y la energía, en la producción de materiales médicos y en la fabricación de productos electrónicos *(Clough, 2001)*. Las propiedades específicas de los materiales producidos mediante injerto por radiación se pueden ajustar mediante la elección cuidadosa de la matriz de injerto como del compuesto a injertar *(Ivanov & Koroleva, 1991)*.

Algunas de las principales complicaciones y variables que pueden surgir en un injerto por radiación ionizante entre dos polímeros son:

1. Dosis y tasa de radiación: La cantidad y la velocidad a la que se aplica la radiación pueden afectar la eficiencia del injerto y la calidad del polímero resultante.

2. Compatibilidad de los polímeros: Los que se injertarán deben ser compatibles para que se produzca una unión efectiva.

3. Concentración de los monómeros: La cantidad de monómeros utilizados para el injerto debe ser cuidadosamente controlada para evitar la sobrerreacción o la falta de reacción.

4. Presencia de otros compuestos: La presencia de otros compuestos en la solución, como agentes antioxidantes o disolventes, pueden interferir en la reacción de injerto.

5. Tiempo de reacción: El tiempo de exposición a la radiación y el tiempo de reacción después de la irradiación son importantes para obtener una alta eficiencia de injerto y una buena calidad del polímero resultante.

6. Temperatura: La temperatura a la que se lleva a cabo la reacción también puede afectar la eficiencia del injerto y la calidad del polímero resultante.

Dependiendo del polímero que se esté irradiando puede que tienda a pasar por un proceso de reticulación, como es el caso del PEGMEMA. La reticulación en polímeros por exposición a radiación ionizante es un proceso mediante el cual los polímeros se unen químicamente entre sí para formar una estructura tridimensional diferente, la cual es más larga y por consiguiente sus propiedades cambian *(Rydzek et al., 2012)*. Durante la exposición a la radiación ionizante, se forman radicales libres en los polímeros, que reaccionan con las moléculas vecinas para formar enlaces cruzados. Estos enlaces cruzados aumentan la fuerza y rigidez del polímero, lo que lo hace más resistente a la deformación y a la descomposición térmica. En casos en donde se encuentra un polímero en solución, o un monómero, que cumpla con la propiedad de reticularse en un inicio mediante la radiación, se forman hidrogeles, cuyas propiedades cambiarán dependiendo del tiempo de exposición, concentración y solvente *(Naikwadi et al., 2022)*.

El mecanismo de reticulación del PEGMEMA por radiación ionizante es complejo y depende de varias reacciones secundarias. En general, la radiación ionizante produce la formación de radicales libres en el PEGMEMA, que reaccionan con las moléculas de PEGMEMA cercanas, formando enlaces cruzados entre ellos. Estos enlaces cruzados son lo que forman la reticulación *(Van Brederode & Rodriguez, 1970)*.

También puede que tienda un polímero a degradarse, como es el caso del PET. La degradación en polímeros por exposición a radiación ionizante es un proceso en el cual los enlaces químicos que componen las cadenas poliméricas se rompen debido a la energía de las radiaciones ionizantes, como los rayos gamma o los electrones acelerados *(Chmiekwsky et al., 2005)*. La energía de las radiaciones ionizantes se transfiere a las moléculas del polímero y causa la ruptura de los enlaces en la cadena polimérica, lo que conduce a la disminución del peso molecular y la reducción de las propiedades mecánicas y físicas del material. Dependiendo de la dosis y la intensidad de la radiación, así como de la naturaleza del polímero, la degradación puede ser más o menos severa.

La degradación del PET por radiación ionizante es un proceso complejo que puede involucrar varios mecanismos. La radiación ionizante puede romper los enlaces químicos en la cadena del polímero, generando radicales libres que pueden reaccionar con oxígeno para producir especies reactivas de oxígeno, como el peróxido de hidrógeno y el superóxido. Estas especies reactivas pueden atacar la cadena del polímero y producir la degradación del PET *(Prasad et al., 2011)*.

Métodos de injerto por radiación.

Preirradiación.

En este proceso, se expone el sustrato polimérico a una dosis de radiación antes de sumergirlo en una solución de monómero. Durante la irradiación, se generan radicales libres en el polímero, los cuales pueden reaccionar con el monómero una vez sumergido en la solución. *(Ashfaq et al., 2020, Dargaville et al., 2003)*

Preirradiación oxidativa.

En este proceso, se expone el sustrato polimérico a una dosis de radiación, en presencia de oxígeno, con lo cual se forman peróxidos e hidroperóxidos, los cuales, al ser calentados a una temperatura óptima, diferente para cada polímero, se rompe la unión -O-O- del peróxido y forman radicales libres, los cuales inician la reacción de injerto. Cabe mencionar que estos peróxidos, aunque estables a temperatura ambiente, deben almacenarse en refrigerio hasta que se empiece la desgasificación y después la reacción. *(Ashfaq et al., 2020)*

Método directo.

En este proceso, tanto la matriz a injertar como la solución del monómero o polímero se irradian a la vez, ocasionando que la formación de radicales libres en ambos, así como la difusión en el medio, generen la reacción de injerto. Sin embargo, dependiendo de cada material, se debe tener cuidado con las dosis de irradiación pues para cada compuesto podría generarse ya sea una homopolimerización por los radicales libres presentes, esto debido a que algunos materiales prefieren reaccionar consigo mismos; o una degradación. En ambos casos el rendimiento de la reacción, lo cual se traduce al porcentaje de injerto, puede disminuir considerablemente. *(Ashfaq et al., 2020; Clough, 2001).*

Productos radiolíticos.

Los productos radiolíticos son las especies químicas producidas como resultado de la radiólisis, es decir, la ruptura de las moléculas por la interacción con la radiación ionizante. Estos productos pueden ser radicales libres, iones, moléculas excitadas y otros compuestos de baja masa molecular *(Belloni et al., 2012)*.

Por ejemplo, la radiólisis del agua se produce cuando la molécula de agua es sometida a radiación ionizante, lo que puede provocar la disociación de la molécula en especies químicas altamente reactivas. Los principales productos radiolíticos de la radiólisis del agua son el radical hidroxilo (·OH), el radical hidrógeno (H·), el ion hidrógeno (H+) y el ion hidróxido (OH-). El radical hidroxilo es altamente reactivo y puede reaccionar con otras moléculas presentes en la solución, incluyendo otros productos radiolíticos y los componentes de los polímeros *(Hochanadel, 1952)*. La formación de estos productos radiolíticos puede tener efectos importantes en la estabilidad química y las propiedades físicas de los materiales poliméricos.

El uso de solventes diferentes al agua, como mezclas de ellos, llevan a productos más variados, difíciles de estimar tanto en cantidad como en tipo. Sin embargo, es necesario

utilizar diferentes solventes pues, algunos de ellos, pueden hinchar la matriz (PET) favoreciendo el injerto. Es importante tener en cuenta que, si se utiliza agua u otro solvente con impurezas o contaminantes, la radiólisis podría generar productos radiolíticos adicionales.

Hidrofilicidad e hidrofobicidad.

La hidrofilicidad se refiere a la afinidad o capacidad de un material para interactuar y tener afinidad con el agua, lo cual modificará su capacidad de atraer, absorber o retener la misma *(Sun & Chen, 2016; Lai et al., 2006)*. En el contexto de la modificación de superficies para mejorar sus propiedades, el uso de materiales hidrofílicos implica la introducción de sustancias que favorecen la interacción con el agua, como el PEGMEMA. Esto puede generar una capa de hidratación en la superficie de la membrana, dificultando que las sustancias no deseadas se adhieran y formen incrustaciones *(Mohamed et al., 2020)*.

La hidrofobicidad, por otro lado, es la propiedad de repeler o resistir el agua. Un material hidrofóbico es aquel que no tiene afinidad por el agua y tiende a repelerla *(Hirvi & Pakkanen, 2007)*. Esta repulsión del agua se debe a la falta de polaridad en la superficie del material o a la presencia de sustancias químicas que no interactúan favorablemente con las moléculas de agua *(Lee et al., 1998)*.

Dependiendo de los objetivos al modificar una superficie, puede ser más conveniente una propiedad u otra. En el presente estudio, al buscar que el material adquiera propiedades antifouling, es preferible optar por volver el material hidrofílico mediante la modificación con radiación gamma. Esto implica que habrá una capa de hidratación en la superficie, lo cual hará que sea termodinámicamente desfavorable para los microorganismos en la superficie del material.

Antibiofouling o antibioadherencia.

La antibioadherencia es una propiedad de los materiales que previene la adhesión de bacterias y otros microorganismos a sus superficies. Esta propiedad es especialmente útil en la prevención de infecciones en implantes médicos y dispositivos biomédicos, ya que la adhesión de bacterias a estas superficies puede provocar infecciones y otros problemas de salud (*Huang & Ghasemi, 2020)*. La antibioadherencia se logra mediante la modificación de la superficie del material para hacerla más resistente a la adhesión de bacterias. Esta modificación puede ser física o química, y puede incluir la aplicación de revestimientos especiales, la modificación de la textura o la utilización de sustancias que inhiben la adhesión de bacterias *(He et al., 2021)*.

Una estrategia habitual para potenciar el rendimiento antibioadherente de los materiales consiste en modificarlas con materiales hidrofílicos. El propósito de este enfoque es prevenir la incrustación mediante la creación de una capa de hidratación fuertemente adherida, lo que dificulta termodinámicamente que las sustancias contaminantes desplacen las moléculas de agua *(Krishnan et al., 2008; Yebra et al., 2004)*.

Solventes.

Los solventes son sustancias líquidas capaces de disolver otras sustancias para formar una solución homogénea. En química, los solventes pueden ser utilizados para disolver, diluir o dispersar compuestos y facilitar así reacciones químicas, procesos de extracción o purificación de sustancias *(Reichardt, 2006)*.

En el contexto de la radiación gamma y el porcentaje de injerto en polímeros, el uso de solventes puede tener un efecto significativo. La radiación gamma se utiliza comúnmente para inducir la polimerización de monómeros y la formación de injertos en polímeros. Durante el proceso de irradiación, los polímeros se exponen a una fuente de radiación gamma, lo que provoca la formación de radicales libres en la estructura del polímero.

El uso de solventes puede afectar el porcentaje de injerto por radiación gamma de varias maneras *(Ranogajec, 2007)*:

1. Solubilidad del monómero, polímero o copolímero a injertar: El solvente puede afectar la solubilidad del monómero en la matriz polimérica. Una mejor solubilidad del monómero en el solvente puede permitir una distribución más uniforme de los radicales libres generados durante la irradiación, lo que puede aumentar el porcentaje de injerto.

2. Movilidad de los radicales libres: El solvente puede afectar la movilidad de los radicales libres generados durante la irradiación. Un solvente que proporciona una mayor movilidad de los radicales libres puede permitir una mayor difusión de los radicales hacia el polímero, lo que puede resultar en un mayor porcentaje de injerto.

3. Compatibilidad polímero-solvente: La compatibilidad entre el polímero y el solvente es importante para lograr una mezcla homogénea durante la irradiación. Un solvente que es compatible con el polímero puede mejorar la dispersión del monómero y los radicales libres en la matriz polimérica, lo que puede aumentar el porcentaje de injerto.

Tolueno.

El tolueno es un compuesto químico ampliamente utilizado que pertenece a la familia de los hidrocarburos aromáticos. El tolueno se produce principalmente como subproducto en la fabricación de gasolina a partir del petróleo crudo. Se obtiene a través de la destilación fraccionada del alquitrán de hulla y el petróleo crudo. También se puede producir a partir de otras materias primas como el benceno.

El tolueno puede tener efectos perjudiciales para la salud humana en caso de exposición prolongada o en concentraciones elevadas. La inhalación de vapores de tolueno puede causar irritación en los ojos y el tracto respiratorio. Además, la exposición repetida puede afectar el sistema nervioso central, causando síntomas como mareos, dolores de cabeza y confusión.

El tolueno es volátil y puede ser liberado al aire durante su producción, uso y transporte. En el aire, puede contribuir a la formación de smog y contaminantes atmosféricos. Si se vierte

en el agua, puede contaminar cuerpos de agua y afectar la vida acuática. No se considera un compuesto altamente persistente en el medio ambiente (Comyn, 1997).

El tolueno podría tener interacciones con el PET y el PEGMEMA durante el proceso de síntesis o durante su uso, esto debido al hinchamiento y las interacciones con ambos materiales durante la reacción. Pueden afectar la reacción de polimerización y la calidad del producto final injertado. Las interacciones dependerán de las condiciones exactas de síntesis y uso. Es posible que se deban tomar medidas para eliminar o reducir cualquier posible residuo de solvente que pueda afectar las propiedades finales del material.

Dimetil sulfóxido.

El dimetil sulfóxido (DMSO) es un compuesto químico con diversas aplicaciones en la industria y la investigación. El DMSO se obtiene a partir de la oxidación del dimetil sulfuroso. Suele ser producido a nivel industrial mediante la reacción del dimetil sulfuroso con oxígeno. El DMSO resultante es luego purificado y refinado.

El DMSO es un solvente muy efectivo y puede penetrar en la piel y otras membranas biológicas con facilidad. Aunque se ha utilizado en aplicaciones médicas y farmacéuticas, también puede causar irritación en la piel y los ojos. La exposición prolongada y la inhalación de vapores de DMSO pueden causar efectos adversos en la salud, incluyendo dermatitis y otros problemas cutáneos.

El DMSO es miscible con agua y se disuelve fácilmente en ella. En el medio ambiente, puede degradarse y ser eliminado por procesos naturales, pero en concentraciones elevadas puede afectar negativamente a los organismos acuáticos. Su impacto depende de las concentraciones liberadas y la cantidad de exposición *(Comyn, 1997)*.

El DMSO es conocido por su capacidad para disolver una amplia gama de compuestos, incluyendo polímeros como el PET (a temperaturas mayores a 120 grados Celsius) y el PEGMEMA (a temperatura ambiente). En la síntesis y caracterización de injertos de polímeros, el DMSO podría utilizarse para disolver el PEGMEMA *(Sadasivan et al., 2023)*. Por su naturaleza de solvente, es importante considerar interacciones que podrían afectar la reacción y las propiedades finales del material. En particular, podría influir en la estabilidad de los polímeros. Dado que el DMSO puede ser utilizado en la síntesis y caracterización de materiales como el injerto de PEGMEMA en PET, es crucial considerar cómo su uso podría influir en los resultados y en las propiedades deseadas del material.

Dimetil formamida.

La dimetil formamida (DMF) es un compuesto químico utilizado en diversas aplicaciones industriales y de investigación. La DMF se produce mediante la reacción de dimetilamina con monóxido de carbono en presencia de una base como el hidróxido de sodio. Este proceso se lleva a cabo bajo condiciones controladas para asegurar la formación adecuada de DMF.

La DMF es un solvente versátil que puede penetrar fácilmente en la piel y otras membranas biológicas. La exposición prolongada o repetida a altas concentraciones de DMF puede causar irritación en la piel y los ojos. La inhalación de vapores de DMF puede causar irritación respiratoria y afectar el sistema nervioso central. También se ha observado que la exposición ocupacional a concentraciones elevadas de DMF puede tener efectos adversos en la salud, incluyendo daños al hígado. La DMF es miscible con agua y puede ser tóxica para los organismos acuáticos en concentraciones elevadas. La liberación de DMF en el medio ambiente puede tener impactos negativos, especialmente en cuerpos de agua *(Comyn, 1997)*.

La DMF es conocida por su capacidad para disolver una amplia gama de compuestos, incluyendo polímeros como el PET (a altas temperaturas) y el PEGMEMA. En la síntesis y caracterización de injertos de polímeros, la DMF podría utilizarse como solvente para disolver el PEGMEMA. Al igual que con otros solventes, es importante considerar posibles interacciones que podrían influir en la reacción y en las propiedades finales del material *(Sadasivan et al., 2023)*.

Isopropanol.

El isopropanol, también conocido como alcohol isopropílico o 2-propanol, es un compuesto químico muy utilizado en aplicaciones industriales, médicas y domésticas. El isopropanol se puede producir mediante la hidratación del propileno, un compuesto derivado del petróleo. En este proceso, el propileno reacciona con agua en presencia de un catalizador para producir isopropanol y otros subproductos. También se obtiene mediante procesos de fermentación con microorganismos.

El isopropanol es un alcohol que puede tener efectos tóxicos si se ingiere en grandes cantidades. Puede causar intoxicación, irritación en los ojos y la piel, y efectos en el sistema nervioso central. Sin embargo, es menos tóxico que el metanol. También se utiliza en desinfectantes y productos de limpieza para desinfectar superficies. El isopropanol puede ser tóxico para los organismos acuáticos en concentraciones elevadas. Su liberación en el medio ambiente puede tener impactos negativos en cuerpos de agua y ecosistemas acuáticos *(Comyn, 1997)*.

El isopropanol es un solvente ampliamente utilizado y puede tener interacciones con el PET y el PEGMEMA durante la síntesis de injertos. Al igual que con otros solventes, su uso podría influir en la reacción química y en las propiedades finales del material *(Sadasivan et al., 2023)*.

Etanol.

El etanol, conocido como alcohol etílico, es un compuesto químico muy utilizado en aplicaciones industriales, médicas y de consumo. El etanol se produce a través de la fermentación de materiales ricos en azúcares o almidón, como la caña de azúcar, el maíz y otros cultivos. En este proceso, los microorganismos, como levaduras, descomponen los

azúcares en alcohol y dióxido de carbono. Luego, el etanol se puede purificar y concentrar mediante destilación.

El etanol es el componente activo en bebidas alcohólicas y su consumo en exceso puede tener efectos dañinos para la salud. Puede causar intoxicación, daño al hígado, disminución de la función cognitiva y otros efectos adversos. En concentraciones altas, el etanol también puede ser tóxico. Es biodegradable y se degrada en el medio ambiente de manera natural. Sin embargo, la liberación excesiva de etanol en el medio ambiente puede tener impactos negativos, especialmente si contamina cuerpos de agua y suelos *(Comyn, 1997)*.

El etanol es un solvente ampliamente utilizado y puede tener interacciones con el PET y el PEGMEMA durante la síntesis de injertos. Al igual que con otros solventes, su uso podría influir en la reacción química y en las propiedades finales del material *(Sadasivan et al., 2023)*.

Planteamiento del problema y pregunta de investigación.

El PET-g-PEGMEMA al ser un material poco conocido, siendo este utilizado únicamente en áreas de la investigación y no de forma industrial o cotidiana, además de que no hay registro encontrado durante la investigación documental de la metodología (radiación ionizante) para la síntesis de este material sino únicamente mediante plasma o métodos químicos; es necesario determinar las condiciones para la síntesis del material por radiación ionizante, por lo que se requieren las pruebas correspondientes para el material injertado a diferentes dosis, a diferentes concentraciones, tiempos, temperaturas y solventes. Una vez, con las condiciones de síntesis del material, realizar pruebas de interés como el hinchamiento, el ángulo de contacto, Análisis Termogravimétrico (TGA) y Análisis Infrarrojo con Transformada de Fourier (FTIR), con lo que es posible determinar si las propiedades del material han cambiado.

¿Cuáles serán las condiciones de síntesis de este material y qué posibles aplicaciones tendrá con base en sus propiedades?

Hipótesis.

Se espera, de acuerdo con la teoría, que, al injertar una película de PET mediante radiación ionizante, ésta adquiera la propiedad antibioadherente del PEGMEMA, conservando la biocompatibilidad mostrada en el PET.

Objetivo general.

Determinar las condiciones del proceso de injerto de PEGMEMA en películas de PET mediante radiación ionizante por el método de preirradiación oxidativa, para producir un material con propiedades mejoradas antiadherentes.

Objetivos particulares.

- Encontrar las condiciones para la síntesis del material PET-g-PEGMEMA mediante radiación ionizante.
- Determinar las propiedades de este material.
- Con base en las propiedades, encontrar una aplicación adecuada que pueda mejorar algún sector, principalmente en el empaque de alimentos o como material biomédico.

Materiales, Métodos y Diseño de estudio.

Aquí se presenta el diseño del caso de estudio para el injerto de polietilenglicol metileter metacrilato (PEGMEMA) en polietilentereftalato (PET) mediante preirradiación oxidativa:

Materiales.

- Polietilentereftalato (PET) de alta pureza y de un grosor pequeño (0.1 mm) de GoodFelow, Cambridge.
- Polietilenglicol metileter metacrilato (PEGMEMA) de peso molecular de 300 (g/mol), provenientes de Sigma-Aldrich, México.
- Isopropanol
- Metanol
- Dimetil sulfóxido
- Dimetil formamida
- Tolueno

Universo (Población o muestra).

Las muestras serán películas de PET de 0.1 mm de grosor con medidas de 1.2 x 4 cm. Es un PET importado de Inglaterra, de la compañía GoodFellow Cambridge Limited. Color cristalino y orientado biaxialmente.

Variables.

En el caso de estudio para el injerto de polietilenglicol metil éter metacrilato (PEGMEMA) en polietilentereftalato (PET) mediante preirradiación oxidativa, se deben considerar las siguientes variables:

- Dosis de radiación: La dosis de radiación es un factor crítico que afecta la eficiencia del proceso de injerto y la estabilidad del material resultante. Se deben considerar diferentes dosis de radiación para determinar la dosis óptima que maximice la eficiencia del injerto y minimice la degradación del sustrato PET.
- Concentración del polímero a injertar: La concentración de PEGMEMA en la solución de monómero también es importante y debe ser controlada cuidadosamente para garantizar la máxima absorción del monómero en el sustrato PET.
- Temperatura de reacción: Ya que esta es una forma de aumentar la difusión, como de romper los peróxidos para así injertar el PEGMEMA en el PET, también es una variable importante a considerar.
- Tiempo de reacción: El tiempo de reacción, en este caso a temperatura constante en baño maría, es tanto un factor determinante para el porcentaje de injerto como para el costo del material.

A su vez es importante considerar que, debido a las limitaciones del costo del material, como del costo del uso del irradiador, los tiempos de irradiación y demás complicaciones que podrían presentarse, no se realizará un estudio de cada una de las combinaciones posibles de estas variables. Por lo que podría ser que haya una combinación, distinta a las presentadas en este estudio, que resultase en un mayor porcentaje de injerto. Sería interesante, en estudios posteriores, considerar esto.

Técnicas o Instrumentos.

Método de injerto (Preirradiación oxidativa).

Este método es un proceso de injerto de polímeros que se basa en la irradiación de un sustrato polimérico (PET) con radiación ionizante, como rayos gamma o electrones acelerados, con una fuente de radiación de Cobalto-60 en presencia de oxígeno. El procedimiento (Aliev et al., 2000; Ramirez-Fuentes et al., 2007; Sun & Chmielewsky, 2017) se puede describir de la siguiente manera:

1. Preparación de la matriz polìmerica: Se seleccionó polìmero adecuado, que mostró ser capaz de soportar la irradiación sin descomponerse o sufrir daños significativos incluso a dosis altas, como lo es el polietilentereftalato (PET). Se cortaron películas de PET en el tamaño y forma deseada para su posterior tratamiento. Se limpió y se secó para eliminar cualquier contaminación superficial con metanol y acetona en agitación constante durante una hora.
2. Preparación de la solución de PEGMEMA: Se preparó una solución del polímero en un disolvente adecuado, utilizando en primera instancia el tolueno debido a que en la bibliografía se reporta como un buen disolvente para el PEGMEMA y que además hincha al PET, por ello se optó por utilizarlo para la mayoría de las pruebas. Se hicieron los cálculos para 25 ml de solución, variando las concentraciones. Se vertió la cantidad de PEGMEMA deseada con una pipeta volumétrica y una perilla de succión de seguridad. Posteriormente se agregó el solvente hasta aforar a los 25 ml.
3. Soplado de ampolletas: Las películas de PET, previamente lavadas, secadas durante tres horas a –0.08 MPa y 60 °C (condiciones que se obtuvieron de manera experimental al medir el peso con respecto al tiempo, hasta que llegase a peso constante debido a la evaporación del solvente, a esa temperatura y presión de vacío), se dejaron enfriar, se pesaron (anotando en la bitácora los pesos y colocando etiquetas a los tubos de ensayo) y posteriormente se colocan en tubos de ensayo. Se cortaron tubos de vidrio del mismo largo de los tubos de ensayo, como se muestran en la figura 1 y se unieron mediante un soplete para formar así las ampolletas que contienen las películas de PET.

Figura 1. Tubos de ensayo con películas de PET dentro.

4. Irradiación de la matriz polimérica: La matriz o base polimérica (PET) se colocó en una cámara de irradiación en presencia de aire para el método de preirradiación oxidativa descrito en el marco teórico y se expuso a una fuente de radiación ionizante. La dosis de radiación fue controlada cuidadosamente para evitar la degradación excesiva del PET y maximizar la eficiencia del proceso de injerto. A su vez, se calculó el decaimiento radiactivo del Cobalto-60 mediante tablas de decaimiento y la posición específica dentro del irradiador del GAMMABEAM, en dónde se ha determinado por técnicas de dosimetría, independientes al presente estudio, la Intensidad en cada una de las posiciones a una posición determinada.
5. Se realizaron los cálculos correspondientes para determinar el tiempo, con la razón de dosis de rayos gamma de una fuente de Cobalto-60, tendríamos entonces que la intensidad inicial se puede expresar como:
   $Ao = 10.35\ KGy/hr$
   para una fecha del 29 de mayo del 2022. Donde Ao es la razón de dosis de radiación gamma inicial (antes del decaimiento). Este dato es proporcionado directamente del GAMMABEAM, quienes realizan periódicamente análisis de dosimetría para tener las intensidades correspondientes a cada posición en el irradiador, con lo que se puede realizar un ajuste, dependiendo del tiempo que haya transcurrido desde el día de la dosimetría.
   Se utilizó una tabla de decaimientos radiactivos (*Radioactive Decay correction factors*; U.S. Department of health, education, and welfare, radiological health), para el Cobalto-60, la cual se puede consultar en el anexo 1, obteniendo que para la siguiente ecuación: $A = Aoe^{-\lambda t} \quad . \quad . \quad . \quad (Ec.\ 1)$
   En donde A es la razón de dosis final, t es el tiempo en días y λ es constante; teniendo en cuenta la siguiente ecuación:

$F = e^{-\lambda t}$ . . . $(Ec.\ 2)$

en donde F es el factor de corrección que se encuentra en la tabla del anexo 1, el cual tiene un valor de 0.9166 para 240 días, el cual fue el tiempo transcurrido hasta este momento en la fecha del 29 de enero del 2023, sustituyendo en la Ecuación 1, se tiene que:

$A = AoF$ . . . $(Ec.\ 3)$

Con lo que entonces, la nueva razón de dosis después de este tiempo es de:

$A = 9.486\ KGy/hr$

Esta misma ecuación se utilizó para adaptar cada uno de los tiempos, con respecto al cambio de intensidad por el decaimiento del Cobalto 60, durante el tiempo en el que se desarrolló el proyecto.

6. Inmersión de la matriz en la solución del polímero a injertar: Después de la irradiación, la matriz polimérica se sumergió en la solución de monómero preparada, agregando con una jeringa de vidrio y una aguja por la boquilla de la ampolleta. La solución debe cubrir la película, por lo que se agregaron 6 ml de la solución de PEGMEMA en cada ampolleta.
7. Desgasificación: Las ampolletas con las películas y la solución se colocaron en la línea de vacío mostrada en la figura 2, se congelaron con nitrógeno líquido en un deware, vaciando desde uno de 4 L mostrado en la figura 3, se abrieron las llaves de la línea de vacío, conectadas mediante manguera a cada una de las ampolletas, durante 10 minutos, luego se cerró el vacío y se descongelaron cambiando de recipiente, por un vaso de precipitados de 1 L, con agua a temperatura ambiente. El agua dentro de los vasos de precipitados, también se pudo haber calentado por debajo de los 40 °C para evitar romper antes de tiempo los peróxidos formados durante la radiación y disminuyendo así el tiempo en el cambio de fase de la solución. Lo que se quiere con este procedimiento es crear una diferencia en la concentración del oxígeno dentro de la solución con respecto a la presión parcial del oxígeno dentro de la línea de vacío, la cual se observa en la figura 2. Por lo que hay una transferencia de masa por una vez que se ha descongelado la solución, se volvió a congelar y a abrir el vacío para un nuevo ciclo de desgasificación, en el ciclo número 5 se sellan las muestras con soplete, cuidando de no dejar pasar aire externo a la ampolleta.

Figura 2. Línea de vacío para desgasificación de ampolletas.

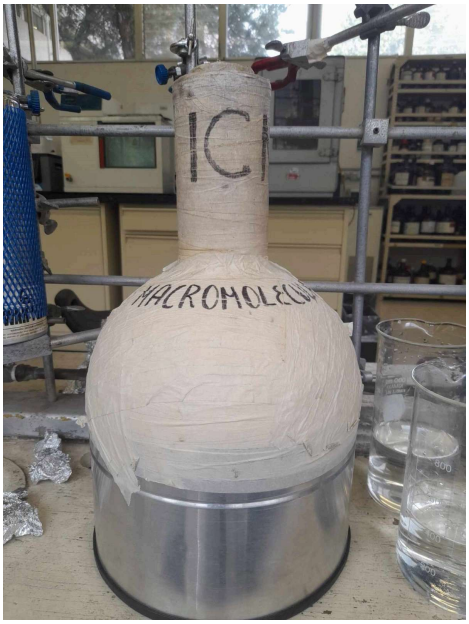

Figura 3. Deware contenedor de nitrógeno líquido de 4 litros.

8. Reacción: Con las ampolletas selladas, se pasaron al baño maría a cada temperatura que indicase cada prueba, durante el tiempo necesario de la reacción. En el presente estudio, la temperatura a la cual se mostró un mayor porcentaje de injerto fue de 80 °C. Es posible incrementar más la temperatura utilizando otro medio para mantener temperatura constante, como usando aceite vegetal para aumentar a 90 °C o más, considerando claro que el solvente no disuelva igual al polímero base al calentarlo.
9. Lavado y secado del material injertado: Cuando se completó el tiempo de reacción del injerto de PEGMEMA en PET, el sustrato polimérico fue lavado cuidadosamente en parrillas de agitación mostradas en la figura 4, para eliminar

cualquier exceso del material no injertado. Este lavado se puede realizar con el mismo solvente que se utilizó para la solución, sin embargo, por costos de material es posible utilizar etanol o metanol para cualquier lavado. Posteriormente, se retiró del solvente y se colocó en un frasco ventilado en la campana de extracción durante 30 minutos y posteriormente en secado al vacio a 55 °C y –0.08 MPa durante tres horas, se pesa y se obtiene el porcentaje de injerto con la siguiente ecuación:

$$\%Graft = \%Injerto = [(Wo - Wi)/Wo](100) \quad . \quad . \quad . \quad (Ec.\ 4)$$

Donde Wo es el peso inicial de la muestra, antes de irradiar y Wi es el peso de la muestra injertada.

Figura 4. Parrillas de agitación usadas para lavado de película injertada.

Pruebas de hinchamiento.

Las pruebas de hinchamiento son una técnica utilizada para evaluar si es que un polímero (PEGMEMA), que se ha unido a otro polímero (PET) durante el proceso de injerto por radiación, ha modificado las propiedades del material base (PET), aumentando o disminuyendo su hidrofilicidad. El procedimiento de esta prueba se puede describir de la siguiente manera:

1. Preparación de la muestra: Se tomó una muestra del polímero injertado, previamente lavado y secado al final del proceso de síntesis.
2. Inmersión en medio acuoso: Las piezas de la muestra se colocaron en un recipiente con un solvente específico, que es capaz de hinchar el polímero sin disolverlo. El solvente puede variar según el tipo de polímero utilizado y la naturaleza del monómero injertado. En el presente estudio, debido a que es de interés saber si el material ha aumentado su hidrofilicidad, se utilizó agua. La cantidad de agua requerida es la suficiente para cubrir en su totalidad el material, puesto que su velocidad y cantidad de hinchamiento no se verán afectadas.
3. Tiempo de hinchamiento: Las piezas de la muestra se dejaron en el solvente durante un tiempo determinado, en el presente estudio se realizaron pruebas de

hinchamiento de hasta 24 horas, para permitir que el disolvente penetre en el polímero y cause su hinchamiento. Al inicio, ya que es cuando la variación del peso es mayor, se tomaron medidas cada 5 minutos, luego cada 10, cada 30, cada 60 y así hasta haber concluido con el tiempo establecido, o hasta que el peso fuera constante, lo que indicaría el hinchamiento límite.

4. Extracción y pesaje: Después de cada tiempo de hinchamiento determinado, se extrajeron las piezas de la muestra del solvente y se eliminó cualquier exceso de solvente, esto puede ser con papel absorbente que no deje trazas de este en la película. Luego se pesaron cuidadosamente para determinar el aumento de peso causado por la absorción del solvente y se dejaron por otro periodo de tiempo hasta obtener un hinchamiento límite.

Ángulo de contacto.

El ángulo de contacto es una medida que se utiliza para caracterizar la humectabilidad de una superficie. Cabe mencionar que esta superficie debe estar completamente limpia y libre de impurezas. Si es necesario, se puede limpiar la superficie con metanol o algún otro disolvente adecuado y secarla completamente en una estufa de vacío. El procedimiento para el análisis del ángulo de contacto puede variar ligeramente dependiendo del equipo utilizado, pero en general se siguen los siguientes pasos:

1. Preparación de las muestras: Se tomó una película, previamente lavada y secada, se fijó en un portaobjetos utilizando cinta adhesiva por los dos lados, tratando de aplanar la misma con otro portaobjetos para tener una superficie lo más plana posible. Esto es para tener una mejor fotografía y que la medición del ángulo de contacto sea más consistente al no tener que considerar una curvatura grande en la superficie.
2. Adición de la gota en la superficie: Se colocó una pequeña cantidad de agua en la superficie de la muestra, utilizando un dispensador de líquidos incluido en el equipo. Debe ser una gota que caiga por gravedad para que la medición sea adecuada, por lo que una apertura ligera y cuidadosa de la perilla del dispensador es necesaria.
3. Captura de imagen y medida: Se capturó una imagen de la gota de líquido en la superficie, utilizando una cámara de alta resolución, incorporada al equipo, en el momento justo después de que ha caído. Es importante que la imagen sea lo suficientemente clara y nítida para permitir la medición precisa del ángulo de contacto con el software. Otro factor para considerar es el tiempo, ya que si se dejan pasar unos segundos la gota podría deformarse afectando la medición de igual manera. Posteriormente, en la imagen, se seleccionó la superficie del material manualmente, así como los límites laterales de la gota para que el programa realizara la medición. Estos puntos son también conocidos como puntos de contacto y están a cada lado de la gota.
4. Análisis, guardado de datos y repetición: Se optó por utilizar las imágenes mostradas en la fig 14 y 15 mostradas en los resultados. En esta etapa se debe decidir si la foto es lo suficientemente clara como para considerarse, igual que no debe aparecer otra gota en la imagen. Las medidas del ángulo de contacto

pueden variar ligeramente entre una medición y otra (hacia arriba y hacia abajo) por lo que a pesar de que es necesario repetir el proceso mínimo 3 veces para obtener una medida precisa del ángulo de contacto, es probable que se necesiten más mediciones. Otro factor para considerar es la absorción del agua en el material, por lo que no se debe realizar la prueba en el mismo lugar dos veces sin antes haber lavado y secado nuevamente. Sin embargo, al ser gotas pequeñas se tuvo espacio para manipular una sola película sin la necesidad de interrumpir las pruebas. Entre cada medición de cada una de las gotas se limpió con papel para evitar hinchar la película.

El resultado final es un ángulo de contacto que puede variar de 0 a 90 grados. Un ángulo de contacto cercano a 0 grados indica que la superficie es altamente hidrofílica y el líquido se extenderá fácilmente sobre ella. Por otro lado, un ángulo de contacto cercano a 90 grados indica que la superficie es poco hidrofílica y el líquido se mantendrá en una forma esférica y no se extenderá fácilmente.

Análisis Termogravimétrico.

El análisis termogravimétrico (TGA, por sus siglas en inglés) es una técnica de análisis térmico que se utiliza para medir los cambios en la masa de una muestra a medida que se somete a un aumento controlado de temperatura en un ambiente inerte. El procedimiento general para el análisis termogravimétrico es el siguiente:

1. Preparar la muestra para el análisis: Se obtuvo una muestra del material injertado, previamente lavado y secado. Debido a que para esta prueba es necesario que la muestra esté lo más libre de solventes posible, se secó una vez más durante al menos 24 horas en una incubadora a 50 °C.
2. Pesado y cortado de muestra: Para esta caracterización fue necesario colocar una muestra de entre 10 mg y 25 mg en el TGA para tener una medición más clara. Previamente se pesaron pequeños trozos recortados, para tener esta cantidad. La muestra se colocó en una pequeña charola de platino, previamente tarada en el equipo, cuidando que los trozos del material no sobresalieran de la charola.
3. Establecer parámetros y comenzar la medición: Los parámetros de medición incluyen la tasa de aumento de temperatura (10 °C por minuto), la temperatura inicial (ambiente) y final (de 600 °C), el gas utilizado para crear la atmósfera inerte (Nitrógeno). Una vez fijados estos valores, el equipo recogió automáticamente la charola y se selló en el horno de este donde se midieron los cambios del peso con respecto al tiempo.
4. Análisis e interpretación: Durante el tiempo de la prueba, la muestra se sometió a un aumento controlado de temperatura, mientras se medía la masa de la muestra en tiempo real. El TGA registró la pérdida de masa de la muestra a medida que se sometió a temperaturas cada vez más altas. Es importante mantener monitoreado el equipo durante todo este tiempo por si hay alguna falla

o perdida repentina de masa que altere los resultados y por lo que la prueba debería de detenerse. Una vez alcanzada la temperatura de 600 °C, momento en el cual prácticamente toda la película ha sufrido una descomposición térmica y únicamente quedan trazas de carbón, se examinaron los resultados del TGA.

La curva de termogravimetría resultante muestra la pérdida de masa de la muestra en función de la temperatura. Esta curva puede proporcionar información sobre la estabilidad térmica de la muestra, la descomposición de la muestra, la oxidación, la degradación y otros cambios en la composición de la muestra a medida que se somete a temperaturas más altas, con lo cual se buscará una comparativa del material puro y el material injertado.

Análisis Infrarrojo.

El análisis infrarrojo o FTIR (por sus siglas en inglés) es una técnica de análisis espectroscópico que se utiliza para identificar y analizar la composición química de una muestra mediante la medición de la absorción de la radiación infrarroja. El procedimiento general para el análisis infrarrojo es el siguiente:

1. Preparar la muestra para el análisis: Se lavó y secó una película del material, se limpió la punta de diamante del equipo con acetona y se hizo una medición de una línea base sin el material. La punta debe estar seca antes de comenzar.
2. Establecer los parámetros de medición: Se establecieron los parámetros para repeticiones realizadas por el equipo (16 en total por cada muestra). Esto nos ayudó a mostrar una figura más clara y precisa de los resultados obtenidos.
3. Realizar el análisis infrarrojo: Durante el análisis, se inició el equipo, teniendo en cuenta que la perilla no debe pasar de un 80% de torque (indicado en el programa integrado al equipo) puesto que ello podría dañar el equipo. Registra la cantidad de absorbancia, o transmitancia según se requiera, a una determinada longitud de onda. Luego de que el equipo realizó las repeticiones, se guardó el archivo con los datos obtenidos.
4. Analizar los resultados: Una vez obtenidos todos los resultados, se compararon FTIR de cada material, injertado y sin injertar, para buscar diferencias. El espectro infrarrojo muestra los picos de absorción de la radiación infrarroja en diferentes longitudes de onda. Cada pico de absorción representa una vibración molecular específica en la muestra. La interpretación de los picos de absorción en el espectro infrarrojo permite identificar los componentes químicos de la muestra, en concreto de cada grupo funcional. Si el polímero o monómero a injertar tuviese un grupo funcional distinto al de la matriz, aparecería ahora en el espectro infrarrojo.

Es importante mencionar que esta solo es una técnica cualitativa que no determina una cantidad en el porcentaje de injerto.

Resultados.

Tablas.

Tabla 1. Resultados de la síntesis del PET-g-PEGMEMA mediante radiación gamma por preirradiación oxidativa con una razón de dosis de 9 KGy/hr y Mn = 300.					
Dosis (KGy)	Concentración (%V/V)	Temperatura (°C)	Tiempo (horas)	Solvente	%Injerto
50	25%	60	20	Tolueno	0.85%
80					0.78%
100					1.05%
140					1.03%
150					1.05%
170					1.08%
180					1.72%
180					1.21%
180					1.47%
200					0.70%
100	6.25%	60	20	Tolueno	0.97%
	12.50%				0.76%
	12.50%				0.76%
	25.00%				1.05%
	40.00%				0.43%
	40.00%				0.31%
	50.00%				0.61%%
100	25%	25	20	Tolueno	0%
		50			0.59%
		60			1.05%
		65			1.59%
		70			1.63%
		80			3.69%
100	25%	80	9.5	Tolueno	2.55%
			20		3.69%
			26		3.65%

			30		3.64%
			40		3.63%
100	25%	80	20	Isopropanol	2.05%
				Tolueno	3.69%
				DMSO	5.42%
				DMSO	5.68%
				DMSO	5.49%
				DMSO	5.16%
				DMSO	5.60%
				Etanol	2.08%
				DMF	3.76%

Como se puede observar en la tabla 1, las condiciones de síntesis con mejor rendimiento para el material PET-g-PEGMEMA, son Dosis = 100 KGy, esto debido a que, mientras mayor sea la dosis, aumenta no solo el costo del material, sino el posible error en el cálculo del porcentaje de injerto debido a los tiempos de irradiación y que esta es una variable que no es del todo controlable, pues, se tiene que mandar al Gammabeam ubicado en el Instituto de ciencias nucleares (ICN) lo cual puede presentar variaciones dependiendo de los tiempos de irradiación de muestras de otros laboratorios. Para las condiciones de concentración tenemos que lo mejor es utilizar una solución al 25% en volumen/volumen usando DMSO como solvente. Aunque el DMSO puede disolver el PET, es a temperaturas más altas de las que se llega durante la reacción. En el caso de esta, tenemos que el mejor tiempo de reacción es a las 20 horas y la mejor temperatura es a 80 °C. Es posible que, aumentando la temperatura, quizá 10 o 20 grados más también se beneficie el porcentaje de injerto, sin embargo, como es bien sabido, el proceso de calentamiento influye directamente en el costo del material o producto final, relacionado directamente a la energía utilizada. Comoquiera, en un caso de estudio diferente, sería interesante comparar los costos de cada uno de los materiales contra sus beneficios y porcentajes de injerto.

Tabla 2. Porcentaje de hinchamiento del PET con respecto al tiempo.

Tiempo (min)	% Hinchamiento por cada muestra					
	1	2	3	4	5	Promedio
0	0	0	0	0	0	0
5	0.143	0	0.763	0	0.8	0.341
10	0.286	0.432	0.381	0.4	0.4	0.38
15	0.286	0.865	0.763	0.4	0.4	0.543
20	0.286	1.298	0.76	0.4	0.4	0.629
30	0.43	0.865	0.381	0.8	0.8	0.655

40	0.286	1.298	1.145	0.4	0.4	0.706
60	0.43	0.865	0.763	0.4	0.8	0.651
90	0.573	0.432	1.526	0.4	0.4	0.666
120	0.573	0.432	0.763	0.4	0.4	0.514
180	0.43	0.432	0.381	0.4	0.4	0.408
240	0.43	0.432	0.381	0.4	0.4	0.408
300	0.573	0.432	0.381	0.4	0.4	0.437

Tabla 3. Porcentaje de hinchamiento con respecto al tiempo del PET-g-PEGMEMA con 2.94% de injerto.

Tiempo (min)	% Hinchamiento por cada muestra					
	1	2	3	4	5	Promedio
0	0	0	0	0	0	0
5	0.144	0.5	0.436	0.393	0.492	0.393
10	0.144	1	0.873	0	0	0.403
15	0.432	1.5	0.436	0.393	0.985	0.749
20	0.432	1.5	0.436	0.393	0.492	0.651
30	0.144	1	0.873	0.393	0.985	0.679
40	0.432	1	0.873	0.787	0.985	0.815
60	0.432	1.5	0.436	0.787	1.477	0.926
90	0.577	1.5	0.436	0.787	0.985	0.857
120	0.865	1.5	0.873	0.393	0.985	0.923
180	0.721	1	0.873	0.393	0.985	0.794
240	0.721	1	0.873	0.787	0.985	0.873
300	0.721	1	0.873	0.393	0.985	0.794

Tabla 4. Porcentaje de hinchamiento con respecto al tiempo del PET-g-PEGMEMA con un 5.6% de injerto.

Tiempo (min)	% Hinchamiento por cada muestra					
	1	2	3	4	5	Promedio
0	0	0	0	0	0	0
5	0.249	1.716	0.796	0.796	0.398	0.791

10	0.498	1.716	1.593	0.796	0.398	1
15	0.498	0.858	1.992	1.593	0.796	1.147
20	0.249	1.287	1.593	0.796	0.398	0.865
30	0.249	1.716	1.593	1.195	0.796	1.11
40	0.748	1.287	1.195	1.195	1.195	1.124
60	1.246	1.287	1.195	0.796	0.796	1.064
90	1.496	0.858	1.195	0.796	1.195	1.108
120	0.997	0.429	1.593	0.796	1.195	1.002
180	1.24	0.858	0.796	1.195	1.195	1.058
240	0.997	0.858	0.796	1.195	1.195	1.008
300	1.246	0.858	1.195	1.195	1.195	1.138

Se puede notar en las tablas 2 a 4 que el hinchamiento límite llega para todos los casos a partir de los 90 minutos, sin embargo, el porcentaje de hinchamiento cambia, como se esperaba, puesto que al injertar y aumentar el porcentaje de injerto se está también aumentando al hidrofilicidad del material. Por lo que, aunque el tiempo sea relativamente parecido, la cantidad de agua que absorbe es mayor para el caso del PET-g-PEGMEMA con respecto al PET.

En todos los casos del hinchamiento, sobre todo durante los primeros minutos de la medición, hay una gran variación en los resultados por varios factores como la técnica de secado, si quedan algunas trazas del papel en alguna de las muestras, si la muestra estaba bien sumergida en el solvente o no. Pero, los puntos de mayor interés son desde los 90 minutos que es cuando ha llegado al hinchamiento límite, así como el final, después de 300 minutos.

Gráficas.

En el análisis de cada gráfica se hicieron pruebas, variando incremental y secuencial una de las siguientes variables: concentración, dosis, temperatura, tiempo de reacción y solvente. Este enfoque sistemático permitió estudiar el impacto individual de cada factor. Como resultado, en las primeras muestras, no se obtuvo un nivel de injerto considerablemente elevado.

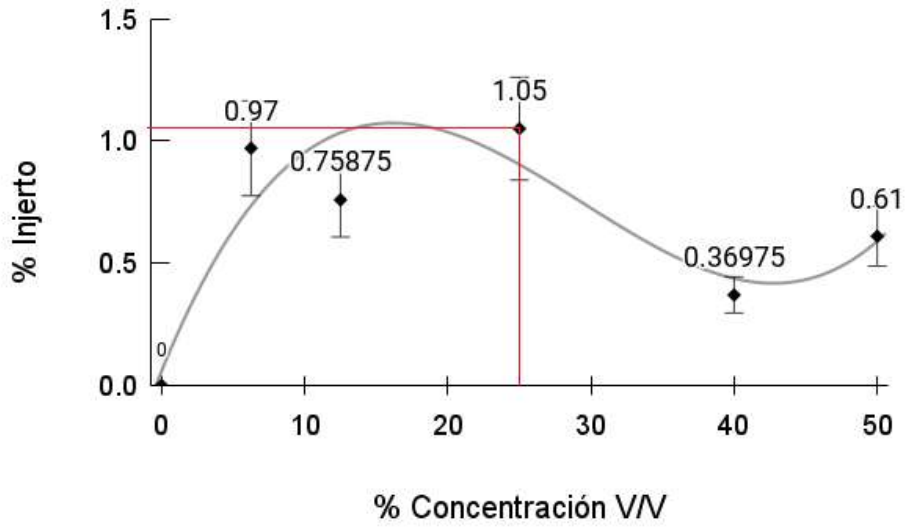

Figura 5. % de injerto en función de la concentración del PEGMEMA (PET-g-PEGMEMA), solvente tolueno, Intensidad = 9.18 KGy/hr, Dosis = 100 KGy, Temperatura = 60ªC, tiempo = 1200 min.

Cuando se examina la variación en la concentración en la figura 5, se observa un pico máximo en el intervalo entre 20% y 30%. Aunque la tendencia de la gráfica sugiere que el punto óptimo podría estar en 15%, es importante tener en cuenta que las fluctuaciones podrían ser el resultado del margen de error experimental del 10% considerado en este proceso. La falta de puntos intermedios también puede influir en estas variaciones. No obstante, el mejor resultado experimental se encontró con una concentración del 25%, logrando un nivel de injerto de 1.05%.

Aunque la concentración de 6,25 % nos ofrece un resultado parecido al mayor, considerando que es una cuarta parte del PEGMEMA utilizado en estas determinaciones, se optó por utilizar una concentración del 25% ya que el máximo aparente entre 10% y 20% podría ser solo una falta de datos intermedios. Incluso puede que la muestra haya retenido un poco de solvente no evaporado. Por esta razón, se optó por utilizar la concentración del 25% en las siguientes curvas de estudio.

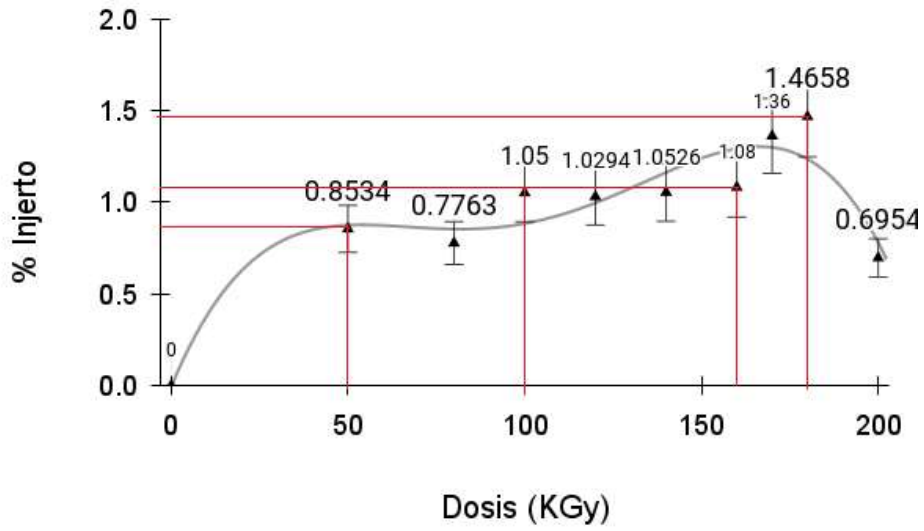

Figura 6. % de injerto en función de la dosis recibida (PET-g-PEGMEMA), solvente tolueno, Intensidad = 9.18 KGy/hr, Concentración = 25 %V/V, T = 60 °C, tiempo = 1200 min.

En esta instancia, en la figura 6 se aprecia que después de alcanzar 50 KGy de dosis, la tendencia se acerca a una relación lineal, que se ve interrumpida por el punto de 180 KGy, donde claramente se registra un pico máximo. No obstante, es evidente que una parte sustancial del costo global del material, un aspecto que se busca minimizar, proviene del tiempo de irradiación, directamente vinculado con la dosis total.

Por lo tanto, a pesar de los resultados superiores obtenidos, estos no son decisivos para adoptarlos como condición óptima. Como consecuencia, se eligió una dosis de 100 KGy para las siguientes evaluaciones. Un factor adicional que motiva la exclusión de los 180 KGy es el margen de error originado por los tiempos de irradiación en el Gammabeam. Dado que las irradiaciones están limitadas a 10 horas diarias y no es posible almacenar o manipular las muestras durante este período, para evitar la posible ruptura no deseada de los peróxidos formados en el PET, es probable que el error se intensifique. Tras alcanzar los 180 KGy, emerge el inicio de la degradación del material, lo que dificulta la precisión en el cálculo del porcentaje de injerto.

Como pruebas adicionales, una vez obtenidas las condiciones óptimas, se realizaron experimentos a 180 KGy. Hubo una serie de complicaciones en cuanto a la síntesis del PET-g-PEGMEMA y no se obtuvieron los resultados esperados. Sin embargo, al repetir 3 veces más el experimento con las condiciones especificadas en la figura 2, se observa que en efecto el material tiene esa tendencia. Una posible explicación sería que al incrementar la dosis, así como la temperatura en las condiciones óptimas, esto provoque que la homopolimerización del PEGMEMA sea mayor, lo que nos da como resultado un % de injerto menor.

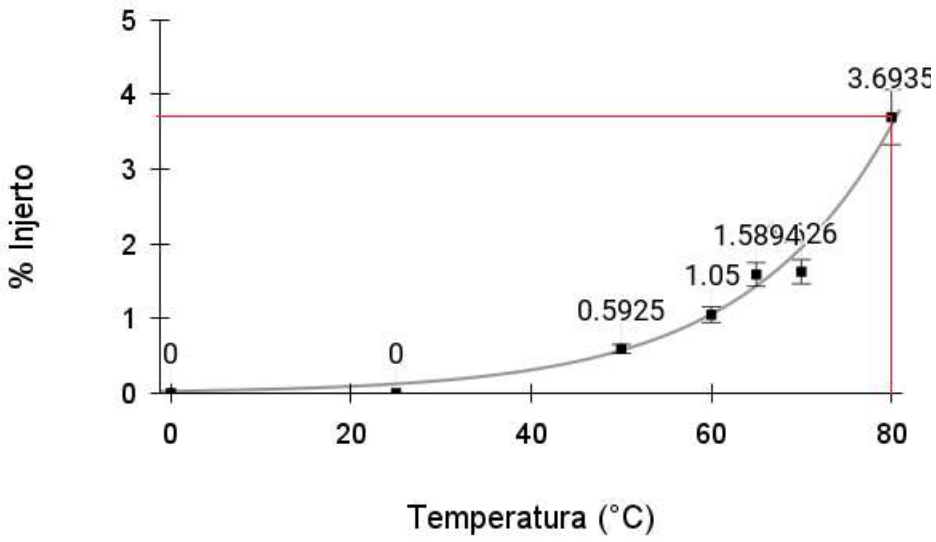

Figura 7. % de injerto en función de la temperatura de reacción (PET-g-PEGMEMA), solvente tolueno, Intensidad = 9.03KGy/hr, Dosis = 100 KGy, Concentración = 25% V/V, tiempo = 1200 min.

En relación a la temperatura, como se observa en la figura 7, un aspecto que también impacta en el costo del material debido al consumo de energía y a las posibles complicaciones asociadas con el uso de solventes volátiles, es relevante destacar que sobrepasar los 80 °C podría generar desafíos adicionales. Esto incluye variaciones y posibles errores, así como la evaporación del agua en el baño maría. Existe la posibilidad de que las ampolletas se rompan debido al aumento de la presión interna.

Aunque la gráfica muestra un comportamiento aparentemente exponencial sin límite, es probable que se alcance un punto de saturación en algún momento. Aun así, el porcentaje de injerto alcanzado, 3.69%, es un indicador positivo de que se está aproximando a condiciones óptimas. Sería interesante plantear un sistema que permitiera un aumento adicional en la temperatura de reacción para examinar esta variable con mayor detalle. A pesar de esto, la decisión fue adoptar la temperatura de 80 °C para las pruebas posteriores.

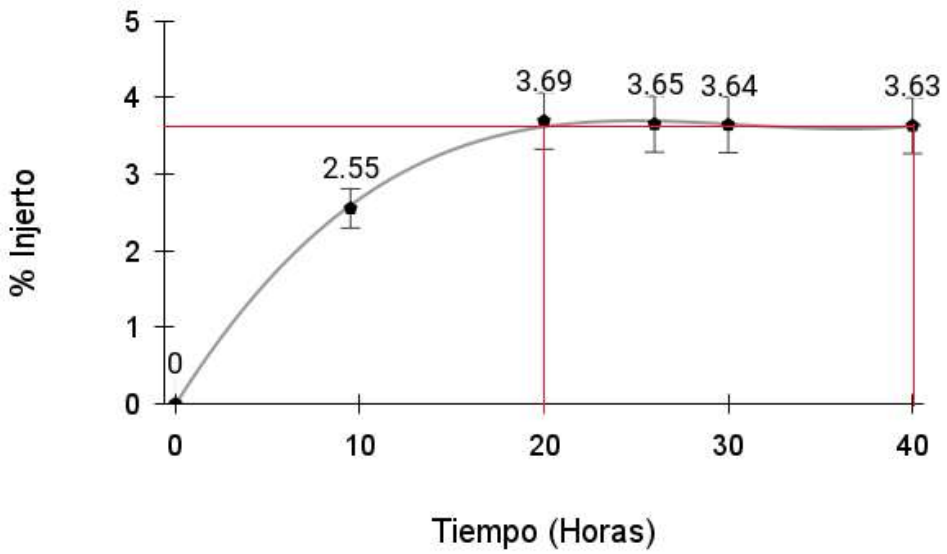

Figura 8. % de injerto del PET en función del tiempo de reacción. (PET-g-PEGMEMA), solvente tolueno, Intensidad = 9.03KGy/hr, Dosis = 100 KGy, Concentración = 25% V/V, Temperatura = 80 °C.

En la evaluación del tiempo de reacción de la figura 8, manteniendo constantes las demás condiciones, es evidente el límite que se alcanza aproximadamente a las 20 horas de reacción. Posterior a este punto, no se observa una variación significativa en los resultados. En vista de esto, se determinó utilizar este período como el óptimo para alcanzar el porcentaje de injerto deseado.

No obstante, sería valioso contrastar entre puntos adicionales para precisar el tiempo en que se logra este máximo. Estos estudios adicionales podrían aportar información más detallada sobre la dinámica del proceso.

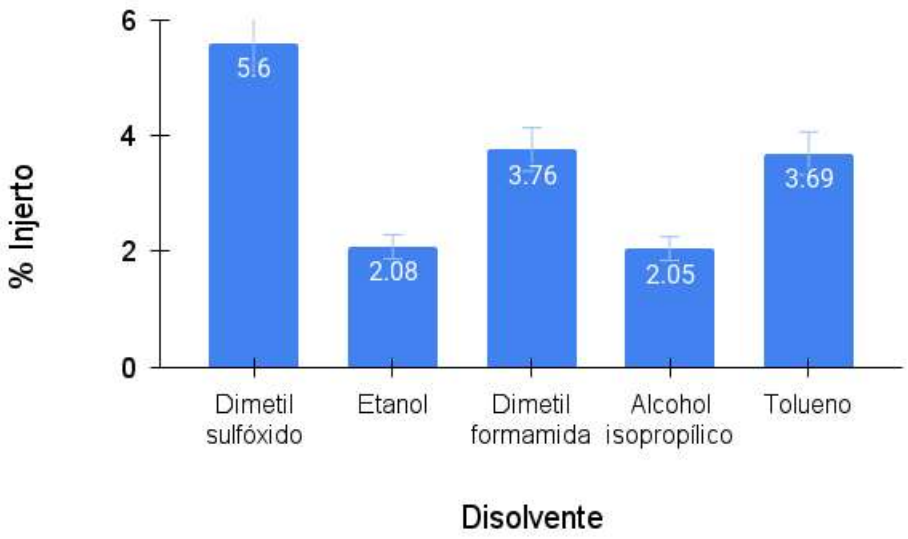

Figura 9. Comparación del % de injerto del PET con diferentes solventes Intensidad = 9.03KGy/hr, Dosis = 100 KGy, Concentración = 25% V/V, tiempo = 20 hrs, Temperatura = 80 °C

Una vez establecidas las condiciones de síntesis, se buscó un solvente con características específicas como se muestra en la figura 9. Este solvente tendría la función de hinchar la matriz base (PET) y, simultáneamente, disolver el PEGMEMA, posibilitando una difusión más efectiva durante la reacción. En las pruebas anteriores, se empleó tolueno, que resulta más económico que el DMSO y también tiene la capacidad de hinchar al PET.

En contraste, el DMSO, aunque requiere precaución debido a su capacidad para disolver el PET a temperaturas superiores a 110 °C, demostró ser el solvente más eficaz en términos de resultados. Al llegar a un nivel de injerto del 5.6%, se optó por el DMSO como el solvente óptimo para el proceso de síntesis. Aunque su manejo demanda consideraciones especiales durante el calentamiento, su desempeño lo posicionó como la elección más adecuada.

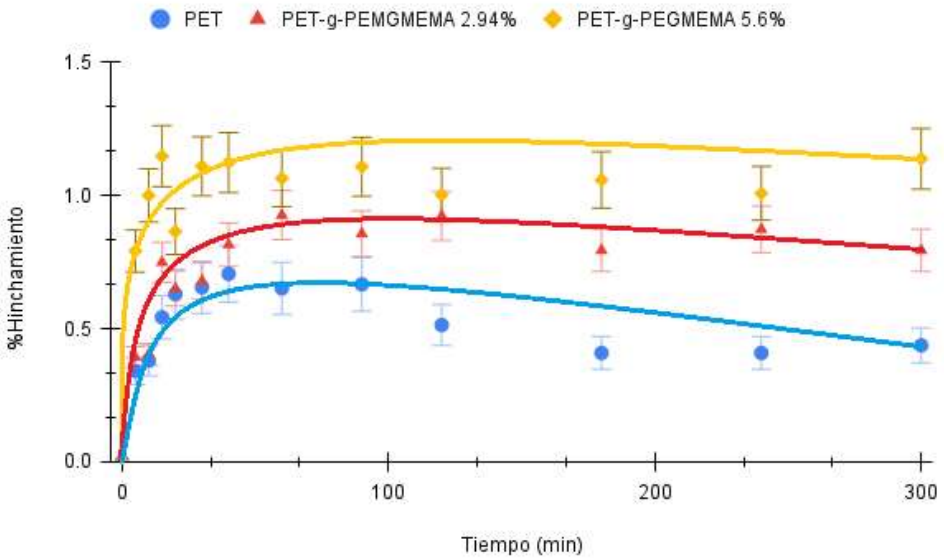

Figura 10. Porcentaje de hinchamiento del PET sin injertar, injerto al 2.97% y al 5.6% con respecto al tiempo.

En la figura 10 se puede apreciar que el grado de hinchamiento, relacionado con la hidrofilcidad del material, aumenta a medida que la cantidad de injerto se incrementa. Esto permite confirmar que no solamente ocurre un injerto, sino también que el material está adquiriendo las propiedades deseadas de antifouling gracias al efecto del PEGMEMA.

Caracterizaciones.

FTIR.

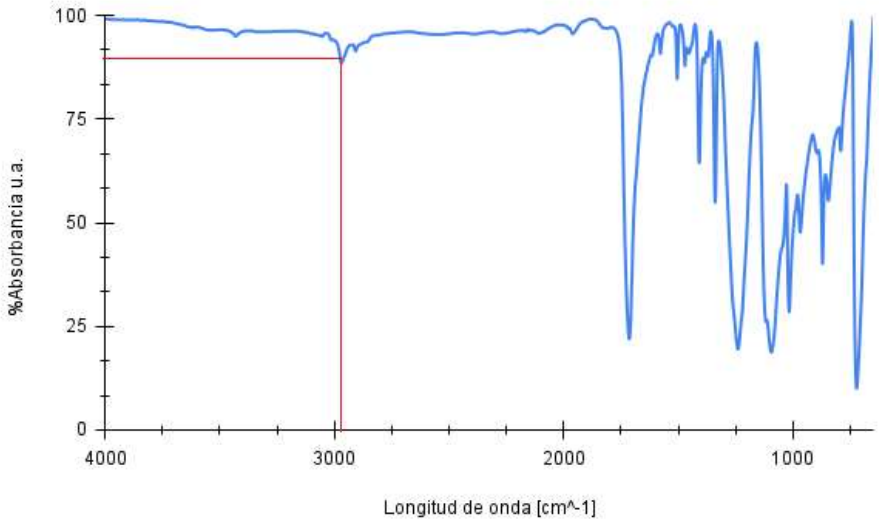

Figura 11. Espectro FTIR. Transmitancia del espectro infrarrojo del PET en unidades arbitrarias.

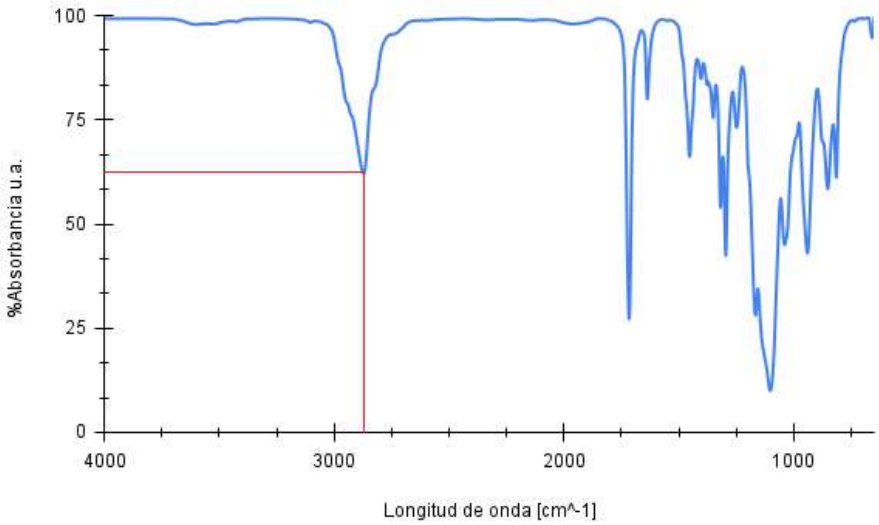

Figura 12. Espectro FTIR. Transmitancia del espectro infrarrojo del PEGMEMA en unidades arbitrarias.

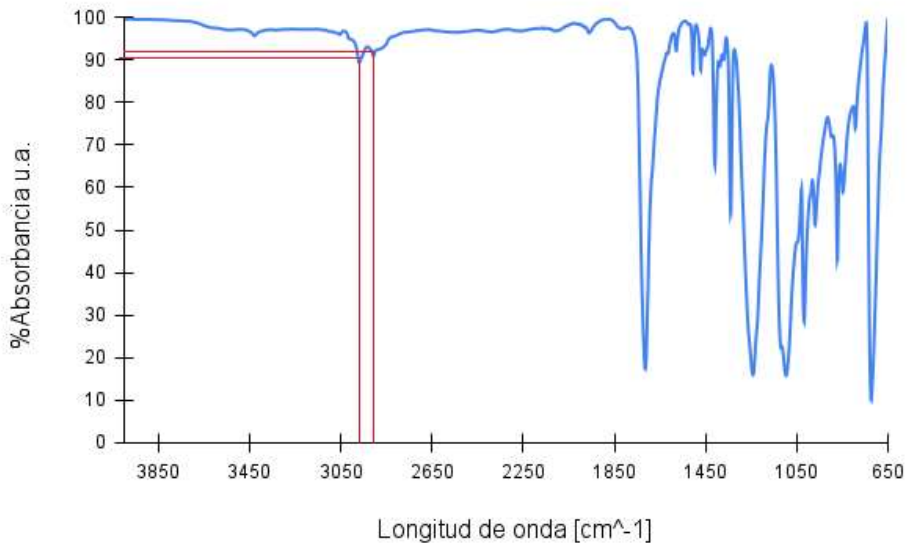

Figura 13. Espectro FTIR. Transmitancia del espectro infrarrojo del PET-g-PEGMEMA 5.6% en unidades arbitrarias.

Al observar las figuras 11, 12 y 13 se evidencia una alteración en la forma del espectro alrededor de los 3000 cm^-1, el cual podría corresponder a una presencia en mayor cantidad de los enlaces C-H, en relación al PET y al PET-g-PEGMEMA. Para lograr una comparación más precisa en cuanto a la modificación del sistema, se requieren las caracterizaciones posteriores. Aunque en el análisis de FTIR no se logre identificar un grupo funcional presente en la estructura del PEGMEMA y ausente en el PET, la conclusión completa se basará en las caracterizaciones adicionales. A pesar de esta limitación, es discernible que existe una sutil modificación en la forma y posición exacta de los picos en la región cercana a los 3000 cm^-1.

Ángulo de contacto.

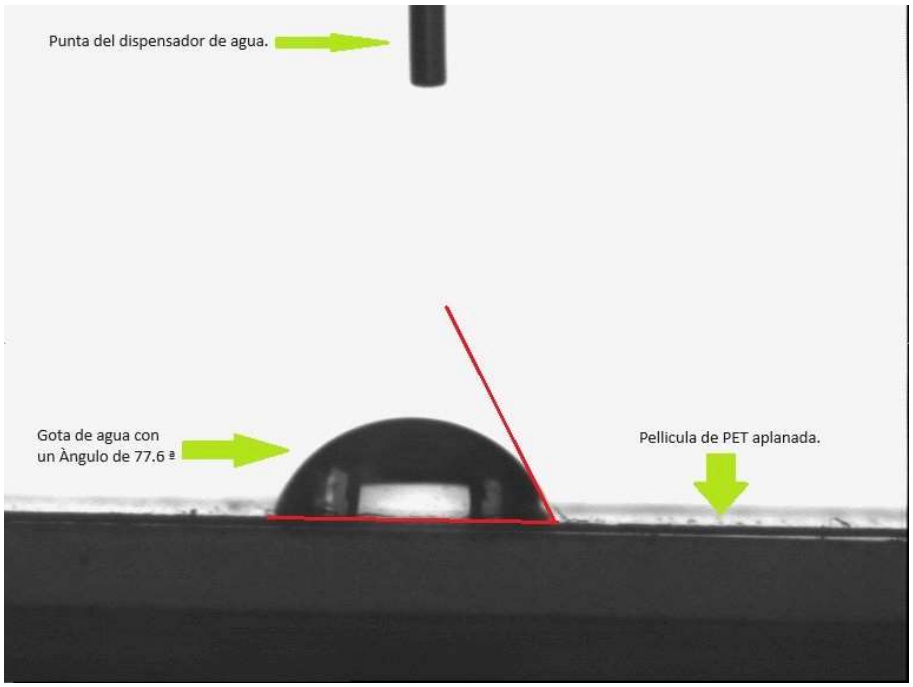

Figura 14. Ángulo de contacto 1. Gota de agua en película de PET, Ángulo = 77.6 °.

El PET, como se puede observar en la figura 14, exhibe una ligera hidrofilicidad, dado que para que un material sea considerado hidrofóbico, su ángulo de contacto debe ser de al menos 90°. Sin embargo, nuestro objetivo es aumentar esta propiedad al incorporar PEGMEMA, lo que debería alterar el ángulo de contacto en función del porcentaje de injerto.

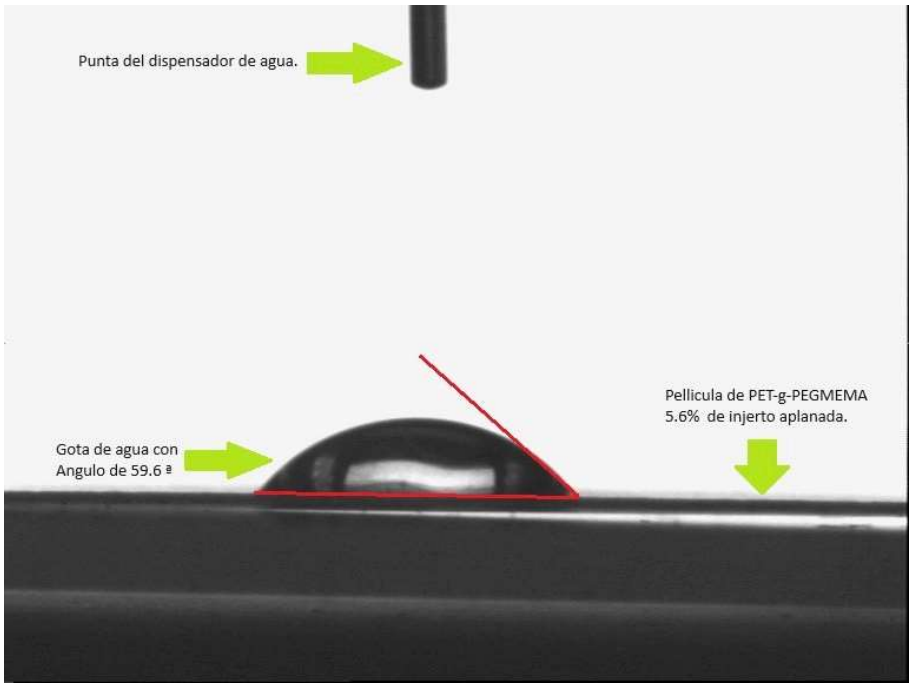

Figura 15. Ángulo de contacto 2. Gota de agua en película de PET-g-PEGMEMA 5.6%, Ángulo = 59.6 °.

Es evidente la transformación en la figura 15, no solo en el ángulo presentado por el software de ángulo de contacto, sino también en la expansión de la gota, que parece abarcar una mayor área en la superficie del material. Esta observación refuerza nuestra conclusión de que la hidrofilicidad del material se intensifica al incrementar el porcentaje de injerto.

TGA.

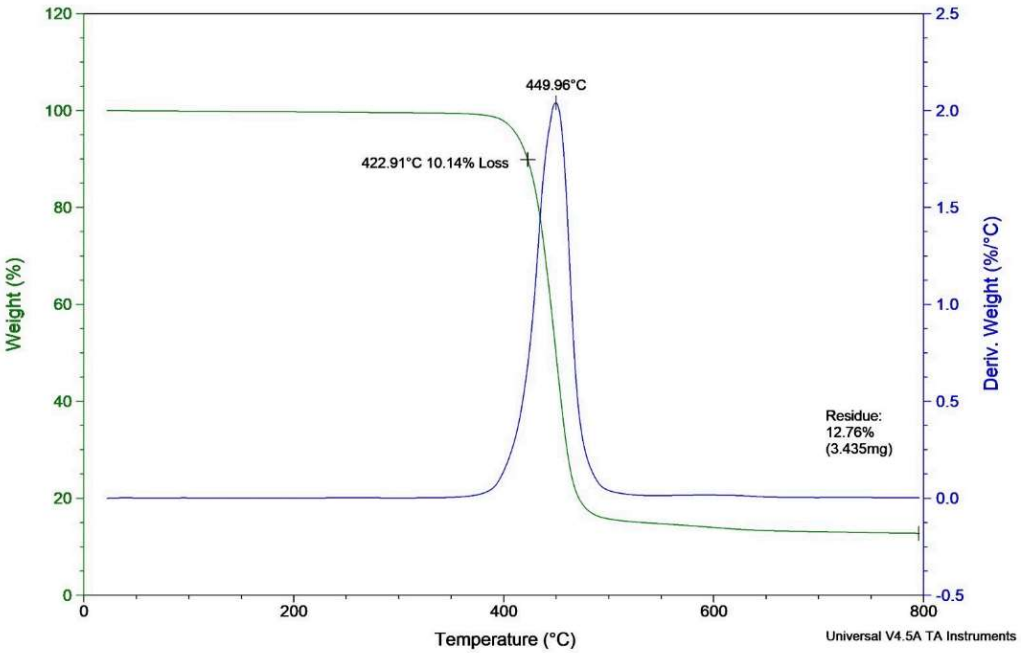

Figura 16. TGA. Análisis termogravimétrico del PET a temperatura de calentamiento de 10 °C/min.

Se puede notar en la figura 16 que la pérdida del 10% de masa ocurre a una temperatura de 422 °C en el caso del PET sin modificaciones. Además, se observa que únicamente presenta una disminución gradual, lo que sugiere que el análisis no está considerando la presencia de masa de otro compuesto, como podría ser algún residuo de solvente de limpieza o restos orgánicos.

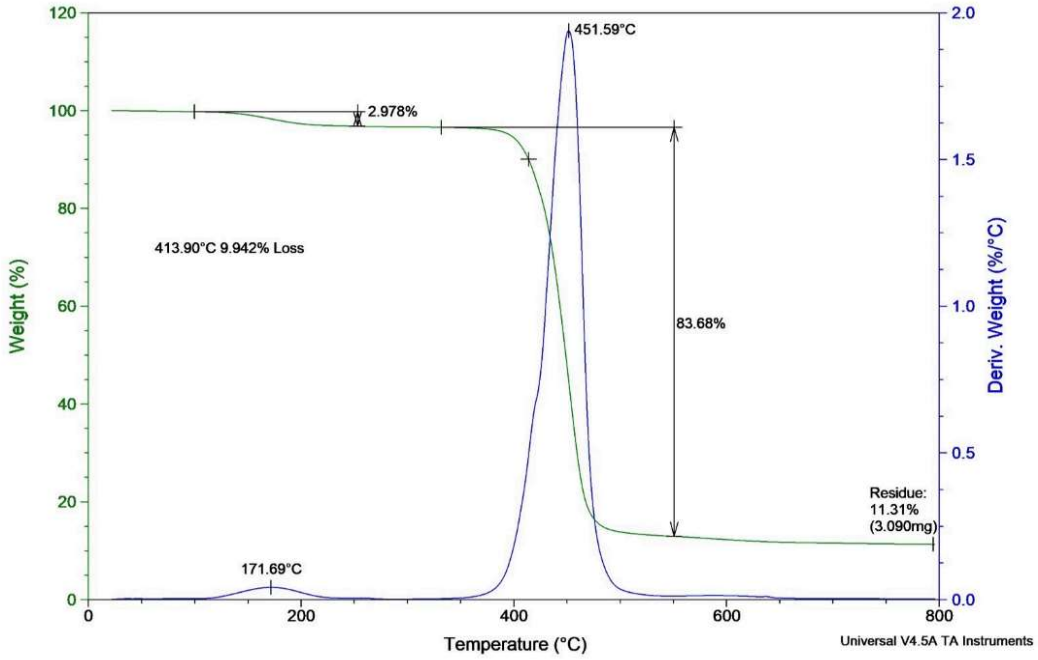

Figura 17. TGA Análisis termogravimétrico del PET-g-PEGMEMA al 5.6% a temperatura de calentamiento de 10 °C/min.

A diferencia del PET sin modificaciones, se puede apreciar en la figura 17 una fase declive inicial en torno a los 171 °C, que se relaciona con el proceso de injerto y con la cantidad de agua presente en la muestra. Asimismo, se observa una pérdida de masa al 10% en un punto distinto, alrededor de los 413 °C, debido a la reducción de la masa inicial. Además, se notan dos declives claros en la gráfica (fases). A partir de esto, podemos inferir que efectivamente ha ocurrido un injerto en nuestro material.

Conclusiones.

En cuanto a la síntesis del material, se encontraron condiciones que favorecen el injerto de PEGMEMA en PET, siendo estas; dosis: 100 KGy, concentración: 25% (V/V) en DMSO, temperatura de reacción: 80 °C, tiempo de reacción: 20 horas, sin embargo, podría haber otra combinación, además de nuevas variables como el peso molecular, que pudiesen mostrar las condiciones óptimas de síntesis del material. Sería interesante analizar estas condiciones en estudios posteriores, así como el realizar más pruebas de caracterización o probar la posibilidad de la síntesis por el método directo en lugar de utilizar preirradiación oxidativa.

Como se ha podido observar, si hay un cambio en las propiedades del material injertado con respecto al material sin injertar, como lo es el cambio del ángulo de contacto debido al aumento en la hidrofilicidad, al igual que una pérdida de masa en el análisis termogravimétrico que no corresponde al PET. Estos análisis cualitativos, son un complemento que confirma la presencia del injerto de PEGMEMA, aun así, será necesario realizar pruebas biológicas posteriores, que determinarán si el material es apto para uso biomédico, antimicrobiano. Otra posibilidad sería que, aun teniendo evidencias del uso del PEGMEMA para mejorar las propiedades de antifouling de una superficie, es posible que en este copolímero el acomodamiento resulte en un material que, por el contrario, permite la retención de proteínas y microorganismos con mayor facilidad, con lo que se le podría dar un uso como material apto para ingeniería de tejidos.

Otro factor que podría afectar favorablemente tanto las condiciones de síntesis como las propiedades buscadas sería la utilización de un polímero de menos peso molecular o del monómero. Este cambio en el tamaño de las cadenas podría modificar la superficie del PET de una manera tal que resulte mejor en cuanto a costo, tiempo, hidrofilicidad, hinchamiento, estabilidad térmica y/o propiedades biológicas.

Anexo 1.

Tabla de factores de corrección de decaimiento radiactivo del Cobalto 60.

HALF-LIFE 5.24 YEARS CALCULATION INTERVAL 15.0 DAYS

DAYS	DAYS 0.0	15.0	30.0	45.0	60.0	75.0	90.0	105.0	120.0	135.0
0.0	1.0000	.9945	.9891	.9838	.9784	.9731	.9679	.9626	.9574	.9522
150.0	.9470	.9419	.9368	.9317	.9267	.9216	.9166	.9117	.9067	.9018
300.0	.8969	.8921	.8872	.8824	.8776	.8729	.8681	.8634	.8588	.8541
450.0	.8495	.8449	.8403	.8357	.8312	.8267	.8222	.8177	.8133	.8089
600.0	.8045	.8002	.7958	.7915	.7872	.7829	.7787	.7745	.7703	.7661
750.0	.7620	.7578	.7537	.7496	.7456	.7415	.7375	.7335	.7295	.7256
900.0	.7216	.7177	.7138	.7100	.7061	.7023	.6985	.6947	.6909	.6872
1050.0	.6834	.6797	.6761	.6724	.6687	.6651	.6615	.6579	.6544	.6508
1200.0	.6473	.6438	.6403	.6368	.6334	.6299	.6265	.6231	.6197	.6164
1350.0	.6130	.6097	.6064	.6031	.5998	.5966	.5934	.5901	.5869	.5838
1500.0	.5806	.5774	.5743	.5712	.5681	.5650	.5620	.5589	.5559	.5529
1650.0	.5499	.5469	.5439	.5410	.5380	.5351	.5322	.5293	.5265	.5236
1800.0	.5208	.5180	.5151	.5124	.5096	.5068	.5041	.5013	.4986	.4959
1950.0	.4932	.4905	.4879	.4852	.4826	.4800	.4774	.4748	.4722	.4697
2100.0	.4671	.4646	.4621	.4596	.4571	.4546	.4521	.4497	.4472	.4448
2250.0	.4424	.4400	.4376	.4352	.4329	.4305	.4282	.4259	.4236	.4213
2400.0	.4190	.4167	.4145	.4122	.4100	.4078	.4055	.4033	.4012	.3990
2550.0	.3968	.3947	.3925	.3904	.3883	.3862	.3841	.3820	.3799	.3779
2700.0	.3758	.3738	.3718	.3697	.3677	.3657	.3638	.3618	.3598	.3579
2850.0	.3559	.3540	.3521	.3502	.3483	.3464	.3445	.3426	.3408	.3389
3000.0	.3371	.3353	.3335	.3316	.3298	.3281	.3263	.3245	.3228	.3210
3150.0	.3193	.3175	.3158	.3141	.3124	.3107	.3090	.3073	.3057	.3040
3300.0	.3024	.3007	.2991	.2975	.2959	.2943	.2927	.2911	.2895	.2879
3450.0	.2864	.2848	.2833	.2817	.2802	.2787	.2772	.2757	.2742	.2727
3600.0	.2712	.2697	.2683	.2668	.2654	.2639	.2625	.2611	.2597	.2583
3750.0	.2569	.2555	.2541	.2527	.2513	.2500	.2486	.2473	.2459	.2446
3900.0	.2433	.2419	.2406	.2393	.2380	.2367	.2355	.2342	.2329	.2316
4050.0	.2304	.2291	.2279	.2267	.2254	.2242	.2230	.2218	.2206	.2194
4200.0	.2182	.2170	.2158	.2147	.2135	.2123	.2112	.2101	.2089	.2078
4350.0	.2067	.2055	.2044	.2033	.2022	.2011	.2000	.1989	.1979	.1968
4500.0	.1957	.1947	.1936	.1925	.1915	.1905	.1894	.1884	.1874	.1864
4650.0	.1854	.1844	.1834	.1824	.1814	.1804	.1794	.1784	.1775	.1765
4800.0	.1755	.1746	.1736	.1727	.1718	.1708	.1699	.1690	.1681	.1672
4950.0	.1663	.1654	.1645	.1636	.1627	.1618	.1609	.1600	.1592	.1583
5100.0	.1575	.1566	.1558	.1549	.1541	.1532	.1524	.1516	.1508	.1499

Referencias.

1. Abednejad, A., Amoabediny, G., & Ghaee, A. (2014). Surface modification of polypropylene membrane by polyethylene glycol graft polymerization. *Materials Science and Engineering: C*, *42*, 443-450. https://doi.org/10.1016/j.msec.2014.05.060
2. Ashfaq, A., Clochard, M., Coqueret, X., Dispenza, C., Driscoll, M. S., Ulański, P., & Al-Sheikhly, M. (2020). Polymerization Reactions and Modifications of Polymers by Ionizing Radiation. *Polymers*, *12*(12), 2877. https://doi.org/10.3390/polym12122877
3. Aliev, R., García, P. L., & Burillo, G. (2000). Graft polymerization of acrylic acid onto polycarbonate by the preirradiation method. *Radiation Physics and Chemistry*, *58*(3), 299-304. https://doi.org/10.1016/s0969-806x(99)00375-8
4. Belloni, J., Douki, T., & Mostafavi, M. (2012). *Radiation chemistry*. EDP Sciences.
5. Bhattacharya, A. (2000). Radiation and industrial polymers. *Progress in Polymer Science*, *25*(3), 371-401. https://doi.org/10.1016/s0079-6700(00)00009-5
6. Braestrup, C. B., & Mooney, R. T. (1958). Cobalt-60 radiation measurements. *Radiology*, *70*(4), 516-522. https://doi.org/10.1148/70.4.516
7. Çaykara, T., Sande, M. G., Azoia, N., Rodrigues, L. R., & Silva, C. J. (2020). Exploring the potential of polyethylene terephthalate in the design of antibacterial surfaces. *Medical Microbiology and Immunology*, *209*(3), 363-372. https://doi.org/10.1007/s00430-020-00660-8
8. Chang, T., Gosain, P., Stenzel, M. H., & Lord, M. S. (2016). Drug-loading of poly(ethylene glycol methyl ether methacrylate) (PEGMEMA)—based micelles and mechanisms of uptake in colon carcinoma cells. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, *144*, 257-264. https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2016.04.019
9. Chen, W., & McCarthy, T. J. (1998). Chemical surface modification of poly(ethylene terephthalate). *Macromolecules*, *31*(11), 3648-3655. https://doi.org/10.1021/ma9710601
10. Chmielewski, A., Haji-Saeid, M., & Ahmed, S. (2005). Progress in radiation processing of polymers. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, *236*(1-4), 44-54. https://doi.org/10.1016/j.nimb.2005.03.247
11. Choi, Y. D., Liu, F., Kim, J., Choi, Y. D., Park, J. C., & Kim, S. W. (1998). Polyethylene glycol-grafted poly-l-lysine as polymeric gene carrier. *Journal of Controlled Release*, *54*(1), 39-48. https://doi.org/10.1016/s0168-3659(97)00174-0
12. Clough, R. (2001). High-energy radiation and polymers: A review of commercial processes and emerging applications. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section B-beam Interactions with Materials and Atoms*, *185*(1-4), 8-33. https://doi.org/10.1016/s0168-583x(01)00966-1
13. Comyn, J. (1997). Handbook of Organic Solvent Properties. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, *17*(2), 177. https://doi.org/10.1016/s0143-7496(97)88687-3
14. Cruz, S. A., & Zanin, M. (2005). PET recycling: Evaluation of the solid state polymerization process. *Journal of Applied Polymer Science*, *99*(5), 2117-2123. https://doi.org/10.1002/app.22526

15. Dargaville, T. R., George, G. A., Hill, D. J., & Whittaker, A. K. (2003). High energy radiation grafting of fluoropolymers. *Progress in Polymer Science*, *28*(9), 1355-1376. https://doi.org/10.1016/s0079-6700(03)00047-9
16. El-Saftawy, A., Elfalaky, A., Ragheb, & Zakhary, S. G. (2014). Electron beam induced surface modifications of PET film. *Radiation Physics and Chemistry*, *102*, 96-102. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2014.04.025
17. Friedlander, G., Kennedy, J. W., Macias, E. S., & Miller, J. M. (1981). *Nuclear and radiochemistry*. John Wiley & Sons.
18. Gawlikowski, M., Fray, M. E., Janiczak, K., Zawidlak-Węgrzyńska, B., & Kustosz, R. (2020). In-Vitro biocompatibility and hemocompatibility study of new PET copolyesters intended for heart assist devices. *Polymers*, *12*(12), 2857. https://doi.org/10.3390/polym12122857
19. Gao, C., & Yan, D. (2004). Hyperbranched polymers: from synthesis to applications. *Progress in Polymer Science*, *29*(3), 183-275. https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2003.12.002
20. He, Z., Yang, X., Wang, N., Mu, L., Pan, J., Lan, X., Li, H., & Dèng, F. (2021). Anti-Biofouling polymers with special surface wettability for biomedical applications. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, *9*. https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.807357
21. Hegazy, E. A., Abdel-Rehim, H. A., Kamal, H., & Kandeel, K. (2001). Advances in radiation grafting. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section B-beam Interactions with Materials and Atoms*, *185*(1-4), 235-240. https://doi.org/10.1016/s0168-583x(01)00834-5
22. Hirvi, J. T., & Pakkanen, T. A. (2007). Enhanced hydrophobicity of rough polymer surfaces. *Journal of Physical Chemistry B*, *111*(13), 3336-3341. https://doi.org/10.1021/jp067399j
23. Hochanadel, C. J. (1952). Effects of Cobalt Γ-Radiation on water and aqueous solutions. *The Journal of Physical Chemistry*, *56*(5), 587-594. https://doi.org/10.1021/j150497a008
24. Huang, Z., & Ghasemi, H. (2020). Hydrophilic Polymer-based Anti-biofouling coatings: preparation, mechanism, and durability. *Advances in Colloid and Interface Science*, *284*, 102264. https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102264
25. Ivanov, V. S., & Koroleva, E. A. (1991). Radiation Chemistry of Polymers. *VSP eBooks*. https://doi.org/10.1201/9780429071003
26. Jafari, S., Salekdeh, S. S. H., Solouk, A., & Yousefzadeh, M. (2019). Electrospun Polyethylene terephthalate (PET) nanofibrous conduit for biomedical application. *Polymers for Advanced Technologies*, *31*(2), 284-296. https://doi.org/10.1002/pat.4768
27. Jarrett, R. D. (2018). Isotope (Gamma) radiation sources. En *CRC Press eBooks*. https://doi.org/10.1201/9781351076005-6
28. Jing, L., Mayer, C., Freger, V., & Ulbricht, M. (2012). Synthesis and characterization of poly(ethylene glycol) methacrylate based hydrogel networks for Anti-Biofouling applications. *Macromolecular Materials and Engineering*, *298*(9), 967-980. https://doi.org/10.1002/mame.201200297

29. Kingshott, P., Wei, J., Bagge-Ravn, D., Gadegaard, N., & Gram, L. (2003). Covalent Attachment of Poly(ethylene glycol) to Surfaces, Critical for Reducing Bacterial Adhesion. *Langmuir*, *19*(17), 6912-6921. https://doi.org/10.1021/la034032m
30. Lai, J., Sunderland, B., Xue, J., Zhao, W., Folkard, M., Michael, B. D., & Wang, Y. (2006). Study on hydrophilicity of polymer surfaces improved by plasma treatment. *Applied Surface Science*, *252*(10), 3375-3379. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2005.05.038
31. Lee, J. H., Khang, G., Lee, J. W., & Lee, H. B. (1998). Interaction of different types of cells on polymer surfaces with wettability gradient. *Journal of Colloid and Interface Science*, *205*(2), 323-330. https://doi.org/10.1006/jcis.1998.5688
32. Lee, J. P., & Feijen, J. (2012). Polymersomes for drug delivery: Design, formation and characterization. *Journal of Controlled Release*, *161*(2), 473-483. https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2011.10.005
33. Magee, J. L. (1953). Radiation chemistry. *Annual review of nuclear science*, *3*(1), 171-192. https://doi.org/10.1146/annurev.ns.03.120153.001131
34. Makuuchi, K., & Cheng, S. (2012). Radiation Processing of Polymer Materials and its Industrial Applications. *John Wiley & Sons, Inc. eBooks*. https://doi.org/10.1002/9781118162798
35. Mariani, M., Ravasio, U., Consolati, G., Buttafava, A., Giola, M., & Faucitano, A. (2007). Gamma irradiation of PolyethyleneTerephthalate and Polyethylenenaphthalate. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section B-beam Interactions With Materials and Atoms*, *265*(1), 245-250. *https://doi.org/10.1016/j.nimb.2007.08.054*
36. Meng, F., Engbers, G. H., & Feijen, J. (2004). Polyethylene glycol-grafted polystyrene particles. *Journal of Biomedical Materials Research*, *70A*(1), 49-58. https://doi.org/10.1002/jbm.a.30056
37. Mohamed, H., Hudziak, S., Arumuganathan, V., Meng, Z., & Coppens, M. (2020). Effects of charge and hydrophilicity on the anti-fouling properties of kidney-inspired, polyester membranes. *Molecular Systems Design and Engineering*, *5*(7), 1219-1229. https://doi.org/10.1039/d0me00045k
38. Naikwadi, A. T., Sharma, B. K., Bhatt, K. D., & Mahanwar, P. A. (2022). Gamma radiation Processed polymeric materials for high performance applications: a review. *Frontiers in Chemistry*, *10*. https://doi.org/10.3389/fchem.2022.837111
39. Nasef, M. M., & Güven, O. (2012). Radiation-grafted copolymers for separation and purification purposes: Status, challenges and future directions. *Progress in Polymer Science*, *37*(12), 1597-1656. https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.07.004
40. Navarrete, M., Cabrera, L., Introducción al Estudio de los Radioisotopos, 2ª Ed (1993), Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química, México.
41. Peng, L., Chang, L., Liu, X., Lin, J., Liu, H., Han, B., & Wang, S. (2017). Antibacterial Property of a Polyethylene Glycol-Grafted Dental Material. *ACS Applied Materials & Interfaces*, *9*(21), 17688-17692. https://doi.org/10.1021/acsami.7b05284

42. Ping, X., Wang, M., & Ge, X. (2011). Surface modification of poly(ethylene terephthalate) (PET) film by gamma-ray induced grafting of poly(acrylic acid) and its application in antibacterial hybrid film. *Radiation Physics and Chemistry*, *80*(4), 567-572. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2010.12.011
43. Prasad, S. G., De, A., & De, U. C. (2011). Structural and optical investigations of radiation damage in transparent PET polymer films. *International Journal of Spectroscopy*, *2011*, 1-7. https://doi.org/10.1155/2011/810936
44. Ramírez-Fuentes, Y. S., Bucio, E., & Burillo, G. (2007). Radiation-induced grafting of n-isopropylacrylamide and acrylic acid onto polypropylene films by two step method. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, *265*(1), 183-186. https://doi.org/10.1016/j.nimb.2007.08.046
45. Ranogajec, F. (2007). Effect of solvent on radiation grafting and crosslinking of polyethylene. *Radiation Physics and Chemistry*, *76*(8-9), 1381-1384. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2007.02.037
46. Reichardt, C. (2006). Solvents and Solvent Effects: An Introduction. *Organic Process Research & Development*, *11*(1), 105-113. https://doi.org/10.1021/op0680082
47. Rydzek, G., Schaaf, P., Voegel, J., Jierry, L., & Boulmedais, F. (2012). Strategies for covalently reticulated polymer multilayers. *Soft Matter*, *8*(38), 9738. https://doi.org/10.1039/c2sm25719j
48. Sadasivan, S. M., Ravindran, L., Goda, K., & Thomas, S. (2023). *Handbook of Natural Polymers, Volume 1: Sources, Synthesis, and Characterization* (1.). Elsevier.
49. Sadasivan, S. M., Ravindran, L., Goda, K., & Thomas, S. (2023). *Handbook of Natural Polymers, Volume 2: Functionalization, Surface Modification, and Properties*. Elsevier.
50. Sadasivan, S. M., Ravindran, L., Goda, K., & Thomas, S. (2023). *Handbook of Natural Polymers, Volume 3: Versatile Applications* (1.). Elsevier.
51. Saldivar-Guerra, E., & Vivaldo-Lima, E. (2013). *Handbook of Polymer Synthesis, Characterization, and Processing*. John Wiley & Sons.
52. Schreiner, L. J., Joshi, C. P., Darko, J., Kerr, A., Salomons, G., & Dhanesar, S. (2009). The role of Cobalt-60 in modern radiation therapy: dose delivery and image guidance. *Journal of Medical Physics*, *34*(3), 133. https://doi.org/10.4103/0971-6203.54846
53. Seitz, H., Marlovits, S., Schwendenwein, I., Vécsei, V., & Losert, U. (1996). Die Biokompatibilität von Polyäthylenterephthalat – PET – (Trevira® Hochfest) – Eine In-vivo-Studie am Schafknie - The Biocompatibility of Polyethylene Terephthalate – PET – (Trevira® Hochfest). An In vivo Study on sheep stifle Joints. *Biomedizinische Technik*, *41*(6), 178-182. https://doi.org/10.1515/bmte.1996.41.6.178
54. Sun, Y., & Chmielewski, A. G. (2017). *Applications of ionizing radiation in materials processing: Vol. 1*.
55. Sun, Z., & Chen, F. (2016). Hydrophilicity and antifouling property of membrane materials from cellulose acetate/polyethersulfone in DMAC. *International Journal*

of Biological Macromolecules, *91*, 143-150. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.05.072

56. Tai, H., Wang, W., Vermonden, T., Heath, F., Hennink, W. E., Alexander, C., Shakesheff, K. M., & Howdle, S. M. (2009). Thermoresponsive and photocrosslinkable PEGMEMA-PPGMA-EGDMA copolymers from a One-Step ATRP synthesis. *Biomacromolecules*, *10*(4), 822-828. https://doi.org/10.1021/bm801308q
57. Van Brederode, R. A., & Rodriguez, F. (1970). Gelation of poly(ethylene oxide) solutions by gamma radiation: effects of molecular weight and irradiation conditions. *Journal of Applied Polymer Science*, *14*(4), 979-987. https://doi.org/10.1002/app.1970.070140408
58. Wang, P., Tan, K. L., & Kang, E. T. (2000). Surface modification of poly(tetrafluoroethylene) films via grafting of poly(ethylene glycol) for reduction in protein adsorption. *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*, *11*(2), 169-186. https://doi.org/10.1163/156856200743634
59. Xu, J., Qiu, Z., Zhao, X., Zhong, H., Li, G., & Huang, W. (2018). Synthesis and characterization of shale stabilizer based on polyethylene glycol grafted nano-silica composite in water-based drilling fluids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, *163*, 371-377. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.01.007
60. Yebra, D. M., Kiil, S., & Dam-Johansen, K. (2004). Antifouling technology—past, present and future steps towards efficient and environmentally friendly antifouling coatings. *Progress in Organic Coatings*, *50*(2), 75-104. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2003.06.001
61. Young, R. J., & Lovell, P. A. (2011). *Introduction to polymers*. CRC Press.
62. Yang, L., Chen, J., Guo, Y., & Zhang, Z. (2009). Surface modification of a biomedical polyethylene terephthalate (PET) by air plasma. *Applied Surface Science*, *255*(8), 4446-4451. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2008.11.048
63. Zaharescu, T., & Ciuprina, F. (2005). Radiolysis effects on polyethylene terephtalate. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section B-beam Interactions with Materials and Atoms*. https://doi.org/10.1016/j.nimb.2005.04.045