



TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE COACALCO



“DESPOLIMERIZACIÓN DE TEREFTALATO DE POLIETILENO”

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERÍA
QUÍMICA, CON LA ESPECIALIDAD EN:
PETROQUÍMICA SECUNDARIA

PRESENTA:

GARCÍA MIRANDA LILIANA JANETH
201820290

MORENO CASTRO DIANA LAURA
201820158

ASESOR:
DR. JULIO GONZALEZ GARCÍA

COACALCO DE BERRIOZÁBAL ABRIL, 2024.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento institucional:

Agradecemos a la institución por brindarnos todo el apoyo para poder realizar el proyecto, proporcionándonos todo el material necesario para la elaboración de este. Sin los materiales necesarios no podríamos haber obtenido los resultados favorables de la elaboración del proyecto.

Agradecemos al Dr. Julio González García, por brindarnos la oportunidad, el apoyo y tiempo invertido enseñándonos paso a paso, así como la accesibilidad que tuvo para aclarar dudas e inquietudes, pero sobre todo por siempre impulsarnos a aprender más allá de este proyecto, todo lo que este nos puede dejar.

Admiro la dedicación, pasión y esfuerzo que involucra en su trabajo y agradezco los consejos y enseñanzas que nos han brindado.

No hubiese sido posible arribar a estos resultados de no haber sido por su incondicional ayuda.

Agradecimientos personales:

Así mismo, queremos expresar nuestra gratitud a todas las personas que contribuyeron con el desarrollo de esta investigación, ayudándonos a recopilar datos y toda la información necesaria. Ya que la recolección de la misma fue de mucha ayuda para poder llegar a un buen resultado, y este proyecto no hubiera sido posible sin la ayuda de todos ustedes.

RESUMEN

En el presente proyecto se investigaron las alternativas para poder darle un uso al tereftalato de polietileno (PET). El desarrollo se llevó a cabo seleccionando el método de despolimerización química o terciaria, dando el seguimiento al proceso y observando el comportamiento de este durante un periodo de tiempo.

Al termino de los 4 meses, se obtuvo la despolimerización del PET con el objetivo de desarrollar una metodología que permita poner en práctica un reciclaje químico para poder obtener monómeros, mediante una degradación inducida o provocada en condiciones controladas (temperatura, pH, presión, tiempos de reacción, etc.) en este caso utilizando la Hidrólisis como el reciclaje químico principal.

La reacción de despolimerización se llevó a cabo durante 3 horas y se analizó el producto de la reacción con un espectro FT-IR, determinando de manera cualitativa que se despolimerizó el PET y se produjeron ácidos carboxílicos y glicoles.

INDICE

Contenido

CAPÍTULO I:.....	5
ANTECEDENTES DEL PROYECTO	5
PROBLEMÁTICA.....	6
OBJETIVOS DEL PROYECTO	7
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	9
Despolimerización:	23
Método utilizado.....	24
MÉTODO SELECCIONADO:.....	28
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	33
ANÁLISIS ESPECTRO FTIR	33
CONCLUSIONES:	35
GLOSARIO:.....	36
Bibliografía.....	37

CAPÍTULO I:

ANTECEDENTES DEL PROYECTO

PROBLEMÁTICA

El gran problema ambiental del PET es la alta resistencia a condiciones atmosféricas y biológicas, por lo que se han desarrollado métodos alternativos para el reciclaje químico de este material. En el presente estudio se busca evaluar una metodología que ayude a despolimerizar este polímero.

La despolimerización implica principalmente la conversión, rompimiento o reducción de la cadena principal de polímero, en unidades más pequeñas como monómeros y oligómeros (fragmentos de cadena más grandes), además de la generación de subproductos gaseosos.

Otros métodos son los solvolíticos, que pueden resultar más complicados que los procesos convencionales de reciclaje por implicar mayor consumo energético y mayor costo si se realizan en pequeña escala (por debajo de 20-30 toneladas por año). Lo que se debe evitar, minimizar o eliminar son los residuos de los sistemas convencionales de reciclado mecánico, que representan uno de los principales problemas que conflictúan la viabilidad técnica del reciclaje de los plásticos.

El PET, que se puede dividir o fragmentar mediante la adición de algunos reactivos o disolventes, implica una metodología específica de manejo. En el caso de reacciones que utilizan, se trata de una hidrólisis; al emplear ácidos, una acidólisis, y si se recurre al uso de glicoles hablaríamos de un glicólisis o si se emplean alcoholes de una alcoholólisis. Sin perder de vista que, dependiendo del reactivo utilizado, se obtienen diferentes productos o distribuciones de estos, después de una etapa de purificación intensiva como es el caso de monómeros de TPA, DMT y EG u oligómeros de poliéster como el BHTE, los cuales pueden ser reutilizados para fabricar productos de poliéster mediante una policondensación.

OBJETIVOS DEL PROYECTO

Objetivo general:

- Llevar a cabo un reciclaje químico del PET mediante su despolimerización a través de una reacción de glicólisis.

Objetivos específicos:

1. Búsqueda de información acerca de los métodos de recuperación de polímeros.
2. Proponer una metodología para llevar a cabo la degradación del PET
3. Llevar a cabo la experimentación propuesta
4. Analizar los resultados.

JUSTIFICACION:

Este trabajo permite desarrollar una alternativa para reducir la presencia de desechos poliméricos, los cuales proporcionarían un valor agregado. Con la generación de un proceso integral se permitiría la recuperación de los polímeros en productos valiosos. Los polímeros son materiales que han sustituido a materiales convencionales y se les ha dado nuevas aplicaciones que les han permitido tener una gran presencia en diferentes aspectos, la gran desventaja es la contaminación que emiten al no ser desechados para la reutilización, por lo que se busca hacer uso de ellos.

México se encuentra entre los países que produce mayor cantidad de polietileno tereftalato (PET), debido al alto consumo de refrescos y de agua embotellada. Se estima que al año se producen 200 botellas de PET por cada mexicano.

Al año, un poco más de ocho millones de toneladas de plásticos van a parar a los océanos, lo que es equivalente a la carga de un camión de basura cada minuto. Con el efecto del sol, el plástico libera toxinas en el agua, afectando a organismos que se encuentran a diferentes niveles de profundidad, incluso a aves marinas.

Los plásticos de mayor tamaño provocan asfixia o atragantamiento en los animales, pero los micro plásticos, que son pequeñas partículas sintéticas de difícil degradación (presentes en productos como detergentes, pasta dental, cosméticos, exfoliantes para la piel, protectores solares e incluso en muchas fibras sintéticas de ropa) son ingeridos por la fauna marina sin darse cuenta, provocándoles problemas alimenticios y reproductivos. Además, estos plásticos continúan su recorrido por la cadena alimenticia hasta regresar a nuestro plato de comida.

Es por ello que se requiere desarrollar y aplicar una metodología que ayude a mitigar la presencia de desechos plásticos en el medio ambiente y a su vez tomar ventaja y generar productos de valor agregado, aplicando procesos que permitan la recuperación de los plásticos.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

POLIMEROS:

¿Qué es un polímero?

Los polímeros se definen como macromoléculas que se obtienen por la unión de una o más moléculas pequeñas repetidas a lo largo de una cadena. La unidad que se repite en el polímero es el monómero y la reacción por la que se forman es la reacción de polimerización.

Los polímeros pueden ser inorgánicos, por ejemplo, el vidrio, pero la mayoría de los polímeros de interés industrial son compuestos orgánicos formados por hidrocarburos asociados a diferentes elementos, es decir, moléculas formadas por cadenas de átomos de carbono a los que se unen otros elementos. (Curiosoando, 2019)

PROPIEDADES:

Cada polímero tiene unas propiedades determinadas. Conociendo las propiedades requeridas de un material para un uso en particular, puede escogerse un polímero u otro, incluso puede diseñarse la síntesis en laboratorio de un nuevo polímero buscando dichas propiedades específicas.

Es común asociar a los polímeros con propiedades elásticas, pero en realidad las propiedades de los polímeros son muchos más amplias y no todos los polímeros presentan elasticidad.

Además, en función del uso final se elegirá un polímero en concreto atendiendo a sus propiedades. Entre las propiedades más buscadas de los polímeros destacan:

- Elasticidad
- Reflectante
- Resistencia
- Dureza
- Fragilidad

- Opacidad, transparencia o translucidez
- Maleabilidad
- Aislante

CLASIFICACIÓN:

Un mito común relacionado con los polímeros es su asociación a la química de laboratorio, pero esto no es real. Existen innumerables polímeros naturales, por ejemplo, muchas proteínas son polímeros formados por cadenas de aminoácidos. Otro ejemplo de polímero natural es el caucho, un material utilizado desde hace miles de años y formado por polimerización natural.

Por supuesto, la química moderna ha hecho posible sintetizar de forma artificial en laboratorio muchos polímeros para satisfacer necesidades concretas, por ejemplo, el teflón. En la actualidad existen muchísimos polímeros que se clasifican en función de diferentes criterios.

En función de su origen:

- Polímeros naturales
- Polímeros artificiales
- Polímeros sintéticos

En función del número de monómeros:

- Homopolímero
- Copolímero

En función de las propiedades del polímero, se pueden distinguir tres tipos generales de polímeros:

- Termoplásticos
- Elastómeros
- Termoestables

POLIMERIZACIÓN:

Un polímero está formado por la unión repetida de moléculas un mismo monómero para formar una cadena larga. La unión de estos monómeros es el proceso de polimerización. Existen varios métodos de polimerización: polimerización de crecimiento en cadena y polimerización por crecimiento en etapas.

- Polimerización de crecimiento en cadena: los monómeros se unen a la cadena de uno en uno. Así, se pasa de monómero a dímero (dos monómeros unidos), luego a trímeros, luego a tetrámeros, etc.
- Polimerización de crecimiento en etapas: en este caso la formación del polímero es similar al anterior método, pero los monómeros pueden unirse de formas diferentes. Por ejemplo, un dímero se podría unir a otro dímero para formar un tetrámero. En otras palabras, es posible la unión de oligómeros (cadenas cortas de monómeros) entre sí y con otros monómeros. Incluso una cadena larga en formación puede reaccionar con otra cadena larga para formar una cadena aún más larga. El proceso de polimerización es mucho más rápido pues en la polimerización de crecimiento en cadena únicamente un monómero puede reaccionar con una cadena en formación para que vaya creciendo. Elegir un método u otro dependerá de las características físico-químicas de las moléculas y de la tecnología disponible.

Además, la polimerización puede ser clasificada por el tipo de reacción:

- Por adición
- Por condensación
- Coordinación

(curiosoando, 2019).

Síntesis de polímeros:

Los polímeros se producen mediante reacciones químicas entre monómeros, que son moléculas más pequeñas. El proceso de síntesis puede ocurrir de varias maneras, de acuerdo con el tipo de polímero deseado. Algunos de los métodos más comunes incluyen:

- **Poli adición:** En este proceso, los monómeros se unen entre sí mediante enlaces covalentes, como en el caso del PVC.
- **Policondensación:** Aquí, los monómeros se unen mediante enlaces covalentes y se libera una molécula pequeña, como en el caso del nylon.
- **Poli óxido-reducción:** En este proceso, los monómeros se oxidan o reducen mediante una reacción química para formar enlaces covalentes, como en el caso del PAN (polimeros.com.es, 2023).

PLÁSTICOS:

Plástico es el nombre genérico y común que se le da a una serie de sustancias de estructura molecular y características fisicoquímicas semejantes, cuya característica fundamental es contar con elasticidad y flexibilidad durante un intervalo de temperaturas, permitiendo así su moldeado y adaptación a diversas formas. Este nombre proviene de su eminente plasticidad, es decir, su facilidad para adquirir ciertas formas.

La mayoría de los plásticos son, concretamente, materiales sintéticos y derivados del petróleo, obtenidos mediante procesos de polimerización, es decir, procesos de síntesis de largas cadenas de átomos de carbono, que dan origen a una sustancia orgánica maleable en caliente y resistente al frío. También existen plásticos que no son derivados del petróleo, como los plásticos derivados del almidón, la celulosa y ciertas bacterias.

Este material es sumamente versátil gracias a su liviandad, tacto agradable y resistencia tanto a la degradación biológica como a la ambiental (excepto por la exposición prolongada a rayos UV en algunos casos).

Estas propiedades son difíciles de conseguir con otros materiales, y hacen del plástico al mismo tiempo una bendición y un problema, ya que a la par de ser el material sintético más útil y eficaz de la historia humana, es también la principal fuente de contaminación sólida del planeta (basura). El plástico es reciclable, aunque su producción es mucho más barata y sencilla que su reutilización.

Tipos de plástico

Los elastómeros pueden deformarse y luego recuperar su rigidez original.

Existen diversas formas de clasificación de los plásticos, como pueden ser:

Según el origen de los monómeros que lo componen.

- Naturales. Los monómeros provienen de sustancias naturales como el caucho, la celulosa y la caseína (proteína presente en la leche). Por ejemplo: el celofán y la goma.
- Artificiales. Los monómeros provienen de sustancias sintéticas, principalmente derivadas del petróleo. Por ejemplo: el polietileno.

Según su reacción al calor.

- Termoplásticos. Cuando se calientan adquieren una consistencia líquida y cuando se enfrían adquieren un estado vítreo (similar al vidrio). Puede ser calentado y moldeado, y después puede ser recalentado varias veces y cambiar su forma de vuelta. Por ejemplo: el polietileno y el caucho.
- Termoestables. Cuando se calientan, se moldean y se enfrían para tomar cierta forma, luego es imposible recalentarlos para fundirlos nuevamente. Por eso se dice que son rígidos o termo duros. Por ejemplo: la baquelita y los poliésteres.
- Elastómeros. También llamados “cauchos”, son polímeros con elevada elasticidad. Si se les aplica una fuerza deformadora, tienen alta capacidad de recuperar su forma original cuando se le retira dicha fuerza. Por ejemplo: el neopreno.

Según su estructura molecular.

- **Amorfos.** Sus moléculas están desorganizadas y no tienden a formar ninguna estructura ordenada, razón por la cual dejan grandes espacios entre sus partículas para que penetre la luz, logrando así plásticos transparentes. Por ejemplo: el poliestireno atáctico.
- **Cristalizables.** Tienden a formar cristales rígidos y resistentes a la deformación. Dependiendo de la velocidad de enfriamiento de un polímero puede aumentarse o disminuirse su cristalinidad. Si se enfría rápido disminuye su cristalinidad, y si se enfría lento, aumenta su cristalinidad. En el caso de los plásticos amorfos, no tendrán ningún nivel de cristalinidad, sin importar la velocidad a la que se enfríen. Por ejemplo: el polipropileno es un plástico cristalizable.
- **Semicristalizables.** Tienen características intermedias entre amorfos y cristalizables, pues tienen zonas desordenadas y otras ordenadas. El paso de la luz a través de ellos dependerá de su espesor. Por ejemplo: el polietileno de baja densidad.

Usos del plástico

Las aplicaciones del plástico son virtualmente infinitas: desde piezas de recambio para aparatos electrónicos, eléctricos e industriales, como aislantes, protectores, fundas, amortiguadores, etc.

Otro uso muy común del plástico es en la fabricación de herramientas, juguetes, envoltorios, muebles, envases, separadores, sujetadores y, sobre todo, bolsas.

Propiedades del plástico

Los plásticos son poco densos y económicos en su fabricación. Los plásticos son conjuntos de macromoléculas orgánicas, generalmente de origen sintético, en su mayoría impermeables, resistentes, diamagnéticos y buenos aislantes acústicos, eléctricos y térmicos, aunque no son muy resistentes a temperaturas muy elevadas en su totalidad.

Además, son poco densos, económicos en su fabricación, fáciles de trabajar y moldear. Una vez que se han enfriado y adquirido cierta forma, son resistentes a la corrosión y a muchos elementos químicos, excepto los solventes orgánicos (como el thinner, diluyente cuyo nombre deviene del inglés).

Por demás, la mayoría de los plásticos no son biodegradables, aunque actualmente se experimente en esa dirección, ni son fáciles de reciclar, lo cual hace de ellos una fuente de contaminación importante que perdura en el tiempo. (Álvarez, 2021)

CLASIFICACIÓN DE PLÁSTICOS:

Los monómeros son las piezas fundamentales de las estructuras de los plásticos (p.e. etileno). Son moléculas sencillas (Carbono e Hidrógeno). La unión de muchos monómeros constituye un polímero (p.e. polietileno).

Existen dos grandes tipos de plásticos:

Los termoplásticos, que no sufren cambios en su estructura química durante el calentamiento. Se pueden calentar y volver a moldear cuantas veces se desee. Por ejemplo, el polietileno (PE), el polipropileno (PP), el poliestireno (PS), el poliestireno expandido (EPS), el policloruro de vinilo (PVC), el politereftalato de etilenglicol (PET), etc.

Los termoestables, que sufren un cambio químico cuando se moldean y, una vez transformados por la acción del calor, no pueden ya modificar su forma. Por ejemplo, las resinas epoxídicas, las resinas fenólicas y amídicas y los poliuretanos.

Los plásticos son versátiles, duraderos, resistentes, baratos y livianos.

¿De dónde provienen?

Los plásticos proceden de recursos naturales: petróleo, gas natural, carbón y sal común.

POLIETILENO TEREF TALATO (PET)

Características:

Se produce a través del Ácido Tereftálico y el Etilenglicol por policondensación. Existen dos tipos: grado textil y botella. Para el grado botella se lo debe post condensar, existiendo diversos colores para estos usos.

Ventajas:

- Barrera a los gases
- Transparente
- Irrompible
- Liviano
- Impermeable
- No tóxico
- Inerte (al contenido)

POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD (PEAD)

Características:

Es un termoplástico fabricado a partir del Etileno (elaborado a partir del Etano, uno de los componentes del gas natural). Es muy versátil y se lo puede transformar de diferentes maneras: inyección, soplado, extrusión o rotomoldeo.

Ventajas:

- Resistente a las bajas temperaturas
- Irrompible
- Liviano
- Impermeable
- Inerte (al contenido)
- No tóxico

POLICORURO DE VINILO (PVC)

Características:

Se produce a partir de dos materias primas naturales: 43% gas y 57% sal común. Para su procesado es necesario fabricar compuestos con aditivos especiales, que permiten obtener productos de variadas propiedades para un gran número de aplicaciones. Se obtienen productos rígidos a totalmente flexibles. Se transforma por inyección, extrusión o soplado.

Ventajas:

- Resistente a la intemperie
- Transparente
- No tóxico
- Inerte (al contenido)
- Impermeable
- Irrompible

POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (PEBD)

Características:

Se produce a partir del gas natural. Al igual que el PEAD, es de gran versatilidad y se procesa de diversas formas: inyección, extrusión, soplado y rotomoldeo. Su transparencia, flexibilidad y economía hacen que esté presente en una diversidad de envases, sólo o en conjunto con otros materiales y en variadas aplicaciones.

Ventajas:

- No tóxico
- Flexible
- Liviano
- Transparente
- Inerte (al contenido)
- Impermeable
- Económico

POLIPROPILENO (PP)

Características:

Es un termoplástico que se obtiene por polimerización del propileno. Los copolímeros se forman agregando Etileno durante el proceso. El PP es un plástico rígido, de alta cristalinidad y elevado punto de fusión, excelente resistencia química y el de más baja densidad. Al adicionarle distintas cargas (talco, caucho, fibra de vidrio, etc.) se potencian sus propiedades hasta transformarlo en un polímero de ingeniería. El PP es transformado en la industria por los procesos de inyección, soplado, extrusión y termo formado.

Ventajas:

- Resistente a la temperatura

- Barrera a los aromas
- Impermeable
- Irrompible
- Brilloso
- Liviano
- Transparente en películas
- No tóxico

POLIESTIRENO (PS)

Características:

PS Cristal: es un polímero de estireno monómero derivado del petróleo, cristalino y de alto brillo. PS Alto Impacto: es un polímero de estireno monómero con oclusiones de Polibutadieno que le confiere alta resistencia al impacto. Ambos PS son fácilmente moldeables a través de procesos de inyección, extrusión, termo formado y soplado.

Ventajas:

- Brilloso
- Liviano
- Irrompible
- Impermeable
- Inerte y no tóxico
- Transparente

OTROS PLÁSTICOS

Características:

En este rubro se incluyen una enorme variedad de plásticos tales como Policarbonato (PC), Poliamida (PA), ABS, SAN, EVA, Poliuretano (PU), Acrílico (PMMA) entre otros. Se puede desarrollar un tipo de plástico para cada aplicación específica.

Ventajas:

- Resistentes a la corrosión

- Flexibles
- Livianos
- No tóxicos (CAIP, 2020)

Métodos de recuperación de plásticos:

El reciclaje es un factor de gran importancia para la conservación de nuestro medio ambiente, el cual nos aporta una serie de beneficios, como, por ejemplo: permite ahorrar energía, evita la explotación de los recursos naturales, reduce la contaminación, permite alargar la vida útil de los vertederos y un largo etc.

Cuando los desechos generados se procesan y se transforman, podemos obtener materias primas, las cuales serán utilizadas en nuevos procesos de fabricación. De esta forma, el reciclaje contribuye a eliminar los residuos generados, a ahorrar en los procesos industriales y a reducir la explotación de los recursos naturales.

Reciclaje mecánico:

Se refiere a todas las técnicas y procesos que incluyan el trabajo manual o ayudado por máquinas. Este tipo de reciclaje es utilizado mucho en la clasificación de residuos mezclados y en el reciclaje del plástico.

Reciclaje químico:

Incluye técnicas y procedimientos que implican el cambio en la estructura química del material. Su finalidad es la descomposición del polímero para la obtención de monómeros. Este tipo de reciclaje es utilizado mediante disoluciones, hidrólisis, hidrogenación.

Reciclaje energético:

Se utiliza este tipo de reciclaje en materiales cuyo fin es el aprovechamiento energético y cuyos residuos no pueden ser clasificados y recuperados, por lo que, debido a esta imposibilidad técnica o económica, se aprovechan de este modo. Un ejemplo de estos son la incineración de residuos, pirólisis y gasificación.

Reciclaje por residuo:

En este tipo de reciclaje, lo que se busca es la degradación de toda la materia orgánica en presencia o en ausencia de oxígeno. Estos tratamientos pueden emplearse con la materia orgánica separada en origen o con la materia orgánica sin separar, utilizando procesos mecánicos complementarios en este último caso.

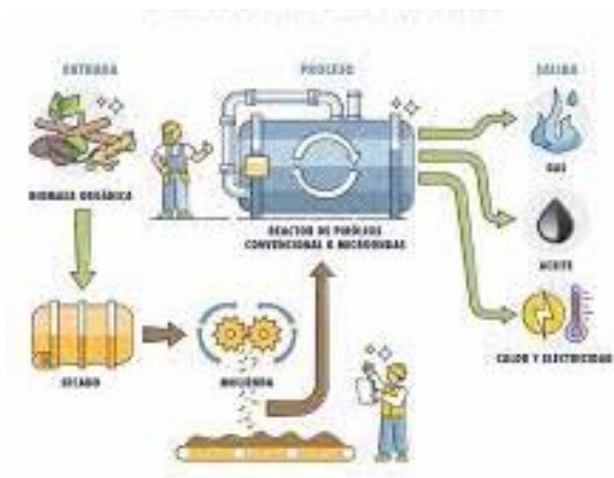


Figura1. Reciclaje mecánico



Figura 2. Reciclaje químico



Figura 3. Reciclaje energético



Figura 4. Reciclaje por residuo

Esto hace evidente una clara necesidad de introducir el concepto de calidad en las actividades de reciclado, para asegurar las propiedades de los reciclados en un rango estrecho de tolerancia.

Se deben desarrollar e implementar procedimientos de caracterización rápidos, rentables y confiables para los plásticos reciclados dentro de las instalaciones de reciclaje para garantizar la calidad de sus propiedades.

Reciclado primario:

Proceso también conocido como re-extrusión, que consiste en la reintroducción de piezas o residuos plásticos grado industrial de un solo tipo de plástico al ciclo de extrusión, en la misma línea de producción, para la obtención de productos con la misma aplicación a la que estaba inicialmente destinado el material virgen.

Reciclado secundario:

Materiales como residuos plásticos de baja calidad y que no son adecuados para ser procesado directamente, son reprocesados con el fin de obtener productos terminados o materiales con características de desempeño menores a los del material original

Reciclado terciario:

En este proceso materiales plásticos sólidos son convertidos mediante el uso de calor o descomposición térmica en altas temperaturas y/o la descomposición química, en moléculas o compuestos más pequeños de bajo peso molecular. Estas sustancias químicas o combustibles son utilizadas para la producción de petroquímicos y plásticos.

Reciclado cuaternario o incineración:

Aunque convencionalmente este proceso no es totalmente aceptado como un proceso de reciclado, ya que no hay una etapa de recirculación o recuperación de material como tal, si contempla la recuperación de energía.

Despolimerización:

De los procesos químicos para la despolimerización de PET, la metanólisis, la hidrólisis y sobre todo el glicólisis, son los procesos más utilizados. Sin embargo, la metanólisis e hidrólisis se llevan a cabo a condiciones de presión y temperatura mayores que en el caso del glicólisis, y además, debido a las condiciones ácidas o básicas de la hidrólisis, esta puede generar mayores problemas ambientales. Contrario a lo que se podría pensar y a pesar de las múltiples alternativas que existen para reciclar el PET, esta práctica constituye menos del 5% del consumo anual del polímero a nivel mundial. En el caso del glicólisis, el proceso más empleado, es llevado a cabo con etilenglicol.

Método utilizado

Hidrólisis

Es una reacción química en la que la adición de agua provoca la ruptura de los enlaces moleculares. Esto provoca que la molécula se deshaga en sus componentes más pequeños: tras moléculas.

Hidro significa agua y lisis significa desligar o romper.

Son moléculas biológicas grandes formadas por la unión de muchas moléculas pequeñas del mismo tipo. La hidrólisis es crucial para el funcionamiento normal de las células, ya que al descomponer polímeros en monómeros (moléculas pequeñas) permite la obtención de moléculas más pequeñas que pueden ser absorbidas más fácilmente por las células.

También se aplica a algunas reacciones ácido-base en las que participa el agua y se rompe un enlace covalente.



Figura 5: Hidrolisis del éster

Al ser disueltos en agua, los iones constituyentes de una sal se combinan con los iones hidronio, H_3O^+ o bien con los iones hidroxilo, OH^- , o ambos. Dichos iones proceden de la disociación del agua. Esto produce un desplazamiento del equilibrio de disociación del agua y como consecuencia se modifica el valor del pH.

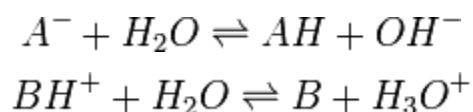


Figura 6: Ejemplo de desplazamiento de equilibrio

Los iones A^- , BH^+ procedentes de ácidos débiles AH o bases débiles B se hidrolizan

por acción del agua, dependiendo el grado de la reacción de la debilidad del ácido o de la base; los iones procedentes de ácidos o bases fuertes no se hidrolizan apreciablemente. El equilibrio de la reacción se puede desplazar mediante la adición de un ácido o una base al medio de reacción.

La hidrólisis del PET produce AT puro y EG para su posterior reutilización en la producción de polímero virgen. El proceso de hidrólisis es clasificado en tres categorías diferentes, así: hidrólisis neutra con agua o vapor, hidrólisis ácida e hidrólisis alcalina o saponificación.

Existen diversas formas de hidrólisis, dependiendo de las sustancias que se hacen reaccionar con el agua:

Hidrólisis ácido-base.

En esta reacción el agua se divide en un ion hidroxilo (OH^-) y un protón (H^+), que es inmediatamente hidratado para formar un ion hidronio (H_3O^+). Así, el agua pura manifiesta esta reacción espontáneamente.

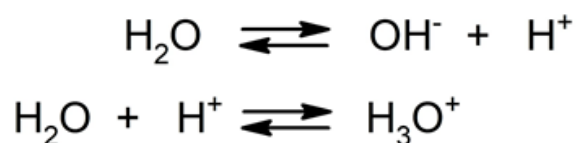


Figura 7: Ejemplo de hidrólisis ácido-base

Cuando se añaden determinadas sustancias al agua se puede modificar el equilibrio de la reacción anterior. Por ejemplo, si añadimos sales, dependiendo de su solubilidad, sus aniones o cationes se pueden combinar con los iones OH^- y H_3O^+ , lo que puede provocar que varíe el pH de la disolución final.

Así, existen cuatro clasificaciones para la hidrólisis ácido-base según el tipo de sal que se añada al agua:

Hidrólisis de sal de ácido fuerte-base fuerte:

Cuando se diluye una sal proveniente de un ácido y una base fuerte en agua, no se produce casi hidrólisis, debido a lo que no se altera el equilibrio de disociación del agua. El pH en este caso será neutro.

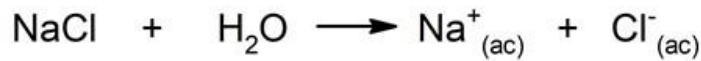
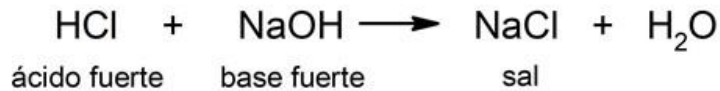


Figura 8: Ejemplo de hidrólisis ácido fuerte- base fuerte

Hidrólisis de sal de ácido débil-base fuerte:

Se combinan el anión de la sal (proveniente del ácido débil y la base fuerte) y un protón del agua, liberando iones hidroxilo, debido a lo que el pH resultante será básico.

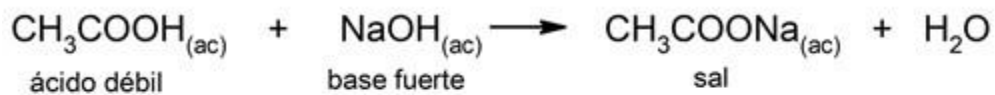
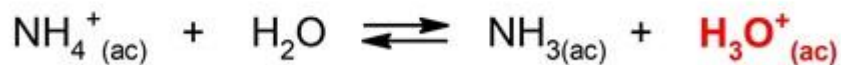
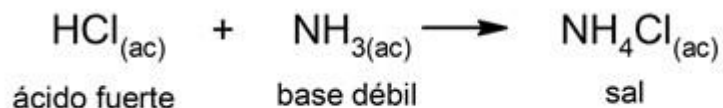


Figura 9: Ejemplo de hidrólisis ácido débil- base fuerte

Hidrólisis de sal de ácido fuerte-base débil:

El catión de la sal (proveniente del ácido fuerte y la base débil) cede un protón al agua para formar un ion hidronio (H_3O^+), debido a lo que el pH resultante será ácido.



Ejemplo 10: Ejemplo de hidrólisis ácido fuerte- base débil

Hidrólisis de sal de ácido débil-base débil:

El catión de la sal (proveniente de la base débil) se combina con el agua liberando un ion hidronio (H_3O^+) y el anión de la sal (proveniente del ácido débil) se combina con el agua liberando un ion hidroxilo (OH^-). El pH resultante dependerá de las cantidades de iones hidronio e hidroxilo producidos. Si se produce más ion H_3O^+ que ion OH^- , el pH será ácido, y si se produce más ion OH^- que ion H_3O^+ , el pH será básico. Por otra parte, si las cantidades producidas de ambos iones son iguales, el pH resultante será neutro.

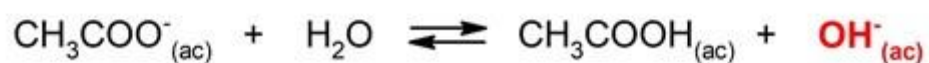
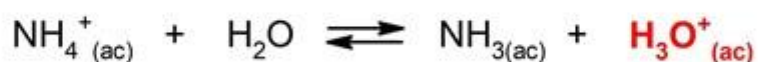
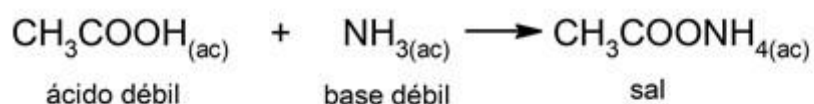


Figura 11: Ejemplo de hidrólisis ácido débil- base débil

MÉTODO SELECCIONADO:

Hidrólisis Alcalina:

Materiales

- PET de botella desechado en diferentes tamaños de partícula
- Etilenglicol
- Hidróxido de sodio
- Ácido clorhídrico.

Se realizó en 100ml de solución 2M de NaOH en etilenglicol usando 5 g de PET. Se llevó a cabo en un sistema de calentamiento. Se usó una agitación de 400 rpm a 80°C y un tiempo de dos horas. Los productos obtenidos de esta degradación se separaron por filtración.

Con este método se obtendrá la despolimerización del PET de una manera eficiente y en un lapso de tiempo más corto.

METODOLOGÍA

Inicio de método seleccionado

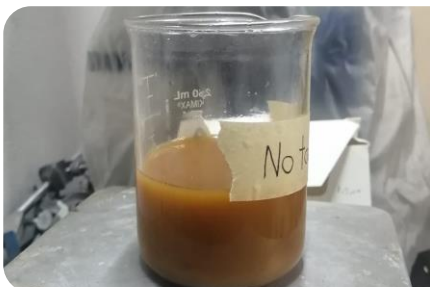


Se colocó en un vaso de precipitados: NaOH, $C_2H_6O_2$, y 5 gramos de tereftalato de polietileno.

Se colocó en una plancha de calentamiento a $100^{\circ}C$ y agitándose por dos hora



A los 30 minutos comenzó a cambiar de color.

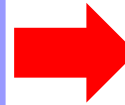
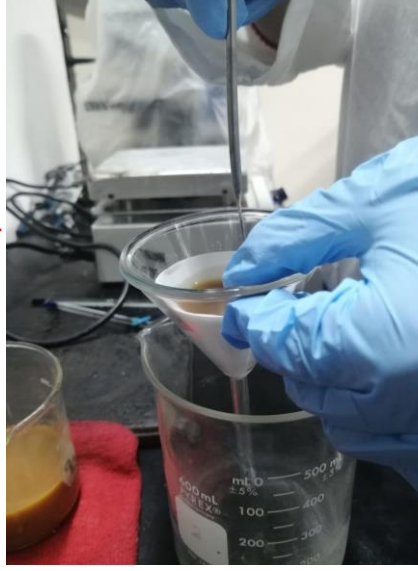


Se dejó sedimentando por un día y se volvió a mantener agitado por otra hora, aquí cambio de color completamente



Se mantuvo en calentamiento a $80^{\circ}C$

PROCESO DE FILTRACIÓN



Se comenzó a filtrar, y ya que el proceso era muy lento, tardo 2 días en terminar de filtrarse.



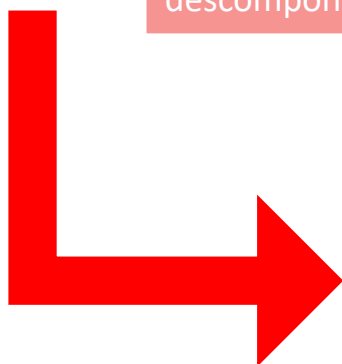
Termino de filtración.



PET que no se logro descomponer aún húmedo.



Producto final de filtración.



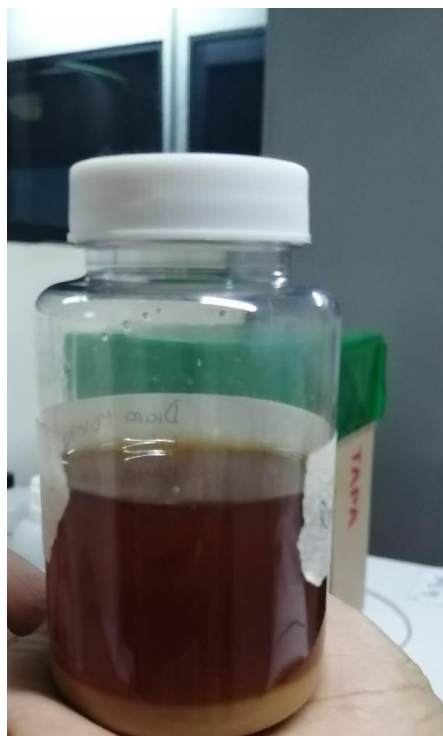
El PET que no se logró descomponer fue llevado al horno a secar a una temperatura de 80°C por 1 día.



De los 5 gramos de PET inicial se logró descomponer 0.74 gramos.
El PET seco se veía de esta manera.



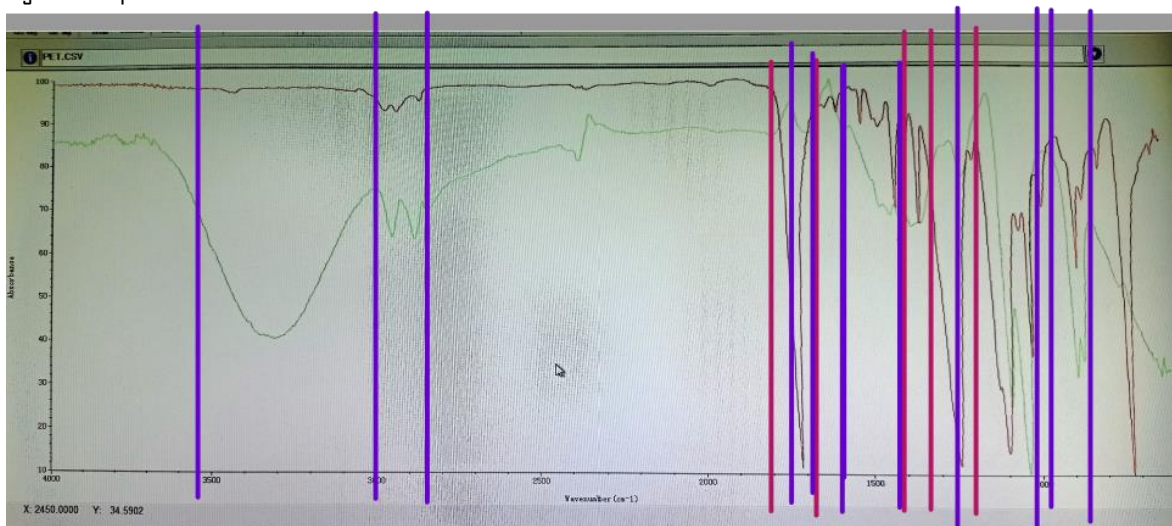
RESULTADO FINAL



ANÁLISIS DE RESULTADOS

ANÁLISIS ESPECTRO FTIR

Figura 12: Espectro FTIR



Nota: Espectro FTIR obtenido de la hidrólisis del PET.

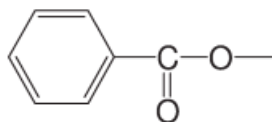
De acuerdo al análisis del FTIR del espectro color rojo (PET), podemos observar una tensión cerca de los 1710 cm^{-1} de un enlace $\text{C}=\text{O}$, existe una pequeña tensión cerca de los 1300 a 1400 cm^{-1} de $\text{C}=\text{C}$, de igual forma se pueden observar tensiones que van desde los 1100 a los 1300 cm^{-1} de enlaces de $\text{C}-\text{H}$.

Por otra parte, en el espectro de color verde (PET degradado), podemos observar una banda ancha que va de los 3000 a los 3500 cm^{-1} correspondiente a una vibración de tensión de tensión de enlaces $\text{O}-\text{H}$, que es característico del etilenglicol, indicando de igual forma la presencia de dioles. Existe una vibración que va desde los 1850 a los 1900 cm^{-1} indicando la presencia de $\text{C}-\text{H}$, hay una vibración que va de desde los 1600 a los 1700 cm^{-1} de $\text{C}=\text{O}$, vibración desde los 1690 a los 1430 cm^{-1} de $\text{C}=\text{C}$ del anillo aromático, flexión que va desde los 1010 a los 1250 cm^{-1} de $\text{C}-\text{H}$, vibración de $\text{C}=\text{O}$ en 1865 cm^{-1} , las bandas desde 850 a 910 cm^{-1} están relacionadas con una vibración de un anillo aromático p-sustituido. (A, 2015)

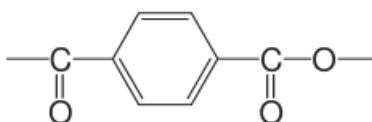
El pico amplio entre los números de onda 3570 y 3200 cm^{-1} se puede interpretar como la existencia de grupos hidróxi y, en particular, la extensión del enlace

hidrógeno y oxígeno en -OH.

Los picos de las bandas de absorción en 1720 cm^{-1} así como a 1272 , 1018 y 730 cm^{-1} denotan la existencia de un éster de ácido carboxílico aromático de este tipo.



La absorción alcanza en las bandas 1504 cm^{-1} , así como a 1408 , 1105 , 1018 y 874 u 877 cm^{-1} son característicos de la existencia de un éster de ácido carboxílico de tipo tereftalato.



Los picos en las bandas 2950 cm^{-1} y 2877 o 2875 cm^{-1} son característicos del tramo asimétrico/simétrico de C-H en los grupos metileno $-\text{CH}_2-$. El mismo grupo también se identifica por los picos de 1452 cm^{-1} y 1379 - 1377 cm^{-1} , que caracterizan la curvatura asimétrica/simétrica del metilo C-H.

El pico en el número de onda 1578 cm^{-1} representa la existencia de un anillo fenilo aromático.

Los picos mencionados confirman la estructura de un PET glicolizado.

CONCLUSIONES:

De acuerdo con la investigación realizada acerca de las metodologías empleadas para la recuperación de polímeros se determinó utilizar la recuperación química o terciaria, ya que el uso de este método representa la generación de productos de valor agregado, además, a partir de su recuperación se puede volver a sintetizar polímeros “vírgenes” y no tienen un número limitado de recuperación como lo es en caso de la recuperación primaria y secundaria.

Se realizó una investigación sobre la degradación del PET con el fin de encontrar un método que nos diera resultados, nos ahorrara tiempo y fuera eficiente, por lo cual decidimos utilizar Hidrolisis Alcalina ya que, de acuerdo con lo investigado nos pareció que cumplía con las características que buscábamos.

Se logró verificar que el método propuesto fue eficiente (Hidrolisis alcalina) ya que se pudo confirmar la existencia de un PET glicolizado, en el análisis del espectro.

Los resultados obtenidos en los espectros demuestran que, nos confirma que se degradó el PET de manera satisfactoria ya que se muestra una ruptura de enlaces, indicando que hubo una separación de un polímero a un monómero demostrando la degradación del PET.

GLOSARIO:

Despolimerización: Es el proceso que convierte el polímero en un monómero, en una mezcla de monómeros u oligómeros. La despolimerización es un proceso de descomposición de la cadena del polímero hasta sus monómeros u oligómeros. Por lo general se logra con alta temperatura (térmica) o agentes hidrolíticos (química). (polímeros, Todo en polímeros, 2016)

Oligómeros: Los oligómeros son polímeros de bajo peso molecular que comprenden un pequeño número de unidades repetidas o monómeros, cuyas propiedades físicas dependen significativamente de la longitud de la cadena. Los oligómeros son esencialmente intermediarios de la reacción de polimerización que encuentran amplias y directas aplicaciones en la ciencia de los materiales. (polímeros, Todo en polímeros, 2020)

Diamagnéticos: Propiedad de los materiales por la cual se magnetizan débilmente en sentido opuesto a un campo magnético aplicado. Los materiales diamagnéticos son repelidos débilmente por los imanes. (EcuRed, 2024)

Extrusión: La extrusión se refiere al proceso industrial de fundir y moldear el plástico a flujo constante de presión y fuerza, para obtener la forma deseada de cierto polímero para su aplicación final. Mediante esta técnica, se pueden obtener productos de excelente calidad como películas para embalaje, bolsas de plástico, tuberías de agua y drenaje, mangueras para jardín, filamentos, envases, entre otros. (García, 2024)

Pirólisis: La pirólisis es una degradación térmica de una sustancia en ausencia de oxígeno, por lo que dichas sustancias se descomponen mediante calor, sin que se produzcan las reacciones de combustión. (Ecológica, 2024)

Metanólisis: La metanólisis es una metodología que implica la degradación del PET, por medio de la adición de metanol a temperaturas (180-280°C) y presiones elevadas. Los productos principales son el dimetil tereftalato (DMT) y el etilenglicol (EG). (PRIETO, 2023)

Dioles: Se denomina diol a los alcoholes que tienen dos grupos hidroxilo; por lo tanto entran dentro de la categoría de polioles. (Quimica.es, 2024)

Bibliografía

- A, R. H. (2015). *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. Obtenido de Revista Mexicana de Ingeniería Química:
https://www.researchgate.net/publication/286580841_Thermal_behavior_of_banana_starch_films_with_degraded_polyethylene_terephthalate#pf4
- Álvarez, D. O. (15 de julio de 2021). *Concepto.de*. Obtenido de Concepto.de:
<https://concepto.de/plastico/>
- CAIP. (15 de 11 de 2020). *CAIP*. Obtenido de CAIP: [https://www.caip.org.ar/tipos-de-plasticos/#:~:text=La%20uni%C3%B3n%20de%20muchos%20mon%C3%B3meros,dos%20grandes%20tipos%20de%20pl%C3%A1sticos%3A&text=Por%20ejemplo%2C%20el%20polietileno%20\(PE,etilenglicol%20\(PET\)%2C%20etc.](https://www.caip.org.ar/tipos-de-plasticos/#:~:text=La%20uni%C3%B3n%20de%20muchos%20mon%C3%B3meros,dos%20grandes%20tipos%20de%20pl%C3%A1sticos%3A&text=Por%20ejemplo%2C%20el%20polietileno%20(PE,etilenglicol%20(PET)%2C%20etc.)
- curiosoando. (26 de 11 de 2019). *curiosoando*. Obtenido de curiosoando:
<https://curiosoando.com/que-es-un-polimero>
- Curiosoando. (26 de 11 de 2019). *Curiosoando*. Obtenido de Curiosoando:
<https://curiosoando.com/que-es-un-polimero>
- DiCYT. (17 de 04 de 2012). *sinc*. Obtenido de sinc:
<https://www.agenciasinc.es/Noticias/Nuevos-tratamientos-quimicos-para-reciclar-plastico>
- Ecológica, M. d. (24 de 01 de 2024). *Ministerio de la Transición Ecológica*. Obtenido de Ministerio de la Transición Ecológica : <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/domesticos/gestion/sistema-tratamiento/pirolisis.html#:~:text=La%20pirolisis%20es%20una%20degradaci%C3%B3n,produzcan%20las%20reacciones%20de%20combusti%C3%B3n>
- EcuRed. (24 de 01 de 2024). *EcuRed*. Obtenido de EcuRed:
<https://www.ecured.cu/Diamagnetismo>
- García, A. D. (24 de 01 de 2024). *ANÁHUAC MÉXICO*. Obtenido de ANÁHUAC MÉXICO:
<https://www.anahuac.mx/mexico/noticias/Extrusor-de-polimeros-que-es-y-como-funciona#:~:text=%C2%BFQu%C3%A9%20es%20el%20proceso%20de,pol%C3%ADmero%20para%20su%20aplicaci%C3%B3n%20final.>
- Mariano. (6 de 07 de 2011). *Blogspot*. Obtenido de Blogspot:
[https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/07/reciclado-quimico-de-pet.html#:~:text=La%20despolimerizaci%C3%B3n%20del%20PET%20a,temperatura%20\(180%2D280%C2%BAC\).](https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/07/reciclado-quimico-de-pet.html#:~:text=La%20despolimerizaci%C3%B3n%20del%20PET%20a,temperatura%20(180%2D280%C2%BAC).)
- polímeros, T. e. (23 de 11 de 2016). *Todo en polímeros*. Obtenido de Todo en polímeros:
<https://todoenpolimeros.com/2016/11/23/degradacion-y-despolimerizacion/>
- polímeros, T. e. (21 de Julio de 2020). *Todo en polímeros*. Obtenido de Todo en polímeros: <https://todoenpolimeros.com/2020/07/21/oligomeros/>
- polimeros.com.es. (17 de 12 de 2023). *polimeros.com.es*. Obtenido de polimeros.com.es:
<https://polimeros.com.es/quimica-de-polimeros/descubre-todo-sobre-los-metodos-de-sintesis-y-caracterizacion-de-polimeros-que-estan-revolucionando-la-industria/>
- Prieto, A. M. (24 de 04 de 2023). *Plastics Technology Mexico*. Obtenido de Plastics Technology Mexico: <https://www.pt-mexico.com/articulos/reciclado-quimico-una-reflexion-tecnica-sobre-la-depolimerizacion-del-pet->
- PRIETO, M. A. (24 de Abril de 2023). *Plastics Technology México*. Obtenido de Plastics Technology México: <https://www.pt-mexico.com/articulos/reciclado-quimico-una-reflexion-tecnica-sobre-la-depolimerizacion-del-pet->
- Protegidas, C. N. (23 de Noviembre de 2018). *Gobierno de México*. Obtenido de Gobierno de México: <https://www.gob.mx/conanp/es/articulos/con-su-mismo->

plastico?idiom=es#:~:text=Se%20estima%20que%20al%20a%C3%B1o,came%C3%B3n%20de%20basura%20cada%20minuto.

Quimica.es. (24 de Enero de 2024). *Quimica.es*. Obtenido de Quimica.es:
https://www.quimica.es/enciclopedia/Diol.html#google_vignette

UNED. (06 de 04 de 2021). *GTRU*. Obtenido de GTRU:
<https://www2.uned.es/biblioteca/rsu/pagina4.htm>