

EVALUACIÓN DE METODOLOGÍAS DE HIDROLISIS DEL PET PARA SU  
APROVECHAMIENTO

ALEXANDER CASTAÑO ZAIDIZA

JUAN PABLO OLMOS CASANOVA

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE MANIZALES  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

INGENIERÍA AMBIENTAL

MANIZALES

2018

EVALUACIÓN DE METODOLOGÍAS DE HIDROLISIS DEL PET PARA SU  
APROVECHAMIENTO

ALEXANDER CASTAÑO ZAIDIZA

JUAN PABLO OLMOS CASANOVA

Trabajo de grado para obtener el título de Ingenieros Ambientales

TUTOR:

MSc. SEBASTIÁN ISAAC PACHECO GONZALES

COTUTOR:

MSc.(C) CARLOS ALEXANDER PINILLA CASTAÑEDA

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE MANIZALES  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
MANIZALES-CALDAS

2018

## DEDICATORIAS

*En primera instancia, dedicamos a Dios Padre este trabajo por su bendición,*

*A nuestros padres, familiares y amigos.*

## **AGRADECIMIENTOS**

*Agradecemos a Dios, por permitirnos llegar hasta aquí.*

*A nuestros tutores Sebastián Isaac Pacheco & Carlos Alexander Pinilla, por brindarnos sus conocimientos, colaboración y paciencia durante este tiempo.*

*Al personal del Caler por brindarnos los materiales para el desarrollo de nuestra investigación.*

*Al PhD. Milton Rosero y a la Universidad de Caldas por darnos un espacio en sus instalaciones.*

*A nuestras familias, por su apoyo incondicional en nuestro proceso de formación profesional y personal.*

## TABLA DE CONTENIDO

1	Glosario.....	1
2	Resumen.....	3
3	Abstract.....	4
4	Introducción.....	5
5	Planteamiento del problema.....	7
6	Justificación.....	9
7	Objetivos.....	11
7.1	Objetivo general.....	11
7.2	Objetivos específicos.....	11
8	Marco Teórico.....	12
8.1	Los materiales plásticos.....	12
8.2	Tereftalato de Polietileno (PET).....	12
8.3	Propiedades Del PET.....	13
8.3.1	Resistencia.....	13
8.3.2	Variedad.....	14
8.3.3	Química.....	14
8.3.4	Solubilidad.....	14
8.4	Ácido tereftálico.....	14

8.5	Hidrólisis .....	15
8.5.1	Hidrólisis Ácida.....	15
8.5.2	Hidrólisis Alcalina.....	15
8.6	Compuestos orgánicos .....	15
8.7	Espectroscopia de infrarrojo.....	16
9	Marco Metodológico.....	17
9.1	Revisión de estado del arte .....	23
9.2	Hidrólisis Alcalina.....	32
9.2.1	Materiales.....	32
9.2.2	Procedimiento.....	33
9.3	Hidrólisis Ácida.....	34
9.3.1	Materiales.....	34
9.3.2	Procedimiento.....	34
9.4	Prueba de filtración para muestras hidrolíticas.....	36
9.4.1	Materiales .....	36
9.4.2	Procedimiento.....	36
9.5	Prueba para la identificación de compuestos orgánicos .....	37
9.5.1	Materiales .....	37
9.5.2	Procedimiento.....	38
9.6	Evaluación de la solubilidad del compuesto (Ácido Tereftálico).....	39

9.6.1	Materiales .....	39
9.6.2	Procedimiento.....	40
10	Resultados y Análisis .....	42
10.1	Resultados de Hidrólisis Alcalina (Básica) .....	42
10.1.1	Evidencias Fotográficas Hidrólisis Alcalina.....	43
10.2	Resultados de Hidrólisis Ácida.....	47
10.2.1	Evidencias Fotográficas Hidrólisis Ácida.....	48
10.3	Filtración de las muestra de hifrolitica alcalina.....	50
10.3.1	Evidencias Fotográficas de Filtración para hidrolisis alcalina.....	50
10.4	Resultados de la Identificación de Compuestos Orgánicos.....	53
10.4.1	Evidencias Fotográficas de la identificación de compuestos orgánicos .....	53
10.4.2	Análisis de infrarrojo del PET hidrolizado .....	57
10.4.3	Resultados infrarrojo del ácido tereftálico .....	58
11	Conclusiones .....	61
12	Recomendaciones.....	63
13	Bibliografía.....	64
14	Anexos.....	70
14.1.1	Resultados y Evidencias Fotográficas para prueba de diluciones.....	70

## **TABLA DE TABLAS**

Tabla 1. Tipo de documentos.....	20
Tabla 2. Documentos por área temática.....	21
Tabla 3. Artículos indagados para obtención de la metodología a usar.....	23
Tabla 4. Compuestos utilizados en el laboratorio de dilución ATP.....	40



## TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Estructura del PET. Recuperado de: <a href="http://www.arapack.com/la-empresa/preguntas-frecuentes-envases-termoconformados">http://www.arapack.com/la-empresa/preguntas-frecuentes-envases-termoconformados</a> ).....	13
Figura 2. Volumen 40 mL de 1-Butanol. ....	43
Figura 3. Montaje para hidrolisis alcalina. ....	43
Figura 4. Masa de PET (1 gramo). ....	44
Figura 5. Mezcla de los materiales. ....	44
Figura 6. Finalización de la prueba alcalina. ....	45
Figura 7. Muestra final de la hidrolisis alcalina. ....	46
Figura 8. Muestra precipitada en tubo de muestra. ....	46
Figura 9. Mezcla de la muestra. ....	48
Figura 10. Residuos de la hidrolisis acida. ....	49
Figura 11. Muestra de hidrolisis acida. ....	49
Figura 12. Muestra de hidrolisis alcalina ....	50
Figura 13. Proceso de filtración para muestra alcalina ....	51
Figura 14. Secado de la muestra alcalina. ....	51
Figura 15. Muestra alcalina en fase sólida. ....	52
Figura 16. Muestras a identificar y comparar. ....	53
Figura 17. Masa de la muestra hidrolítica alcalina.....	54
Figura 18. Masa de bromuro de potasio.....	54
Figura 19. Macerado de la muestra alcalina y el bromuro de potasio.....	55
Figura 20. Montaje de la muestra alcalina al equipo de identificación.....	56
Figura 21. Generación de resultados para la muestra hidrolítica alcalina.....	56
Figura 22. Espectro IR de la muestra hidrolítica alcalina. ....	57

Figura 23. Espectro IR del ácido tereftalico.....	58
Figura 24. Estructura del PET. Recuperado de: <a href="http://www.arapack.com/la-empresa/preguntas-frecuentes-envases-termoconformados">http://www.arapack.com/la-empresa/preguntas-frecuentes-envases-termoconformados</a> ).....	58
Figura 25. Espectro infrarrojo del PET de partida. Recuperado del libro Infrared Spectroscopy of Polymers (Kathryn Bradley, Dr. Michael Bradley, 2008). .....	60
Figura 26. Muestra de 1mL de agua desalinizada con 0,05 gr de ácido tereftálico .....	70
Figura 27. Muestra de 1mL de etanol con 0,05 gr de ácido tereftalico.....	71
Figura 28. Muestra de 1mL de benceno con 0,05gr de ácido tereftálico. ....	71
Figura 29. Muestra de 1 mL de éter etílico con 0,05g de ácido tereftálico.....	72
Figura 30. Muestra de 1mL de acetona con 0,05gr de ácido tereftálico. ....	72
Figura 31. Muestra de 1mL de n- hexano con 0,05gr de ácido tereftálico.....	73
Figura 32. Muestra de 1 mL de ciclo-hexano y 0,05gr de ácido tereftalico.....	74

## TABLA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Número de citas en los últimos 18 años según Web Of Science.....	17
Gráfica 2. Número de veces citadas al año según Web Of Science.....	18
Gráfica 3. Documentos por autor según Scopus. ....	18
Gráfica 4. Documentos por asociación según Scopus.....	19
Gráfica 5. Documentos por país/territorio según Scopus.....	19
Gráfica 6. Tipo de documentos publicados según Scopus .....	20
Gráfica 7. Documentos por área temática según Scopus .....	21

## 1 Glosario

**Ácido tereftálico:** El ácido tereftálico o PTA es la principal materia prima del PET y las fibras de poliéster y se produce al oxidar el paraxileno. Algunos de los usos más comunes del PET son empaques para alimentos, bebidas y bienes de consumo. Las fibras de poliéster se usan principalmente en alfombras, ropa, muebles y aplicaciones industriales (Alpek, 2015)

**Degradación de plástico:** La degradación de los polímeros se refiere al cambio en las propiedades físicas causadas por las reacciones que escinden los enlaces. De acuerdo con el modo de iniciación, puede ser degradación térmica, mecánica, química, fotoquímica, química radiante y biológica. Entre muchos otros agentes que pueden causar la degradación de los polímeros están aquellos con naturaleza física, como las cargas, el calor y la luz, aquellos que se caracterizan por sus efectos químicos, como la oxidación y la hidrólisis (Bustamante, 2012).

**Grupo funcional:** Los grupos funcionales son los átomos con características similares en donde suceden las reacciones de un compuesto en específico (Stephen J. Weininger, 1988).

**Hidrólisis ácida:** La hidrólisis con ácido suelen emplear diluciones de ácidos minerales, tales como el ácido sulfúrico, ácido clorhídrico, etc., de alta concentración y a temperaturas inferiores a los 100°C. Con estas condiciones es posible romper esos enlaces de la sustancia tratada (Pulido, 2003).

Hidrólisis alcalina: “La Hidrólisis alcalina es un proceso químico donde hay una sustancia álcali sometida a altas temperaturas y presiones considerables, que al disolverse, desintegra el material orgánico” (Delgado, 2013).

PET: El PET (polyethylene terephthalate) o tereftalato de polietileno, es una materia prima derivada del petróleo, “los primeros usos de este material fueron para la industria textil y posteriormente se aplicó en la industria del plástico, adicionalmente, es un polímero termoplástico, con un alto grado de cristalinidad que es unas de las principales cualidades de este material” (Plásticos minipet, 2014).

Reciclaje de plástico: El reciclado químico es exclusivo de los plásticos. Se trata de un proceso que descompone las moléculas de polímeros en materias primas petroquímicas que se pueden utilizar, entre otras cosas, para fabricar nuevos plásticos. Dicho de forma sencilla, se trata de dar marcha atrás en el proceso de producción de los plásticos y devolverlos a sus primeras materias (Linazisoro, 1997).

## 2 Resumen

El presente trabajo de grado se desarrolló en el modelo de investigación de autoría propia, el cual tuvo como principal objetivo “Evaluar las metodologías de hidrólisis del PET como preparación para su aprovechamiento”. Para el cumplimiento de este objetivo se realizaron y evaluaron dos (2) metodologías para la degradación del PET, (HIDRÓLISIS ÁCIDA E HIDRÓLISIS ALCALINA) cuya información fue encontrada y sustraída de artículos y documentos indexados tales como, DEGRADACIÓN QUÍMICA DEL POLI(ETILEN TEREFALATO) y PROCESO DE RECUPERACIÓN DEL ÁCIDO TEREFALICO Y EL ETILENGLICOL A PARTIR DEL PET RECICLADO. Las dos metodologías se ejecutaron hidrolizando 1 gramo de PET obtenido de una botella plástica y, como producto de estas metodologías, se obtuvieron unas muestras hidrolizadas, practicándosele una prueba de identificación de compuestos orgánicos como la espectroscopia infrarroja (IR); se obtuvieron gráficas para la muestra hidrolizada alcalina y gráficas para el ácido tereftálico teórico (ATP), cuya obtención fue de importación. Para la identificación fue necesario que la muestra estuviera en estado sólido, realizándose una prueba de filtración para cada una de los productos, se evaluó y analizó el rendimiento de las pruebas hidrolíticas ácida y alcalina del PET, donde la prueba que tuvo mayor degradación fue la alcalina con un porcentaje de degradación del 80% con respecto a prueba ácida que obtuvo un 64% de degradación.

***Palabras clave:*** hidrólisis ácida, hidrólisis alcalina, ATP, PET, degradación.

### 3 Abstract

The present work of degree developed in the investigation model of own authorship, who had as principal aim "Evaluate the methodologies of hydrolysis of PET as preparation for his utilization". For the fulfillment of this aim of they realized and evaluated two (2) methodologies for the degradation of the PET, (ACID HYDROLYSIS AND ALKALINE HYDROLYSIS) whose information was found and obtained of articles and such indexed documents as, CHEMICAL DEGRADATION OF THE POLY(ETILEN TEREFTALATO) and PROCESS OF RECOVERY OF THE ACID TEREFTHALIC AND THE ETILENGLICOL from The RECYCLED PET. Both methodologies executed hidrolizando 1 gram of PET obtained of a plastic bottle and, as product of these methodologies, a few samples were obtained hidrolizadas, there being practised a test of identification of organic compounds as the infrared espectroscopia (IR); graphs were obtained for the sample hidrolizada alkaline and graphs for the terephthalic acid theoretical (ATP), whose obtaining was of import. For the identification it was necessary that the sample was is a solid state, a test of filtration being realized for each one of the products, the performance of the tests was evaluated and analyzed hydrolytic, acid and alkaline of PET, where the test that had major degradation was the alkaline one with a percentage of degradation of 80 % with regard to acid test that obtained 64 % of degradation.

***Keywords:*** acid hydrolysis, alkaline hydrolysis, ATP, PET, degradation.

#### 4 **Introducción**

El presente trabajo de autoría propia, refiere a una alternativa del aprovechamiento del PET, enfocándose principalmente en la problemática que aborda la contaminación del ambiente; el término de contaminación se ha vuelto relevante en los últimos años debido a las amenazas que representa para el planeta, la escasez del recurso hídrico, contaminación de los suelos, calentamiento global e inadecuada gestión o disposición de los residuos sólidos. Esta lista de amenazas se contribuyen a las actividades antrópicas realizadas diariamente, es ahora donde el tema del ambiente se ha acentuado como prioridad a nivel mundial para que los países subdesarrollados, como Colombia, comiencen a actuar inmediatamente ante esta problemática, la generación de residuos se ha vuelto un aspecto ambiental complejo de solucionar, en los últimos años ha venido creciendo la fabricación de botellas tipo PET como insumo importante en el consumo humano, utilizando los recursos naturales renovables y no renovables, dichas botellas deben cumplir con unos estándares de calidad necesarios para su óptimo uso, pero teniendo en cuenta que la vida útil o de uso del producto es relativamente corta, la degradación de este residuo es de un tiempo considerable, pues una botella plástica puede tardar en descomponerse 450 años (Service, Mote Marine Lab, & Atmospheric, 2017) sin ningún tipo de intervención tecnológica, mecánica o química para acelerar su proceso de degradación.

A través del tiempo, la ciencia y tecnología han venido creciendo exponencialmente contribuyendo el mejoramiento y el desarrollo del sector económico, social y ambiental. En el sector ambiental se han venido implementando técnicas y estrategias de manejo y reducción de impactos ambientales que están asociados a los residuos sólidos, específicamente a las botellas plásticas (PET).



Dentro de las estrategias para el aprovechamiento de las botellas plásticas está el reciclaje, que se puede realizar mediante la educación ambiental, del cual surgen ideas innovadoras para saber de qué manera reciclar el material, la elaboración de infraestructura sostenible como parques y viviendas elaboradas a base de botellas plásticas, son proyectos muy innovadores y que están tomando mucha fuerza como una táctica del post-consumo. De igual forma también existen estrategias como el aprovechamiento energético mediante pirolisis, que consiste principalmente en realizar una “descomposición térmica en ausencia de oxígeno, con temperaturas comprendidas entre 400° y 1000°C obteniendo una fracción gaseosa, líquida y sólida aprovechables(Mancheno et al., 2016)”, posterior a ello se realizan otros procedimientos como análisis de la fracción líquida utilizando el cromatógrafo de gases.

Otra estrategia de aprovechamiento para estos residuos es obtener ácido tereftálico (ATP), el cual hace parte fundamental como materia prima para la elaboración de botellas plásticas, dicha obtención consiste en elaborar pruebas químicas como la hidrólisis, que ayuden a degradar el PET cumpliendo con unas características específicas como temperatura, volúmenes de los reactivos, manejo de tiempo en cada procedimiento, para obtener resultados exitosos (Aurelio Ramírez, 2010), aunque estas técnicas no son suficientes, sí reducen de manera considerable los impactos ambientales causados por los plásticos.

## 5 Planteamiento del problema

Toneladas de plástico son desperdiciadas al año, según la Real Academia Española (RAE) el término desperdicio se refiere a: “residuo de lo que no se puede o no es fácil aprovechar o se deja de utilizar por descuido”, por esto al nombrar este término, quiere decir que los materiales plásticos representan una problemática en términos ambientales, pues son desechadas en los cuerpos de agua, a los bosques, afectando tanto la fauna como la flora del medio en donde se desechan. La problemática del PET empieza desde su elaboración, donde “la mayoría de las botellas de plástico están hechas a base de tereftalato de polietileno (PET), derivado del petróleo crudo. Por sí sola, la extracción de petróleo genera gases contaminantes que dañan el medio ambiente” ((DW), 2014), para cuantificar esta teoría, se dice que un kilogramo de PET está compuesto por 64% de petróleo, 23% de derivados líquidos de gas natural y 13% de aire. El paraxileno, extraído del petróleo crudo, permite la obtención del ácido tereftálico (ATP) al oxidarse con el aire. Por su parte, el etileno, derivado del gas natural, se oxida con aire para la obtención del etilenglicol. El PET resulta de la combinación del ácido tereftálico y el etilenglicol (Universidad de Lima. & Ruiz-Ruiz, 1997).

Desde un punto de vista neutro, es necesaria la utilización de este tipo de materiales (PET) en el mundo, bien sea como empaque de cualquier producto, sea sólido, líquido o gaseoso, pero el problema radical es la finalización de la vida útil de cada botella plástica, ya que su futuro es incierto, algunas botellas son recicladas y otras desafortunadamente son arrojadas al ambiente lo cual puede durar acerca de 450 años en descomponerse (Service, Mote Marine Lab, & Atmospheric, 2017), sin utilizar ningún proceso de descomposición intermediario.

En Colombia se procesan alrededor de 910.000 toneladas anuales de las principales resinas plásticas y solo se recicla más el 30% del plástico (Negocios, 2011), indicando a las instituciones

públicas y privadas que adopten medidas que incentiven la disminución en el uso de este material y fomenten el reciclaje, pudiendo de esta manera agregar un valor económico al reciclaje, de modo que haya una disminución de los impactos ambientales producidos por las botellas plásticas (PET).

El proceso de transformación de cualquier materia prima y de un producto con trae impactos negativos y positivos, pero ¿Será posible transformar el PET en un producto que se pueda aprovechar y que sea menos contaminante al ambiente?

## 6 Justificación

Anualmente, se acumulan millones de toneladas de botellas plásticas provenientes del consumo humano, según *Biosca* del portal web [www.eldiario.es](http://www.eldiario.es), en 2016, en el mundo se compraron 480.000 millones de botellas plásticas y una proyección al año 2021 es que habrá un crecimiento del 20%; cifras totalmente alarmantes en términos ambientales, pues según el mismo autor, menos de la mitad de estas botellas fueron recicladas y solo el 7% de estas se convirtió en una nueva botella, las demás fueron a parar a rellenos sanitarios, océanos y en vertederos.

En la actualidad, el uso de materias primas como el plástico se ha venido incrementando de manera exponencial, dado por un factor principal, la demanda causada al haber un crecimiento poblacional y el consumismo exagerado que está presentando el mundo moderno; la problemática ha acogido bastante importancia, pues a pesar de ser un material muy usado y prácticamente básico para el quehacer diario, su degradación de manera natural puede tardar de 100 a 1.000 años sin utilizar ninguna intervención física o química que acelere la degradación de este material (Cuevas, 2017).

Este material presenta un problema en particular al ser desechado en un relleno sanitario, su composición hace que sea poco maleable si no se implementa sobre él algún procedimiento fisicoquímico, pues al ser recipientes cóncavos, es decir, que pueden almacenar en si algún tipo de sustancia, al ser desechada el volumen de su capacidad será ocupado por aire, haciendo que al disponerse, esta ocupe un volumen mayor que los demás tipos de residuos, por esto, se han venido evaluando nuevos métodos y tecnologías para descomponer el PET y darle un mejor aprovechamiento.

Con frecuencia, se están comenzando a implementar nuevas alternativas tecnológicas para degradar el PET, como es la degradación térmica, mecánica, química, biológica, fotoquímica,

que, de las cuales se ha estudiado su factibilidad económica y ambiental al practicarle dichos procedimientos al PET.

Este trabajo de grado de autoría propia se realiza enfocado en evaluar una metodología en particular para la posible degradación del PET, con la necesidad a futuro de implementar medidas que transformen reduzcan los residuos plásticos y disminuir el uso de combustibles fósiles y recursos naturales usados para su fabricación.

## 7 Objetivos

### 7.1 Objetivo general

- Evaluar los métodos de hidrolisis del PET como preparación para su aprovechamiento.

### 7.2 Objetivos específicos

- Realizar una revisión del estado del arte sobre la hidrolisis ácida y alcalina del PET.
- Evaluar dos metodologías de hidrolisis del PET: vía ácida y alcalina.
- Determinar el porcentaje % de eficiencia de las pruebas de hidrolisis vía acida y alcalina.
- Identificar la muestra resultante de los procesos hidrolíticos por medio de espectroscopia infrarroja (IR).

## **8 Marco Teórico**

### **8.1 Los materiales plásticos**

Los plásticos son materiales sintéticos, derivados del petróleo, los cuales poseen un amplio campo de aplicaciones y usos, que por su composición y fabricación es óptima principalmente para la producción de botellas en la industria alimenticia.

Los denominados termoplásticos, son materiales plásticos que poseen características en común, una de ellas es que al someterse a temperaturas altas, este se vuelve maleable (flexible o deformable), y la otra es que son de difícil degradación natural o biológica (Suasnavas, 2017). Existen diferentes tipos de termoplásticos como lo son el poliestireno (PS), polipropileno (PP), cloruro de polivinilo (PVC), polietileno (PE) y el tereftalato de polietileno (PET) (Suasnavas, 2017), todos estos usados en diferentes campos, como envases en industrias alimenticias, de aseo o de belleza, construcción, aislamiento eléctrico y térmico.

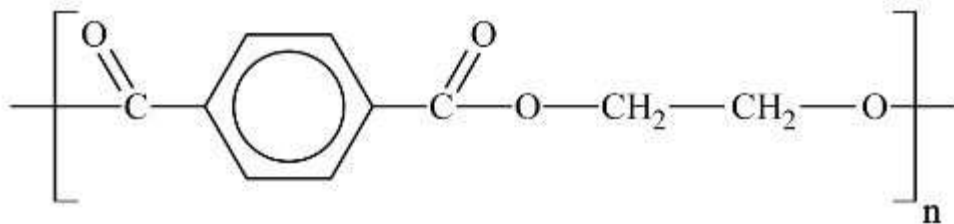
El polietileno tereftalato (PET) es un polímero termoplástico con importantes aplicaciones industriales, el 70% de todas las fibras sintéticas son de PET y se emplean para fabricar cuerda para llantas, diversos artículos de piel y textiles, pero sobre todo en envases para la industria alimenticia (Flores, 2017)

### **8.2 Tereftalato de Polietileno (PET)**

El PET (polyethylene terephthalate) o tereftalato de polietileno, es una materia prima derivada del petróleo, “los primeros usos de este material fueron para la industria textil y posteriormente se aplicó en la industria del plástico, adicionalmente, es un polímero termoplástico, con un alto grado de cristalinidad que es una de las principales cualidades de este material” (Plásticos minipet, 2014).

Químicamente pertenece a la familia de los poliésteres, cuya principal característica es la presencia de enlaces tipo éster ( $-\text{CO}-\text{O}-$ ). El PET se constituye por grupos etileno y tereftalato, según se muestra en la siguiente figura:

Figura 1. Estructura del PET. Recuperado de: <http://www.arapack.com/la-empresa/preguntas-frecuentes-envases-termoconformados>)



### 8.3 Propiedades Del PET

Las propiedades físicas del PET y su capacidad para cumplir diversas especificaciones técnicas han sido las razones por las que el material haya alcanzado un desarrollo relevante en la producción de una gran diversidad de envases, especialmente en la producción de botellas (Plásticos minipet, 2014).

#### 8.3.1 Resistencia.

Una de las características que hace a estos envases tan populares es su resistencia; resistente a esfuerzos permanentes y al desgaste, ya que presenta alta rigidez y dureza, por esta razón son utilizados entre muchas otras razones como envases plásticos para cosméticos (Plásticos minipet, 2014).



### **8.3.2 Variedad.**

“hay una enorme variedad de colores en las cuales podemos encontrarlos, por lo que los envases plásticos para perfumes es otro de los muchos usos en los cuales podemos encontrar el PET” (Plásticos minipet, 2015).

### **8.3.3 Química.**

“otra característica es que son altamente resistentes a los químicos por lo que el llenado en caliente es otra de sus muchas características y de prueba de que es un material realmente de excelente calidad” (Plásticos minipet, 2015).

### **8.3.4 Solubilidad.**

El PET presenta insolubilidad ante los solventes orgánicos, pero hay una variación en cuanto a sustancias como cetonas, compuestos clorados y alcoholes de más de cuatro carbonos. Entre otras características, se encuentra la liviandad de este material, resistencia con llenados calientes hasta temperaturas de 70°C (Flores, 2017).

## **8.4 Ácido tereftálico**

El ácido tereftálico o PTA es la principal materia prima del PET y las fibras de poliéster y se produce al oxidar el paraxileno. Algunos de los usos más comunes del PET son empaques para alimentos, bebidas y bienes de consumo. Las fibras de poliéster se usan principalmente en alfombras, ropa, muebles y aplicaciones industriales (Alpek, 2015).

## **8.5 Hidrólisis**

En su definición más simple, la hidrólisis es una reacción química en la que el agua se utiliza para romper los enlaces de una sustancia en particular. En biotecnología y en lo que respecta a los organismos vivos, estas sustancias a menudo son polímeros. La palabra hidrólisis proviene de la palabra hidro, que es griega para agua, y lisis, que significa "desatar". En términos prácticos, la hidrólisis significa el acto de separar productos químicos cuando se agrega agua (Phillips, 2018).

### **8.5.1 Hidrólisis Ácida.**

La hidrolisis con ácido suelen emplear diluciones de ácidos minerales, tales como el ácido sulfúrico, ácido clorhídrico, etc., de alta concentración y a temperaturas inferiores a los 100°C. Con estas condiciones es posible romper esos enlaces de la sustancia tratada (Pulido, 2003).

### **8.5.2 Hidrólisis Alcalina.**

“La Hidrólisis alcalina es un proceso químico donde hay una sustancia álcali sometida a altas temperaturas y presiones considerables, que al disolverse, desintegra el material orgánico” (Delgado, 2013).

## **8.6 Compuestos orgánicos**

“El compuesto orgánico o también denominado molécula orgánica es una sustancia química compuesta por el elemento químico carbono y que conforma enlaces como: carbono/carbono o carbono/hidrógeno” (Ucha, 2013).

## **8.7 Espectroscopia de infrarrojo**

Como primera aproximación, un espectro IR se obtiene al pasar radiación a través de una muestra y determinar que fracción de esta radiación incidente ha sido absorbida. La energía particular a la que aparece cada pico en un espectro guarda relación con la frecuencia de vibración de una parte de la molécula (Serrano, 2009).

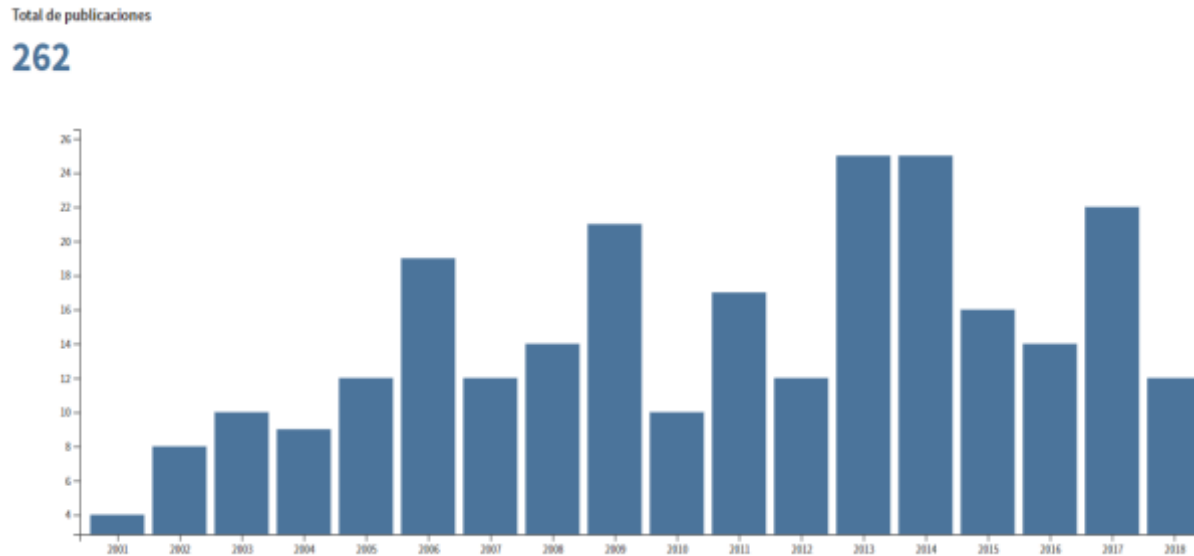
## 9 Marco Metodológico

Para el cumplimiento del primer objetivo específico se realizó un cuadro donde se refleja el estado del arte de las hidrolisis del PET con el objetivo de tener información de soporte y poder realizar un análisis de los resultados más completo, donde inicialmente se hizo una revisión bibliométrica y posterior a ello se refleja la tabla con la información bibliográfica indagada.

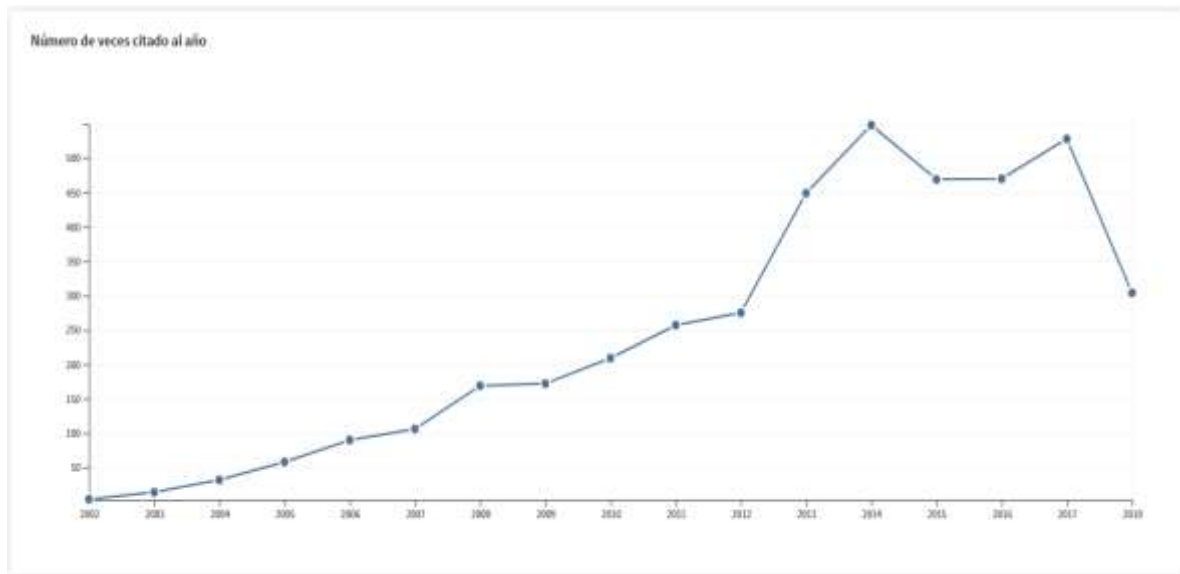
Palabras claves: Hydrolisys depolymerization polyethylene terephthalate

- Según Web Of Science. [www.webofknowledge.com](http://www.webofknowledge.com)

*Gráfica 1. Número de citaciones en los últimos 18 años según Web Of Science.*



Gráfica 2. Número de veces citadas al año según Web Of Science.

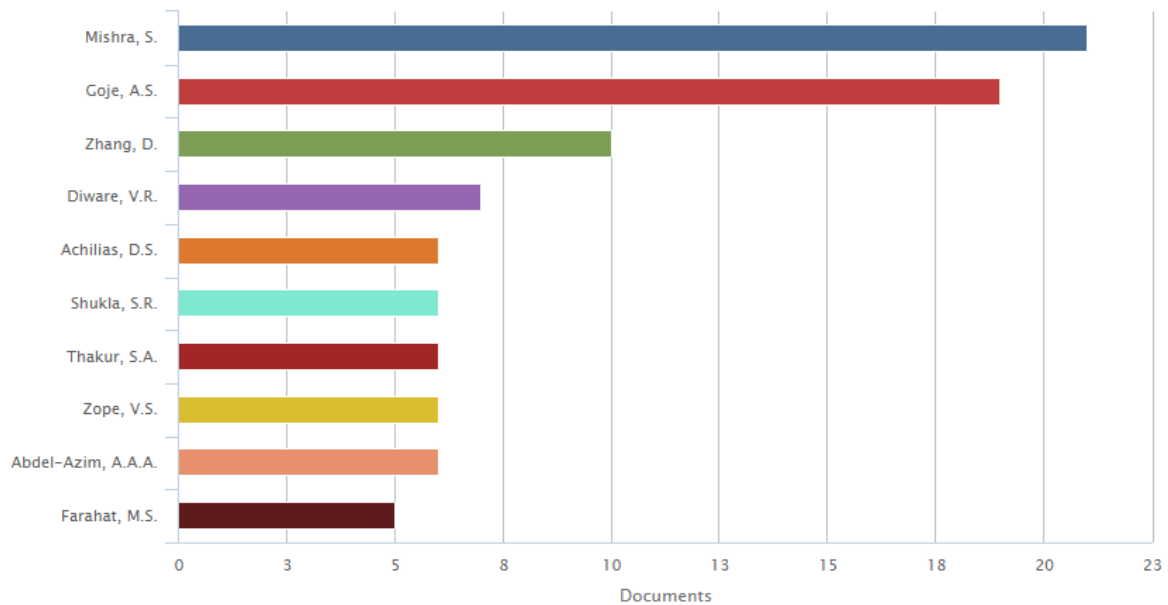


- Según SCOPUS. [www.scopus.com](http://www.scopus.com)

Gráfica 3. Documentos por autor según Scopus.

### Documents by author

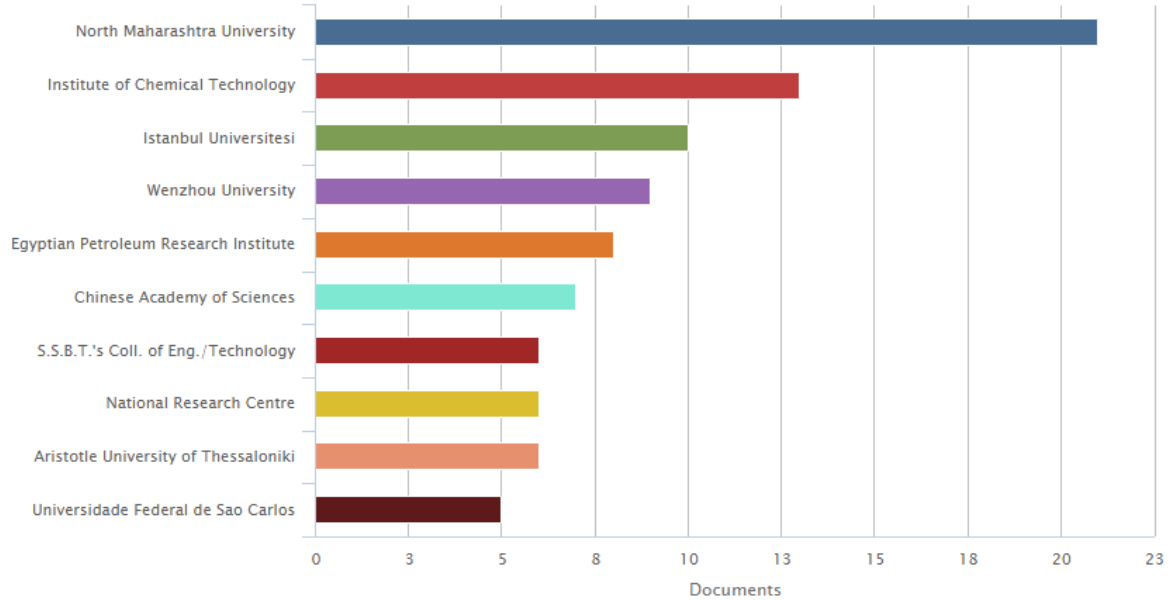
Compare the document counts for up to 15 authors



Gráfica 4. Documentos por asociación según Scopus

### Documents by affiliation

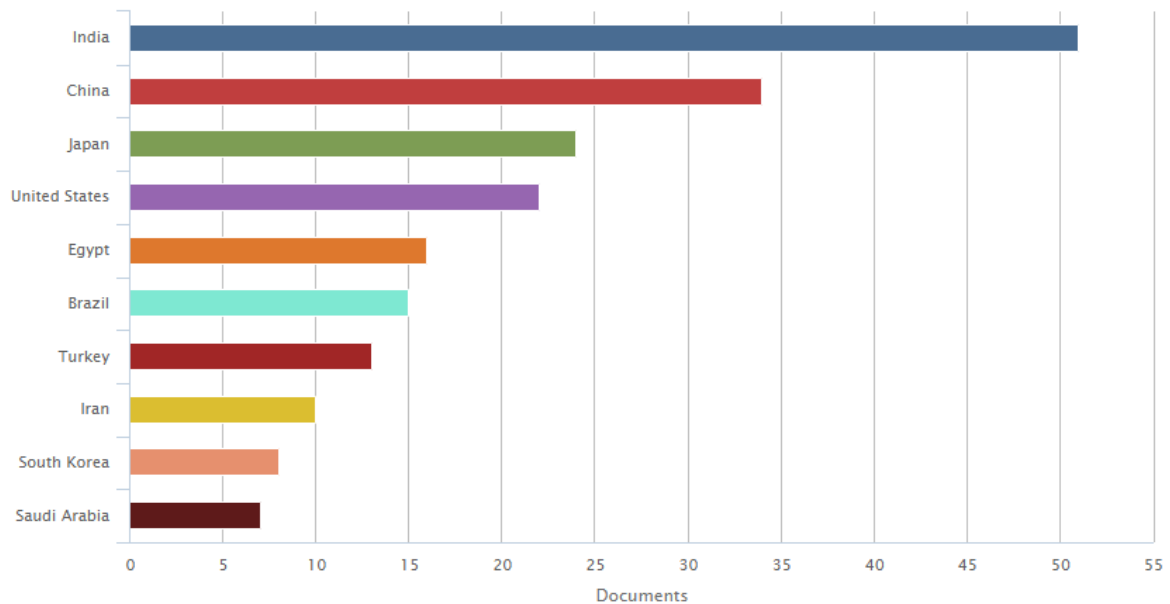
Compare the document counts for up to 15 affiliations



Gráfica 5. Documentos por país/territorio según Scopus

### Documents by country/territory

Compare the document counts for up to 15 countries/territories



Gráfica 6. Tipo de documentos publicados según Scopus

### Documents by type

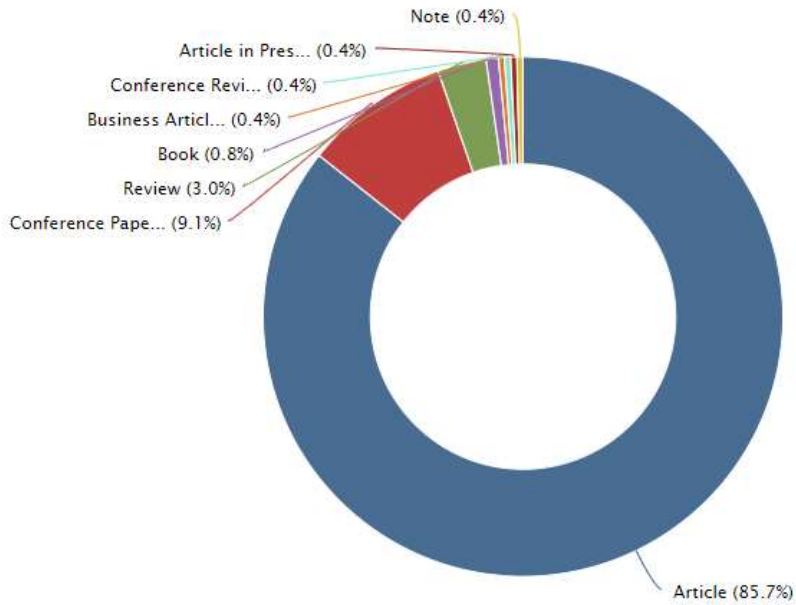


Tabla 1. Tipo de documentos publicados según Scopus

<b>Tipo de documento</b>	<b># documentos</b>
Article	<u>227</u>
Conference Paper	<u>24</u>
Review	<u>8</u>
Book	<u>2</u>
Business Article	<u>1</u>
Conference Review	<u>1</u>
Article in Press	<u>1</u>
Note	<u>1</u>
Total	<u>265</u>

Gráfica 7. Documentos por área temática según Scopus

### Documents by subject area

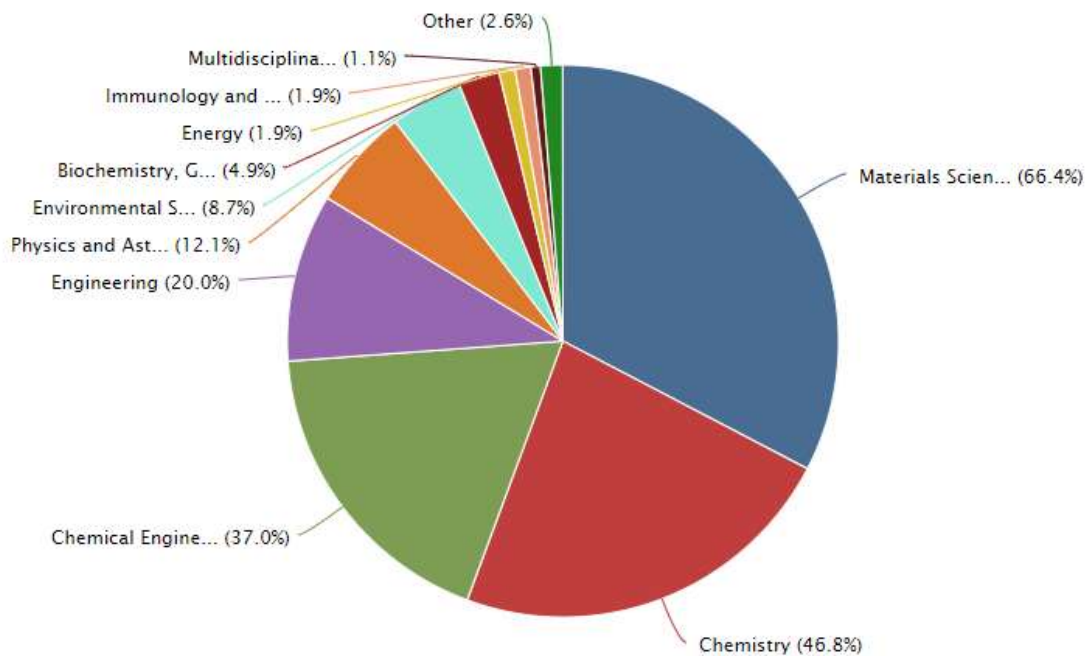


Tabla 2. Documentos por área temática según Scopus

Documentos por área	# de documentos
Materials Science	<u>176</u>
Chemistry	<u>124</u>
Chemical Engineering	<u>98</u>
Engineering	<u>53</u>
Physics and Astronomy	<u>32</u>
Environmental Science	<u>23</u>
Biochemistry, Genetics and Molecular Biology	<u>13</u>
Energy	<u>5</u>
Immunology and Microbiology	<u>5</u>



Multidisciplinary	<u>3</u>
Business, Management and Accounting	<u>2</u>
Earth and Planetary Sciences	<u>2</u>
Computer Science	<u>1</u>
Economics, Econometrics and Finance	<u>1</u>
Social Sciences	<u>1</u>
Total	<u>265</u>

## 9.1 Revisión de estado del arte

Tabla 3. Artículos indagados para obtención de la metodología a usar

Título del artículo	Hidrólisis	Reactivo y concentración	Variables de operación	Rendimiento	País	Referencia
Degradación de materiales plásticos “PET” (polyethylene terephthalate), como alternativa para su gestión	Ácida	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> al 87% w/w	Temp: 85-90°C, 5 minutos a presión atmosférica. Neutralizar pH a 7-5 u 8. Filtrar y secar residuo.	99%	Ecuador	(Suasnavas, 2017)
	Básica	NaOH al 20% w/w	Relación PET - NaOH 1:20, Temp 100°C por 2 horas. Añadir agua para saturar solución, esperar precipitado para separar por filtración y secar residuo.	99%		
	Básica	Amoniaco acuoso	Temp de 200°C por 2 horas. Añadir agua para saturar solución, esperar precipitado para separar por filtración y secar residuo.	99%		
DEGRADACIÓN QUÍMICA DEL POLI(ETILEN TEREFTALATO)	Básica	KOH en 1-Butanol, entre 0,4 y 4,4 M	Agitación suave a 150°C por 1 hora, filtrar y secar residuo	99%	México	(Aurelio Ramírez, Leticia Guadalupe Navarro, 2010)

DISEÑO DEL PROCESO PARA LA OBTENCIÓN DE RESINA POLIÉSTER INSATURADA MEDIANTE EL RECICLAJE QUÍMICO DE DESECHOS DE POLIETILENTEREFTALATO (PET)	Ácida	H2SO4 10N en presencia de H3PO4 2,5N	Reactor con reflujo y agitación mecánica a 1atm. T (88-140°C)	90%	Ecuador	(Padilla Alomoto, 2014)
	Básica	NaOH o KOH de 4 al 20% w/w	3-5 horas; Temp: 210-250°C. Pres: 1.4 - 2 Mpa.			
	Neutra	Agua o vapor de agua. Relación molar PET:agua (1:2 - 1:12)	Temp: 200 - 300 °C. Pres: 1 - 1 Mpa. Usar Catalizadores: acetatos alcalinos.	menos puro que la ac y alc		
ALKALINE HYDROLYSIS OF POLY(ETHYLENE TEREPHTHALATE) RECYCLED FROM THE POSTCONSUMER SOFT-DRINK BOTTLES	Básica	NaOH o KOH 4 - 20 % masa. H2SO4 al 98% para neutralizar. Catalizador bromuro de triocil metilamonio.	Reactor de fondo redondo de 2L y 3 bocas. 1,5L NaOH (5 - 15% masa). Temp: 80 - 120°C. Masa PET: 11,52g. Tiempo: 2 - 5 h.	80 - 100% dependiendo del tiempo y temperatura empleados	República de Macedonia	(D. Spaseska, 2010)

Alkaline Hydrolysis of Polyethylene Terephthalate at Lower Reaction Temperature	Básica	NaOH al 10%. Etanol/agua (20:80). HCl al 20%.	Matraz 300mL. Temp: 110°C. 100mL etanol y agua (20:80). 2g PET. Tiemp: 0,5h.	89%	Japón	(Yamashita & Mukai, 2011)
	Básica	NaOH al 8%. Agua/m-cresol (20:80).	Temp: 100°C. 100mL agua/m-cresol (20:80). Tiemp: 1h	93,60%		
DEGRADACIÓN HIDROLÍTICA DEL POLIETILEN-TEREFTALATO (PET)	Básica	NaOH 2M. Etanol. HCl 0,5M	NaOH 2M en 100 mL etanol. 15g PET. Temp:80°C a 400rpm. Tiemp:2h. Neutralizar con HCl 0,5M	84 - 90 %. Depende del tamaño de partícula de PET que se emplee.	Colombia	(Vásquez et al., 2010)
"PROCESO DE RECUPERACIÓN DEL ÁCIDO TEREFTÁLICO Y EL ETILENGLICOL A PARTIR DEL PET RECICLADO	Neutra	Agua. Relación en peso PET/agua (1:6 a 1:12)	Pres: 1 - 4 Mpa. Tiemp: 5 - 6h. Temp: 180 - 220°C	/	Perú	(PALOMINO, 2010)
	Ácida	H3PO4 o H2SO4 al 87% en peso.	Tiemp: 1h. Temp: 85 - 95°C. Pres ATM. Para un H2SO4 inferior al 67% en peso -> Temp: 150°C. Tiemp: 3 - 6h.			
	Básica	NaOH o KOH o NH4OH del 4 al 20%.	Pres: 1,4 a 2 Mpa. Temp: 180 - 250°C.			

Poliésteres y Reciclaje Químico del Poli(tereftalato de etileno)	Ácida	H2SO4 7.5M	Pres ATM. Temp: 100°C. 5 días.	80%	Perú	(Bertolottp, Rospigliosp, & Nakamatsu, 2005)
	Básica	NaOH 4 al 20% en peso	Tiemp: 2 - 5h	98%		
TRANFORMACIÓN DE PET MEDIANTE HIDROLISIS ÁCIDA Y <i>Bacillus subtilis</i> PARA OBTENER MATERIALES CON CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE METALES PESADOS COMO COBRE Y MERCURIO.	Ácida	H3PO4 7M	Tamaño de partícula: 75 - 10µm. Temp: 100°C. Tiemp: 16h	45%	Ecuador	(Educaci et al., 2008)
		HNO3 13M	Tamaño de partícula: 75 - 10µm. Temp: 100°C. Tiemp: 16h	80%		
		H2SO4 3M	Tamaño de partícula: <75µm. Temp: 190°C. Tiemp: 1h	100%		
	Básica	NaOH 4 al 20% en peso	Temp: 210 - 250°C. Pres: 1,4 - 2 Mpa. Tiemp: 3 - 5h.	99%		

Post consumer poly(ethylene terephthalate) depolymerization by waste of battery acid hydrolysis	Ácida	H2SO4 7,8M	Reactor de vidrio de 250 mL. Pres: 1 ATM. 2,95g de PET. 25 mL ácido de batería. Temp: 100 °C. Tiemp: 96h.	80%	Irak	(Al-tamimi, Khalaf, Sabri, & Sabri, 2011)
			Reactor de vidrio de 250 mL. Pres: 1 ATM. 2,95g de PET. 25 mL ácido de batería. Temp: 132°C. Tiemp:5h	90%		
Hydrolysis of Waste PET by sulfuric Acid at 150°C for a Chemical Recycling	Ácida	H2SO4 7M	Tamaño de partícula: 0,1-0,3 mm. Masa de PET: 0,2g en 30cm3 H2SO4 en tubo Pyrex sellado. Temp: 150°C. Tiemp: 1 - 6h	100%	Japón	(Size, Viability, & Species, 1997)
Chemical recycling of poly(ethylene terephthalate) (pet) by hydrolysis and glycolysis	Neutra	Agua o vapor de agua	Pres: 1 - 4 Mpa. Temp: 473 - 573 K. Relación PET/agua(vapor de agua)-> (1:2 a 1:12)		Italia	(Carta, D., G. Cao, 2003)

Optimization of Neutral Hydrolysis Reaction of Postconsumer PET for Chemical Recycling	Neutra	Agua. NH4OH 5M	Reactor acero inoxidable de 120mL. Masa PET: 5,88g. Vol agua:50mL. Baño de aceite caliente. Temps: 135°C Pres: 4atm. Tiemp: 6h. Secar residuo. Poner en 15mL de NH4OH 5M por 10min y separar precipitado por filtración.	1,68%. TamPartícula: 1,19mm.	Brazil	(Mancini & Zanin, 2003)
				0,53%. TamPartícula: 2mm.		
			Reactor acero inoxidable de 120mL. Masa PET: 5,88g. Vol agua:50mL. Baño de aceite caliente. Temps: 170°C. Pres: 7,5 atm. Tiemp: 6h. Secar residuo. Poner en 15mL de NH4OH 5M por 10min y separar precipitado por filtración.	8,17%. TamPartícula: 1,19mm.		
				2,38%. TamPartícula: 2mm.		
			Reactor acero inoxidable de 120mL. Masa PET: 5,88g. Vol agua:50mL. Baño de aceite caliente. Temps: 205°C. Pres: 13,5 atm. Tiemp: 6h. Secar residuo. Poner en 15mL de NH4OH 5M por 10min y separar precipitado por filtración.	98,92%. TamPartícula: 1,19mm.		
				99,01%. TamPartícula: 2mm.		

CHEMICAL RECYCLING OF POLYETHYLENE TEREPHTHALATE (PET) WASTE USING SUB- AND SUPERCRITICAL WATER	Neutra	Agua. PET:agua-> 1:10 (p/v)	Reactor autoclave tipo batch.Temp: 300°C. Pres: 300 bar. Tiemp: 60min.	91,44%	Rumani a	(Chimie, Căta, Miclău, Ienașcu, & Ursu, 2015)
Synergistic chemo-enzymatic hydrolysis of poly (ethylene terephthalate) from textile waste	Neutra	Agua. PET:agua-> 1:4 (p/v)	Temp: 250°C. Pres: 39 bar.	85%	Reino Unido	(Quartinello et al., 2017)
Kinetics of Hydrolysis of PET Powder in Nitric Acid by a Modified Shrinking-Core Model	Ácida	HNO3 entre 7 - 13M. NH4OH 6 M.	Masa PET: 1,5g tamizado en malla entre 75 - 106μm. Temp: 100°C. Matraz de tres bocas de 0,2dm3. 0,05dm3 HNO3 13M. Tiemp: 24h. Precipitar residuo con NH4OH 6 M y secar.	91,30%	Japón	(Yoshioka, Okayama, & Okuwaki, 1998)



Investigation of Alkaline Hydrolysis of Polyethylene Terephthalate by Differential Scanning Calorimetry and Thermogravimetric Analysis	Básica	KOH o NaOH en agua	Disolver hidroxido alcalino en agua y posterior con el PET entre 100 - 200°C. Secar a 60°C	/	Taiwan	(Kao, Cheng, & Wan, 1998)
CHEMICAL DERGRADATION OF POLY(ETHYLENE TEREPHTHALATE)	Básica	NaOH 5% wt. P2C15	Partícula PET: 0,4cm2. Masa PET: 2g. Vol: 100mL NaOH 5%wt. Tiemp: (12-24-48-96h). Neutralizar con HCl diluido. Filtrar residuo. Secar a 40°C por 24h en horno de vacío con P2C15.	2,31% en 12h.	Arabia Saudita	(Magdy Y. Abdelaal, 2008)
				4.63% en 24h.		
				11,57% en 48h.		
				16,19% en 96h.		
				16,87% en 120h.		

Surface modification of poly(ethylene terephthalate) via hydrolysis and layer-by-layer assembly of chitosan and chondroitin sulfate to construct cytocompatible layer for human endothelial cells	Básica	NaOH 4M. HCl 1M.	TamPartícula: 75µm. Lavar en solución agua/alcohol -> (1:1) (v/v). Tiemp: 2 - 3h. Secar por 24h a 30°C. Sumergir en solución acuosa 4M NaOH. Temp: 70°C. Lavar con 1M HCl. Lavar secuencialmente en alcohol y agua bajo sonicación. Secar a presión reducida a 30°C.		China	(Liu, He, & Gao, 2005)
Alkaline Hydrolysis of Polyester Fibers - Structural Effects	Básica	NaOH al 10%	TamTiraPET: 5cm. 200cc NaOH 10%. Temp: 30°C. Enjuagar residuo, secar a TempAmb por varios días(40h). Pesar.	95.4%	Irán	(Haghighatkish & Yousefi, 1992)

Para el cumplimiento del segundo objetivo se realizaron varias sesiones de laboratorio, para posteriormente analizarlas y cumplir con los objetivos establecidos anteriormente, se realizaron principalmente 2 hidrolisis (acida y alcalina) para la degradación del plástico (PET).

A continuación se presenta el paso a paso de la degradación del PET, utilizando técnicas como la hidrolisis acida y alcalina.

## **9.2 Hidrólisis Alcalina**

Para la realización de la hidrolisis alcalina, se tomó como referencia una muestra de PET (1 gramo) obtenido de la universidad católica de Manizales, los otros materiales a utilizar fueron:

### **9.2.1 Materiales.**

- 1- butanol
- KOH
- Agua destilada
- Plancha de calentamiento
- Balanza
- Agitadores de vidrio
- 1 gramo de PET triturado.
- Imanes con extractor
- Matraz de 50 ml
- Termómetro
- Bureta 10 ml
- Pipeteador
- Tubos de vidrio para muestra.

### 9.2.2 Procedimiento.

1. Se realizó los cálculos para conocer los gramos de KOH que serían mezclados con 40 mL de 1-butanol , los datos de las cantidades y volúmenes de los reactivos así como también los datos para hallar la masa de KOH fueron tomados de un artículo de la revista colombiana de química al cual hace como referencia el nombre como DEGRADACIÓN QUÍMICA DEL POLI(ETILEN TEREFALATO) (Navarro & Acevedo, 2010) , los cálculos fueron los siguientes:

-  $3,34 \text{ M} \times 0,04 \text{ L} = 0,1336 \text{ mol KOH}$

-  $0,1336 \text{ mol KOH} \times \frac{56,10 \text{ g KOH}}{1 \text{ mol KOH}} = 7,49 \text{ gr KOH}.$

2. Se le agregaron 7,49 gr de KOH a un beaker con 40ml de 1-butanol, se mezcló la muestra hasta la dilución total del KOH.

3. Teniendo la muestra totalmente en fase líquida y sin residuos de KOH, se le agregó 1 gramo de PET comercial totalmente seco y limpio, la muestra se calentó a una temperatura que no sobrepasara a los 150°C durante 1 hora en agitación lenta utilizando el imán y plancha de calentamiento.

4. Pasada 1 hora de calentamiento y agitación, se retiró la muestra, se verificó que no hubieran residuos de PET en la muestra, se realizó los cálculos para la determinación del porcentaje de degradación para la hidrólisis alcalina.

5. Se tomó la muestra del producto y agregó a un tubo de ensayo, para su identificación.

### **9.3 Hidrólisis Ácida**

Se realizó una hidrólisis acida, asociada a la metodología anterior, utilizando como base 1 gramo de PET comercial, para ello se utilizaron los siguientes materiales:

#### **9.3.1 Materiales.**

- Ácido sulfúrico
- Agua destilada
- Plancha de calentamiento
- Balanza
- Agitadores de vidrio
- 1 gramo de PET.
- Imanes de varillas de rotación
- Matraz de 50 ml
- Termómetro
- Bureta 10 ml
- Pipeteador.

#### **9.3.2 Procedimiento.**

Este procedimiento se realizó basado de un trabajo de grado realizado por estudiante de Lima-Perú teniendo en cuenta los materiales y condiciones de la prueba, el documento se titula "PROCESO DE RECUPERACIÓN DEL ÁCIDO TEREFTÁLICO Y EL ETILENGLICOL A

PARTIR DEL PET RECICLADO"(PALOMINO, 2010), a continuación se describe el procedimiento para la descomposición del PET por vía acida.

1. Se tomaron 40 mL de ácido sulfúrico y los agregamos a un beaker de 200ml.
2. Se pesó 1 gramo de PET y lo adicionamos al beaker de 200 mL junto con los 40 ml de ácido sulfúrico.
3. Se calentó la muestra en una plancha de calentamiento donde se controló variables como la temperatura que no pasara a más de 110°C y un tiempo de 40 minutos aproximadamente.
4. Pasados los 40 minutos de calentamiento, se verifico que no hubieran residuos de PET en la muestra, debido a que se observó una pequeña que no se degrado se separó y se cuantifico por diferencias de masas.
5. Se tomó una cantidad de la muestra en un tubo de ensayo para ser identificada

## **9.4 Prueba de filtración para muestras hidrolíticas.**

Esta prueba se realizó con el objetivo de identificar el compuesto hidrolizado, para ello era necesario que las muestras hidrolíticas estuvieran en fase sólida por lo que se realizó un proceso de filtración, la filtración de la prueba hidrolítica ácida no se realizó debido a que no se evidenció precipitación durante 72 horas de reposo, debido a esto se realizó la prueba de filtración se realizó únicamente con la prueba hidrolítica alcalina utilizando los siguientes materiales.

### **9.4.1 Materiales**

- Muestra hidrolítica alcalina
- Papel de filtro
- Embudos
- Matraz de Erlenmeyer
- Vidrio de reloj
- Estufa convencional

### **9.4.2 Procedimiento**

1. Se instaló en primer lugar el papel filtro al embudo asegurándose que no quedara aberturas sobre los costados del embudo, posteriormente se agregó la muestra hidrolítica alcalina lentamente evitando salpicaduras de la muestra, esperamos el tiempo óptimo para que hubiera una buena separación de la muestra sólida y líquida que fue aproximadamente 15 minutos.
2. Una vez separado la fase sólida de la líquida, se retiró el papel filtro del embudo cuidadosamente sin afectar la muestra sólida y fue llevada al horno convencional para

empezar el secado de la muestra, dado que la muestra se encontraba semisólida se dejó calentar por 10 minutos hasta obtener un polvo de color blanco seco.

3. Se recogió la muestra en un tubo de vidrio para ser identificada y analizada.

## **9.5 Prueba para la identificación de compuestos orgánicos**

Esta prueba se realizó con el objetivo de identificar la muestra hidrolítica alcalina y realizar una comparación de la muestra hidrolítica alcalina experimental y una muestra de ácido tereftálico teórico por medio de espectros infrarrojos, Es importante tener en cuenta que este procedimiento se debe realizar bajo a unas condiciones específicas. Es decir que no haya un gran índice de humedad en el ambiente debido a que la humedad no deja reflejar los rayos para ser leídos y analizados. Para realizar el procedimiento se necesitaron los siguientes materiales,

### **9.5.1 Materiales**

- Compresor mecánica
- Balanza
- Software OMNIC
- Muestra hidrolítica alcalina
- Ácido tereftálico puro (estándar)
- Bromuro de potasio ( KBr )



## **Especificaciones de operación del espectrómetro**

**Nombre técnico del equipo:** Espectrómetro FT-IR Thermo Scientific Nicolet iS5

**Detector:** DTGS KBr

**Divisor de Haz:** KBr

**Accesorio:** iD1 transmission

**Rango trabajado:** 4000-400 $\text{cm}^{-1}$

**Número de barridos:** 34

**Ganancia:** 1.0

### **9.5.2 Procedimiento**

1. Se pesaron 2 mg de la muestra alcalina y 75 mg de bromuro de potasio y se agregaron a un mortero para ser macerado completamente.
2. Una vez macerada la muestra la introducimos al compresor mecánico, este compresor contiene dos tornillos que van sujetos a cada lado del compresor, ejerciendo presión con el objetivo de retener la muestra en el lente para ser identificada.
3. La muestra se dejó por 2 minutos, se retiraron los tornillos de la celda y se introdujo al equipo infrarrojo para ser identificado.
4. Una vez montada la muestra al equipo nos dirigimos al software OMNIC para generar la gráfica de la muestra hidrolítica alcalina, cabe resaltar que el software hace 36 barridos de la muestra, es decir promedia los 36 barridos y lo convierte en 1.
5. Una vez generada la primera gráfica, se desmonta la muestra y se procede a repetir el mismo proceso pero esta vez con el ácido tereftálico puro (estándar), la cual se generó la

gráfica gracias al software OMNIC para ser comparada y analizada junto a la muestra alcalina.

## **9.6 Evaluación de la solubilidad del compuesto (Ácido Tereftálico)**

Se realizó esta prueba con el objetivo de encontrar algún solvente que diluyera totalmente (100%) el ácido tereftálico al (98%), para posteriormente poder cuantificar las muestras hidrolíticas por el método de espectrofotometría. Para realizar esta técnica se requería que el ATP se solubilizara, pero ningún de los solventes evaluados cumplió con el objetivo de diluir el ácido. Se evaluaron los siguientes solventes:

### **9.6.1 Materiales**

- Balanza
- 7 Tubos de ensayo
- Ácido tereftálico al 98%
- Pipetas de 2 mL
- Pipeteadores
- Espátula
- Corchos para tubos de ensayo.

Tabla 4. Compuestos utilizados en el laboratorio de dilución ATP.

Número de muestra	Nombre del solvente	% Pureza
1	Agua desalinizada	100
2	Etanol	95
3	Benceno	99.7
4	Éter etílico	99
5	Acetona	99
6	n-hexano	99
7	Ciclo hexano	99.5

Tabla 4. En la tabla se observa el nombre de los 7 compuestos a utilizar en la prueba de dilución del ácido Tereftálico en estado sólido.

### 9.6.2 Procedimiento

1. En este caso el solvente son los compuestos que están en la Tabla 4 y el soluto es el ácido tereftálico al 98%, se agregó 1 ml de cada uno de los solventes a los tubos de ensayo que el total fueron 7 y 0,05g de ácido tereftálico, para conocer el porcentaje de pureza de esos 0,05g de ácido tereftálico se realizaron los siguientes cálculos:

$$\%pureza = 50mg \times \frac{100}{98}$$

$$\%pureza \text{ acido tereftalico} = 51,02\%$$

Siguiendo el orden la de Tabla 4 se realizó las siguientes pruebas:

1. Agua desalinizada: se agregó 1 mL de agua desalinizada y 0,05 g de ácido tereftálico, posteriormente se cerró el tubo con un corcho para poder realizar la agitación manual, se agito por 20 segundos y se dejó reposar 10-15segundos.

2. Etanol 95%: se agregó 1 mL de etanol y 0,05 g de ácido tereftálico, posteriormente se cerró el tubo con un corcho para poder realizar la agitación manual, se agito por 20 segundos y se dejó reposar 10-15segundos.
3. Benceno: se agregó 1 mL de benceno y 0,05 g de ácido tereftálico, posteriormente se cerró el tubo con un corcho para poder realizar la agitación manual, se agito por 20 segundos y se dejó reposar 10-15segundos.
4. Éter Etilico: se agregó 1 mL de éter etílico y 0,05 g de ácido tereftálico a un tubo de ensayo, posteriormente se cerró el tubo con un corcho para poder realizar la agitación manual, se agito por 20 segundos y se dejó reposar 10 -15 segundos.
5. Acetona: se agregó 1 mL de acetona y 0,05 g de ácido tereftálico a un tubo de ensayo, posteriormente se cerró el tubo con un corcho para poder realizar la agitación manual, se agito por 20 segundos y se dejó reposar 10-15 segundos.
6. n-hexano: se agregó 1 ml de n-hexano y 0,05 g de ácido tereftálico a un tubo de ensayo, posteriormente se cerró el tubo con un corcho para poder realizar la agitación manual, se agito por 20 segundos y se dejó reposar 10-15segundos,
7. Ciclo-Hexano : se agregó 1 ml de ciclo-hexano y 0,05 g de ácido tereftálico a un tubo de ensayo, posteriormente se cerró el tubo con un corcho para poder realizar la agitación manual, se agito por 20 segundos y se dejó reposar 10-15 segundos.

## 10 Resultados y Análisis

En esta sección se hará un análisis de los resultados que fueron obtenidos durante todas las pruebas realizadas y de forma cuantitativa y cualitativamente, cumpliendo con todos los objetivos específicos propuestos desde el inicio de la investigación, los resultados se analizaron por prueba hidrolítica (ácida y básica) y de forma general para un mejor entendimiento del lector.

### 10.1 Resultados de Hidrólisis Alcalina (Básica)

Para la realización de la hidrólisis alcalina se tuvo en cuenta la metodología de la revista colombiana de química DEGRADACIÓN QUÍMICA DEL POLI (ETILEN TEREFALATO) (Navarro & Acevedo, 2010), donde se cumplió y se obtuvo resultados favorables.

Esta prueba tuvo una duración total de 50 minutos aproximadamente donde se pudo evidenciar la degradación de los 7,49 gr de KOH en 40 mL de 1-butanol en los primeros 15 minutos de la prueba Figura 2, la temperatura osciló entre 120°C – 130°C cumpliendo con la metodología de la hidrólisis alcalina, pasados 30 minutos se observa como el PET se va degradando lentamente hasta cumplir con el tiempo establecido que fueron 50 minutos aproximadamente (Figura 4), la muestra se evaporó lentamente por acción del alcohol 1-butanol obteniendo una muestra viscosa y color lechosa (

Figura 5), la muestra se dejó reposar por 5 minutos obteniendo una muestra sólida y de textura dura por lo cual se agregó 4 mL de agua destilada para poder recoger la muestra en un tubo de vidrio (Figura 6). A continuación se presenta las evidencias fotográficas para la hidrólisis alcalina.

### 10.1.1 Evidencias Fotográficas Hidrólisis Alcalina.

Figura 2. Volumen 40 mL de 1-Butanol.



Se agregó 40 mL de 1-butanol en un beaker de 200 mL para agregar la masa de KOH.

Figura 3. Montaje para hidrólisis alcalina.



Figura 3. Se agrega una masa de 7,49 gr de KOH en un beaker de 200 mL junto con los 40 mL de 1-butanol para la dilución.

En la Figura 2 y Figura 3 se evidencia el montaje inicial de la prueba hidrolítica alcalina, la cual se realizó con el objetivo de diluir 7,49 gr de KOH en 40 mL de 1-butanol, esta actividad tuvo una duración de 20 minutos manteniendo una agitación lenta y constante, la dilución se completó un 100% agregando temperatura para optimizar el proceso.

Figura 4. Masa de PET (1 gramo).



Figura 4. Se pesa 1 gramo de PET obtenido de una botella de agua plástica en la Universidad Católica de Manizales.

Figura 5. Mezcla de los materiales.



Figura 5. Se agrega 1 gramo de PET a la mezcla, se le adicono temperatura para la degradación.

En la Figura 3 y Figura 4 se evidencia la mitad del proceso, donde se agregó 1 gramo de PET al beaker que contenía el KOH y 1-butanol, donde posteriormente se le agrega temperatura para cumplir la función de la degradación del PET, la temperatura no debe superar los 150°C por lo que se mantiene en monitoreo con la ayuda de un termómetro de mercurio, la degradación se puede notar a simple vista pasados 10 minutos del montaje.

Figura 6. Finalización de la prueba alcalina.



Figura 6. Se evidencia un cambio de aspecto y un cambio de color, los pequeños trozos hacen parte del PET.

En la Figura 6 se puede observar el proceso 35 minutos después del montaje, se evidencia que la mayoría del alcohol 1-butanol de evaporo por la acción de la temperatura que se monitorio y se mantuvo graduada entre 120°C a 130°C para cumplir con la metodología inicial de la hidrolisis alcalina, se puede observar también un cambio de textura y un cambio de color transparente a un color lechoso semisólido, pasados los 40 minutos se comenzó a bajar la temperatura con la ayuda de la plancha de calentamiento para el desmonte y toma de la muestra.



Figura 7. Muestra final de la hidrolisis alcalina.



Figura 7. Se agregó 4 mL de agua destilada a la muestra para poder recogerla en un tubo de muestras.

En la

Figura 7 se evidencia el producto final de la hidrolisis alcalina, fue necesario agregar 4 mL de agua destilada al beaker con el objetivo de poder recoger la muestra y llevarla al laboratorio de la universidad de caldas para poder identificar el compuesto , el color de la muestra es lechoso con una franja naranja en la parte superior.

Figura 8. Muestra precipitada en tubo de muestra.



Figura 8. Se evidencia un precipitado de color blanco lo que puede indicar presencia de ácido tereftalico.

En la Figura 8 se evidencia el precipitado después de 24 horas de reposo, la muestra cambia de color lechoso a un color más translucido y está lista para extraer la fase solida de la muestra con la ayuda de papel filtro y así poder identificar el compuesto.

En cada prueba hidrolítica y como parte de los objetivos específicos se determinó el rendimiento de la prueba hidrolítica alcalina por medio de porcentaje de degradación, en esta prueba hubo un 80% de degradación del PET, es decir que del gramo de PET que fue sometido a esta prueba, se degrado el 80% en 45 minutos.

## **10.2 Resultados de Hidrólisis Ácida**

La duración de la prueba fue de 40 minutos aproximadamente, donde se pudo evidenciar un gran porcentaje de degradación del PET lentamente, pero pasados los 40 minutos no se evidencio más degradación por parte del PET, por lo que se decidió retirar cuidadosamente los trozos de PET que no fueron degradados y se pesaron obteniendo un valor de 0,36 gramos de PET que no se degradaron.

Este procedimiento se realizó bajo un índice de temperatura que oscilaba en 100°C y 110°C y a 100 rpm, finalmente se tomó 20 mL de la muestra aproximadamente para ser identificada, cabe resaltar que durante el tiempo establecido no se evidencio un cambio de color ni de textura en la muestra.

### 10.2.1 Evidencias Fotográficas Hidrólisis Ácida.

Figura 9. Mezcla de la muestra.



Figura 9. Se evidencia la muestra de ácido sulfúrico reaccionando con 1 gramos de PET sobre una plancha de calentamiento con agitación lenta.

En la Figura 9 se puede evidenciar el montaje para la hidrólisis ácida, el montaje está compuesto por 40mL de ácido sulfúrico en un beaker de 200mL el cual se calienta a una temperatura no mayor a 110°C por 3 minutos, posteriormente se le agregó 1 gramos de PET y se dejó la muestra en calentamiento por 40 minutos.

En la Figura 10 se puede evidenciar trozos de PET después de 40 minutos de calentamiento y agitación que no fueron degradados por la acción de la hidrólisis ácida, por lo cual se decide retirar el residuo y una vez seco se lleva a la balanza para tomar el peso y realizar el análisis de eficiencia.

Figura 10. Residuos de la hidrolisis acida.

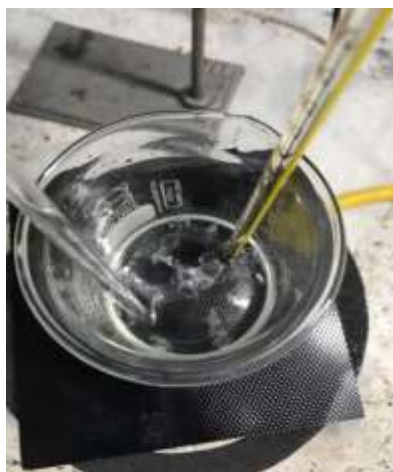


Figura 10. Se evidencia los trozos de PET que no fueron degradados por la hidrolisis acida.

Figura 11. Muestra de hidrolisis acida.



Figura 11. Se evidencia la muestra filtrada.

En la Figura 11 se evidencia la muestra recogida en un tubo de vidrio para ser llevada a la universidad de caldas y ser analizada en los equipos de identificación de compuestos.

En cada prueba hidrolítica y como parte de los objetivos específicos se determinó el rendimiento de la prueba hidrolítica acida por medio de porcentaje de degradación, en esta prueba hubo un 64% de degradación del PET, es decir que del gramo de PET que fue sometido a esta prueba, se degrado 0,64 gramos de PET en 40 minutos.

### **10.3 Filtración de las muestra de hifrolítica alcalina.**

La prueba tuvo una duración de 35 minutos aproximadamente, se realizó con el objetivo de separar la fase sólida y liquida de la muestra alcalina lo cual una vez este en fase solida se pueda identificar en el equipo de infrarrojo, la filtración de la prueba hidrolítica acida no se realizó debido a que no se evidencio precipitación durante 72 horas de reposo, debido a esto se realizó la prueba de filtración se realizó únicamente con la prueba hidrolítica alcalina.

### 10.3.1 Evidencias Fotográficas de Filtración para hidrolisis alcalina.

Figura 12. Muestra de hidrolisis alcalina



Figura 12. Se evidencia el montaje para iniciar el proceso de filtración de la muestra alcalina a una concentración de 3,34 M.

En la Figura 12 se puede evidenciar el montaje para el proceso de filtración de la muestra alcalina, para ello se instaló el papel filtro y se agregó la muestra alcalina lentamente para evitar una posible saturación de la prueba.

Figura 13. Proceso de filtración para muestra alcalina



Figura 13. Se evidencia el proceso de filtración de la muestra alcalina a una concentración 3,34 M.

Figura 14. Secado de la muestra alcalina.



Figura 14. Se evidencia la muestra en un vidrio de reloj lista para iniciar el calentamiento de la muestra.

En la Figura 13 y Figura 14 se evidencia la parte fundamental del proceso de filtración, se observa como la fase líquida se separa de la fase sólida lentamente, pasados 15 minutos se retiró el Erlenmeyer y el papel de filtro se dejó secar durante 10 minutos, posteriormente se le agrega calor con la ayuda de una estufa convencional hasta obtener una masa de la muestra dura y fina.

Figura 15. Muestra alcalina en fase sólida.



Figura 15. La muestra se recoge en un tubo de vidrio y queda listo para la identificación del compuesto.

En la Figura 15 se observa la muestra alcalina recogida en un tubo de vidrio, en esta prueba hubo una pérdida de la fase sólida debido al secado del papel filtro lo cual fue complejo retirar la parte sólida del papel.

#### **10.4 Resultados de la Identificación de Compuestos Orgánicos.**

Después de las pruebas hidrolíticas y la filtración de las mismas, es necesario identificar la muestra alcalina por medio de la espectroscopia infrarroja (IR), lo cual requería una condición óptima de operación como la baja humedad del ambiente, lo cual interfiere con los resultados obtenidos, el día que se realizó la prueba de espectroscopia infrarroja las condiciones del ambiente no eran las más óptimas, sin embargo el equipo contaba con unas bolsas de sílica gel el



cual permite a regular el índice de humedad haciendo que los resultados sean confiables a la hora de analizar.

Se obtuvieron 2 espectros infrarrojos que corresponden a la muestra hidrolítica alcalina y el ácido tereftálico al 98%.

#### 10.4.1 Evidencias Fotográficas de la identificación de compuestos orgánicos

Figura 16. Muestras a identificar y comparar.



Figura 16. Se evidencia las dos muestras para su análisis respectivo (muestra alcalina y ácido tereftálico Estándar).

Figura 17. Masa de la muestra hidrolítica alcalina.



Figura 17. Se observa la masa de 2 mg de la muestra alcalina para ser introducida al compresor mecánico.

Figura 18. Masa de bromuro de potasio.

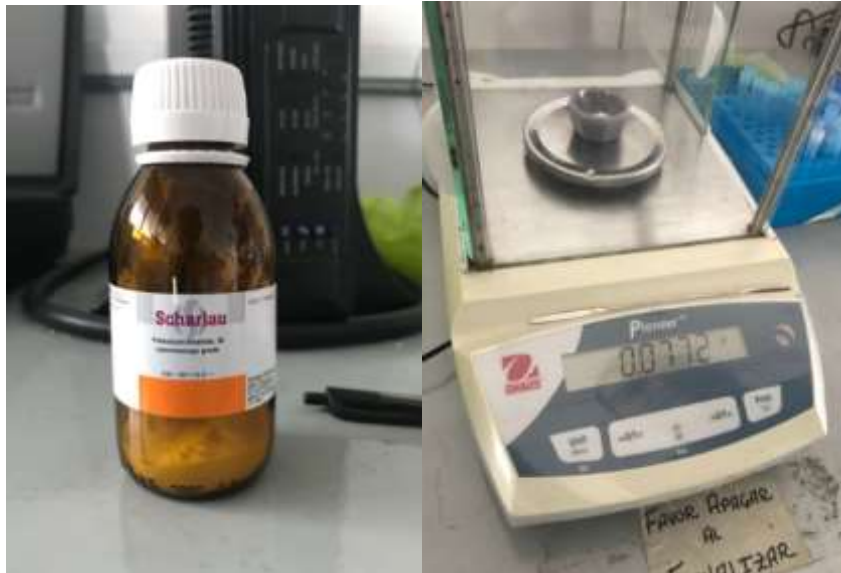


Figura 18. Se observa la masa de 75 mg de bromuro de potasio para macerar junto con los 2 mg de la muestra alcalina.

En la Figura 17 y Figura 18 se observan las masas de los compuestos de bromuro de potasio y la muestra hidrolítica alcalina previa a ser maceradas en el mortero, el bromuro de potasio permite que el rayo de luz pase por el compresor mecánico permitiendo la lectura y generación del espectro de la muestra, la masa del bromuro de potasio fue de 75 mg y la masa de la muestra a identificar es de 2 mg.

Figura 19. Macerado de la muestra alcalina y el bromuro de potasio



Figura 19. Se evidencia como la muestra alcalina es macerada junto con el bromuro de potasio.

En la Figura 19 se presenta la muestra macerada completamente, esta muestra debe estar totalmente seca y fina antes de ser introducida al equipo de infrarrojo, en la Figura 20 la muestra ya está siendo introducida al equipo, el equipo contiene unas bolsas de silica con el objetivo de regular la humedad del equipo, lo que permite que se genere los espectros sin señales de humedad.

Figura 20. Montaje de la muestra alcalina al equipo de identificación.



Figura 21. Generación de resultados para la muestra hidrolítica alcalina.

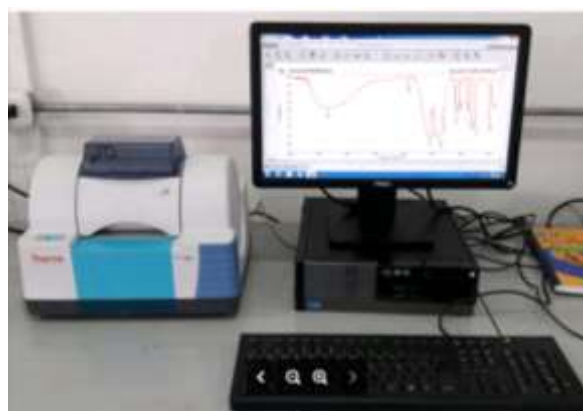


Figura 21. Se evidencia el montaje de la muestra al equipo de identificación de compuestos y la generación de los resultados.

#### 10.4.2 Análisis de infrarrojo del PET hidrolizado

Figura 22. Espectro IR de la muestra hidrolítica alcalina.

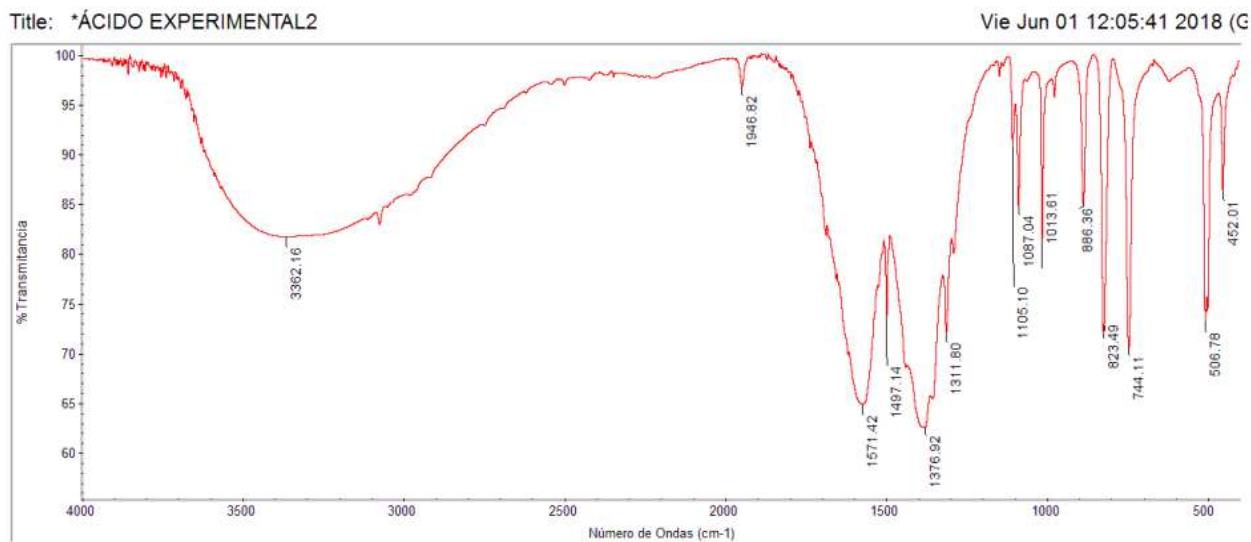
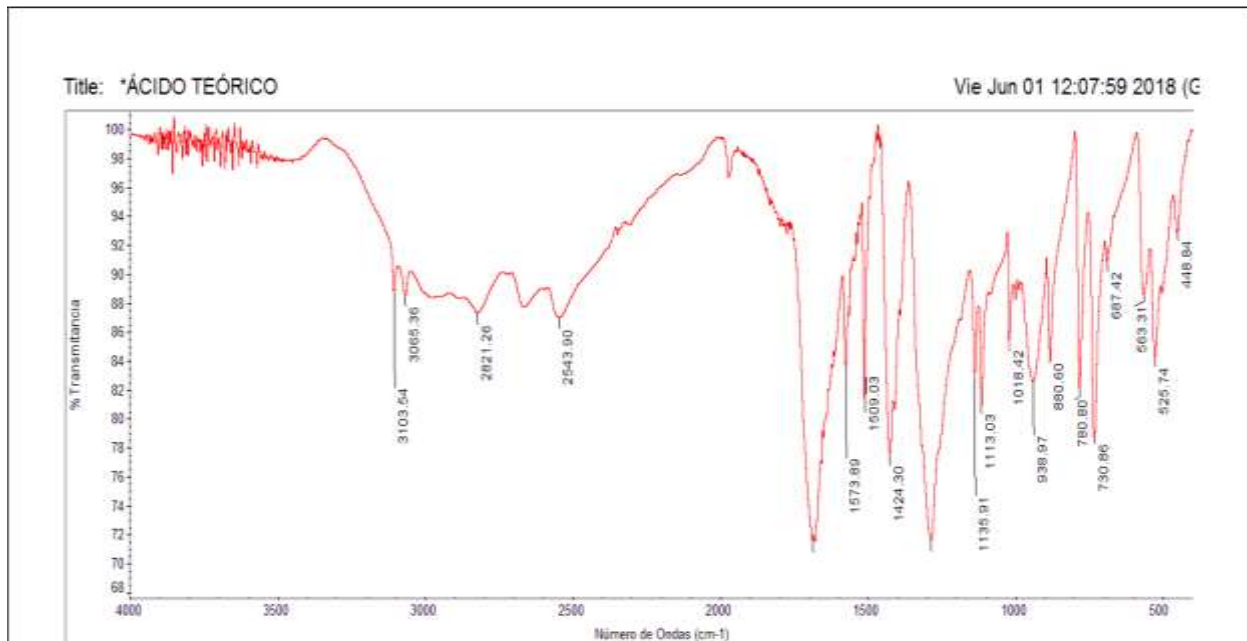


Figura 22. Se observa la gráfica del espectro IR de la muestra alcalina lista para ser analizada.

Las señales encontradas en el infrarrojo demuestran presencia de sales de ácidos carboxílicos (tereftalato de potasio) debido a que en el rango del espectro entre 1400 y 1600  $\text{cm}^{-1}$  se encontraron en los picos 1574 y 1497  $\text{cm}^{-1}$  la presencia de esta sal. También se encuentran bandas del estiramiento de C=C aromático, se evidencian señales en 3080, 1946 y 1500  $\text{cm}^{-1}$  las cuales son características de hidrocarburos aromáticos, la señal presente en 3362  $\text{cm}^{-1}$  pertenece a las impurezas del etilenglicol, pero se recomienda realizar otras técnica de identificación para asegurar que señales presentes en 3362  $\text{cm}^{-1}$  sea etilenglicol.

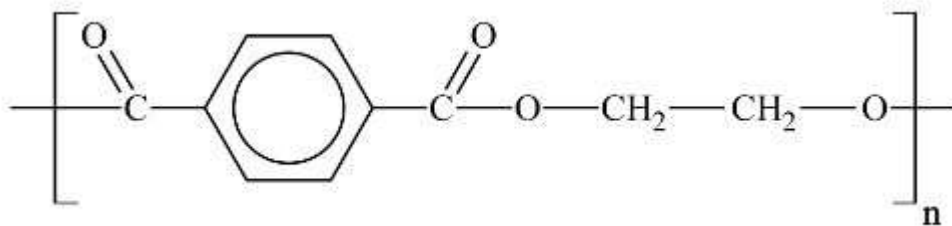
### 10.4.3 Resultados infrarrojo del ácido tereftálico

Figura 23. Espectro IR del ácido tereftálico.



Las señales encontradas en el infrarrojo demuestran la presencia de un anillo aromático por las señales presentes en 1509, 1573 y 3070  $\text{cm}^{-1}$ , también hay presencia de enlace  $\text{COO}^-$  en 1424  $\text{cm}^{-1}$  correspondiente a ácido carboxílico, confrontando con la literatura, se corrobora que el espectro tiene coincidencias con los picos representantes al ATP por el cual está compuesto el PET, con la diferencia que en el rango de 4000 a 3500  $\text{cm}^{-1}$  se nota humedad en la muestra.

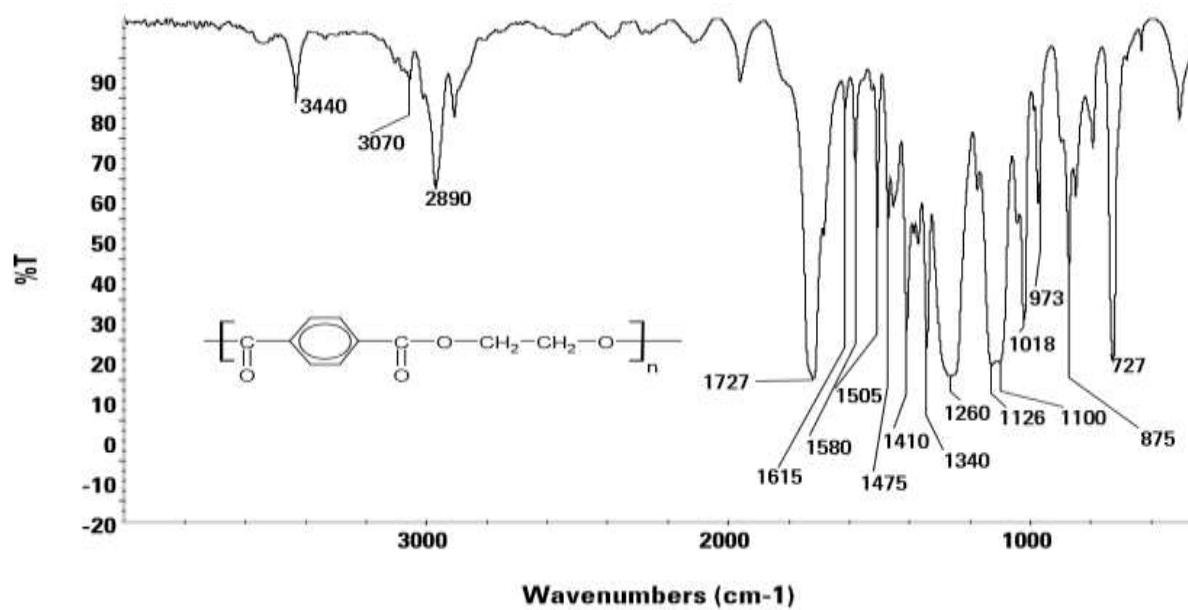
Figura 24. Estructura del PET. Recuperado de: <http://www.arapack.com/la-empresa/preguntas-frecuentes-envases-termoconformados>)



Confrontando el infrarrojo de la muestra de PET hidrolizada alcalina y el ácido tereftálico teórico se concluye que en ambos espectros se evidencia la presencia del anillo aromático, pero la diferencia está en la muestra del ácido teórico donde en ésta indica la presencia ácido carboxílico y en la muestra hidrolizada se evidencia la sal de ácido carboxílico.

Se encontró en la literatura (Infrared Spectroscopy of Polymers) (Kathryn Bradley, Dr. Michael Bradley, 2008), un espectro de infrarrojo para el PET de partida, el cual se puede comparar con el espectro infrarrojo de la muestra hidrolítica alcalina y se pudo concluir que en el PET teórico sin hidrolizar se observa que los picos presentes en  $1260$  y  $1126\text{ cm}^{-1}$  que indican normalmente la presencia de enlace de Ester C-O-C ya no se encuentran presentes en el infrarrojo de la muestra hidrolizada indicando así la separación del polímero, por otra parte en el espectro infrarrojo del PET hidrolizado por vía alcalina se encontró la señal en  $3362\text{ cm}^{-1}$  la cual no está presente en el infrarrojo del PET de partida por lo que se puede interpretar que este sea etilenglicol el cual es uno de los subproductos de la hidrólisis, esto se puede evidenciar observando los infrarrojos de la Figura 22 y Figura 25 respectivamente.

Figura 25. Espectro infrarrojo del PET de partida. Recuperado del libro *Infrared Spectroscopy of Polymers* (Kathryn Bradley, Dr. Michael Bradley, 2008).





## 11 Conclusiones

1. En las pruebas hidrolíticas del PET que se realizaron (vía acida y alcalina), la que presento gran rendimiento y eficiencia en cuanto a degradación del PET fue la hidrólisis alcalina obteniendo un 80% de degradación total con respecto a la hidrolisis acida que tuvo una eficiencia de degradación del 64%.
2. Se evaluó un amplio espectro de solventes disponibles para solubilizar el ácido tereftálico y obtener una curva patrón por espectrofotometría, pero al no encontrar un solvente adecuado para solubilizar el ácido tereftálico, se optó por no implementarlo en este trabajo.
3. La obtención del ácido tereftálico por medios hidrolíticos es de gran relevancia tanto económica como ambientalmente, pues al regresar a la materia prima necesaria para la producción del PET se está evitando un aumento en la cantidad de residuos que van al relleno sanitario y el uso de recursos no renovables (petróleo) empleado para elaborar dicho compuesto.
4. Basado en la revisión del estado del arte, los métodos que se usaron por condiciones de operación y acceso fueron encontrados en los documentos DEGRADACIÓN QUÍMICA DEL POLI (ETILEN TEREFTALATO) y PROCESO DE RECUPERACIÓN DEL ÁCIDO TEREFTÁLICO Y EL ETILENGLICOL A PARTIR DEL PET RECICLADO que se pueden evidenciar en la Tabla 3.
5. El espectro IR de la muestra hidrolítica alcalina presenta señal de formación de sales de ácido carboxílico que probablemente puede ser tereftalato de potasio, pues durante el proceso de hidrólisis, el enlace éster del PET se degrada y da paso a la reacción de formación de la sal del ácido.

6. En el espectro infrarrojo de la muestra de PET hidrolizada por vía alcalina se evidencio una ruptura del enlace Ester, indicando una separación del polímero a monómero, demostrando física y químicamente una degradación del PET.

## 12 Recomendaciones

1. Si se opta por cuantificar por métodos de espectrofotometría, se recomienda someter a reacción el ATP puro para obtener los mismos resultados obtenidos por vía hidrolítica.
2. Se recomienda ensayar otras vías hidrolíticas del PET como pueden ser la hidrolisis enzimática o neutra para evaluar sus rendimientos.
3. Se recomienda optimizar las técnicas hidrolíticas a las muestras tales como la neutralización y purificación de la misma.
4. Se recomienda seguir investigando, y para ello se propone implementar cambios en las variables de operación (temperatura, tiempos, volúmenes y cambio de reactivos), y evaluar el rendimiento en la hidrolisis con las variables modificadas.
5. Se recomienda implementar otro método de identificación de compuestos al producto hidrolizado para validar la técnica.
6. Se recomiendan que las pruebas previas al análisis IR, se sometan a secamiento convectivo a 105°C durante 12 horas.
7. Se recomienda el uso de la química analítica en Ingeniería Ambiental.

### 13 Bibliografía

Alpek. (2015). *Alpek*. Recuperado el 2 de Abril de 2018, de alpek.com:

<http://www.alpek.com/es/pta.html>

Aurelio Ramírez, L. G. (2010). DEGRADACIÓN QUÍMICA DEL POLI(ETILEN TEREFTALATO). *Revista Colombiana de Química*, 1-2.

Cuevas, K. (25 de Mayo de 2017). El plástico tarda miles de años en descomponerse. *televisa.news*, págs. 1-2.

Delgado, R. (18 de Noviembre de 2013). *monografias*. Recuperado el 2 de Abril de 2018, de [www.monografias.com](http://www.monografias.com): <http://www.monografias.com/docs111/hidrolisis-alcalina/hidrolisis-alcalina.shtml>

Flores, D. F. (2017). *PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR*. Recuperado el 2 de Abril de 2018, de Repositorio PUCE: <http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/13224/Degradaci%C3%B3n%20Qu%C3%ADmica%20del%20PET.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Negocios, R. (18 de Septiembre de 2011). Plástico, sólido. *El Espectador*, págs. 1-2.

Phillips, T. (26 de Marzo de 2018). *The balance*. Recuperado el 2 de Abril de 2018, de [www.thebalance.com](http://www.thebalance.com): <https://www.thebalance.com/what-is-hydrolysis-375589>

Plásticos minipet. (24 de Septiembre de 2014). *minipet. Pequeños envases para grandes marcas*. Recuperado el 2 de Abril de 2018, de [plasticosminipet.com](http://www.plasticosminipet.com):

<http://www.plasticosminipet.com/caracteristicas-pet>

Plásticos minipet. (14 de Mayo de 2015). *minipet. Pequeños envases para grandes marcas*.

Recuperado el 2 de Abril de 2018, de [plasticosminipet.com](http://plasticosminipet.com):

<http://www.plasticosminipet.com/noticias/45-caracteristicas-de-los-envases-plasticos-pet>

Pulido, M. I. (13 de Noviembre de 2003). Hidrólisis ácida y enzimática del residuo de poda de olivo. Fermentación de hidrolizados con *Pachysolen Tannophilus*. Jaén, España.

Service, U. N., Mote Marine Lab, S. F., & Atmospheric, N. O. (31 de Agosto de 2017). *NH*

*Department of Environmental Services Search*. Recuperado el 9 de Mayo de 2018, de NH

Department of Environmental Services Search: <https://www.des.nh.gov/>

(DW), D. W. (2014). El ciclo de vida de una botella de plástico.

Al-tamimi, R. K., Khalaf, M. N., Sabri, M., & Sabri, L. (2011). *Post consumer poly(ethylene terephthalate) depolymerization by waste of battery acid hydrolysis. Journal of Materials and Environmental Science*.

Aurelio Ramírez, Leticia Guadalupe Navarro, J. C. A. (2010). DEGRADACIÓN QUÍMICA DEL POLI(ETILEN TEREFTALATO) CHEMICAL DEGRADATION OF POLY(ETHYLENE TEREPHTHALATE) DEGRADAÇÃO QUÍMICA DO POLI(TEREFTALATO DE ETILENO). *Revista Colombiana de Química*, 39, 321–331. Retrieved from <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rcolquim/article/view/20354/29309>

Bertolottp, B., Rospigliosp, C., & Nakamatsu, J. (2005). Poliésteres y Reciclaje Químico del Poli ( tereftalato de etileno ), (7), 13–20.

Bustamante, B. P. (2012). La degradación de los plásticos. *Revista Universidad EAFIT*. Retrieved from <http://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/revista-universidad-eafit/article/view/1408>

- Carta, D., G. Cao, and C. D. (2003). Chemical recycling of poly (ethylene terephthalate)(PET) by hydrolysis and glycolysis. *Nvironmental Science and Pollution Research*, 10(6)(6), 390–394.
- Chimie, R. R. De, Căta, A., Miclău, M., Ienașcu, I., & Ursu, D. (2015). Chemical Recycling of Polyethylene Terephthalate ( Pet ) Waste Using Sub- and Supercritical Water, 60, 579–585.
- D. Spaseska, M. C. (2010). Nalkaline Hydrolysis of Poly(Ethylene Terephthalate) Recycled From the Postconsumer Soft-Drink Bottles. *D. Spaseska, M. Civkaroska 379 Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy*, 45(4), 379–384.
- Educaci, D. E. L. a, Psicolog, C. D. E., Institucionalizaci, E. D. E. L. a, Percepci, E. N. L. a, Personas, D. E. L. a S., Tercera, D. E. L. a, ... Heredia, D. (2008). *Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito*.
- Haghighatkish, M., & Yousefi, M. (1992). Alkaline hydrolysis of polyester fibers-structural effects. *Iranian Journal of Polymer Science & Technology*, 1(2), 56–61. Retrieved from <http://www.irpds.com/FileEssay/ipj-1387318-vol1no2-mm1.pdf>
- Kao, C., Cheng, W., & Wan, B. (1998). Investigation of alkaline hydrolysis of polyethylene terephthalate by differential scanning calorimetry and thermogravimetric analysis. *Journal of Applied Polymer Science*, 70(10), 1939–1945. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19981205\)70:10<1939::AID-APP8>3.0.CO;2-G](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19981205)70:10<1939::AID-APP8>3.0.CO;2-G)
- Kathryn Bradley, Dr. Michael Bradley, F. I. (2008). *Infrared Spectroscopy of Polymers*. United States. Retrieved from <http://www.thermo.com/spectroscopy>
- Linazisoro, I. (1997). El reciclado químico, otra alternativa menos conocida. Retrieved from <http://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/5628-El-reciclado-quimico-otra-alternativa->

menos-conocida.html

Liu, Y., He, T., & Gao, C. (2005). Surface modification of poly(ethylene terephthalate) via hydrolysis and layer-by-layer assembly of chitosan and chondroitin sulfate to construct cytocompatible layer for human endothelial cells. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 46(2), 117–126. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2005.09.005>

Magdy Y. Abdelaal, T. R. S. and M. S. I. M. (2008). CHEMICAL DERGRADATION OF POLY(ETHYLENE TEREPHTHALATE). *Chemistry Department, Faculty of Science, Mansoura University*, 1–18.

Mancheno, M., Astudillo, S., Arévalo, P., Malo, I., Naranjo, T., & Espinoza, J. (2016). Aprovechamiento energético de residuos plásticos obteniendo combustibles líquidos, por medio del proceso de pirólisis. *La Granja*, 23(1), 53–59. <https://doi.org/10.17163/lgr.n23.2016.06>

Mancini, S. D., & Zanin, M. (2003). Optimization of Neutral Hydrolysis Reaction of Post-consumer PET for Chemical Recycling, 20(2), 117–132.

Navarro, L. G., & Acevedo, J. C. (2010). Degradación química del poli(etilen tereftalato). *Revista Colombiana de Química*, 39(200), 321–331.

Padilla Alomoto, A. E. (2014). Diseño del proceso para la obtención de resina de poliéster insaturada mediante el reciclaje químico de desechos de polietilentereftalato (PET), 22–26.

PALOMINO, J. M. (2010). *PROCESO DE RECUPERACIÓN DEL ÁCIDO TEREFTÁLICO Y EL ETILENGLICOL A PARTIR DEL PET RECICLADO". Información e Historia.*

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA. Retrieved from

[http://www.uni.edu.ni/Alma\\_Mater/Historia](http://www.uni.edu.ni/Alma_Mater/Historia)

Quartinello, F., Vajnhandl, S., Volmajer Valh, J., Farmer, T. J., Vončina, B., Lobnik, A., ...

Guebitz, G. M. (2017). Synergistic chemo-enzymatic hydrolysis of poly(ethylene terephthalate) from textile waste. *Microbial Biotechnology*, 10(6), 1376–1383.

<https://doi.org/10.1111/1751-7915.12734>

Serrano, J. L. (2009). Espectroscopía infrarroja 1-Fundamentos. *Instrumentacion y Métodos de Análisis Químico*, 35.

Size, S., Viability, S., & Species, T. T. (1997). *Hydrolysis of Waste PET by Sulfuric Acid at 150°C for a Chemical Recycling*.

Stephen J. Weininger, F. R. S. (1988). *Química Orgánica*. Retrieved from

<https://books.google.com.co/books?id=O6YvtgAtXmcC&pg=PA29&dq=grupo+funcional&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwiTIZ7pr6TbAhUGulMKHTLjBhoQ6AEIKjAB#v=onepage&q=grupo+funcional&f=false>

Suasnavas, D. (2017). Degradación de materiales plásticos “PET” (polyethylene terephthalate), como alternativa para su gestión, 1–64.

Ucha, F. (2013). DefiniciónABC. Retrieved from

<https://www.definicionabc.com/ciencia/compuestos-organicos.php>

Universidad de Lima., L., & Ruiz-Ruiz, M. (1997). Ingeniería Industrial. *Universidad de Lima - Ingeniería Industrial*, 0(27), 123–137. Retrieved from

[http://revistas.ulima.edu.pe/index.php/Ingenieria\\_industrial/article/view/627/608](http://revistas.ulima.edu.pe/index.php/Ingenieria_industrial/article/view/627/608)

Vásquez, A., Contreras, E., Sánchez, A., Muñoz, J., Hoyos, A., & Gartner, C. (2010).

Degradación hidrolítica del Polietilen-Tereftalato (PET). *Revista Colombiana de Materiales*, 39(5), 100–105.



Yamashita, M., & Mukai, H. (2011). Alkaline Hydrolysis of Polyethylene Terephthalate at Lower Reaction Temperature. *The Science and Engineering Review of Doshisha University*, 52(2), 51–56.

Yoshioka, T., Okayama, N., & Okuwaki, A. (1998). Kinetics of Hydrolysis of PET Powder in Nitric Acid by a Modified Shrinking-Core Model. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 37(2), 336–340. <https://doi.org/10.1021/ie970459a>

## 14 Anexos

### 14.1.1 Resultados y Evidencias Fotográficas para prueba de diluciones.

Se evaluaron 7 compuestos como diluyente del ácido tereftálico estándar, donde no se obtuvieron resultados positivos dado que ningún compuesto fue capaz de diluir el ácido tereftálico estándar, a continuación de evidencia el proceso de cada dilución.

Figura 26. Muestra de 1mL de agua desalinizada con 0,05 gr de ácido tereftálico



Figura 26. Se observa que hay un precipitado de ácido tereftálico al 98%

En la Figura 26 se observa un pequeño precipitado del ácido tereftálico estándar, a pesar que hubo precipitación fue una de las muestras donde más dilución se notó. En la

Figura 27 se observa que no hay una dilución completa y quedo bastante precipitado utilizando 1 mL de etanol.

Figura 27. Muestra de 1mL de etanol con 0,05 gr de ácido tereftálico.

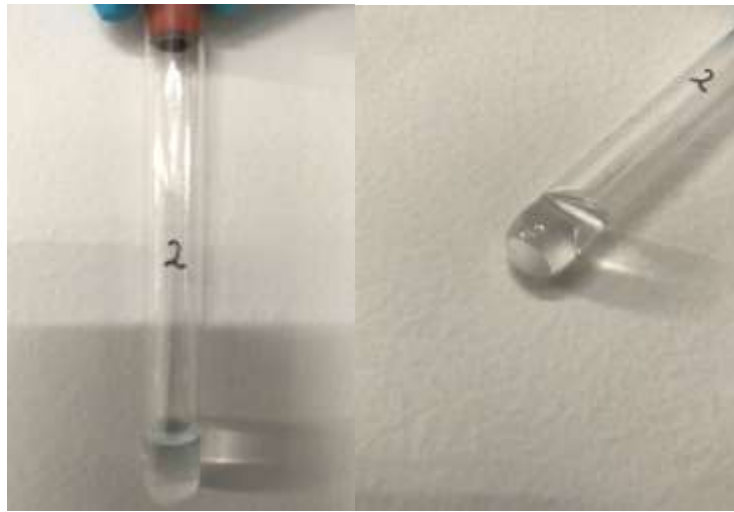


Figura 27. Se observa el precipitado de ácido tereftálico estándar.

Figura 28. Muestra de 1mL de benceno con 0,05gr de ácido tereftálico.

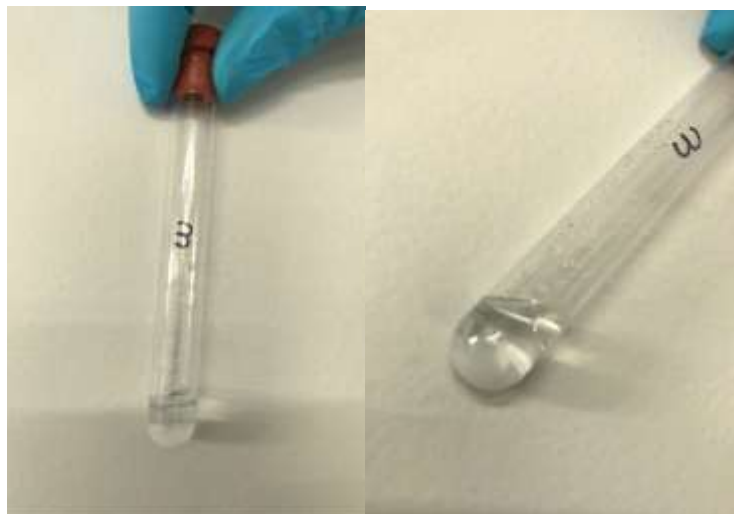


Figura 28. Se observa el precipitado de ácido tereftálico después de agitar.

En la Figura 28 se puede observar que no se diluyó totalmente los 0,05 gramos de ácido tereftálico con el benceno, por lo cual hubo un precipitado del ácido después de 10 segundos de agitación manual.

Figura 29. Muestra de 1 mL de éter etílico con 0,05g de ácido tereftálico.

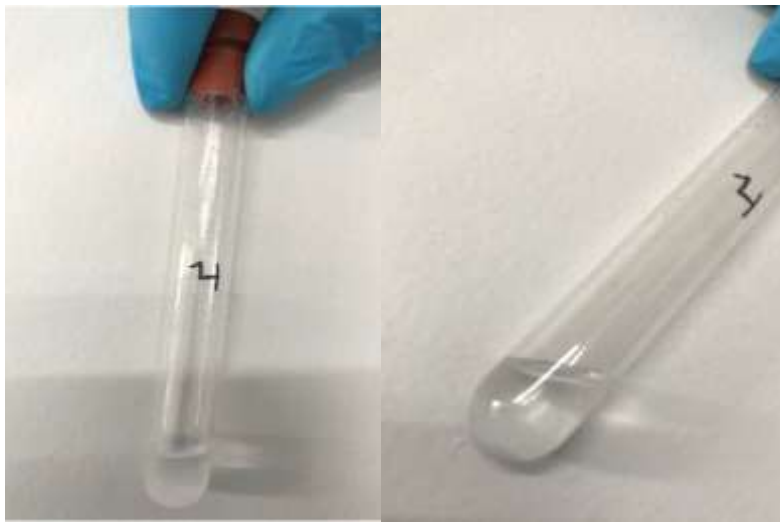


Figura 29. Se evidencia un pequeño precipitado de ácido tereftálico estándar.

En la Figura 29 se puede observar la muestra del éter etílico con el ácido tereftálico y se concluye que no hay una dilución del 100%, pero se evidencia que es una de las muestras donde más se notó la dilución de ácido tereftálico.

Figura 30. Muestra de 1mL de acetona con 0,05gr de ácido tereftálico.

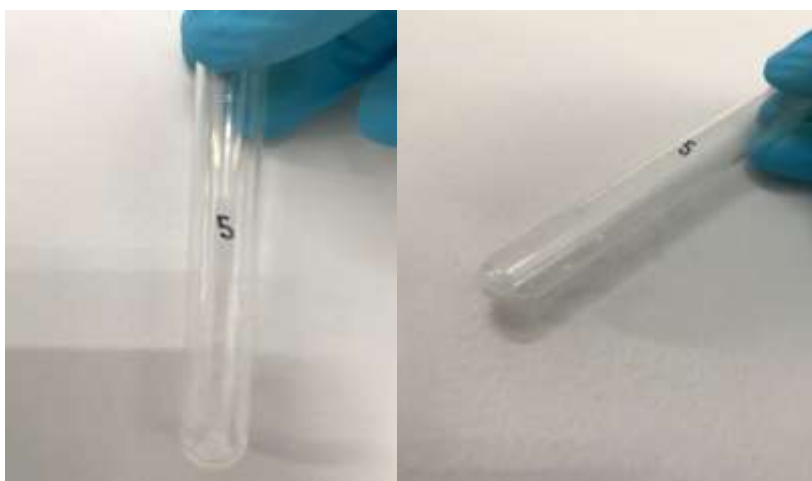


Figura 30. Se evidencia un pequeño precipitado del ácido tereftálico estándar al 98%

En la Figura 30 se puede observar un pequeño precipitado de ácido tereftálico, lo cual quiere decir que la acetona no funciona como diluyente del ácido tereftálico, pero se evidencia una dilución por parte del soluto.

Figura 31. Muestra de 1mL de n- hexano con 0,05gr de ácido tereftálico.

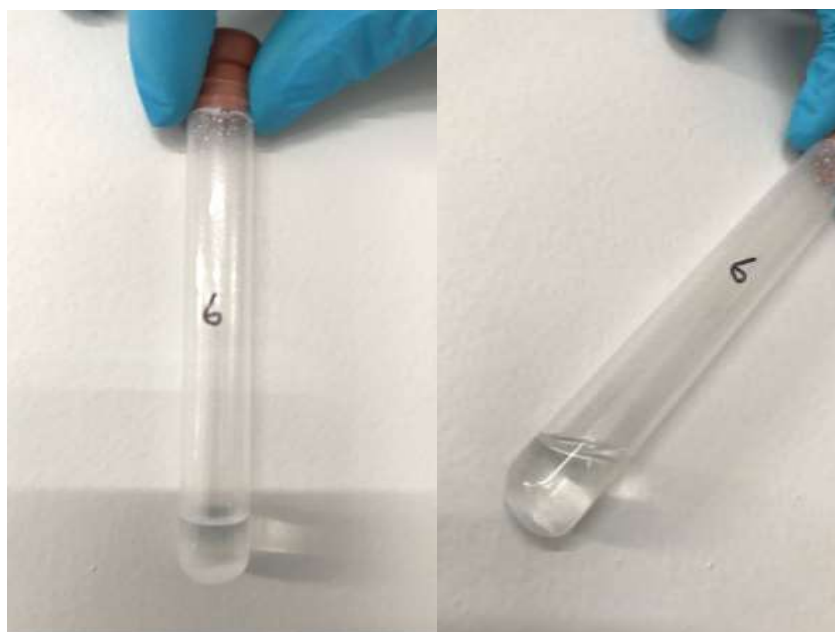


Figura 31. Se observa el precipitado de ácido tereftalico al 98% de pureza.

En la Figura 31 de evidencia la muestra de 1mL de n-hexano reaccionando con 0,05gramos de ácido tereftalico, se observa un precipitado del compuesto a diluir por lo cual no se cumple con la dilución del 100%.

Figura 32. Muestra de 1 mL de ciclo-hexano y 0,05gr de ácido tereftalico.

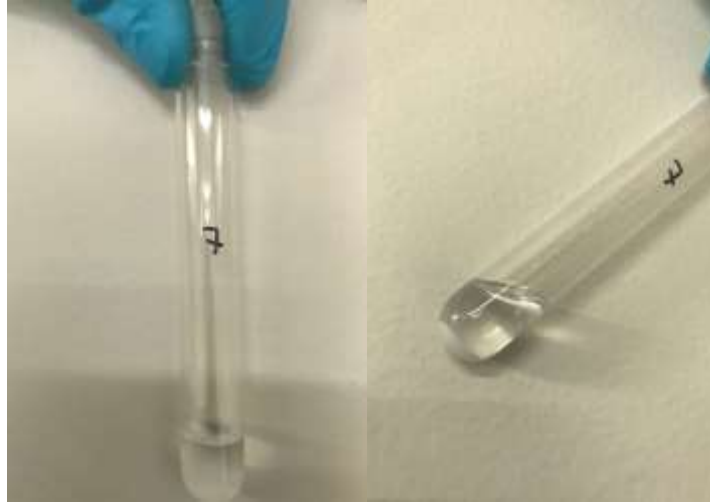


Figura 32. Se evidencia el precipitado de ácido tereftalico al 98%.

En la Figura 32 se observa claramente la muestra de 1 mL de ciclo-hexano con 0,05 gramos de ácido tereftalico reaccionando, pasados 20 segundos de agitación manual se observa el precipitado del ácido por lo cual no fue un resultado positivo.