






INFLUENCIA DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA EN EL RENDIMIENTO DE LA HIDRÓLISIS ALCALINA DEL POLIETILENTEREFTALATO (PET) POST- CONSUMO

Influence of particle size on the performance of post-consumer polyethylene terephthalate alkaline hydrolysis

-  ¹ Paul Palmay Paredes*
-  ² Mishell Sánchez Rojas
-  ³ Michele Alvarado Guicalpi

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Riobamba, Ecuador.

* paul.palmay@esPOCH.edu.ec

RESUMEN

La generación de plástico a nivel mundial se ha incrementado a un ritmo descontrolado, donde el termoplástico que más aparece es el polietilentereftalato PET, debido a su uso en la industria alimenticia. En la actualidad, se manejan varias tecnologías para su adecuada disposición final. En los últimos años se ha fortalecido las tecnologías de reciclaje químico para obtener productos de interés industrial a partir de un residuo. En este sentido la hidrólisis es una técnica que busca la descomposición del PET, mediante un conjunto de reacciones químicas considerando factores como: tamaño de partícula del PET, catalizador, condiciones de reacción, composición del PET y demás. Para el estudio se utilizó dos dimensiones del plástico: 5mm x 5mm (T5mm) y 10mm x 10mm (T10mm), de plásticos de colores verde y violeta. El material obtenido se caracterizó por medio de espectroscopia infrarroja (FTIR) y prueba de solubilidad, corroborando la presencia de ácido tereftálico (TPA). El mejor resultado se obtuvo con la partícula "T5mm, verde", con un rendimiento de 96,346%. Por lo tanto, mientras más pequeño sea el tamaño de la partícula, mayor será la probabilidad de que exista una interacción química entre la superficie de las partículas PET y la solución base.

Palabras claves: *Hidrólisis, álcali, plástico, color, tamaño.*

ABSTRACT

The generation of plastic worldwide has increased at an uncontrolled rate, where the thermoplastic that appears the most is polyethylene terephthalate PET, due to its use in the food industry. At currents, Several technologies are currently used for their proper final disposal. In recent years, chemical recycling technologies have been strengthened to obtain products of industrial interest from waste. In this sense, hydrolysis is a technique that seeks the decomposition of PET, through a set of chemical reactions taking into account factors such as: PET particle size, catalyst, reaction conditions, PET composition and others. Two dimensions of plastic were used for the study: 5mm x 5mm (T5mm) and 10mm x 10mm (T10mm), of green and violet colored plastics. The material obtained was characterized by means of infrared spectroscopy (FTIR) and solubility test, corroborating the presence of terephthalic acid (TPA). "T5mm, green" particle was the best result, with a yield of 96.346%. Therefore, the smaller the particle size, the higher the probability of chemical interaction between the surface of the PET particles and the base solution.

Keywords: *Hydrolysis, alkali, plastic, color, size.*

Fecha de recepción: 07-12-2021

Fecha de aceptación: 02-05-2022

Fecha de publicación: 24-03-2023

I. INTRODUCCIÓN

En el 2018, la producción de plásticos en todo el mundo alcanzó 343 millones de toneladas. Siguiendo esta tendencia, se estima que en 20 años la producción se incremente y se fabriquen 1 100 millones de toneladas de este material (1). En el mismo año, alrededor de 292 millones de toneladas cortas de desechos sólidos municipales fueron generados tan solo en Estados Unidos y de este universo, el 12,2% (35,7 millones de toneladas estadounidenses) representaba a los plásticos. De este último porcentaje, el 79% estaba distribuido de la siguiente manera: Polietileno de baja densidad, LDPE (30,3%). Polipropileno, PP (28,8%). Polietileno de alta densidad, HDPE (22,2%) y PET (18,7%) (2). Claramente se evidencia un consumo excesivo.

El desecho inadecuado de residuos representa un alto riesgo para la supervivencia de la vida silvestre, se han registrado muertes de animales provocadas por la ingesta de plásticos (3). Diversos Gobiernos han incorporado políticas a favor de combatir la problemática ambiental. Algunos Estados han planteado incorporar ciertos porcentajes de materiales reciclados como materia prima, para la creación de nuevos productos (4) y otros Estados incluso han vetado la adquisición de plásticos de un solo uso (5).

Entre los diferentes tipos de plásticos disponibles en el mercado, la investigación se focalizó en el plástico tipo PET. Dicho polímero es un termoplástico utilizado por las fábricas para elaboración de envases, paquetes de alimentos y botellas (6). De acuerdo con el informe emitido por Smithers Pira, el mercado mundial de envases PET elaboró aproximadamente 16,4 millones de toneladas. En los próximos 5 años se estima que la demanda de estos envases aumente en 4,6% cada año(7).

El plástico PET se podría considerar como un agente nocivo para el planeta debido al mal uso post consumo que se le da al ingresar grandes cantidades de este residuo en vertederos municipales, a su alta resistencia a los agentes biológicos y atmosféricos, además por no ser un plástico degradable a condiciones normales (8). La radiación UVB de la luz solar, las propiedades hidrolíticas del agua mar y las propiedades oxidativas de la atmósfera hacen que los desechos plásticos en mares y océanos se desintegren en micropartículas; incluso en el 2018 con el estudio realizado por la Agencia Austriaca de Medio

Ambiente se encontraron residuos de PP y PET en heces humanas (9).

Este tipo de plástico se puede recuperar mediante incineración y reciclaje. La incineración no es una vía ecológica, debido a la emisión de gases tóxicos y la presencia de cenizas residuales cuya composición incluye cadmio y plomo. El método más respetuoso con el medio ambiente que da la preservación de los materiales y la energía, es el reciclaje (10).

El reciclaje es una alternativa para minimizar la cantidad de residuos plásticos en vertederos; con las tecnologías que se disponen hoy en día, tan solo en Europa más del 50% de los plásticos, entre ellos PET, llegarían a ser potencialmente reciclables por una vía ecoeficiente (11). Sin embargo, a los países subdesarrollados se dificulta el llegar a un correcto tratamiento debido a la falta de conocimiento y apoyo tanto técnico como económico (12).

Existen dos métodos principales de reciclaje: método mecánico y químico. El reciclaje mecánico es el más común, aproximadamente el 84% del PET es reciclado, recolectado, clasificado, limpiado y por último se procede a la molienda(13). Estos últimos pasos pueden ir en orden diferente, dependiendo de la composición y el origen del plástico (14).

En el reciclaje químico se rompen las cadenas que forman el polímero, este proceso se desarrolla por medio de solvólisis o termólisis. La glicólisis, metanólisis, hidrólisis, aminólisis y demás, son algunas alternativas que se presentan en la solvólisis (15). En la despolimerización del PET por medio de hidrólisis (ácida, neutra o alcalina) se obtienen como productos: etilenglicol (EG) y TPA. El ácido oxálico también es factible sintetizarlo por medio este mecanismo (16). Entre las variables que afectan al rendimiento se encuentran: el tiempo de reacción, efecto de la concentración de la base, temperatura, tamaño de partícula, entre otros (17).

Por medio de la hidrólisis alcalina, las sales tereftálicas son hidrolizadas empleando ácido clorhídrico (HCl) o ácido sulfúrico (H₂SO₄) hasta formar TPA. Comúnmente, se emplea hidróxido de potasio (KOH) o hidróxido de sodio (NaOH) con una concentración de 4%-20% en masa (18). En la hidrólisis ácida se obtiene rendimientos altos, pero debido al alto consumo de ácido, esta vía se convierte en un proceso muy costoso y altamente corrosivo. Además de que tiene un efecto negativo en la pureza del EG. Por otro lado, con la hidrólisis



neutra, a pesar de no ser una vía nociva, todas las impurezas presentes en el plástico se manifiestan en el TPA, por lo cual afecta su pureza (19).

La presente investigación tuvo como objetivo identificar cómo el tamaño de partícula interfiere en el rendimiento de la hidrólisis alcalina de PET. El plástico de color se dimensionó en dos tamaños T5mm y T10mm. Para la hidrólisis se empleó NaOH, agua (H₂O) y EG, el proceso necesitó 120°C por 30 minutos. Se trabajó con un sistema hermético para evitar pérdidas de masa. El TPA se caracterizó por medio de la espectroscopia FT-IR y prueba de solubilidad.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Equipos

Para la caracterización de la materia prima (PET) así como del producto despolimerizado, se usó el espectrofotómetro infrarrojo modelo "JASCO FT/IR-4100", resolución 0,9 cm⁻¹ rango de número de onda 7800-350 cm⁻¹. Para la hidrólisis se emplearon: balanza analítica "OHAUS EXPLORER, EX 224" con una sensibilidad de 0,1mg; Agitador magnético con plancha de calentamiento "THERMO FISHER SCIENTIFIC" rango de velocidad 60-1110 l/min y temperatura máxima de 450°C ; Bomba al vacío "DOA-P704" modelo GM-05, presión máxima de 60psig; Bureta digital "Hirschmann solarus, 9392020", rango de temperatura 4°C-50°C y precisión 0,2%; pH-metro "OAKLON 2700" rango (-2.000 a 20.000)pH y exactitud ±0,002+1 LSD; Estufa "POL-EKO, SRN 115" temperatura máxima 250°C y convección de aire natural.

Caracterización del plástico

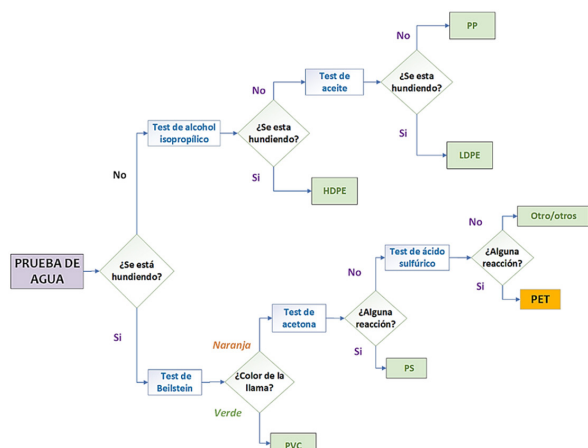


Figura 1. Representación esquemática del test clásico de identificación de plásticos.

Fuente:(20)L

Diariamente durante tres semanas se recolectaron muestras provenientes de zonas exclusivas para el reciclaje de plásticos dentro de las instalaciones de la ESPOCH, con preferencia por aquellos materiales que presentan un color distintivo. Las muestras se rasparon hasta obtener un polvo fino, el cual se analizó en el espectrofotómetro.

Tipo de plástico	ρ (kg/m ³)
PET	1350-1390
HDPE	930-970
LDPE	917-925
PVC	1100-1450
PP	904 - 906

Tabla 1. Densidad de algunos plásticos

Fuente: (21)

Siguiendo el esquema de la figura 1, el test clásico de identificación de PET consiste en cuatro fases: test de densidad, test de Beilstein, test de acetona y test de ácido sulfúrico. Para el test de densidad, se requiere de 2mL de agua destilada dentro de un tubo de ensayo conjuntamente con las muestras del polímero. Se registra: ¿Flota o no Flota?. En el test de Beilstein es necesario usar un cable de cobre enrollado en la muestra y acercar el sistema a una fuente de calor. Se observa el color de la llama.

Finalmente, en el test de acetona y de ácido sulfúrico, se emplean 6mL de cada reactivo concentrado dentro de dos tubos de ensayo diferentes, conjuntamente con el plástico. Además, para el último test es necesario someter el sistema a baño María por media hora, se retira y se deja enfriar la muestra. Se registra: Alguna reacción visible ¿Si o No?. Una vez identificado el material, se colocó una criba en el triturador para tener una abertura apropiada y poder dimensionar las láminas en: (T5mm) y (T10mm).

Hidrólisis alcalina

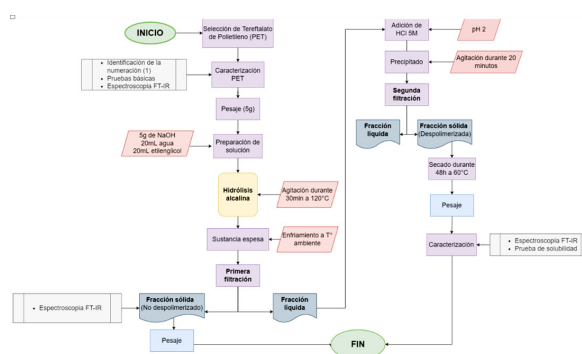


Figura 2. Metodología de la hidrólisis alcalina de PET

5g de plástico, previamente lavado y triturado, se mezcló con 5g de NaOH, 20mL de H₂O y 20mL de EG (22). La despolimerización se desarrolló dentro de un vaso de precipitación de 250mL completamente hermético, bajo las siguientes condiciones:

Temperatura	Tiempo	Agitación
120°C	30 min	Magnética constante

Tabla 2. Condiciones de reacción

Al final de la reacción, se obtuvo una sustancia espesa color melón (plástico violeta) y color verde (plástico verde). La metodología restante se desarrolló acorde lo estipula el trabajo de Kandasamy et al. (22). Con la diferencia que, para la neutralización se usó HCl 5M y para el secado, se programó la estufa a 60°C durante 48 horas.

Caracterización

Las muestras sólidas despolimerizadas y las no despolimerizadas se analizaron en el espectrofotómetro. Además, para la prueba de solubilidad es necesario colocar 5mL de cada reactivo en un tubo de ensayo conjuntamente

con 1 g de la muestra obtenida de la hidrólisis. Los cinco reactivos son: agua destilada, etanol, hexano, ácido acético y cloroformo.

Rendimiento (%)

Se realizaron un total de 16 experimentaciones. El porcentaje de rendimiento se calculó acorde a la siguiente fórmula:

$$\%R = \frac{m^e_{TPA}}{m^t_{TPA}} \times 100 \quad (1)$$

%R = Rendimiento expresada como porcentaje

M^e TPA= Masa experimental final en gramos de TPA.

M^t TPA= Masa teórica final en gramos de TPA.

Para 5 gramos de PET usados en la hidrólisis alcalina se espera teóricamente 4,3225g de TPA (23).

Análisis estadístico

Una vez determinado el porcentaje de rendimiento, se realizó el análisis de varianza, ANOVA, con dos factores (color y tamaño). Conjuntamente con el test de Tukey con un porcentaje de significancia del 5%.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Pruebas básicas de identificación de PET

Test	Test de densidad		Test de Beilstein (Color de la llama)		Test de acetona (Reacción visible)		Test de ácido sulfúrico (Reacción visible)	
	Flota	No flota	Naranja	Verde	Si	No	Si	No
Plástico Verde		✓	✓			✓	✓	
Plástico Violeta		✓	✓			✓	✓	

Tabla 3. Tabla 3. Resultados de las pruebas básicas de identificación de PET.

De acuerdo a los resultados detallados en la Tabla 3. En el Test de densidad, para considerar que una partícula no ha sufrido ningún cambio y/o reacción, la muestra no debe aumentar su tamaño ni debe disolverse con el agua (24). Considerando estos parámetros y atribuyendo a la muestra resultados favorables para el Test de densidad, se estipula que la muestra NO FLOTA. De acuerdo a la tabla 1, la densidad del plástico a hidrolizar es superior a la densidad del agua ($P_{plástico} > 997 \text{ kg/m}^3$), descartando la posibilidad que el material corresponda a: LDPE, HDPE o PP (21).

En el test de Beilstein, se observó una llama naranja, es decir, una reacción negativa. De acuerdo a la teoría, el halógeno presente en los polímeros reacciona con el óxido de cobre (II) dando lugar a la formación de haluros de cobre (II) y al estar en presencia de calor, se forma la llama verde(25). El plástico PVC se elimina como una opción (20).

De igual manera, se rechaza la idea de la presencia de poliestireno (PS) con el Test de acetona, debido a que no se ha evidenciado una reacción o degradación del material. Sin embargo, se obtuvo una reacción positiva en la última prueba; H₂SO₄



reacciona con el plástico como resultado de la hidrólisis ácida (24). Por lo tanto, se confirma la presencia de PET en la muestra a hidrolizar.

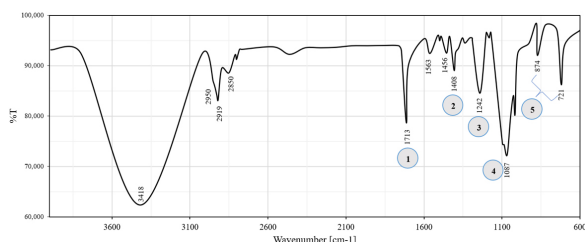


Figura 3. Espectro IR del plástico PET

Región	Banda (cm ⁻¹)
1	1713
2	1408
3	1242
4	1087
5	874-721

Tabla 4. Bandas del espectro IR de PET

En la figura 3, se aprecia el Espectro IR referente al PET. La banda 1, representan un estiramiento del carbonilo C = O atribuido a las vibraciones de los ésteres saturados (26). En la región 2 se aprecia un pico relacionado con la deformación asimétrica de CH₂ - y segmentos de EG (27), con valores aproximados al trabajo de Silva et al. Además, 3 indica la presencia de la absorción específica de los enlaces del grupo tereftalato (OOC - C₆H₄ - COO. Estiramiento de los enlaces C-O se encuentran en la región 4.

Los dos picos de la zona 5, corresponden a la vibración =C-H del anillo de benceno. El espectro presentado efectivamente pertenece al PET, y está confirmado por el pico 721 cm⁻¹ (28), que es atípico para los aromáticos di-sustituidos (860-780) cm⁻¹ y se debe a la interacción del grupo éster polar y el anillo benceno.

Análisis infrarrojo de los pigmentos

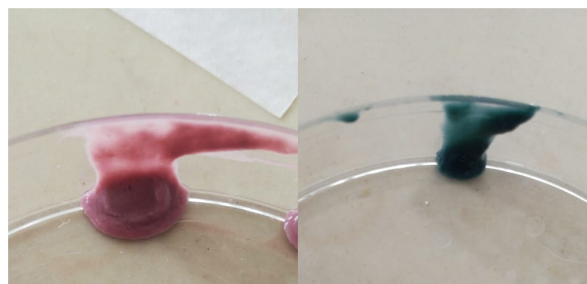


Figura 4. Pigmento de la fracción NO despolimerizada

Para la identificación de los pigmentos del plástico se recolectó la fracción sólida NO despolimerizada y se procedió con su análisis en el espectrofotómetro infrarrojo.

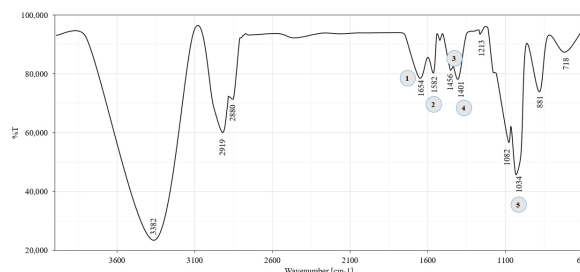


Figura 5. Espectro IR del pigmento verde (Pv)

Región	Banda (cm ⁻¹)
1	1654
2	1582
3	1456
4	1401
5	1034

Tabla 5. Bandas del espectro IR de Pv

La figura 5 perteneciente al pigmento verde. El espectro IR no detalla una banda pronunciada característica de la unión metal- oxígeno (M-O) en 668 cm⁻¹, por lo cual se descarta la presencia de pigmentos inorgánicos(29).

Entre los pigmentos verdes aptos para el uso en alimentos en encuentran las ftalocianinas (Fc) (30). Por lo tanto, la región 1 corresponde al estiramiento C=C. Las vibraciones del anillo de pirrol se encuentran en la banda 2. Los picos intermedios ubicados en 3 y 4 pertenecen al estiramiento C-C y C-N. Al pico 5 se atribuyen vibraciones C-H del anillo de Fc (31).

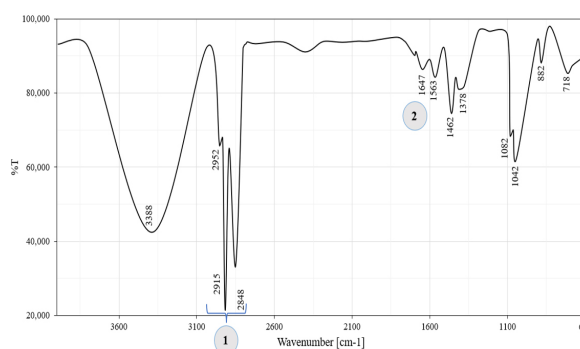


Figura 6. Espectro IR del pigmento violeta (PvI)

Región	Banda (cm ⁻¹)
1	2800-3300
2	1647

Tabla 6. Bandas del espectro IR de Pvl

Por lo general, los pigmentos inorgánicos son óxidos metálicos (32). Tal como se indicó en la figura anterior, no se evidencia la presencia de una banda perteneciente al enlace entre M-O. Por ello, la figura 6 no pertenece a un pigmento inorgánico. Sin embargo, la la quinacridona (QA) es el pigmento orgánico comunmente usado por la industria de los plásticos (33).

En la banda 1, se presenta bandas de absorción correspondientes a modos de estiramiento C-H y N-H de la QA (34). Además, para la banda 2 se asigna el estiramiento C=O del esqueleto de QA(35) con un valor muy cercano al presentado en el trabajo de Imura et al.

Rendimiento

El rendimiento promedio de la reacción para cada color y tamaño de partícula se muestran en la tabla 7.

COLOR	TAMAÑO	
	5mm	10mm
Violeta	95,904%	89,950%
Verde	96,346%	92,995%

Tabla 7. Diagrama de barras del porcentaje de rendimiento de la hidrólisis alcalina.

Análisis Estadístico

Para el estudio estadístico se empleó un análisis Anova de dos factores, considerando las variables de clasificación: color, tamaño e interacción entre ellas, el rendimiento como la variable dependiente.

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
%Rendimiento	16	0,90	0,88	1,03

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	105,46	3	35,15	38,02	<0,0001
Color	12,19	1	12,19	13,18	0,0034
Tamaño	86,47	1	86,47	93,52	<0,0001
Color*Tamaño	6,80	1	6,80	7,36	0,0189
Error	11,10	12	0,92		
Total	116,56	15			

Figura 8. Análisis Anova

Para el análisis Anova detallado en la figura 8, las tres condiciones establecidas para el modelo estadístico (color, tamaño e interacción) obtienen un valor R^2 de 0,9. El p-valor de las tres variables es inferior a 0,05. Demostrando que sí existe diferencias estadísticamente significativas entre las dos variables incluida la interacción. Por lo cual, se acepta la hipótesis alterna (investigador) y se rechazan las hipótesis nulas. Al menos, una de las medias es distinta de cero.

Test Tukey

```

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=1,04755
Error: 0,9246 gl: 12
Tamaño Medias n E.E.
10mm 91,48 8 0,34 A
5mm 96,12 8 0,34 B
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=2,01866
Error: 0,9246 gl: 12
Color Tamaño Medias n E.E.
violeta 10mm 89,95 4 0,48 A
verde 10mm 93,00 4 0,48 B
violeta 5mm 95,90 4 0,48 C
verde 5mm 96,35 4 0,48 C
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)
    
```

Figura 9. Test Tukey

En la figura 9 se aprecian diferencias significativas entre T5mm y T10mm. Además, en cuanto al cuadro correspondiente a la interacción de variables, entre los grupos: A, B y C también existen diferencias estadísticamente significativas. Sin embargo, entre violeta **T5mm** y verde **T5mm** no existe diferencia debido a que las medias registradas en el Test Tukey coinciden el grupo C.

En la tabla 7 se describe el rendimiento promedio obtenido de la hidrólisis alcalina del PET. De acuerdo, a los resultados obtenidos en el análisis estadístico Anova y el test Tukey. Entre los factores que intervienen en el porcentaje de rendimiento se encuentra el color del plástico, así como el tamaño de partícula.

A medida que el tamaño del material disminuye, el rendimiento de la hidrólisis aumenta. En consecuencia, el rendimiento más bajo corresponde al plástico violeta **T10mm** con un valor de 89,950%. El mejor rendimiento es para plástico verde **T5mm** con porcentaje de 96.346%. Este fenómeno se debe a la velocidad de reacción de la hidrólisis alcalina es proporcional al área superficial de la partícula. En otras palabras, el plástico con un área superficial alta permite una reacción directa entre NaOH y el plástico PET (17).

De acuerdo al trabajo desarrollado por Fonseca et al. La hidrólisis alcalina con NaOH sigue el modelo de núcleo en contracción debido a que la reacción



ocurre únicamente en la superficie externa de las partículas(36). A pesar de que se obtienen mejores rendimientos con tamaños de partícula bajos, se debe tener cuidado con los polvos debido a que son complicados de manejar. Sobre todo, en la actualidad la micronización de polímeros no es habitual en el campo industrial (19).

Los pigmentos orgánicos de las figuras 5 y 6 han sido incorporados en los plásticos del estudio. Pigmentos orgánicos como: ftatocianina, antraquinona y quinacridona presentan carbonos electrofílicos en sus estructuras moleculares, lo que afecta y limita la posibilidad de un ataque directo por parte del hidróxido (nucleófilo) sobre los carbonos electrofílicos en la molécula de PET. Por lo tanto, estas especies químicas contribuyen a la reducción de la pureza del TPA, así como en el rendimiento (37).

Se puede llegar a considerar que los pigmentos presentes de estos plásticos actúan como un inhibidor, afectando de esta manera el porcentaje de rendimiento. También es importante señalar que, acorde a los resultados obtenidos en el análisis estadístico Anova y el test Tukey. Si se trabaja con aquellas interacciones en las que no se han presentado diferencias significativas, no se obtendrán porcentajes de rendimiento que difieran relativamente entre ellos.

Caracterización del ácido tereftálico

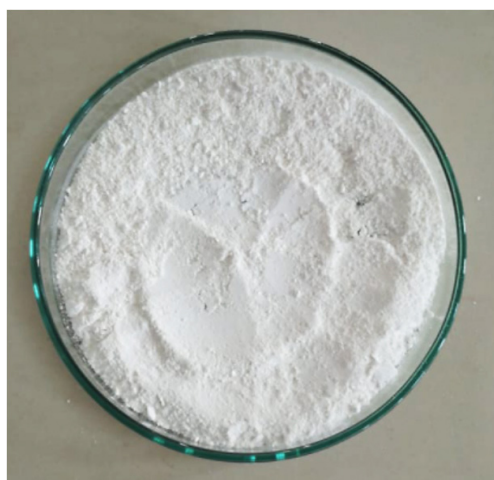


Figura 10. Ácido Tereftálico

El ácido tereftálico es un compuesto químico que posee una solubilidad extremadamente baja y su reactividad es aún más lenta(38). Es por tanto que, en cuanto a la prueba de solubilidad, se observó que con los solventes orgánicos y con el agua destilada se dio la formación dos fases.

El ácido tereftálico es muy poco soluble en compuestos orgánicos y aumenta su solubilidad lentamente con el aumento de la temperatura. La solubilidad en agua a 25°C es de 0.0017gTPA/100g de solvente mientras que a 200°C es de 1,7 gTPA/100g de solvente (39). Los ácidos dicarboxílico no son líquidos a temperatura ambiente.

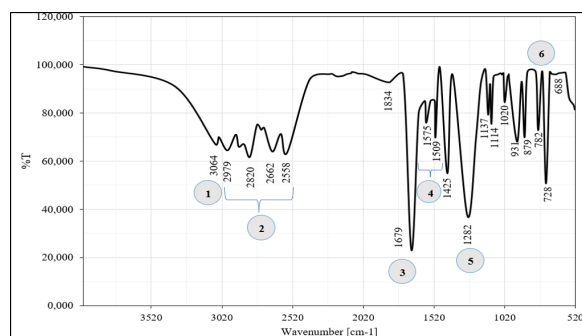


Figura 11. Espectro FT-IR del TPA

Región	Banda (cm ⁻¹)
1	3064
2	2979-2820-2662-2558
3	1679
4	1575-1509
5	1282
6	782

Tabla 8. Bandas del espectro IR de TPA

En la figura 11 se detalla grupos funcionales característicos del TPA. La región 1, se evidencia un grupo aromático fuerte. De igual manera, un aromático es evidente en el pico 5. Se incorpora la zona 2 para las bandas -OH de ácidos carboxílicos. El pico inherente y característico TPA se observa en 3, con una banda de estiramiento C=O del carboxilo (40). La banda 4 simboliza una sustitución 1-4 correspondiente al anillo aromático (23), los cuales son valores próximos a los registrados en el estudio de Căta et al. Por último, la banda específica para anillos de benceno "para-sustituidos" se ubica en 6.

V. CONCLUSIONES

Para las dos pruebas de identificación del plástico, siguiendo el diagrama presentado en la presente investigación, se descartó cualquier tipo de plástico que no sea el tereftalato de polietileno. Con el test de Beilstein se apreció una llama naranja y la formación de un precipitado

blanco con el ácido sulfúrico. Con en análisis IR, se encontró un pico muy representativo que se observa a 1242 cm^{-1} el cual representa al grupo tereftalato.

El rendimiento máximo corresponde al plástico verde **T5mm**. El tamaño de partícula del plástico influye significativamente en el porcentaje de rendimiento de la hidrólisis alcalina. Para obtener mejores resultados es necesario trabajar con un tamaño mínimo, además de elegir preferentemente plásticos transparentes. Los

resultados obtenidos, tanto por espectroscopia FT IR como por pruebas de solubilidad, mostraron que el producto final de despolimerización es el ácido tereftálico, siendo este uno de los principales monómeros del PET.

V. AGRADECIMIENTOS

Los autores están profundamente agradecidos por la apertura de los laboratorios de la ESPOCH para poder realizar la investigación y análisis del presente trabajo.

V. REFERENCIAS

1. Aryan V, Maga D, Majgaonkar P, Hanich R. Valorisation of polylactic acid (PLA) waste: A comparative life cycle assessment of various solvent-based chemical recycling technologies. *Resour Conserv Recycl* [Internet]. 2021;172:105670. Available from: 10.1016/j.resconrec.2021.105670
2. Chaudhari US, Lin Y, Thompson VS, Handler RM, Pearce JM, Caneba G, et al. Systems Analysis Approach to Polyethylene Terephthalate and Olefin Plastics Supply Chains in the Circular Economy: A Review of Data Sets and Models. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering* [Internet]. 2021;9(22):7403–21. Available from: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c08622>
3. Davidson MG, Furlong RA, McManus MC. Developments in the life cycle assessment of chemical recycling of plastic waste – A review. *J Clean Prod* [Internet]. 2021;293:126163. Available from: 10.1016/j.jclepro.2021.126163
4. Steensgaard I, Syberg K, Rist S, Hartmann N, Boldrin A, Hansen SF. From macro- to microplastics - Analysis of EU regulation along the life cycle of plastic bags. *Environ Pollut* [Internet]. 2017 May 1 [cited 2021 Sep 6];224:289–99. Available from: 10.1016/j.envpol.2017.02.007
5. Xanthos D, Walker TR. International policies to reduce plastic marine pollution from single-use plastics (plastic bags and microbeads): A review. *Mar Pollut Bull* [Internet]. 2017 May 15 [cited 2021 Sep 6];118(1–2):17–26. Available from: 10.1016/j.marpolbul.2017.02.048
6. Frigione M. Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete. *Waste Manag* [Internet]. 2010;30(6):1101–6. Available from: 10.1016/j.wasman.2010.01.030
7. Langer E, Bortel K, Waskiewicz S, Lenartowicz-Klik M. Methods of PET Recycling [Internet]. Plasticizers Derived from Post-Consumer PET. 2020. 127–171 p. Available from: 10.1016/b978-0-323-46200-6.00005-2
8. Rezazadeh A, Thomsen K, Gavala HN, Skiadas I V., Fosbøl PL. Solubility and Freezing Points of Disodium Terephthalate in Water-Ethylene Glycol Mixtures. *J Chem Eng Data* [Internet]. 2021;66(5):2143–52. Available from: 10.1021/acs.jced.1c00052
9. Tessnow-von Wysocki I, Le Billon P. Plastics at sea: Treaty design for a global solution to marine plastic pollution. *Environ Sci Policy* [Internet]. 2019;100(February):94–104. Available from: 10.1016/j.envsci.2019.06.005
10. Chirayil C, Mishra R, Thomas S. Materials Recovery, Direct Reuse and Incineration of PET Bottles. In: Thomas S, Vasudeo Rane A, Kanny K, VK A, Thomas MG, editors. *Recycling of Polyethylene Terephthalate Bottles*. Andrew, Wil. Kalara: Elsevier Inc.; 2018. p. 37–60.
11. Kawai K, Tasaki T. Revisiting estimates of municipal solid waste generation per capita and their reliability. *J Mater Cycles Waste Manag* 2015 181 [Internet]. 2015 Feb 5 [cited 2021 Sep 6];18(1):1–13. Available from: 10.1007/s10163-015-0355-1
12. Sardon H, Dove AP. Plastics recycling with a difference. *Science* (80-) [Internet]. 2018;360(6387):380–1. Available from: 10.1126/science.aat4997



13. Chinchillas-Chinchillas MJ, Gaxiola A, Alvarado-Beltrán CG, Orozco-Carmona VM, Pellegrini-Cervantes MJ, Rodríguez-Rodríguez M, et al. A new application of recycled-PET/PAN composite nanofibers to cement-based materials. *J Clean Prod* [Internet]. 2020;252. Available from: 10.1016/j.jclepro.2019.119827
14. Ragaert K, Delva L, Van Geem K. Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Manag* [Internet]. 2017;69:24–58. Available from: 10.1016/j.wasman.2017.07.044
15. Li S, Cañete I, Järvinen M, Seemann M. Polyethylene terephthalate (PET) recycling via steam gasification – The effect of operating conditions on gas and tar composition. *Waste Manag* [Internet]. 2021;130:117–26. Available from: 10.1016/j.wasman.2021.05.023
16. Yoshioka T, Masaki Ota, Okuwaki A. Conversion of a Used Poly(ethylene terephthalate) Bottle into Oxalic Acid and Terephthalic Acid by Oxygen Oxidation in Alkaline Solutions at Elevated Temperatures. *Ind Eng Chem Res* [Internet]. 2003 Feb 19 [cited 2021 Sep 7];42(4):675–9. Available from: 10.1021/IE010563Z
17. Bhogle C, Pandit A. Ultrasound-Assisted Alkaline Hydrolysis of Waste Poly(Ethylene Terephthalate) in Aqueous and Non-aqueous Media at Low Temperature. *Indian Chem Eng* [Internet]. 2018;60(2):122–40. Available from: 10.1080/00194506.2017.1310634
18. Damayanti, Wu HS. Strategic possibility routes of recycled pet. *Polymers (Basel)* [Internet]. 2021;13(9):1–37. Available from: 10.3390/polym13091475
19. Ügdüler S, Van Geem KM, Denolf R, Roosen M, Mys N, Ragaert K, et al. Towards closed-loop recycling of multilayer and coloured PET plastic waste by alkaline hydrolysis. *Green Chem* [Internet]. 2020;22(16):5376–94. Available from: 10.1039/d0gc00894j
20. Canevarolo S V. Experiments in Polymer Science. *Polym Sci* [Internet]. 2019;281–336. Available from: 10.3139/9781569907269.010
21. Alaerts L, Augustinus M, Van Acker K. Impact of bio-based plastics on current recycling of plastics. *Sustain* [Internet]. 2018;10(5). Available from: 10.3390/su10051487
22. Kandasamy S, Subramaniyan A, Ramasamy G, Ahamed AR, Manickam N, Dhandapani B. Study of alkaline hydrolysis of post consumed polyethylene terephthalate waste. *AIP Conf Proc* [Internet]. 2020;2240(May). Available from: 10.1063/5.0011020
23. Căta A, Ștefănuț MN, Ienașcu IMC, Tănasie C, Miclău M. Alkaline Hydrolysis of Polyethylene Terephthalate Under Microwave Irradiation. *Rev Roum Chim* [Internet]. 2017;62(7):531–8.
24. Braun D. Simple Methods for the Identification of Plastics [Internet]. 5th ed. München: Hanser Publications; 2013. Available from: <https://doi.org/10.3139/9781569905425.fm>
25. Lamarque A, Zygadlo J, Labuckas D, López L, Torre M, Maestri D. Fundamentos Teórico-Prácticos de Química Orgánica [Internet]. 1st ed. Lamarque, A Maestri D, editor. Córdoba: Editorial Encuentro; 2008. 94 p.
26. Jung MR, Horgen FD, Orski S V., Rodriguez C. V, Beers KL, Balazs GH, et al. Validation of ATR FT-IR to identify polymers of plastic marine debris, including those ingested by marine organisms. *Mar Pollut Bull* [Internet]. 2018;127(December 2017):704–16. Available from: 10.1016/j.marpolbul.2017.12.061
27. Silva E, Fedel M, Deflorian F, Cotting F, Lins V. Properties of post-consumer polyethylene terephthalate coating mechanically deposited on mild steels. *Coatings* [Internet]. 2019;9(1). Available from: 10.3390/coatings9010028
28. Dos Santos A, Da Silva M, Lima É, Dos Santo P, Tommasini F. Processing and characterization of PET composites reinforced with geopolymers concrete waste. *Mater Res* [Internet]. 2017;20:411–20. Available from: 10.1590/1980-5373-MR-2017-0734
29. Gražėnaitė E. Inorganic green pigments : investigation of historical and synthesis of novel [Internet]. Vilna; 2018.
30. Chirayil T, Rediske J. Impact of pigments on the dimensional stability of plastics [Internet]. Annual Technical Conference - ANTEC, Conference Proceedings. 2016.
31. Zhao Z, Fan J, Xie M, Wang Z. Photo-catalytic reduction of carbon dioxide with in-situ synthesized CoPc/TiO₂ under visible light irradiation. *J Clean Prod* [Internet]. 2009;17(11):1025–9. Available

- from: 10.1016/j.jclepro.2009.02.016
32. Speight JG. Industrial Inorganic Chemistry [Internet]. Speight JG, editor. Environmental Inorganic Chemistry for Engineers. Butterworth-Heinemann; 2017. 111–169 p. Available from: 10.1016/b978-0-12-849891-0.00003-5
 33. Harris R. A Primer on Colorful Additives. In: Harris R, editor. Coloring Technology for Plastics [Internet]. 1st ed. Georgia; 1999. p. 1–12. Available from: 10.1016/b978-188420778-5.50002-4
 34. Yuyama K, Sugiyama T, Asahi T, Ryo S, Oh I, Masuhara H. Nanoparticle preparation of quinacridone and β -carotene using near-infrared laser ablation of their crystals. Appl Phys A Mater Sci Process [Internet]. 2010;101(4):591–6. Available from: 10.1007/s00339-010-5922-7
 35. Imura, Y Yamashita, y Senju, T Mizuguchi J. Crystal Structure of a Quinacridone Pigment-precursor and its Regeneration Process. Revista de la Sociedad de imágenes de Japón [Internet]. 2005 Apr;138–42. Available from: <https://doi.org/10.11370/isj.44.138>
 36. Gonz R, Guti I. A shrinking core model for the alkaline hydrolysis of PET assisted by tributylhexadecylphosphonium bromide. 2009;146:287–94.
 37. Dos Santos C, Gonçalves A, Cintra A, Da Silva L, Rossi A, Oliveira H, et al. Processo de reciclagem química de PET em meio alcalino: efeito da concentração do íon hidróxido, da cor do PET e do tempo de reação. Matéria (Rio Janeiro) [Internet]. 2018;23(4). Available from: 10.1590/s1517-707620180004.0566
 38. Lamboune R, Strivens T. Organic film formers. In: Woodhead Publishing, editor. Paint and Surface Coatings - Theory and Practice [Internet]. 2nd ed. 1999. p. 19–90. Available from: 10.1533/9781855737006.19
 39. Chrobok A, Matuszek K, Pankalla E, Grymel A, Latos P. Studies on the Solubility of Terephthalic Acid in Ionic Liquids. Mod Electrochem 1 [Internet]. 2019;601–767. Available from: 10.1007/0-306-46909-x_5
 40. Singh S, Sharma S, Umar A, Mehta SK, Bhatti MS, Kansal SK. Recycling of Waste Poly(ethylene terephthalate) Bottles by Alkaline Hydrolysis and Recovery of Pure Nanospindle-Shaped Terephthalic Acid. J Nanosci Nanotechnol [Internet]. 2018;18(8):5804–9. Available from: 10.1166/jnn.2018.15363