

Degradación del polietilentereftalato por medio de microorganismos

Polyethylene terephthalate degradation by microorganisms

Diana Bermúdez-Morera¹
Juan Sandoval-Herrera²

¹Fundación Universidad de América (Colombia). Correo electrónico: diana.bermudez@estudiantes.uamerica.edu.co
orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1093-2533>

²Fundación Universidad de América (Colombia). Correo electrónico: juan.sandoval@profesores.uamerica.edu.co
orcid: <https://orcid.org/0000-0001-8957-1421>

Recibido: 22-02-2021 Aceptado: 07-07-2021

Como citar: Bermúdez-Morera, Diana; Sandoval-Herrera, Juan (2021). Degradación del polietilentereftalato por medio de microorganismos. *Informador Técnico*, 85(2), 219 - 229.
<https://doi.org/10.23850/22565035.3592>

Resumen

La alta demanda de plásticos como el PET y el escaso conocimiento sobre la economía verde o el reciclaje ha incrementado los efectos adversos al medio ambiente por acumulación incontrolada de residuos plásticos que terminan en las fuentes hídricas. Dentro de las estrategias que se han estudiado para controlar este problema, la degradación mediante microorganismos ha dado óptimos resultados en eficiencia y economía. Mediante una revisión bibliográfica, se especifica el mecanismo (enzimas) para la degradación del PET, teniendo en cuenta las principales condiciones de cultivo y del microorganismo, el pretratamiento que se debe realizar al PET y los porcentajes de degradación alcanzados. También se presentan las aplicaciones industriales de los posibles subproductos para su aprovechamiento y disminución de la contaminación.

Palabras clave: contaminación; degradación; bacterias; hongos; microalgas; PET; desarrollo sustentable.

Abstract

The high demand for plastics such as PET and the scant knowledge about the green economy, or recycling, has increased the adverse effects on the environment due to the uncontrolled accumulation of plastic waste that ends up in water sources. Among the strategies studied to control this problem, degradation by microorganisms has given optimal results in efficiency and economy. We specify the mechanism (enzymes) for the degradation of PET by using a bibliographic review considering the main culture conditions and the microorganism, the pretreatment carried out on PET, and the degradation percentages achieved. We also present the industrial applications of the possible by-products for their use and reduction of pollution.

Keywords: contamination; degradation; bacteria; fungi; microalgae; PET; sustainable development.

1. Introducción

El PET es un polímero plástico que se obtiene a partir del etileno y el paraxileno, compuesto principalmente por etilenglicol y ácido tereftálico, aunque también se obtiene por otra vía, cuando este reacciona con dimetil tereftalato (Webb; Arnott; Crawford; Ivanova, 2013). Presenta gran transparencia y resistencia al desgaste, así como al ataque de productos químicos, rayos UV, humedad, entre otros factores (Ahmed *et al.*, 2018). Esta

gran resistencia hace que dure más de 700 años en degradarse; adicionalmente, se libera micro plásticos que quedan en el ambiente y pueden generar afectaciones en la salud, se ha convertido en un gran problema de contaminación ambiental.

Aunado a lo anterior, la acumulación de PET, así como de otros plásticos, se ha incrementado a lo largo de los años en todo el mundo (Ru; Huo; Yang, 2020). En el caso particular del PET, este se emplea como envase para muchos productos (Goel; Jayal; Negi; Saravanan; Zaidi, 2014; Wei; Zimmermann, 2017) que, luego de ser distribuidos y consumidos, terminan siendo desechados por el usuario final (Valderrama-Ocoró; Chavarro-Guzmán; Osorio-Gómez; Peña-Montoya, 2018). Según Papadopoulou, Hecht y Buller (2019), tan solo el 10 % del PET usado para empaques se recicla actualmente.

El problema no es solo la acumulación en vertederos, sino que terminan en fuentes de agua en las que sus consecuencias son la muerte de animales por ingestión, daños hormonales, problemas de crecimiento, diversos tipos de cáncer, etc. Al final terminan en el mar, y crean esas grandes “islas artificiales”, con consecuencias conocidas sobre los ecosistemas marinos (Ioakeimidis *et al.*, 2016; Kumar; Anjana; Hinduja; Sujitha; Dharani, 2020).

Para tratar de controlar este problema, se han buscado alternativas a los métodos tradicionales de tratamiento y/o valorización: incineración, reciclaje químico (Khoonkari; Haghighi; Sefidbakht; Shekoohi; Ghaderian, 2015) y mecánico, o inclusive disposición en rellenos sanitarios (Ru *et al.*, 2020). Se pretende que las nuevas estrategias no generen más subproductos contaminantes ni mayor huella de carbono, y que operen con menores tiempos y costos (Farzi; Dehnad; Fotouhi, 2019). A este respecto, cobra importancia la degradación que realizan microorganismos mediante enzimas que liberan, y que rompen los enlaces de los plásticos para usar los productos de degradación en su propio crecimiento (Wei; Zimmermann, 2017).

En general, estas enzimas se pueden dividir en dos grandes grupos: esterasas y lipasas. Bacterias como *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Candida* y *Burkholderia* son importantes fuentes de lipasas y esterasas, pero se prefieren hongos como *Trichoderma*, *Aspergillus*, *Fusarium*, *Alternaria* y *Penicillium*, por su adaptabilidad a condiciones extremas (Malafatti-Picca *et al.*, 2019). A medida que crecen las hifas de hongos, como *Aspergillus*, *Fusarium*, *Paecilomyces* y *Penicillium*, rompen la estructura polimérica, al tiempo que secretan enzimas hidrolíticas como esterasa, catalasa, cutinasa, entre otras (Hyde *et al.*, 2019). Algunas enzimas, provenientes, en su mayoría, de microorganismos termofílicos prefieren la superficie del PET de menor cristalinidad, debido a que presenta mayor movilidad en su cadena y facilita la degradación (Fecker *et al.*, 2018).

La cutinasa TfCut2 es, también, una enzima que rompe los enlaces ésteres del PET, y es liberada por la actinobacteria *Thermobifida fusca* (Furukawa; Kawakami; Tomizawa; Miyamoto, 2019). *Thermomonospora curvata* libera las esterasas Tcur127 y Tcur128 (Wei *et al.*, 2014). *Thermobifida halotolerans* libera la esterasa Thh_Est, capaz de hidrolizar PET, así como ácido poliláctico (Ribitsch *et al.*, 2012). *Ideonella sakaiensis* según, Palm *et al.* (2019), libera PETasa y MHETasa, donde la primera parece tener gran afinidad por el PET de alta cristalinidad a temperatura ambiente (Fecker *et al.*, 2018), mientras que la segunda es crucial porque degrada el producto intermedio MHET a TPA y etilenglicol. Papadopoulou *et al.* (2019) presenta un listado de algunas enzimas, con sus respectivos microorganismos productores, que se han usado para degradación del PET.

Para tener un panorama acerca de la degradación de plásticos, específicamente el PET, por medio de diversos microorganismos, se presentan en este trabajo los resultados de la revisión bibliográfica alrededor de estos aspectos: condiciones de desarrollo del cultivo, condiciones de degradación del plástico, métodos para determinar la degradación, y factores clave que se deben tener en cuenta para la implementación de esta tecnología.

2. Metodología

Para el desarrollo de la investigación, se realizó consulta bibliográfica de artículos y tesis en *Scopus*, *Science Direct* y *Springer Link*. Los términos de búsqueda iniciales fueron: “*Bioegradation of PET*”, “*PET*” y “*Biodegradation*”. Después se aplicaron filtros como: tipo de documento (“*document type*”): “artículo”; área temática o subdisciplina: ciencias medioambientales; ciencia de materiales e ingeniería química. Para organizar la información recolectada, se tuvieron en cuenta factores comunes de estudio por parte de los investigadores, como el pretratamiento del PET, las variables que manejaron para el desarrollo del microorganismo, y la implementación del proceso de degradación del PET.

3. Resultados

La búsqueda con “*Biodegradation*” and “*PET*” arrojó estos resultados: 4515 en *Science Direct*, 287 en *Springer Link* y 312 en *Scopus*. Luego de aplicar los filtros de artículo de acceso libre y disciplina Ingeniería química, se redujeron a 198, 54 y 62, respectivamente; no obstante, se revisaron sus resúmenes, y se identificaron los que tuvieran más relación con el tema. La búsqueda “*Biodegradation of PET*” generó menos resultados: 23 en *Science Direct*, 2 en *Springer Link* y 11 en *Scopus*. Al aplicar filtros, se redujo a 1 artículo en *Science Direct*, los mismos 2 de *Springer Link* y 3 en *Scopus*. A partir de las referencias de cada uno de ellos, se cruzó la información con la búsqueda inicial y se clasificó la documentación final.

3.1. Condiciones del cultivo

En la Tabla 1 se muestran las principales condiciones que han manejado varios autores para el desarrollo de los cultivos de diversos microorganismos usados para degradar PET. En algunas ocasiones, como en el trabajo de Sowmya, Krishnappa y Thippeswamy (2014), las muestras provenían de pantanos, y se separaban y preservaban en el laboratorio en condiciones de temperaturas bajas.

Tabla 1. Condiciones de cultivo para diversos microorganismos.

| Microorganismo | Medio de cultivo | Temperatura de incubación o de preservación (°C) | Tiempo (horas) | Referencia |
|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|----------------|------------------------------------|
| Trichoderma reesei, T. atroviride y T. vens (hongo) | 30 g de extracto de malta y 20 g de agar por litro de agua | 25-28 °C | No indica | Espino-Rammer <i>et al.</i> (2013) |
| Trichoderma harzianum (hongo) | 0,3 g de NH ₄ NO ₃ , 0,5 g de K ₂ HPO ₄ , 0,1 g de NaCl, 0,02 g de MgSO ₄ ·7H ₂ O, 2 g de agar, 0,5 g de polietileno, y 100 mL de agua destilada | 4 | No indica | Sowmya <i>et al.</i> (2014) |
| Pleurotus ostreatus (hongo) | TDA: extracto de trigo, dextrosa y agar | 4 | 3 meses | de Faria, Wisbeck y Pereira (2015) |

| Microorganismo | Medio de cultivo | Temperatura de incubación o de preservación (°C) | Tiempo (horas) | Referencia |
|---------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|----------------|--------------------------------------------------|
| Comamonas testosteroni (bacteria) | NH ₄ Cl, KH ₂ PO ₄ , Na ₂ HPO ₄ , NaCl, MgSO ₄ ·7H ₂ O | 37 | 48 | Gong <i>et al.</i> (2018) |
| Thermobifida fusca (bacteria) | Sacarosa, NaNO ₃ , K ₂ HPO ₄ , MgSO ₄ ·7H ₂ O, KCl, FeSO ₄ ·7H ₂ O, extracto de levadura y peptona. | 50 | 48 | Billig, Thorsten, Birkemeyer y Zimmermann (2010) |
| Phaeodactylum tricornutum (microalga) | f/2: sal marina, HCl, NaH ₂ PO ₄ , NH ₄ Cl y NaNO ₃ | | 24 | Moog <i>et al.</i> (2019) |
| Spirulina sp. (microalga) | NaCl, KCl, MgSO ₄ ·7H ₂ O, CaCl ₂ ·2H ₂ O, NaHCO ₃ , NaNO ₃ , NaH ₂ PO ₄ , Na ₂ EDTA, FeCl ₃ ·6H ₂ O, vitaminas B ₁ y B ₁₂ (Hadiyanto; Widayat; Kumoro, 2012) | 24-26 °C | 14 días | Khoironi, Anggoro y Sudarno (2019) |
| Chlorella vulgaris (microalga) | BG11: NaNO ₃ , K ₂ HPO ₄ ·3H ₂ O, MgSO ₄ ·7H ₂ O, CaCl ₂ ·2H ₂ O, entre otros | | 30 días | Falah <i>et al.</i> (2020) |

Fuente: elaboración propia.

El medio de cultivo debe contener ciertos nutrientes para que el microorganismo pueda multiplicarse; por ejemplo, nitrógeno, fósforo y carbono. Sin embargo, algunos autores suprimieron la fuente de carbono para estimular la degradación del PET (Sowmya *et al.*, 2014; Moog *et al.*, 2019). La temperatura es fundamental para el crecimiento de los microorganismos, y se observa que el valor más usado está alrededor de 37 °C. La mayoría de los microorganismos, al ser mesófilos, suelen tener una mejor adaptación al medio en temperaturas que se encuentren entre 25 y 35 °C; no obstante, tienen la capacidad de adaptarse a máximas temperaturas según el lugar en el que se sitúen (Vieira; Nahas, 2005). Para la microalga *Phaeodactylum tricornutum* (Moog *et al.*, 2019) así como para *Chlorella vulgaris* (Falah *et al.*, 2020), el medio de cultivo y las condiciones requeridas por las bacterias y los hongos son diferentes, requiriendo sales y vitaminas, además de mayor tiempo de incubación. Otros factores fundamentales para el proceso de degradación son temperatura, humedad y pH. Este último, afecta el crecimiento del microorganismo y, por ende, afecta directamente la degradación. A mayor grado de humedad, mayor será la actividad hidrolítica del microorganismo (Iram; Riaz; Iqbal, 2019).

3.2. Mecanismo de la degradación

Según Nisticò (2020), la biodegradación de los plásticos requiere de una aproximación inicial del microorganismo a la superficie del polímero, luego la secreción interna o externa de enzimas (agentes de biodegradación) y de

polisacáridos (agentes de adhesión); después, la despolimerización enzimática hasta obtener oligómeros; y, finalmente, la mineralización de los oligómeros hasta formar biomasa, CO₂, H₂O y CH₄, aunque esto varía según la composición del polímero. Para Lee y Liew (2020), una segunda etapa después de la aproximación inicial consiste en la formación de una biocapa del microorganismo en la superficie del polímero. En la Figura 1 se observa el mecanismo general de reacción de las enzimas que produce *I. sakaiensis* para degradar el PET.

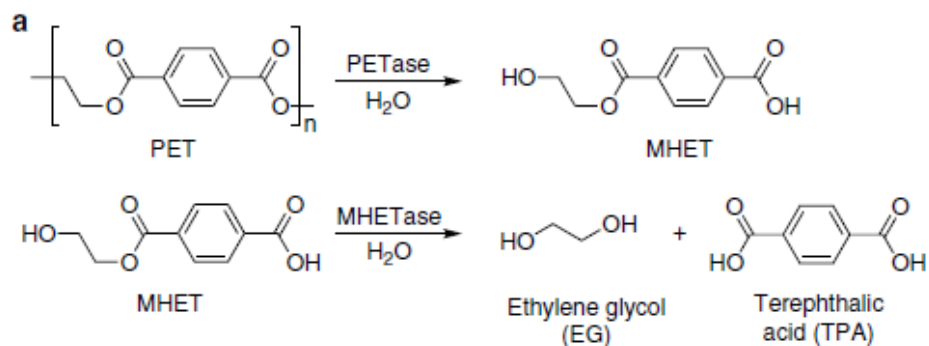


Figura 1. Degradación del PET a Etilenglicol y ácido tereftálico.

Fuente: Palm et al. (2019).

En primera instancia, se hidroliza la cadena del polímero, formando ácido carboxílico e hidroxilos, logrando aumentar la interacción entre la enzima y la superficie, debido a que las moléculas de agua disminuyen la fuerza entre los enlaces de hidrógeno, a permitiendo que las cadenas de polímeros sean más flexibles, donde las enzimas encuentran mayor accesibilidad (Kawai; Kawabata; Oda, 2019).

3.3. Pretratamiento del PET

El tratamiento general del PET consiste en lavar con agua destilada o etanol, secar un tiempo mínimo de 24 horas, y finalmente cortar, triturar o moler, dependiendo de los autores (Khoironi; Anggoro; Sudarno, 2019; Falah et al., 2020). Sin embargo, según Wilkes y Aristilde (2017), el pretratamiento del PET favorece la degradación. Dentro de esos métodos de pretratamiento se tienen, principalmente, radiación ultravioleta (Roberts *et al.*, 2020), oxidación térmica y fotoxidación. Lo que se busca con estos métodos es alterar la naturaleza de los polímeros en cuanto a presencia de grupos funcionales, rompimiento en cadenas más cortas, disminuyendo la cristalinidad, entre otros, para facilitar el ataque enzimático (Ahmed *et al.*, 2018). Al tener partículas de menor diámetro, se genera mayor susceptibilidad para que ocurra el proceso de hidrólisis enzimática y aumente la degradación (Wei; Zimmermann, 2017).

3.4. Evaluación de la degradación

Se han utilizado diversos métodos para determinar la degradación del PET: turbidez (Wei *et al.*, 2014), calorimetría diferencial de barrido (Goel *et al.*, 2014; de Castro; Carniel; Nicomedes Junior; da Conceição Gomes; Valoni, 2017) y densidad óptica. Otro análisis de gran uso es la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), que permite determinar el cambio de la estructura mediante estrechamiento de la banda identificadora del grupo carbonilo, lo que demuestra un ataque químico o biocatalítico (Donelli; Freddi; Nierstrasz; Taddei, 2010; Sowmya *et al.*, 2014). También se ha verificado el cambio de la superficie del PET mediante microscopía espacial de barrido (SEM), por ejemplo, en Sowmya *et al.* (2014), Goel *et al.* (2014), o Falah *et al.* (2020). Según Sowmya *et al.* (2014), a medida que aumenta el porcentaje de degradación, los cambios superficiales son mucho más notorios, en forma de fisuras, descamación y corrugaciones, principalmente.

Para evaluar cuantitativamente la degradación, se usa la Ecuación (1) para determinar el porcentaje de pérdida de peso del PET:

$$Pp (\%) = \frac{P_i - P_f}{P_i} * 100 \quad (1)$$

Donde:

Pp: Pérdida de peso en porcentaje (%).

Pi: Peso inicial de la muestra de PET (mg).

Pf: Peso final de la muestra de PET (mg).

En la Tabla 2 se presentan algunos resultados representativos de porcentajes de degradación.

Tabla 2. Valores representativos de biodegradación de plásticos.

| Enzima | Microorganismo | Pérdida de peso | Condiciones de reacción | Referencia |
|--------------|---------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| Lacasa | <i>Trichoderma harzianum</i> | 40 % | No indica T; t: 90 d; discos de bolsas de polietileno de 1 cm de diámetro con y sin pretratamiento. Mejor resultado con tratamiento UV | Sowmya <i>et al.</i> (2014) |
| NR | <i>Pleurotus Flórida</i> | | T: 20°C, t: 120 d; películas de 4 cm ² de PET virgen | Koschevic (2015) |
| TfH BTA-2 | <i>Thermobifida fusca</i> DSM43793 | | T: 55 -65 °C; t: 48 h; películas de PET amorfo | Then <i>et al.</i> (2015) |
| Tfu_0882 | <i>Thermobifida fusca</i> YX | | T: 55-65 °C; t: 48 h; | Then <i>et al.</i> (2015) |
| TfCut1 | <i>Thermobifida fusca</i> KW3 | | T: 55-65 °C; t: 48 h; | Then <i>et al.</i> (2015) |
| TfCut2 | <i>Thermobifida fusca</i> YX | | T: 65-80 °C; t: 48 h; | Then <i>et al.</i> (2015) |
| Petasa | <i>Ideonella sakaiensis</i> | 0,13 mg cm ⁻² d ⁻¹ | T: 30 °C; 42 d | Yoshida <i>et al.</i> (2016) |
| Cutinasa | <i>Thermobifida fusca</i> | | T: 40-70 °C | Furukawa <i>et al.</i> (2019) |
| NR | <i>Streptomyces</i> | | T: 28°C; t: 18 días; partículas de 212 mm | Farzi <i>et al.</i> (2019) |
| PETasa | <i>Ideonella sakaiensis</i> | NR | T: 30 °C; t: 36 h; películas de PET amorfo | Wang <i>et al.</i> (2020) |

Fuente: elaboración propia.

3.5. Perspectivas de aplicación industrial

Dentro de las ventajas que tiene la biodegradación del PET, se cuenta que es una tecnología ecoamigable, tiene bajo costo, y los pocos subproductos que genera (Grigore, 2017) pueden utilizarse para varias aplicaciones. Mediante la degradación biológica también se disminuyen los contaminantes que se generan en procesos de

degradación química, especialmente debido al pH neutro que se debe manejar en el mismo (Carr; Clarke; Dobson, 2020). Pero una de sus desventajas principales es el alto tiempo que se debe invertir para lograr el mismo porcentaje de degradación que con tecnologías químicas y térmicas (Samak *et al.*, 2020). Las alternativas al proceso tradicional de degradación del PET, que emplea microorganismos completos y puros desde su cultivo, consisten en la utilización de consorcios de microorganismos (Goel *et al.*, 2014; Roberts *et al.*, 2020) y la acción directa de enzimas, como, por ejemplo, en de Castro *et al.* (2017), donde se reportó que entre 16 enzimas, obtenidas de diferentes microorganismos, la que mejores resultados presentó fue la cutinasa de la *Humicola insolens*; la modificación genética, alteración molecular o clonación de genes de enzimas (Ma *et al.*, 2018; Wei *et al.*, 2019; Al-Kanany; Rasha, 2020; Yan, Wei; Cui; Bornscheuer; Liu, 2020); el uso de plantas en consorcio con microorganismos como bacterias y hongos, como es el caso del trabajo de Janczak, Hryniewicz, Znajewska y Dąbrowska (2018); o la aplicación de métodos de cribado, basados en placa agar, como lo plantean Molitor *et al.* (2010) para *Pseudomonas*. Dentro de los resultados recientes más destacados está el trabajo de Turner *et al.* (2020), quienes reportan haber alcanzado 90 % de degradación del PET en 10 horas con enzimas hidrolasas mejoradas genéticamente. Un reto a futuro es encontrar más microorganismos y enzimas que sean capaces de degradar el PET a temperaturas más altas (Hiraga; Taniguchi; Yoshida; Kimura; Oda, 2019).

4. Conclusiones

La biodegradación del PET es una alternativa eficiente y ecoamigable para la gestión responsable de residuos de envases. Los factores de mayor importancia a la hora de alcanzar mejores eficiencias son, el establecimiento de las condiciones adecuadas para el cultivo y desarrollo del microorganismo, y un pretratamiento que incluya mínimamente lavado y disminución de tamaño de la partícula. Además, en el proceso de degradación, la concentración inicial del microorganismo debe ser alta, y la temperatura óptima para su metabolismo. No obstante, la ingeniería genética aporta en este sentido, mediante el desarrollo de cepas mejoradas, la expresión de genes a través de enzimas de otros microorganismos, o el uso de consorcios de microorganismos para alcanzar mejores resultados en menos tiempo.

Es importante que los microorganismos se inoculen en medios de cultivo que permitan lograr el crecimiento óptimo o se realice la adaptación prolongada a nuevos sustratos para evitar muerte microbiana. El tiempo de incubación de los hongos es mayor al de las bacterias, debido a que los hongos, al ser eucariotas pluricelulares tienen un sistema complejo con mayor cantidad de organelos, en comparación con los microorganismos procariontes (bacterias), más sencillos. Este factor se ve ligado a la biodegradación, donde se debe tener en cuenta que, a mayor concentración de microorganismos, mayor será la biodegradación.

Referencias

- Ahmed, Temoor; Shahid, Muhammad; Azeem, Farrukh; Rasul, Ijaz; Shah, Asad Ali; Noman, Muhammad; ... Sher, Muhammad (2018). Biodegradation of plastics: current scenario and future prospects for environmental safety. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(8), 7287-7298.
<https://doi.org/10.1007/s11356-018-1234-9>
- Al-Kanany, Fadhil; Othman, Rasha (2020). Cloning and Expression of *Pseudomonas aeruginosa* AlkB Gene in *E. coli*. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, 14(1), 389-396.
<https://doi.org/10.22207/JPAM.14.1.40>
- Billig, Susan; Thorsten, Oeser; Birkemeyer, Claudia; Zimmermann, Wolfgang (2010). Hydrolysis of cyclic poly (ethylene terephthalate) trimers by a carboxylesterase from *Thermobifida fusca* KW₃. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 87(5), 1753-1764.
<https://doi.org/10.1007/s00253-010-2635-y>

- Carr, Clodagh; Clarke, David; Dobson, Alan (2020). Microbial Polyethylene Terephthalate Hydrolases: Current and Future Perspectives. *Frontiers in Microbiology*, 11, 571265.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.571265>
- de Castro, Aline; Carniel, Adriano; Nicomedes, José; da Conceição-Gomes, Absai; Valoni, Érika (2017). Screening of commercial enzymes for poly (ethylene terephthalate) (PET) hydrolysis and synergy studies on different substrate sources. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 44(6), 835-844.
<https://doi.org/10.1007/s10295-017-1942-z>
- de Faria, Paulo; Wisbeck, Elisabeth; Pereira, Luciana (2015). Biodegradação de polipropileno reciclado (ppr) e de poli (tereftalato de etileno) reciclado (petr) por *Pleurotus ostreatus*. *Matéria*, 20(2), 452-459.
<https://doi.org/10.1590/S1517-707620150002.0045>
- Donelli, Ilaria; Freddi, Giuliano; Nierstrasz, Vincent; Taddei, Paola (2010). Surface structure and properties of poly-(ethylene terephthalate) hydrolyzed by alkali and cutinase. *Polymer Degradation and Stability*, 95(9), 1542-1550.
<https://doi.org/10.1016/j.polyimdegradstab.2010.06.011>
- Espino-Rammer, Liliana; Ribitsch, Doris; Przulucka, Agnieszka; Marold, Annemarie; Greimel, Katrin; Herrero-Acero, Enrique; ... Druzhinina, Irina (2013). Two novel class II hydrophobins from *Trichoderma* spp. stimulate enzymatic hydrolysis of poly (ethylene terephthalate) when expressed as fusion proteins. *Applied and Environmental Microbiology*, 79(14), 4230.
<https://doi.org/10.1128/AEM.01132-13>
- Falah, Wajeeha; Chen, Fu-Jia; Zeb, Bibi; Hayat, Tahir; Mahmood, Qaisar; Ebadi, Abdolghaffar; ... Li, En-Zhong (2020). Polyethylene Terephthalate Degradation by Microalga *Chlorella vulgaris* Along with Pretreatment. *Materiale Plastice*, 57(3), 260-270.
<https://doi.org/10.37358/MP.20.3.5398>
- Farzi, Ali; Dehnad, Alireza; Fotouhi, Afsaneh (2019). Biodegradation of polyethylene terephthalate waste using *Streptomyces* species and kinetic modeling of the process. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 17, 25-31.
<https://doi.org/10.1016/j.bcab.2018.11.002>
- Fecker, Tobias; Galaz-Davison, Pablo; Engelberger, Felipe; Narui, Yoshie; Sotomayor, Marcos; Parra, Loreto; Ramírez-Sarmiento, César (2018). Active site flexibility as a hallmark for efficient PET degradation by *I. sakaiensis* PETase. *Biophysical Journal*, 114(6), 1302-1312.
<https://doi.org/10.1016/j.bpj.2018.02.005>
- Furukawa, Makoto; Kawakami, Norifumi; Tomizawa, Atsushi; Miyamoto, Kenji (2019). Efficient degradation of poly (ethylene terephthalate) with *Thermobifida fusca* cutinase exhibiting improved catalytic activity generated using mutagenesis and additive-based approaches. *Scientific Reports*, 9(1), 1-9.
<https://doi.org/10.1038/s41598-019-52379-z>
- Goel, Reeta; Jayal, Priyanka; Negi, Harshita; Saravanan, P. R.; Zaidi, M. G. H. (2014). Comparative in situ PET biodegradation assay using indigenously developed consortia. *International Journal of Environment and Waste Management*, 13(4), 348-361.
<https://doi.org/10.1504/IJEWM.2014.060441>
- Gong, Jixian; Kong, Tongtong; Li, Yuqiang; Li, Qiujin; Li, Zheng; Zhang, Jianfei (2018). Biodegradation of microplastic derived from poly (ethylene terephthalate) with bacterial whole-cell biocatalysts. *Polymers*, 10(12), 1326.
<https://doi.org/10.3390/polym10121326>

- Grigore, Madalina (2017). Methods of recycling, properties and applications of recycled thermoplastic polymers. *Recycling*, 2(4), 24.
<https://doi.org/10.3390/recycling2040024>
- Hadiyanto, Hadiyanto; Widayat, Widayat; Kumoro, Andri Cahyo (2012). Potency of microalgae as biodiesel source in Indonesia. *International Journal of Renewable Energy Development*, 1(1), 23-27.
<https://doi.org/10.14710/ijred.1.1.23-27>
- Hiraga, Kazumi; Taniguchi, Ikuo; Yoshida, Shousuke; Kimura, Yoshiharu; Oda, Kohei (2019). Biodegradation of waste PET: A sustainable solution for dealing with plastic pollution. *EMBO Reports*, 20(11), e49365.
<https://doi.org/10.15252/embr.201949365>
- Hyde, Kevin; Xu, Jianchu; Rapior, Sylvie; Jeewon, Rajesh; Lumyong, Saisamorn; Niego, Allen Grace; ... Stadler, Marc (2019). The amazing potential of fungi: 50 ways we can exploit fungi industrially. *Fungal Diversity*, 97, 1-136.
<https://doi.org/10.1007/s13225-019-00430-9>
- Ioakeimidis, Christos; Fotopoulou, Kalliopi; Karapanagioti, Hrisi; Geraga, Maria; Zeri, Christina; Papatheodorou, Enangelos; ... Papatheodorou, George (2016). The degradation potential of PET bottles in the marine environment: An ATR-FTIR based approach. *Scientific Reports*, 6(1), 1-8.
<https://doi.org/10.1038/srep23501>
- Iram, Darakhsanda; Riaz, Rafi; Iqbal, Rana (2019) Usage of Potential Micro-organisms for Degradation of Plastics. *Open Journal of Environmental Biology*, 4(1), 7-15.
<https://doi.org/10.17352/ojeb.000010>
- Janczak, Katarzyna; Hryniewicz, Katarzyna; Znajewska, Zuzanna; Dąbrowska, Grazyna (2018). Use of rhizosphere microorganisms in the biodegradation of PLA and PET polymers in compost soil. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 130, 65-75.
<https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2018.03.017>
- Kawai, Fusako; Kawabata, Takeshi; Oda, Masayuki (2019). Current knowledge on enzymatic PET degradation and its possible application to waste stream management and other fields. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 103, 4253-4268.
<https://doi.org/10.1007/s00253-019-09717-y>
- Khoironi, Adian; Anggoro, Sutrisno; Sudarno, Sudarno (2019). Evaluation of the interaction among microalgae *Spirulina* sp, plastics polyethylene terephthalate and polypropylene in freshwater environment. *Journal of Ecological Engineering*, 20(6), 161-173.
<https://doi.org/10.12911/22998993/108637>
- Khoonkari, Mohammad; Haghghi, Amir; Sefidbakht, Yahya; Shekoohi, Khadijeh; Ghaderian, Abolfazl (2015). Chemical recycling of PET wastes with different catalysts. *International Journal of Polymer Science*, 2015.
<https://doi.org/10.1155/2015/124524>
- Koschevic, Marivane (2015). *Biodegradation of PET (polyethylene terephthalate) by ligninolytic fungi* (tesis de pregrado). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Panamá.
- Kumar, Ganesh; Anjana, K.; Hinduja, M.; Sujitha, K; Dharani, G. (2020). Review on plastic wastes in marine environment–Biodegradation and biotechnological solutions. *Marine Pollution Bulletin*, 150, 110733.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110733>
- Lee, Alicia; Liew, Mei (2020). Ecologically derived waste management of conventional plastics. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 22, 1-10.
<https://doi.org/10.1007/s10163-019-00931-4>

- Ma, Yuan; Yao, Mingdong; Li, Bingzhi; Ding, Mingzhu; He, Bo; Chen, Si; ... Yuan, Yingjin (2018). Enhanced poly (ethylene terephthalate) hydrolase activity by protein engineering. *Engineering*, 4(6), 888-893.
<https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.09.007>
- Malafatti-Picca, Lusiane; de Barros-Chaves, Michel-Ricardo; de Castro, Aline; Valoni, Érika; de Oliveira, Valéria-Maia; Marsaioli, Anita-Jocelyne; ... Attili-Angelis, Derlene (2019). Hydrocarbon-associated substrates reveal promising fungi for poly (ethylene terephthalate) (PET) depolymerization. *Brazilian Journal of Microbiology*, 50(3), 633-648.
<https://doi.org/10.1007/s42770-019-00093-3>
- Molitor, Rebecka; Bollinger, Alexander; Kubicki, Sonja; Loeschcke, Anita; Jaeger, Karl-Erick; Thies, Stephan (2020). Agar plate-based screening methods for the identification of polyester hydrolysis by *Pseudomonas* species. *Microbial Biotechnology*, 13(1), 274-284.
<https://doi.org/10.1111/1751-7915.13418>
- Moog, Daniel; Schmitt, Johanna; Senger, Jana; Zarzycki, Jan; Rexer, Karl-Heinz; Linne, Uwe; ... Maier, Uwe (2019). Using a marine microalga as a chassis for polyethylene terephthalate (PET) degradation. *Microbial Cell Factories*, 18(1), 171.
<https://doi.org/10.1186/s12934-019-1220-z>
- Nisticò, Roberto (2020). Polyethylene terephthalate (PET) in the packaging industry. *Polymer Testing*, 90, 106707.
<https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106707>
- Palm, Gottfried; Reisky, Lukas; Böttcher, Dominique; Müller, Henrik; Michels, Emile; Walczak, Miriam; ... Weber, Gert (2019). Structure of the plastic-degrading *Ideonella sakaiensis* MHETase bound to a substrate. *Nature Communications*, 10(1), 1-10.
<https://doi.org/10.1038/s41467-019-09326-3>
- Papadopoulou, Athena; Hecht, Katrin; Buller, Rebecca (2019). Enzymatic PET degradation. *Chimia International Journal for Chemistry*, 73(9), 743-749.
<https://doi.org/10.2533/chimia.2019.743>
- Ribitsch, Doris; Herrero-Acero, Enrique; Greimel, Katrin; Dellacher, Anita; Zitzenbacher, Sabine; Marold, Annemarie; ... Guebitz, Georg (2012). A new esterase from *Thermobifida halotolerans* hydrolyses polyethylene terephthalate (PET) and polylactic acid (PLA). *Polymers*, 4(1), 617-629.
<https://doi.org/10.3390/polym4010617>
- Roberts, Cameron; Edwards, Sabrina; Vague, Morgan; León-Zayas, Rosa; Scheffer, Henry; Chan, Gayle; ... Mellies, Jay (2020). Environmental Consortium Containing *Pseudomonas* and *Bacillus* Species Synergistically Degrades Polyethylene Terephthalate Plastic. *Mosphere*, 5(6), e01151-20.
<https://doi.org/10.1128/mSphere.01151-20>
- Ru, Jiakang; Huo, Yixin; Yang, Yu (2020). Microbial degradation and valorization of plastic wastes. *Frontiers in Microbiology*, 11, 442.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00442>
- Samak, Nadia; Jia, Yunpu; Sharshar, Moustafa; Mu, Tingzhen; Yang, Maohua; Peh, Sumit; Xing, Jianmin (2020). Recent advances in biocatalysts engineering for polyethylene terephthalate plastic waste green recycling. *Environment International*, 145, 106144.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106144>
- Sowmya, H. V.; Krishnappa, Ramalingappa; Thippeswamy, B. (2014). Degradation of polyethylene by *Trichoderma harzianum*—SEM, FTIR, and NMR analyses. *Environmental Monitoring and Assessment*, 186(10), 6577-6586.
<https://doi.org/10.1007/s10661-014-3875-6>

- Then, Johannes; Wei, Ren; Oeser, Thorsten; Barth, Markus; Belisário-Ferrari, Matheus; Schmidt, Juliane; Zimmermann, Wolfgang (2015). Ca²⁺ and Mg²⁺ binding site engineering increases the degradation of polyethylene terephthalate films by polyester hydrolases from *Thermobifida fusca*. *Biotechnology Journal*, 10(4), 592-598.
<https://doi.org/10.1002/biot.201400620>
- Tournier, V.; Topham, C. M.; Gilles, A.; David, B.; Folgoas, C.; Moya-Leclair, E.; ... Marty, A. (2020). An engineered PET depolymerase to break down and recycle plastic bottles. *Nature*, 580(7802), 216-219.
<https://doi.org/10.1038/s41586-020-2149-4>
- Valderrama-Ocoró, María; Chavarro-Guzmán, Luz; Osorio-Gómez, Juan; Peña-Montoya, Claudia (2018). Estudio dinámico del reciclaje de envases pet en el Valle del Cauca. *Revista Lasallista de Investigación*, 15(1). <https://doi.org/10.22507/rli.v15n1a6>
- Vieira, Francisco; Nahas, Ely (2005). Comparison of microbial numbers in soils by using various culture media and temperatures. *Microbiological Research*, 160(2), 197-202.
<https://doi.org/10.1016/j.micres.2005.01.004>
- Wang, Nan; Guan, Feifei; Lv, Xiang; Han, Dongfei; Zhang, Yuhong; Wu, Ningfeng; ... Tian, Jian (2020). Enhancing secretion of polyethylene terephthalate hydrolase PETase in *Bacillus subtilis* WB600 mediated by the SP_{amy} signal peptide. *Letters in Applied Microbiology*, 71(3), 235-241.
<https://doi.org/10.1111/lam.13312>
- Webb, Hayden; Arnott, Jaimys; Crawford, Russell; Ivanova, Elena (2013). Plastic degradation and its environmental implications with special reference to poly (ethylene terephthalate). *Polymers*, 5(1), 1-18.
<https://doi.org/10.3390/polym5010001>
- Wei, Ren; Breite, Daniel; Song, Chen; Gräsing, Daniel; Ploss, Tina; Hille, Patrick; ... Zimmermann, Wolfgang (2019). Biocatalytic degradation efficiency of postconsumer polyethylene terephthalate packaging determined by their polymer microstructures. *Advanced Science*, 6(14).
<https://doi.org/10.1002/advs.201900491>
- Wei, Ren; Oeser, Thorsten; Then, Johannes; Kühn, Nancy; Barth, Markus; Schmidt, Juliane; Zimmermann, Wolfgang (2014). Functional characterization and structural modeling of synthetic polyester-degrading hydrolases from *Thermomonospora curvata*. *AMB Express*, 4(1), 44.
<https://doi.org/10.1186/s13568-014-0044-9>
- Wei, Ren; Zimmermann, Wolfgang (2017). Biocatalysis as a green route for recycling the recalcitrant plastic polyethylene terephthalate. *Microbial Biotechnology*, 10(6), 1302-1307.
<https://doi.org/10.1111/1751-7915.12714>
- Wilkes, Rebecca-Ann; Aristilde, Ludmilla (2017). Degradation and metabolism of synthetic plastics and associated products by *Pseudomonas* sp.: capabilities and challenges. *Journal of Applied Microbiology*, 123(3), 582-593.
<https://doi.org/10.1111/jam.13472>
- Yan, Fei; Wei, Ren; Cui, Qiu; Bornscheuer, Uwe; Liu, Ya-Jun (2020). Thermophilic whole-cell degradation of polyethylene terephthalate using engineered *Clostridium thermocellum*. *Microbial Biotechnology*, 14(2), 374-385.
<https://doi.org/10.1111/1751-7915.13580>
- Yoshida, Shosuke; Hiraga, Kazumi; Takehana, Toshihiko; Taniguchi, Ikuo; Yamaji, Hironao; Maeda, Yasuhito; ... Oda, Kohei (2016). A bacterium that degrades and assimilates poly (ethylene terephthalate). *Science*, 351(6278), 1196-1199.
<https://doi.org/10.1126/science.aad6359>