POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

Cinética de la degradación de hidrocarburos mediante biopilas a escala de banco

Original
Cinética de la degradación de hidrocarburos mediante biopilas a escala de banco / Gutiérrez-Benítez, O., Castro-Rodríguez, D.J., Viera-Ribot, O.M., Casals-Pérez, E., Rabassa-Rabassa, D.. - In: TECNOLOGÍA QUÍMICA. - ISSN 2224-6185. - ELETTRONICO. - 42:2(2021), pp. 349-369.

Availability:
This version is available at: 11583/2899492 since: 2021-05-11T16:26:08Z

Publisher:
Facultad de Ingeniería Química y Agronomía (FIQA) y Ediciones UO de la Universidad de Oriente. Cuba,

Published
DOI:

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

10 October 2026

Vol. 41, no.2, mayo-agosto, 2021

Cinética de la degradación de hidrocarburos mediante biopilas a escala de banco

Kinetic of hydrocarbon degradation by biopile at a bench-scale

Omar Gutiérrez-Benítez[1]* https://orcid.org/0000-0002-3644-6245
David Javier Castro-Rodríguez[2] https://orcid.o rg/0000-0002-7609-3229
Orlando Manuel Viera-Ribot[1] https://orcid.org/0000-0003-4867-3020
Enmanuel Casals-Pérez[1] https://orcid.org/0000-0003-2385-8846
Dayana Rabassa-Rabassa[1] https://orcid.org/0000-0003-3392-6486

[1]Departamento de Gestión e Ingeniería Ambiental. Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos, Cuba.
[2]Politecnico di Torino (POLITO). Dipartimento Scienza Applicata e Tecnologia (DISAT). Centro Studi su Sicurezza, Affidabilità e Rischi (SAFER). Dottorando.

*Autor para la correspondencia. correo electrónico: omar@gestion.ceac.cu

RESUMEN

La biorremediación de hidrocarburos está condicionada por factores físicos, químicos, microbiológicos y medioambientales. El objetivo fue evaluar el comportamiento de la cinética de la degradación de hidrocarburos, mediante la ecotecnología de biopilas utilizando diferentes texturizantes, a escala de banco. Se implementó un protocolo experimental para evaluar seis tratamientos, utilizando bagazo de caña integral, cachaza, serrín, pulpa de café, estiércol

vacuno y residuos de *Thalassia testudinum*, durante el tiempo 0, 60, 90, 150 y 240 días. Los datos experimentales fueron ajustados a los modelos matemáticos para las reacciones de orden cero, primer orden y segundo orden. Se determinó estadísticamente el modelo de mejor ajuste y el orden de la reacción. Se obtuvieron la constante de velocidad de reacción y el tiempo de vida medio. Se elaboró un libro de cálculo de Microsoft Office Excel para los cálculos y gráficos correspondientes. Se obtuvieron altas eficiencias de remoción de hidrocarburos (GyA e HTP) para todos los texturizantes. El estiércol vacuno fue el tratamiento con mayor porcentaje, del orden de 66,08 % y 59,12 % respectivamente. La cinética de la degradación de hidrocarburos tuvo un mejor ajuste al modelo de segundo orden, explicado a partir de la naturaleza compleja del residual petrolizado investigado, y por la ocurrencia de los complejos mecanismos bioquímicos de la biorremediación de los hidrocarburos en la ecotecnología de biopilas. La investigación aportó criterios técnicos para la selección del texturizante a utilizar en la optimización y escalado de la ecotecnología.
Palabras clave: residuo petrolizado; biorremediación; biopila; cinética; degradación de hidrocarburos.

ABSTRACT

Hydrocarbon bioremediation is conditioned by physical, chemical, microbiological and environmental factors. The objective was to assess the performance of the kinetics of hydrocarbon degradation by biopile ecotechnology using different texturizers, at bench scale. An experimental protocol was implemented to evaluate six treatments, using sugarcane bagasse, sugarcane filter cake, sawdust, coffee pulp, cow dung and *Thalassia testudinum* residues, for 0, 60, 90, 150 and 240 days. The experimental data were fitted to mathematical models for zero-order, first-order and second-order reactions. The best-fit model and the order of the reaction were statistically determined. The reaction rate constant and half-life were obtained. A Microsoft Office Excel workbook was prepared for the corresponding calculations and graphs. High hydrocarbon removal efficiencies (G&A and TPH)

were obtained for all texturizers. Cow dung was the treatment with the highest percentage, of the order of 66.08 % and 59.12 % respectively. The kinetics of hydrocarbon degradation had a better fit to the second order model, explained by the complex nature of the petroleum waste investigated, and by the occurrence of the complex biochemical mechanisms of hydrocarbon bioremediation in the biopile ecotechnology. The research provided technical criteria for the selection of the texturizer to be used in the optimization and scale-up of the ecotechnology.
Keywords: petroleum waste; bioremediation; biopile; kinetic; hydrocarbon degradation.

Recibido: 18/09/2020
Aceptado: 10/01/2021

Introducción

Las actividades de extracción, refinación, distribución y uso de hidrocarburos generan peligros de derrames y pasivos ambientales contaminados. Estos pueden provocar una amplia variedad de impactos en el medio ambiente y en la salud.[1-2] El componente más costoso y que requiere más tiempo de una respuesta de manejo efectiva suele ser el tratamiento de los residuos. [3,4]

La biorremediación es un método de tratamiento recomendado.[5,6] La biopila es una tecnología de bioestimulación *ex situ*, pertinente para la biorremediación de residuos petrolizados y suelos contaminados con hidrocarburos.[7,8,9] En Cuba el Centro de Investigaciones del Petróleo desarrolló un proyecto de biorremediación como alternativa al saneamiento ambiental en la industria petrolera. Se diseñó y habilitó un área de biorremediación en una empresa comercializadora de combustibles.[10]

El Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos junto al Instituto de Ciencias del Mar y el Instituto de Investigaciones Suelos ejecutan el proyecto de investigación-

desarrollo “Evaluación de la ecotecnología de biopilas para la biorremediación de residuos petrolizados utilizando texturizantes locales”, en lo adelante proyecto Biopilas.

Se reconoce que la degradación de hidrocarburos está condicionada por factores físicos, químicos, microbiológicos y medioambientales. Esto hace que la cinética de la degradación sea muy compleja.[11,12,13]

El objetivo fue evaluar el comportamiento de la cinética de la degradación de hidrocarburos en la ecotecnología de biopilas utilizando diferentes texturizantes, a escala de banco.

Materiales y métodos

En la figura 1 se muestra el procedimiento utilizado en el protocolo experimental del proyecto Biopilas.[14] Entre sus etapas se incluyen la evaluación de la degradación de hidrocarburos y la evaluación de la cinética.

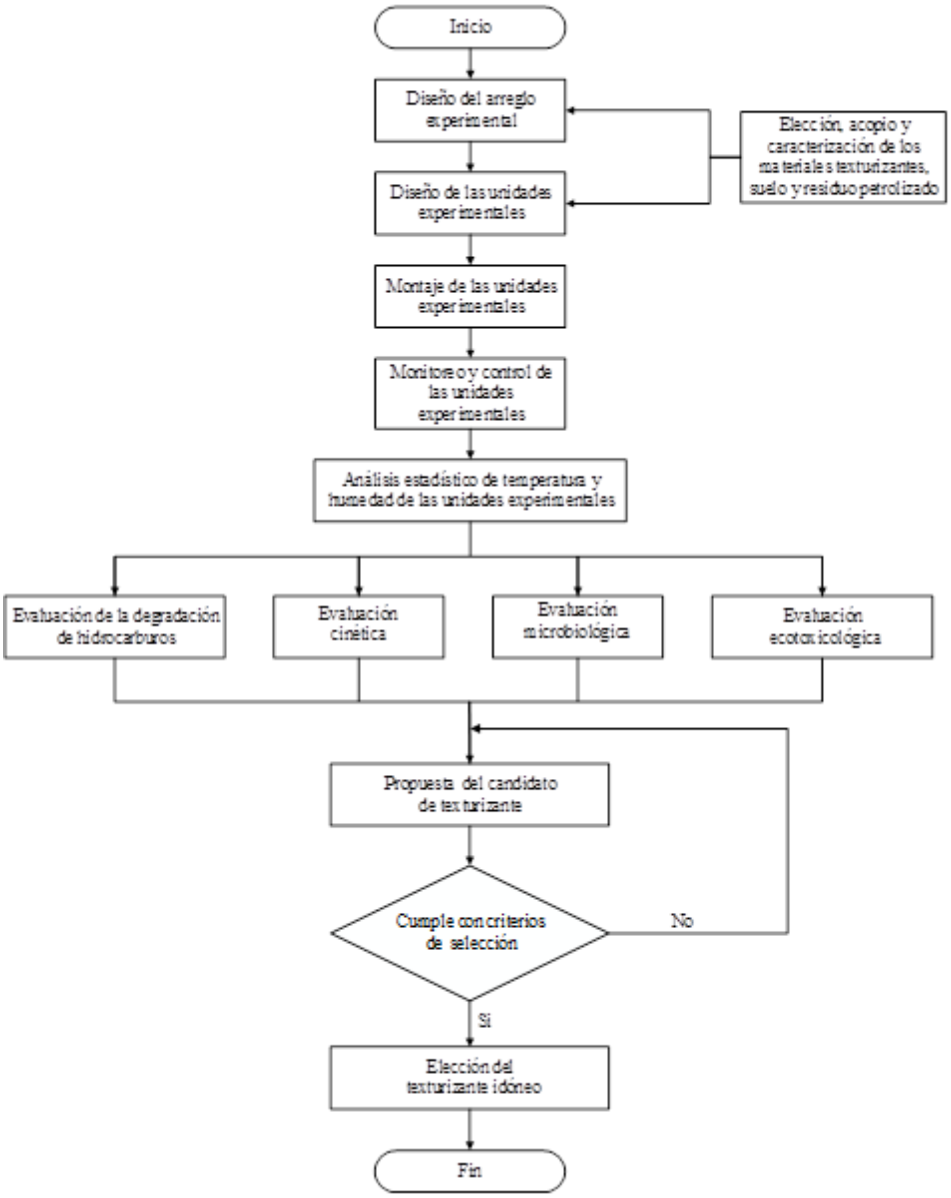

Fig. 1- Procedimiento utilizado en el protocolo experimental el proyecto Biopilas [14]

Las etapas de elección, acopio y caracterización de los materiales; diseño del arreglo experimental; diseño de las unidades experimentales; y montaje de las unidades experimentales fueron descritas.[14]

Monitoreo y control de las unidades experimentales

Las unidades experimentales fueron conformadas en correspondencia con las propuestas de los diseños experimental e ingeniero, a partir de una mezcla de residuo petrolizado, suelo y material texturizante. Fueron evaluados seis tratamientos, utilizando como texturizantes bagazo de caña integral, cachaza, serrín, pulpa de café, estiércol vacuno, y residuos de *Thalassia testudinum*, respectivamente.[14]

La composición química de diseño de las unidades experimentales fue de 22809 mg/kg y 9565 mg/kg de Grasas y Aceites (GyA) e Hidrocarburos Totales del Petróleo (HTP) respectivamente, 8 % de texturizante, y 20 % de humedad.

Las unidades experimentales fueron monitoreadas y controladas, según las siguientes actividades y tiempos:

1. Homogenización y aireación (cada 15 días): se homogenizó y aireó manualmente el contenido de cada unidad experimental en su propia bandeja.
2. Conformado (cada 15 días): una vez homogenizado y aireado se volvió a conformar la unidad experimental utilizando las plantillas creadas para la estandarización de las relaciones entre las dimensiones de la base, altura y ángulo de reposo de cada tratamiento.
3. Humectación (cada 4 días): A partir del porciento de humedad real de la unidad experimental, por balance de masa, se determinó el peso de agua a añadir para lograr el porciento de humedad de diseño. El agua se añadió con una regadera distribuyéndola uniformemente sobre todo el volumen de la unidad experimental.
4. Monitoreo de temperatura, humedad y pH (cada 7 días): Se realizó el monitoreo semanalmente.
5. Monitoreo de GyA e HTP (tiempo 0, 60, 90, 150 y 240 días): Se muestreó el contenido de cada unidad experimental para la determinación de la concentración de GyA e HTP por el método gravimétrico.

Evaluación de la cinética de la degradación de hidrocarburos

A partir de los datos experimentales del monitoreo se analizaron los comportamientos de las concentraciones de las fracciones de hidrocarburos investigadas (GyA e HTP) respectivamente, durante el tiempo 0, 60, 90, 150 y 240 días, para cada tratamiento. Asimismo, el comportamiento de la razón entre las concentraciones de las fracciones de hidrocarburos (GyA/HTP).

Los parámetros cinéticos de la degradación de las fracciones de hidrocarburos (GyA e HTP) fueron determinados a partir del siguiente protocolo:

- Se determinó la eficiencia de remoción de las fracciones de hidrocarburos (GyA e HTP) para cada tratamiento, utilizando las ecuaciones 1 y 2 respectivamente.

$$\%R_{GyA} = \left(\frac{\mathrm{GyA}_{t=0} - \mathrm{GyA}_{t=240}}{\mathrm{GyA}_{t=0}}\right) \cdot 100 \qquad (1)$$

$$\%R_{HTP} = \left(\frac{\mathrm{HTP}_{t=0} - \mathrm{HTP}_{t=240}}{\mathrm{HTP}_{t=0}}\right) \cdot 100 \qquad (2)$$

donde:

$\%R_{GyA}$: Eficiencia de remoción de GyA (%).

$\%R_{HTP}$: Eficiencia de remoción de HTP (%).

$\mathrm{GyA}_{t=0}$: Concentración de GyA en el tiempo 0 días (mg/kg).

$\mathrm{GyA}_{t=240}$: Concentración de GyA en el tiempo 240 días (mg/kg).

$\mathrm{HTP}_{t=0}$: Concentración de HTP en el tiempo 0 días (mg/kg).

$\mathrm{HTP}_{t=240}$: Concentración de HTP en el tiempo 240 días (mg/kg).

- Se graficaron las concentraciones obtenidas de las fracciones de hidrocarburos (GyA y HTP) durante el tiempo 0, 60, 90, 150 y 240 días, para cada tratamiento.
- Se ajustaron los datos experimentales según los modelos matemáticos para las reacciones de orden cero, primer orden y segundo orden. [15-16] Se determinó estadísticamente el modelo de mejor ajuste, definiéndose el orden de la reacción. Se obtuvo de los modelos la constante de velocidad de reacción (*k*).

- Se determinó el tiempo de vida medio ($t_{1/2}$) o período de tiempo en que la concentración del analito disminuyó a la mitad de su concentración inicial.

Se elaboró un libro de cálculo de Microsoft Office Excel para los cálculos y gráficos correspondientes.

Resultados y discusión

Evaluación cinética de la degradación de hidrocarburos

En las figuras 2 y 3 se muestran los comportamientos de las concentraciones de las fracciones de GyA e HTP respectivamente, durante el tiempo (0, 60, 90, 150 y 240 días) para cada tratamiento. Se obtuvo una alta la degradación de hidrocarburos (GyA e HTP) en todos los tratamientos. El comportamiento de los órdenes de los tratamientos, con relación las concentraciones en el tiempo final, fueron muy similares para ambos analitos.

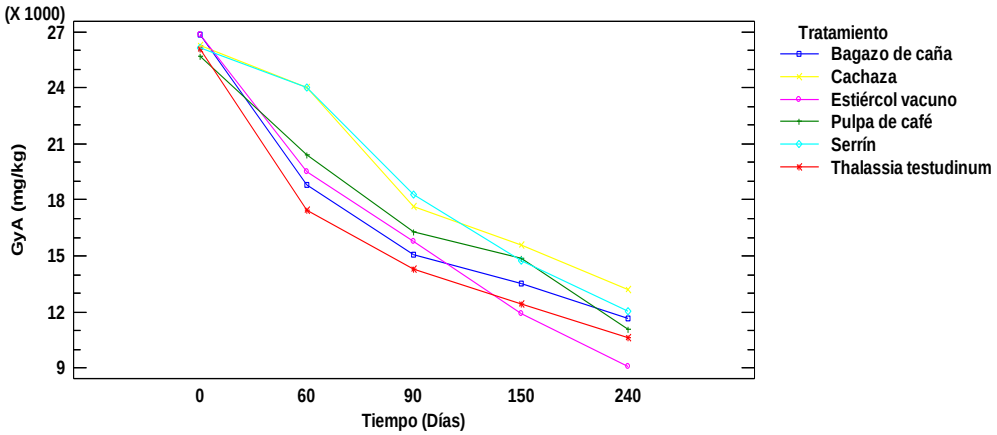

Fig. 2- Comportamiento de las concentraciones de GyA para cada tratamiento

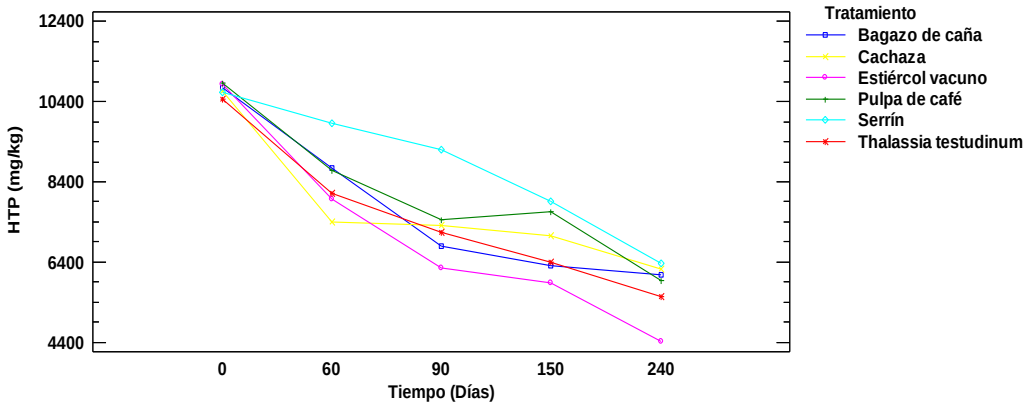

Fig. 3- Comportamiento de las concentraciones de HTP para cada tratamiento

En la figura 4 se muestra el comportamiento de la razón entre las concentraciones de las fracciones de hidrocarburos investigadas (GyA/HTP), durante el tiempo (0, 60, 90, 150 y 240 días) para cada tratamiento, a partir de los datos del monitoreo. Se constató que en el tiempo inicial la razón GyA/HTP por tratamientos se mueve en un rango de 2,37 a 2,51, en correspondencia con la propia composición del residual petrolizado utilizado. Asimismo, se observó una tendencia en general de disminución de esta razón desde el tiempo inicial hasta el tiempo final, momento en que la razón GyA/HTP se movió en un rango de 1,87 a 2,12. Los tratamientos bagazo, serrín y *Thalassia testudinum* tuvieron mayores porcientos de reducción en la razón GyA/HTP, del orden de 23,37 %, 23,16 % y 22,89 % respectivamente; mientras que el tratamiento estiércol vacuno fue el de menor reducción con 17,01 %. Solo en el tratamiento cachaza en el tiempo 60 días mostró inestabilidad apreciable.

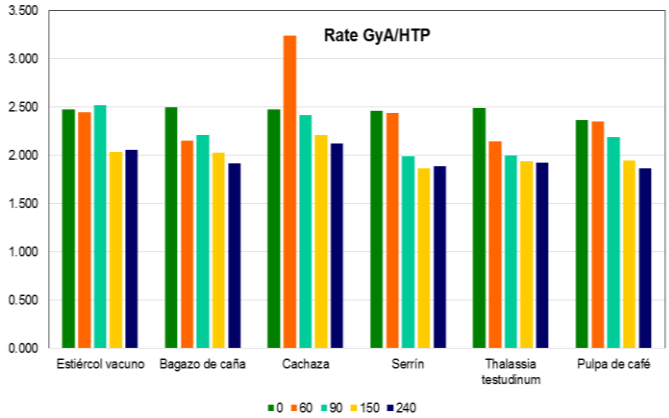

Fig. 4- Comportamiento de la razón GyA/HTP para cada tratamiento en el tiempo

En la figura 5 se muestra el comportamiento de la razón GyA/HTP para cada tiempo y tratamiento. En el tiempo inicial la razón media de GyA/HTP para todos los tratamientos fue de 2,47 y en el tiempo final fue de 1,97, para un 20,30 % de reducción de esa razón. Las mayores inestabilidades se observaron en los tiempos 60 y 90 días.

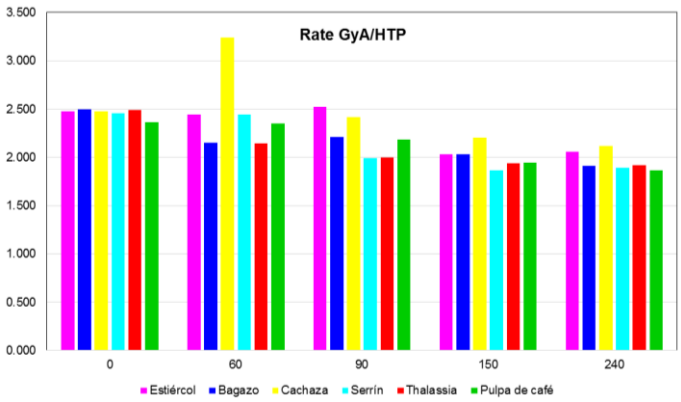

Fig. 5- Comportamiento de la razón GyA/HTP para cada tiempo y tratamiento

En la figura 6 se muestran las eficiencias de remoción de las fracciones de hidrocarburos investigadas (GyA e HTP), entre los tiempos inicial y final (0 y 240 días) para cada tratamiento.

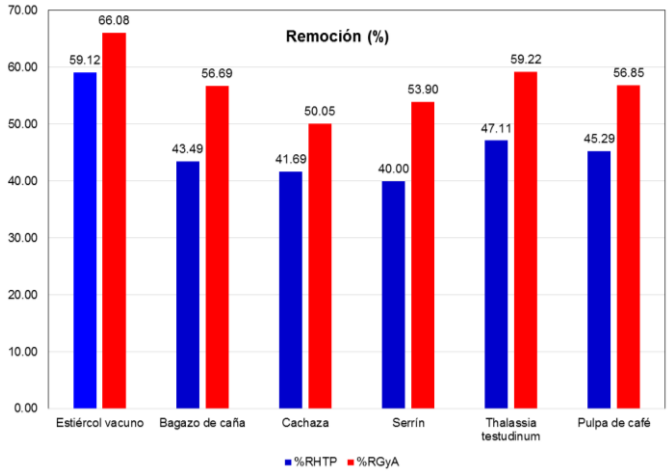

Fig. 6- Eficiencias de remoción de las fracciones de hidrocarburos investigadas (GyA e HTP) para cada tratamiento

Se lograron eficiencias de remoción de GyA superiores al 50,00 % en todos los tratamientos, con un rango entre 50,05 % y 66,08 %. El mejor comportamiento por tratamientos fue estiércol vacuno, *Thalassia testudinum*, pulpa de café, bagazo, serrín y cachaza respectivamente.

En el caso de los HTP las eficiencias de remoción fueron iguales y superiores al 40,00 % en todos los tratamientos, con un rango entre 40,00 % y 59,12 %. El comportamiento del orden de los tratamientos fue estiércol vacuno, *Thalassia testudinum*, pulpa de café, bagazo, cachaza y serrín respectivamente.

Las eficiencias de remoción obtenidas son coherentes con los resultados reportados en otras investigaciones, que han evaluado el efecto de los texturizantes sobre la eficacia de la biorremediación de hidrocarburos; [17,18,19] atribuyéndoles estos los beneficios debido al aporte de nutrientes y flora microbiana, a mejoras en la porosidad y la aireación, y la retención de humedad.

Los niveles de remoción de hidrocarburos obtenidos, para las condiciones de la investigación, aseguran el cumplimiento de las normas de disposición final del residuo investigado.[20] Los resultados a escala de banco confirman la pertinencia de la ecotecnología.

En las tablas 1 y 2 se muestran los resúmenes de los modelos cinéticos ajustados y sus principales parámetros: Coeficiente de determinación (R^2), constante de velocidad de degradación (k) y tiempo de vida medio ($t_{1/2}$) para GyA e HTP respectivamente.

Tabla 1- Resumen de los modelos cinéticos ajustados y sus principales parámetros para GyA

Modelo cinético	Parámetros	Tratamientos					
		Estiércol vacuno	Bagazo de caña	Cachaza	Serrín	*Thalassia testudinum*	Pulpa de café
Orden Cero	k ((mg/kg).día^{-1})	72,14	58,83	57,51	62,60	59,27	58,61
	R^2	0,91	0,80	0,88	0,92	0,80	0,92
Primer Orden	k (día^{-1})	0,004	0,003	0,003	0,004	0,004	0,003
	R^2	0,98	0,88	0,91	0,95	0,88	0,97
Segundo Orden	k ((mg/kg)$^{-1}$.día^{-1})	3,00E-07	2,00E-07	2,00E-07	2,00E-07	2,00E-07	2,00E-07
	R^2	0,99	0,940	0,942	0,96	0,95	0,98
	$t_{1/2}$ (días)	124	186	189	191	192	194

Tabla 2- Resumen de los modelos cinéticos ajustados y sus principales parámetros para HTP

Modelo cinético	Parámetros	Tratamientos					
		Estiércol vacuno	Bagazo de caña	Cachaza	Serrín	*Thalassia testudinum*	Pulpa de café
Orden Cero	k ((mg/kg).día^{-1})	24,91	18,54	15,56	18,27	19,39	18,50
	R^2	0,87	0,78	0,69	0,99	0,88	0,86
Primer Orden	k (día^{-1})	0,0036	0,0023	0,0019	0,0022	0,0026	0,0023
	R^2	0,94	0,81	0,75	0,9857	0,93	0,90
Segundo Orden	k ((mg/kg)$^{-1}$.día^{-1})	5,00E-07	3,00E-07	2,00E-07	2,00E-07	3,00E-07	3,00E-07
	R^2	0,971	0,84	0,81	0,968	0,974	0,92
	$t_{1/2}$ (días)	185	310	468	471	319	307

Se constató que la cinética de la degradación de hidrocarburos (GyA e HTP) para todos los tratamientos, excepto los HTP en el tratamiento serrín, se ajusta mejor al modelo de segundo orden. Lo anterior fue validado por los mayores coeficientes de determinación (R^2); explicando, en el porcentaje correspondiente, la variabilidad en los datos experimentales.

Para las GyA el R^2 del modelo de segundo orden se movió en un rango de 0,94 a 0,99. El mejor ajuste, la mayor constante de velocidad de degradación y el menor tiempo de vida medio ($t_{1/2}$) lo tuvo el tratamiento estiércol vacuno. Para el resto de los tratamientos no se aprecia una diferencia marcada en la constante de velocidad de degradación y el menor tiempo de vida medio ($t_{1/2}$).

Para los HTP, el R^2 del modelo de segundo orden se movió en un rango de 0,81 a 0,974. Solo los tratamientos bagazo y cachaza tuvieron R^2 por debajo del 92 %. El tratamiento serrín tuvo una R^2 de 0,97. El mejor ajuste lo tuvo el tratamiento *Thalassia testudinum* y muy próximo fue el del tratamiento estiércol vacuno. El tratamiento estiércol vacuno también tuvo una mayor constante de velocidad de degradación y el menor tiempo de vida medio ($t_{1/2}$). Le siguen los tratamientos bagazo, pulpa de café y *Thalassia testudinum* con igual constante de velocidad de degradación, pero en ese orden según el $t_{1/2}$.

Los resultados son coherentes con investigaciones precedentes [21-26] donde se reconoce que la cinética de hidrocarburos en la biorremediación se ajusta en su mayoría a cinéticas de primer orden y segundo orden. El comportamiento de segundo orden puede ser explicado a partir de la naturaleza compleja del residual petrolizado investigado, y por la ocurrencia de los complejos mecanismos bioquímicos de la biorremediación de los hidrocarburos.[10, 27,28,29]

Conclusiones

1. Se obtuvieron altas eficiencias de remoción de hidrocarburos (GyA e HTP) para todos los texturizantes. El estiércol vacuno fue el tratamiento con mayor porcentaje, del orden de 66,08 % y 59,12 % respectivamente.
2. La cinética de la degradación de hidrocarburos (GyA e HTP) tuvo un mejor ajuste al modelo de segundo orden, explicado a partir de la naturaleza compleja del residual petrolizado investigado, y por la ocurrencia de los complejos

mecanismos bioquímicos de la biorremediación de los hidrocarburos en la ecotecnología de biopilas.

3. La investigación aportó criterios técnicos para la selección del texturizante a utilizar en la optimización y escalado de la ecotecnología.

Referencias bibliográficas

1. THE INTERNATIONAL TANKER OWNERS POLLUTION FEDERATION LIMITED (ITOPF). *Effects of oil pollution on the marine environment*. United Kingdom: The International Tanker Owners Pollution Federation Limited (ITOPF). 2011. **12** p. [Consulta: 5 de mayo de 2018]. Disponible en: https://www.itopf.org/knowledge-resources/documents-guides/document/tip-13-effects-of-oil-pollution-on-the-marine-environment/

2. COCÂRTĂ, D. M., STOIAN, M.A. y KARADEMIR, A.. Crude Oil Contaminated Sites: Evaluation by Using Risk Assessment Approach. *Sustainability* [en línea]. 2017, **9**(8), 1365 [Consulta: 15 de diciembre de 2017]. ISSN 2071-1050. Disponible en: www.mdpi.com/journal/sustainability/doi:10.3390/su9081365

3. INTERNATIONAL PETROLEUM INDUSTRY ENVIRONMENTAL CONSERVATION ASSOCIATION (IPIECA). *Guidelines for the minimization and management of waste from oil spills (Vol. 12).* London, Reino Unido: International Petroleum Industry Environmental Conservation Association (IPIECA). 2004. 24 p. [Consulta: 5 de mayo de 2018]. Disponible en: http://www.cleancaribbean.org/download_pdf.cfm?cF=IPIECA%20Oil%20Spill%20Report%20Series%20(Spanish)&fN=Vol_12_WasteManagemt_SP_623.27KB.pdf

4. THE INTERNATIONAL TANKER OWNERS POLLUTION FEDERATION LIMITED (ITOPF). *Disposal of oil and debris. United Kingdom: The International Tanker Owners Pollution Federation Limited (ITOPF).* 2011. 12 p. [Consulta: 5 de mayo de 2018]. Disponible en: https://www.ukpandi.com/fileadmin/uploads/uki/Knowledge_Base_InternationalConventions/TIP%209%20Disposal%20of%20Oil%20and%20Debris.pdf

5. ERCOLI, E. *Biorremediación de suelos: Desde el concepto a su aplicación*. Lima, Perú: Foro Internacional Supervisión y fiscalización ambiental en el sector hidrocarburos. 2008. [Consulta: 10 de febrero de 2017]. Disponible en: http://www.osinerg.gob.pe/newweb/pages/GFH/ForoUMAL/tema5.pdf

6. DE OLIVEIRA SANTOS, J. V., ALVES FERREIRA, Y.L., DE SOUZA SILVA, L. DE LACERDA BUARQUE, I. M., BRANDÃO PALÁCIO, S. y FERRO CAVALCANTI, I. M. Use of bioremediation for the removal of petroleum hydrocarbons from the soil: an overview. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology* [en línea]. 2018, **3**(5), 1831-1838. [Consulta: 18 de febrero de 2019]. ISSN 2456-1878. Disponible en: https://ijeab.com/detail/use-of-bioremediation-for-the-removal-of-petroleum-hydrocarbons-from-the-soil-an-overview/

7. ENVIROMENTAL PROTECTION AGENCY. *How To Evaluate Alternative Cleanup Technologies For Underground Storage Tank Sites. A Guide For Corrective Action Plan Reviewers. Chapter IV Biopiles EPA 510-B-17-003. Land and Emergency Management 5401R* [en línea]. Washington D. C.: United States Environmental Protection Agency (EPA), 2017. [Consulta: 8 de marzo de 2018]. Disponible en: https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-03/documents/tum_ch4.pdf

8. VELASCO, J. A. y VOLKE, T. L. El composteo: Una alternativa tecnológica para la biorremediación de suelos en México*. Gaceta Ecológica* [en línea]. 2003, **66.** 41-53 [Consulta: 3 de marzo de 2018]. ISSN: 1405-2849. Disponible en: https://www.redalyc.org/pdf/539/53906604.pdf

9. VOLKE, T. L. y VELASCO, J. A. *Tecnologías de remediación para suelos contaminados* [en línea]. México: Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT), 2002. 64 p. ISBN: 968-817-557-9. [Consulta: 14 de marzo de 2017]. Disponible en: http://www.ecopuerto.com/Bicentenario/informes/TecnologiasRemediacion.pdf

10. CENTRO DE INVESTIGACIONES DEL PETRÓLEO (CEINPET). *Proyecto 2416 "Biorremediación como alternativa al saneamiento ambiental en la industria petrolera".* La Habana, Cuba. 2008.

11. YUNIATI, M. D. Bioremediation of petroleum-contaminated soil: A Review. *Earth and Environmental Science* [en línea]. 2018, 118. ISSN: 2577-0640. [Consulta: 18 de julio 2019]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/323348744_Bioremediation_of_petroleum-contaminated_soil_A_Review

12. AL-HAWASH, A.B., DRAGH, M. A., LI, S., ALHUJAILY, A., ABBOOD H., A., ZHANG, X., FUYING, M. Principles of microbial degradation of petroleum hydrocarbons in the environment. *The Egyptian Journal of Aquatic Research* [en línea]. 2018, **44**(2). 71-76. [Consulta: 18 de febrero de 2019]. ISSN: 1687-4285. Disponible en: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1687428518300244

13. PÉREZ, J. P. VIGUERAS, S. E., ZAMUDIO, E. Z., RIVERA, N. A. y CALVA, G.. Bioremediation of soils from oil spill impacted sites using bioaugmentation with biosurfactants producing, native, Free-living nitrogen fixing bacteria. *Rev. Int. Contam. Ambie.* [en línea]. 2017,**33**, 105-114. [Consulta: 3 de marzo de 2018]. ISSN: 0188-4999. Disponible en: https://www.revistascca.unam.mx/rica/index.php/rica/article/view/RICA.2017.33.esp01.09/46648

14. GUTIÉRREZ, O., CASTRO, D. J., VIERA, O. M., CASALS, E., RABASSA, D. Diseño ingeniero y montaje de unidades experimentales para la biorremediación de residuos petrolizados a escala de banco. *Tecnología Química* [en línea]. 2020, **40**(3), 564-562. [Consulta: 16 de octubre de 2020]. ISSN 2224-6185. Disponible en: https://tecnologiaquimica.uo.edu.cu/index.php/tq/article/view/5168

15. FOGLER, H. S. Elements of Chemical Reaction Engineering (Fifth ed.). United States of America: Prentice Hall. 2016. 992 p. ISBN: 9780133887822

16. NAVARRO, Javier José, ORTEGA, E. M., FUENTES, P., ABAD, A y CUARTAS, B. E. Cinética Química y Catálisis: Modelos cinéticos en sistemas homogéneos. Universitat Politécnica de Valéncia, Valencia. 2017. 191 p. ISBN 978-84-9048-561-3. [Consulta: 5 de mayo de 2018]. Disponible en:

https://gdocu.upv.es/alfresco/service/api/node/content/workspace/SpacesStore/74851bef-786f-460c-af55-8c2ffcc3a040/TOC_6355_01_01.pdf?guest=true

17. ORDAZ, J. A., MARTÍNEZ, Á., RAMOS, F. R., SÁNCHEZ, L. F., MARTÍNEZ, A. J., TENORIO, J. A. y CUEVAS DÍAZ, M. del C. Biorremediación de un suelo contaminado con petróleo mediante el empleo de bagazo de caña con diferentes tamaños de partícula. *Multiciencias* [en línea]. 2011, **11**(2), 136-145. [Consulta: 13 de junio de 2018]. ISSN 1317-2255. Disponible en: https://www.redalyc.org/pdf/904/90419195004.pdf

18. BUENDÍA, H. Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos mediante compost de aserrín y estiércoles. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica,* [en línea]. 2012, **15(**30), 123-130. Consulta: 13 de junio de 2018]. ISSN: 1682-3087. Disponible en: https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/iigeo/article/view/4101

19. GARCÍA, R., RIOS, E., MARTÍNEZ, A., RAMOS, F. R., CRUZ, J. S., CUEVAS, M. del C. Uso de cachaza y bagazo de caña de azúcar en la remoción de hidrocarburos en suelo contaminado. *Rev. Int. Contam. Ambient*. [en línea]. 2011, **27**(1), 31-39. [Consulta: 13 de junio de 2018]. ISSN 0188-4999. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-9992011000100003

20. OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. *Manejo de Fondaje de Tanques de Almacenamiento de Petróleo y sus Derivados* [en línea]. *(NC 819: 2017).* Norma Cubana. La Habana, Cuba: Oficina Nacional de Normalización (ONN). 2017. [Consulta: 1 de febrero de 2018]. Disponible en: http://www.nconline.cubaindustria.cu:81/

21. ESSABRI, A. M. A., AYDINLIK, N. P. y WILLIAMS, N. E. Bioaugmentation and biostimulation of total petroleum hydrocarbon degradation in a petroleum-contaminated soil with fungi isolated from olive oil effluent. *Water Air Soil Pollut* [en línea]. 2019, 230, **76** [Consulta: 17 de noviembre de 2019]. ISSN 1567-7230. Disponible en:

https://www.academia.edu/40077048/Bioaugmentation_and_Biostimulation_of_Total_Petroleum_Hydrocarbon_Degradation_in_a_Petroleum-contaminated_Soil_with_Fungi_Isolated_from_Olive_Oil_Effluent

22. MOHAJERI, L., AZIZ, H. A., ISA, M. H., ZAHED, M. A. y MOHAJERI, S. Effect of remediation strategy on crude oil biodegradation kinetics and halflife times in shoreline sediment samples. *Int. J. MAr. Sci. Eng.* [en línea]. 2013, **3**(2), 99-104. [Consulta: 13 de junio de 2018]. ISSN 2251-6743. Disponible en: https://iranjournals.nlai.ir/article_330829_89da14a87967d2fd873dd5b6b75e4d3a.pdf

23. MOHAJERI, L., AZIZ, H. A., ISA, M. H., ZAHED, M.A. y MOHAJERI, S. *Ex-situ* bioremediation of crude oil in soil, a comparative kinetic analysis. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* [en línea]. 2010, **85**(1), 54–58 [Consulta: 13 de junio de 2018]. ISSN 1432-0800. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/44799869_Exsitu_Bioremediation_ofCrude_Oil in_Soil_a_Comparative_Kinetic_Analysis/link/0deec5154d9769c90d000000

24. FARAHAT, L. A. y EL-GENDY, N. SH. Comparative kinetic study of different bioremediation processes for soil contaminated with petroleum hydrocarbons. *Material Science Research* India [en línea]. 2007, **4**(2), 269-278. [Consulta: 13 de junio de 2018]. ISSN: 2394-0565. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/271513604_Comparative_Kinetic_Study_of_Different_Bioremediation_Processes_for_Soil_Contaminated_with_Petroleum_Hydrocarbons

25. SARKAR, D., FERGUSON, M., DATTA, R. y BIRNBAUM, S.. Bioremediation of petroleum hydrocarbons in contaminated soils: Comparison of biosolids addition, carbon supplementation, and monitored natural attenuation. *Environmental Pollution* [en línea]. 2005, **136**(1), 187-195. [Consulta: 13 de junio de 2018]. ISSN 0269-7491. Disponible en: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749105000102?via%3Dihub

26. PINEDA, G., BOLL, G. y MESTA, A. M. Biodegradación de asfaltenos por un consorcio microbiano aislado de petróleo crudo "Maya". *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* [en línea]. 2002, **18**, 67-73. [Consulta: 13 de junio de 2018]. ISSN: ISSN 0188-4999. Disponible en: http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=37018202

27. IZQUIERDO, A. R.. *Biodegradación de HAPs durante la biorremediación aeróbica de suelos contaminados con hidrocarburos del petróleo. Análisis de poblaciones bacterianas y genes funcionales*. Tesis doctoral inédita. M. Grifoll Ruiz y J. Vila Grajales (dir.). Universitat de Barcelona, Barcelona, España, 2014. [Consulta: 13 junio de 2018]. Disponible en: http://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/53361/1/ARIR_TESIS.pdf

28. FIGUERAS, A., LORA-TAMAYO, E., TINTORÉ, J., PERÉZ, F. F., ALBAIGÉZ, J., SANCHÉZ, F., DURADO, M. A., RODRÍGUEZ, E. E. y PADÍN, R. H.. Biorremediación, pseudoproblemas, problemas y una experiencia. En su: *Las lecciones de la catástrofe del Prestige.* Madrid, España: Consejo Superior de Investigaciones Científicas. 2005.180 p. ISBN 978-84-00-08408-0.

29. NÚÑEZ, R. R., CABRANES, Y., ORTIZ, E., GONDRES, R., MARTÍNEZ, C., MARTÍNEZ, J. Cinética de degradación del naftaleno por células inmovilizadas húmedas de Bacillus alcalophilus cepa IDO-225. *Revista CENIC. Ciencias Biológicas* [en línea]. 2004, **35**(2), 77-82. [Consulta: 13 de junio de 2018]. ISSN 0253-5688. Disponible en: https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181226079003

Conflictos de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

Contribución de los autores

Omar Gutiérrez Benítez

Participación en la planeación y realización del diseño de experimentos. Elaboración de los protocolos para el diseño ingeniero y el montaje de las unidades experimentales, y para la evaluación de la cinética de la degradación de hidrocarburos. Ejecución y validación del balance de masa a nivel de unidades experimentales y de los cálculos ingenieros. Participación en el acondicionamiento del polígono experimental, y en las campañas de montaje y muestreo de las unidades experimentales. Participación en el análisis de los resultados del diseño de experimentos. Ejecución de la evaluación de la cinética de la degradación de hidrocarburos. Escritura y corrección del manuscrito del artículo.

David Javier Castro Rodríguez

Ejecución de la planeación y realización del diseño de experimentos. Elaboración del protocolo para el diseño de experimentos. Elaboración de la distribución en planta. Participación en el acondicionamiento del polígono experimental, y en las campañas de montaje y muestreo de las unidades experimentales. Ejecución del análisis de los resultados del diseño de experimentos. Oponencia del manuscrito.

Orlando Manuel Viera Ribot

Participación en la elaboración de otros protocolos utilizados en la fase experimental del proyecto Biopilas. Caracterización fisca y química de los materiales de la biopila. Participación en el acondicionamiento del polígono experimental, y en las campañas de montaje y muestreo de las unidades experimentales. Ejecución del monitoreo de las unidades experimentales. Participación en el análisis de los resultados del diseño de experimentos.

Enmanuel Casals Pérez

Participación en la elaboración de otros protocolos utilizados en la fase experimental del proyecto Biopilas. Participación en el acondicionamiento del polígono experimental, y en las campañas de montaje y muestreo de las unidades experimentales.

Dayana Rabassa Rabassa

Participación en la elaboración de otros protocolos utilizados en la fase experimental del proyecto Biopilas. Participación en el acondicionamiento del polígono experimental, y en las campañas de montaje y muestreo de las unidades experimentales. Revisión del manuscrito del artículo.