

# Biorremediación de ambientes contaminados con hidrocarburos: un proceso complejo que involucra múltiples variables

Héctor M. Alvarez

Centro Regional de Investigación y Desarrollo Científico Tecnológico, Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de la Patagonia, San Juan Bosco y CONICET Comodoro Rivadavia, Chubut, Argentina

Contacto: Héctor M. Alvarez - halvarez@unpata.edu.ar

## Resumen

En nuestro país existen regiones con una intensa actividad petrolera, que ha generado problemas ambientales de contaminación de distinto grado, extensión y antigüedad. Con el fin de preservar nuestro ambiente para las futuras generaciones y mantener el potencial productivo de las regiones, es necesario remediar las zonas contaminadas y recuperar el potencial natural de los mismos. La biodegradación de los contaminantes por las comunidades microbianas del ambiente representa el mecanismo primario para eliminar los hidrocarburos del ambiente y proceder a su recuperación. Los procesos naturales que influyen en un proceso de biorremediación tienen lugar a diferentes escalas de tamaño y extensión, por lo que su entendimiento requiere el aporte de diferentes áreas del conocimiento.

El objetivo de este artículo es realizar un análisis general sobre los principales aspectos a considerar dentro del área de la biorremediación de ambientes contaminados con hidrocarburos.

**Palabras claves:** bacterias degradadoras, hidrocarburos, bioestimulación, bioaumentación, ambiente

## Summary

Our country possesses diverse regions with a very intensive activity of the oil industry. Crude oil spills have occurred at many sites, and there is a need to remediate contaminated soil. Biodegradation by natural populations of microorganisms represents one of the primary mechanisms for eliminating hydrocarbon pollutants from the environment. The natural processes involved in a bioremediation treatment occur at different levels (sizes and extensions); thus, their understanding requires the involvement of diverse fields of knowledge.

The aim of this article is to perform a general analysis on main aspects to be considered for the bioremediation of hydrocarbon contaminated environments.

**Keywords:** degrading bacteria, hydrocarbons, biostimulation, bioaugmentation, environment

## **Tratamientos de biorremediación de zonas contaminadas**

La biorremediación es el tratamiento biológico de los ambientes naturales contaminados, como el suelo o el agua. El proceso se basa en el uso de microorganismos o plantas para degradar o inmovilizar los contaminantes [1]. La degradación de los contaminantes tiene lugar cuando una comunidad microbiana específica está presente en el sitio contaminado. Los microorganismos que integran estas comunidades (o al menos algunos de ellos) utilizan los hidrocarburos contaminantes como fuente de carbono y energía para su crecimiento y reproducción. Sin embargo, la eliminación del contaminante del ambiente por parte de los microorganismos depende de las condiciones que prevalecen en el ambiente. Aunque los miembros de las poblaciones microbianas posean el potencial de degradar los hidrocarburos presentes, las condiciones desfavorables del ambiente pueden limitar considerablemente la eliminación de los mismos. Esta situación ocurre con frecuencia en los suelos de la Patagonia semiárida, donde la existencia de áreas con contaminación crónica producidas por antiguos derrames de hidrocarburos sugieren que los índices de degradación natural son muy bajos debido probablemente a las condiciones climáticas y ambientales adversas de la región en gran parte del año. Precisamente, la atenuación natural como un tratamiento alternativo de biorremediación basado en la capacidad natural de las comunidades microbianas para degradar los contaminantes, no parece ser un procedimiento adecuado para aplicarlo a sitios con las características de la Patagonia semiárida. La bioestimulación es otro proceso alternativo de biorremediación donde se incrementa el potencial de degradación de las comunidades microbianas naturales del lugar, pero sin modificar la diversidad genética, mediante el agregado de nutrientes y agua. Finalmente, la bioaugmentación es la inoculación de alguna cepa bacteriana o consorcio bacteriano con buen potencial de degradación con el fin de incrementar la capacidad de biorremediación del sistema. En este caso, el proceso puede llevarse a cabo con microorganismos alóctonos o autóctonos. En los últimos años, la bioaugmentación con microorganismos autóctonos aislados del lugar a remediar posee mayor grado de aceptación, debido a que no se realiza el aporte de nuevo material genético al ambiente, sino que simplemente se aumenta el número de células del microorganismo inoculado con el fin de acelerar el proceso de eliminación del contaminante.

## **El proceso de biorremediación ocurre a diferentes escalas**

La biorremediación es un proceso complejo que integra fenómenos que ocurren en muy diferentes escalas de dimensión (Fig. 1). Se puede comenzar el análisis en una escala microscópica considerando los diferentes microorganismos (bacterias, hongos y levaduras) con una capacidad intrínseca de degradar los contaminantes. Usualmente en las comunidades microbianas de los ambientes naturales existen microorganismos de diferentes grupos taxonómicos con la capacidad de degradar total o parcialmente los diferentes tipos de hidrocarburos que se encuentran en el petróleo. Estos microorganismos exhiben diferentes estrategias para captar los hidrocarburos y una diversidad de genes y rutas metabólicas para la degradación de los mismos. En esta escala de tamaño también existen interacciones metabólicas entre los microorganismos, en base a la degradación secuencial de los contaminantes (en el caso de mezclas complejas como el petróleo) y de los metabolitos o

productos parciales de degradación que se generan durante el proceso. De esta manera, existen microorganismos que crecen utilizando los productos de degradación de los hidrocarburos que generan los otros miembros de las comunidades microbianas. En una escala un poco mayor, existen fenómenos químicos y físicos entre las partículas y los microcompartimentos del suelo que influyen en la eficiencia del proceso de biodegradación de los hidrocarburos (Fig. 1). Estos fenómenos determinan la biodisponibilidad de los contaminantes para su degradación y la accesibilidad de las células microbianas al hidrocarburo. Si los compuestos contaminantes no estuvieran disponibles o accesibles entre las partículas de suelo, su eliminación no ocurriría aunque en el sistema estuvieran presentes microorganismos con capacidad de degradarlos. A su vez, en una escala de dimensión aún mayor (metros) se observa que los sitios a biorremediar son heterogéneos en cuanto a la distribución de los contaminantes, la humedad, los nutrientes/minerales o la salinidad, o a la presencia de vegetación, entre otros aspectos (Fig. 1). Todos estos factores también tendrán incidencia sobre la actividad metabólica de las comunidades microbianas del lugar y en la eficiencia del proceso de biorremediación que se aplique. En ciertos sitios como en la Patagonia semiárida, la gran extensión de las zonas contaminadas determina la existencia de factores a nivel de ecosistemas que influyen en los procesos de biorremediación en una escala de kilómetros (Fig. 1). Entre estos aspectos se pueden mencionar la presencia de mallines o de algún tipo de relieve en particular, entre otros.

De todo lo expuesto, queda claro que la eficiencia de un proceso de biorremediación de un ambiente contaminado dependerá no solo de la presencia de microorganismos con capacidad de degradar los contaminantes, sino del acoplamiento de estas capacidades con los aspectos físicos, químicos y geológicos del sitio a remediar, como un sistema integrado. Por tales razones, el análisis y la gestión de la biorremediación demandan un enfoque multidisciplinario e interdisciplinario para poder ser llevado a cabo con éxito.

## **La biorremediación y la microbiología**

La microbiología es una disciplina que ha contribuido significativamente al entendimiento de los procesos biológicos que ocurren en un tratamiento de biorremediación. Usualmente se han estudiado los principales componentes de las poblaciones bacterianas de los suelos contaminados con hidrocarburos en diferentes regiones geográficas a través de métodos dependientes e independientes de cultivo. En este contexto, es importante no solo analizar la capacidad de degradar hidrocarburos de los microorganismos, sino también su capacidad de adaptarse a las condiciones del ambiente que se desea biorremediar. Esto podría dar un panorama sobre el rango de condiciones ambientales en las cuales las células son capaces de mantenerse activas metabólicamente.

fig1

**Figura 1:** La biorremediación integra fenómenos que ocurren a diferentes escalas de dimensión.

Una de las aplicaciones prácticas que podría tener este tipo de estudios microbiológicos, es el de desarrollar inóculos para tratamientos de bioaumentación de ambientes contaminados. Este es uno de los aspectos que más se han investigado en este campo, sin embargo su utilidad se

encuentra aún en discusión. Se han reportado algunos casos en donde la inoculación de microorganismos ha tenido un efecto estimulador en la remoción de los hidrocarburos del suelo [2 – 5]. Sin embargo, en otros casos la inoculación de bacterias degradadoras en ambientes naturales contaminados no ha tenido el efecto esperado [1]. Las causas del escaso éxito de la bioaumentación para la remoción de los contaminantes en el ambiente pueden ser variadas, entre las que se podrían mencionar la incapacidad de las células inoculadas para ser transportadas hacia el contaminante, de adherirse al mismo, de sobrevivir a eventuales predadores, de competir exitosamente por los nutrientes disponibles y de crecer y mantener sus capacidades degradadoras en las condiciones imperantes [6]. Esta situación determina que la relación costo/eficiencia de este procedimiento no siempre sea favorable desde un punto de vista comercial o económico.

Diversos estudios de degradación realizados en diferentes ambientes, incluyendo los suelos del Ártico y la Antártida, han demostrado que por lo general, las comunidades microbianas indígenas son capaces de degradar hidrocarburos del petróleo cuando las condiciones del sistema son manipuladas y optimizadas [3, 7, 8]. Estos trabajos demuestran que en el ambiente aún en condiciones extremas existe un potencial natural para eliminar las sustancias contaminantes. En este contexto, la bioestimulación constituye una alternativa para la biorremediación de ambientes contaminados basada en la capacidad degradadora de las comunidades microbianas indígenas luego del agregado de agua y nutrientes y la oxigenación del sistema. Este procedimiento produce un incremento en el potencial de degradación sin aumentar la diversidad genética del suelo. Por otro lado, el tratamiento de bioestimulación de suelos contaminados parece ser beneficioso también desde el punto de vista económico, además del ecológico. En general, en la Patagonia semiárida el tratamiento de bioestimulación, optimizando las diferentes variables del procedimiento en relación a las características intrínsecas del lugar a biorremediar, ha demostrado ser un proceso eficiente y quizás de elección para su aplicación práctica a nivel industrial. Por esta razón, es importante la conformación de un grupo de trabajo interdisciplinario que pueda integrar las diferentes áreas del conocimiento necesarias para el planeamiento, ejecución y monitoreo de los tratamientos de biorremediación.

Mientras tanto, la bioaumentación podría ser útil principalmente para la eliminación de los contaminantes más recalcitrantes o cuando la biorremediación intrínseca o la bioestimulación no funcionan debido a una población microbiana insuficiente o inadecuada, o cuando la concentración del contaminante o el ambiente es tóxico para las comunidades indígenas. En la Patagonia semiárida se han aislado bacterias autóctonas relacionadas con los géneros *Rhodococcus* y *Sphingobium* con capacidad de degradar un amplio rango de hidrocarburos, con el fin de analizar su efectividad para procesos de biorremediación en la región, sus mecanismos de adaptación a las condiciones de aridez y otros factores ambientales típicos de la zona. Una de las características más interesantes de estas bacterias es su capacidad para tolerar la desecación, de mantenerse activas en un amplio rango de condiciones ambientales y de acelerar los procesos de biorremediación de suelos luego de su inoculación [9, 10, y resultados no publicados]. Los procesos de biorremediación en suelos semiáridos como los de la Patagonia pueden resultar costosos tanto desde el punto de vista económico como ambiental, debido a la escasez de agua que habitualmente existe en estas zonas. Por tal

razón, los tratamientos del suelo y el manejo del agua en el proceso deben realizarse muy cuidadosamente. El uso de bacterias autóctonas, con capacidad de tolerar la aridez y de permanecer activas en un rango amplio de humedad, para su inoculación en tratamientos de bioaumentación en el ambiente es un aspecto de interés en la región. Los tratamientos de biorremediación con este tipo de bacterias podrían acelerar los procesos de eliminación del contaminante y acortar la duración del tratamiento, reduciendo el volumen de agua necesario para el proceso. Esta situación podría contribuir a reducir los costos operativos del tratamiento y al ahorro de los volúmenes de agua utilizados. En estos casos, la bioaumentación con bacterias indígenas podría ser una alternativa de aplicación ventajosa para la biorremediación de extensiones limitadas de suelo como las biopilas o piletas de inyección contaminadas, con implicancia no solo en la parte económica, sino también ambiental.

## Conclusiones

La biorremediación es un proceso complejo que depende de múltiples factores microscópicos y macroscópicos; de factores físicos, químicos, biológicos y geológicos. Por tales razones, el análisis y la gestión de la biorremediación demandan un enfoque multidisciplinario e interdisciplinario para poder ser llevado a cabo con éxito, incluyendo la interacción de ingenieros agrónomos, geólogos, hidrogeólogos, microbiólogos, bioquímicos, ingenieros químicos y personal técnico, entre otros. La aplicación del tipo de tratamiento de biorremediación a utilizar (bioestimulación o bioaumentación) y las manipulaciones del sistema a realizar, deberían surgir después de un análisis detallado de las características y propiedades intrínsecas del ambiente a remediar, ya que no existen recetas establecidas para aplicar en las diferentes situaciones ambientales.

## Referencias

1. **Jorgensen KS** (2007) In Situ biorremediation *Advances in applied microbiology* 61:285-305.
2. **Mohn WW, Stewart GR** (2000) Limiting factors for hydrocarbon biodegradation at low temperatures in Arctic tundra soils *Soil biology and biochemistry* 32: 1161-1172.
3. **Mohn WW, Radziminski CZ, Fortin MC, Reimer KJ** (2001) On site bioremediation of hydrocarbon-contaminated Arctic tundra soils in inoculated biopiles *Applied microbiology and biotechnology* 57: 242-247.
4. **Kuyukina MS, Ivshina IB** (2010) Application of *Rhodococcus* in bioremediation of contaminated environments *Biology of Rhodococcus* 91-108.
5. **Jiang Q, Zhou C, Wang Y, Si F, Zhou Y, Chen B, Zhao Y, Chen J, Xiao M** (2014) *Pseudomonas stutzeri* strain possessing a self-transmissible TOL-like plasmid degrades phenol and promotes maize growth in contaminated environments *Applied biochemistry and biotechnology* 172: 3461-3475.
6. **Gallego JLR, Loredó J, Llamas JF, Vázquez F, Sánchez J** (2001) Bioremediation of diesel-contaminated soils: evaluation of potential in situ techniques by study of bacterial degradation *Biodegradation* 12: 325-335.
7. **Coulon F, Pelletier E, Gourhant L, Delille D** (2005) Effects of nutrient and temperature on degradation of petroleum hydrocarbons in contaminated sub-Antarctic soil *Chemosphere* 58: 1439-1448.
8. **Ruberto LAM, Vazquez S, Lobalbo A, MacCormack WP** (2003) Psychrotolerant hydrocarbon-degrading *Rhodococcus* strains isolated from polluted Antarctic soils *Antarctic science* 17: 47-56.
9. **Madueño L, Coppotelli BM, Alvarez HM, Morelli IS** (2011) Isolation and characterization of indigenous soil bacteria for bioaugmentation of PAH contaminated soil of semiarid Patagonia, Argentina *International biodeterioration & biodegradation* 65: 345-351.
10. **Madueño L, Alvarez HM, Morelli IS** (2014) Autochthonous bioaugmentation to enhance phenanthrene degradation in soil microcosms under arid conditions *International journal of environmental science and technology* doi10.1007/s13762-014-0637-5.

***El autor es profesor e investigador de CONICET***

