

# LA BIORREMEDIACIÓN COMO ALTERNATIVA ECOLÓGICA PARA EL SANEAMIENTO DE LOS ECOSISTEMAS MARINOS

Ing. Michel Fernández González<sup>1</sup>, Ing. Arístides Molina Soca<sup>2</sup>, Ing. Dainelis González  
Martines<sup>3</sup>

1. Universidad de Matanzas – Sede “Camilo Cienfuegos”, Vía Blanca Km.3, Matanzas,  
Cuba. [pj.garcia@umcc.cu](mailto:pj.garcia@umcc.cu)



---

CD de Monografías 2017  
(c) 2017, Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”  
ISBN: XXX-XXX-XX-XXXX-X

## Resumen

Este breve informe nos acerca a varios de los problemas medioambientales que existen en la actualidad en ecosistemas marinos del mundo producto a la contaminación por hidrocarburos. Se define en que consiste la biorremediación a través de su concepto, los diferentes tipos o variantes de esta tecnología, así como las principales técnicas con las que cuenta esta. Se hace un breve análisis de la biorremediación como rama surgida de la biotecnología por la implicación de organismos (mayormente bacterias) modificados genéticamente que contribuyen a la limpieza de los ecosistemas marinos afectados. Se mencionan también algunas de las ventajas y desventajas de este método, culminando con un breve análisis de lo que es hoy la biorremediación en Cuba así como el uso de un producto nacional de gran eficiencia y eficacia como es el BIOIL-FC y se finaliza el trabajo mencionando con tres derrames de petróleo considerados entre los más grandes habidos hasta el momento así como las consecuencias tanto ecológicas, como económicas de estos enormes derrames.

**Palabras claves:** *Bioremediación; Ecosistemas; Contaminación.*

---

## Introducción

El crecimiento de la población y el avance de las actividades industriales a partir del siglo XIX trajeron aparejados serios problemas de contaminación ambiental. Desde entonces, los países generan más desperdicios, muchos de ellos no biodegradables o que se degradan muy lentamente en la naturaleza, lo que provoca su acumulación en el ambiente sin tener un destino seguro o un tratamiento adecuado. De este modo, en lugares donde no existe control sobre la emisión y el tratamiento de los desechos, es habitual encontrar una amplia gama de contaminantes. Habitualmente, los casos de contaminación que reciben mayor atención en la prensa son los derrames de petróleo. Pero, en el mundo constantemente están sucediendo acontecimientos de impacto negativo sobre el medio ambiente, incluso en el entorno directo, generados por un gran abanico de agentes contaminantes que son liberados al ambiente. Un ejemplo lo constituyen algunas industrias que producen compuestos cuya estructura química difiere de los compuestos naturales, y que son utilizados como refrigerantes, disolventes, plaguicidas, plásticos y detergentes. El problema principal de estos compuestos es que son resistentes a la biodegradación, por lo cual se acumulan y persisten en el ambiente y lo perjudica tanto como a los seres vivos, entre ellos al ser humano. En las últimas décadas, entre las técnicas empleadas para contrarrestar los efectos de los contaminantes, se comenzó a utilizar una práctica llamada biorremediación (Díaz, 2013).

El término biorremediación fue acuñado a principios de la década de 1980. Los científicos observaron que era posible aplicar estrategias de remediación que fuesen biológicas, basadas en la capacidad de los microorganismos de realizar procesos degradativos. Las primeras observaciones de biorremediación fueron con el petróleo, después, de algunos



organoclorados (los organoclorados, compuestos orgánicos no naturales que tienen cloro en su molécula y son capaces de intervenir en los procesos celulares normales, entre otros la reproducción) y organofosforados (los organofosforados son un grupo de químicos usados como plaguicidas artificiales aplicados para controlar las poblaciones plagas de insectos. Los organofosforados son sustancias orgánicas de síntesis, conformadas por un átomo de fósforo unido a cuatro átomos de oxígeno o en algunas sustancias a tres de oxígeno y uno de azufre (Lorenzo, 2012); se advirtió que los microorganismos no sólo eran patógenos, sino que además eran capaces de absorber compuestos orgánicos, algunos naturales, otros sintéticos, y degradarlos, lo que constituye el objetivo de la biorremediación.

Uno de los muchos reporteros enviados a Alaska meditaba sobre el daño provocado por el vertido del Exxon Valdez. Pensaba que el petróleo, sustancia natural, no provocaría un daño ambiental irreparable y tal como se ha ido observando durante décadas, el crudo después de un largo tiempo es diluido y asimilado por el medio ambiente.

De esta intrínseca capacidad de la naturaleza para superar algunos desequilibrios en el ecosistema, surge la biorremediación, como una tecnología que usa un elemento biológico, en la mayoría de los casos microorganismos, para eliminar contaminantes de un lugar, sea este, suelo, sedimento, fango o mar. Esta tecnología se ha transformado en la colaboradora directa de la naturaleza, que no siempre es capaz de superar por sí sola grandes desequilibrios. La biorremediación le da una ayuda al medio ambiente en la mejora de los ecosistemas dañados, acelerando dichos procesos naturales. Lo que hacen los microorganismos es degradar los desechos en productos menos tóxicos, además de concentrar e inmovilizar sustancias tóxicas, metales pesados, desechos industriales y rehabilitar áreas afectadas con diversos contaminantes.

En 1981 se estudió principalmente la degradación microbiana de los hidrocarburos procedentes del petróleo, determinando que era un proceso complejo en el que tanto los factores ambientales, como la mezcla de hidrocarburos a degradar y la disponibilidad de oxígeno y nutrientes, entre otros, tenían una gran influencia sobre el destino de los vertidos de petróleo. Además, se estableció que la habilidad de degradar los hidrocarburos no se restringía a unos pocos géneros de microorganismos, sino que diversos grupos de bacterias y hongos, que se encontraban ampliamente distribuidos en ambientes marinos, de agua dulce, y hábitats del suelo, habían demostrado tener esta capacidad.

A pesar de los estudios realizados, la naturaleza interactiva de los microorganismos, el petróleo y el medio ambiente no se conocían completamente, por lo que quedaba mucho trabajo por hacer. Existía mucha controversia en algunos temas y se necesitaba realizar muchísimo trabajo en este campo. Con una mejor comprensión de este proceso de degradación, se podrían desarrollar modelos para predecir el destino de los contaminantes de hidrocarburos y desarrollar estrategias para la utilización de microorganismos degradadores de hidrocarburos en actividades para la extracción de hidrocarburos de los ecosistemas contaminados.

Sin embargo, durante los años siguientes hasta la actualidad las técnicas no han evolucionado tanto como cabía esperar. Durante los 90 y principios de siglo XXI la biorremediación se enfocó de las dos formas citadas, siendo la bioestimulación la que mejores resultados ha demostrado. Introducir microorganismos en ambientes contaminados no muestra resultados



eficientes, sin embargo estimular a los microorganismos autóctonos aportando nutrientes y coenzimas que les permita crecer y degradar más rápido los hidrocarburos sí que muestra potencialidad, si bien es necesario mejorar la técnica mediante nuevos y mejores estudios. Los estudios realizados en estos años eran inconcluyentes e ineficientes, ya que apenas existían test de campo, adolecían de controles adecuados, de análisis aleatorios y replicas, o los datos eran erróneamente analizados (Escuela de Organización Industrial, 2011).

## Desarrollo

### Concepto de Biorremediación

El concepto de biorremediación se utiliza para describir una variedad de sistemas que utilizan organismos vivos (plantas, hongos, bacterias, entre otros), para remover (extraer), degradar (biodegradar) o transformar (biotransformar) compuestos orgánicos tóxicos en productos metabólicos menos tóxicos o inocuos (Velazco, 2003), para eliminar, contener o atenuar los contaminantes ambientales peligrosos como son los derrames de petróleo en el mar y otros ecosistemas. Otros especialistas en el tema definen a la biorremediación también como la adición de materiales a sistemas o ecosistemas contaminados para acelerar los procesos de biodegradación natural (Nuñez, 2010).

En los procesos de biorremediación generalmente se emplean mezclas de ciertos microorganismos o plantas capaces de degradar o acumular sustancias contaminantes tales como metales pesados y compuestos orgánicos derivados de petróleo o sintéticos.

Básicamente, los procesos de biorremediación pueden ser de tres tipos:

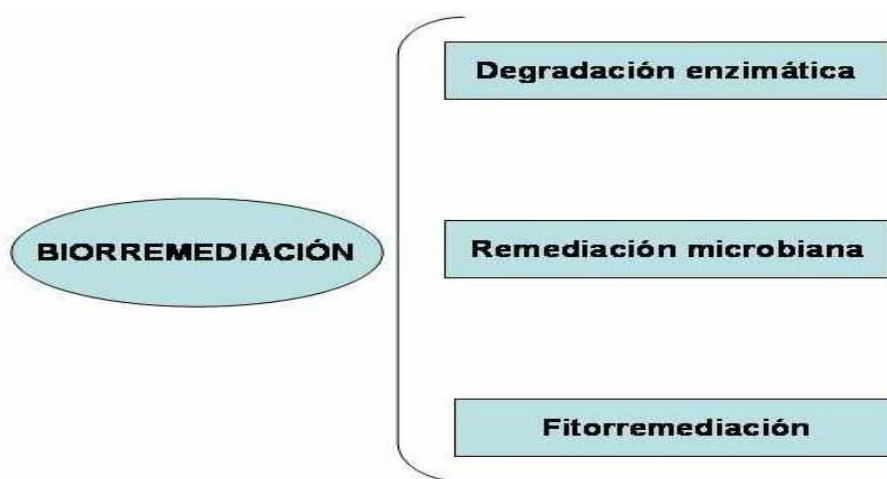


FIG 1: Diferentes modos de biorremediación

### Degradación enzimática



Este tipo de degradación consiste en el empleo de enzimas en el sitio contaminado con el fin de degradar las sustancias nocivas. Estas enzimas se obtienen en cantidades industriales por bacterias que las producen naturalmente, o por bacterias modificadas genéticamente que son comercializadas por las empresas biotecnológicas. Por ejemplo, existe un amplio número de industrias de procesamiento de alimentos que producen residuos que necesariamente deben ser posteriormente tratados. En estos casos, se aplican grupos de enzimas que hidrolizan (rompen) polímeros complejos para luego terminar de degradarlos con el uso de microorganismos. Un ejemplo lo constituyen las enzimas lipasas (que degradan lípidos) que se usan junto a cultivos bacterianos para eliminar los depósitos de grasa procedentes de las paredes de las tuberías que transportan los efluentes.

Otras enzimas que rompen polímeros utilizados de forma similar son las proteinasas y amilasas, que degradan proteínas y almidón, respectivamente. Además de hidrolizar estos polímeros, existen enzimas capaces de degradar compuestos altamente tóxicos. Estas enzimas son utilizadas en tratamientos en donde los microorganismos no pueden desarrollarse debido a la alta toxicidad de los contaminantes. Por ejemplo, se emplea la enzima peroxidasa para iniciar la degradación de fenoles y aminas aromáticas presentes en aguas residuales de muchas industrias.

### **Remediación microbiana**

En este tipo de remediación se usan microorganismos directamente en el foco de la contaminación. Los microorganismos utilizados en biorremediación pueden ser los ya existentes (autóctonos) en el sitio contaminado o pueden provenir de otros ecosistemas, en cuyo caso deben ser agregados o inoculados.

La descontaminación se produce debido a la capacidad natural que tienen ciertos organismos de transformar moléculas orgánicas en sustancias más pequeñas, que resultan menos tóxicas. El hombre ha aprendido a aprovechar estos procesos metabólicos de los microorganismos. De esta forma, los microorganismos que pueden degradar compuestos tóxicos para el ambiente y convertirlos en compuestos inocuos o menos tóxicos, se aprovechan en el proceso de biorremediación. De esta forma, reducen la polución de los sistemas acuáticos y terrestres. La gran diversidad de microorganismos existente ofrece muchos recursos para limpiar el medio ambiente y en la actualidad esta área está siendo objeto de intensa investigación. Existen, por ejemplo, bacterias y hongos que pueden degradar con relativa facilidad petróleo y sus derivados, benceno, tolueno, acetona, pesticidas, herbicidas, éteres, alcoholes simples, entre otros. Los metales pesados como uranio, cadmio y mercurio no son biodegradables, pero las bacterias pueden concentrarlos de tal manera que queden aislados para que sean eliminados más fácilmente.

### **Remediación con plantas (fitorremediación)**

La fitorremediación es el uso de plantas para limpiar ambientes contaminados. Aunque se encuentra en desarrollo, constituye una estrategia muy interesante, debido a la capacidad que



tienen algunas especies vegetales de absorber, acumular y/o tolerar altas concentraciones de contaminantes como metales pesados, compuestos orgánicos y radioactivos. La fitorremediación ofrece algunas ventajas y desventajas frente a los otros tipos de biorremediación:

### **Ventajas:**

- ✓ Las plantas pueden ser utilizadas como bombas extractoras de bajo costo para depurar suelos y aguas contaminadas.
- ✓ Algunos procesos degradativos ocurren en forma más rápida con plantas que con microorganismos.
- ✓ Es un método apropiado para descontaminar superficies grandes o para finalizar la descontaminación de áreas restringidas en plazos largos.

### **Limitaciones:**

- ✓ El proceso se limita a la profundidad de penetración de las raíces o aguas poco profundas.
- ✓ Los tiempos del proceso pueden ser muy prolongados.
- ✓ La biodisponibilidad de los compuestos o metales es un factor limitante de la captación (Díaz, 2013).

### **Distintas técnicas de biorremediación**

La biorremediación puede ser un proceso de aplicación de productos en las áreas contaminadas y se define como un proceso “in situ”; mientras que las tecnologías “ex situ” el material contaminado es tratado en áreas de manejo destinadas a ese fin. Los procesos de biorremediación se desarrollan mediante técnicas de bioestimulación y bioaumentación.

La técnica de bioestimulación se basa en el uso de nutrientes, sustratos o aditivos con actividad superficial para estimular el crecimiento y desarrollo de organismos capaces de biodegradar compuestos contaminantes del medio ambiente.

Las técnicas de bioaumentación describe la adición de organismos o enzimas a un material con el propósito de eliminar sustancias indeseables. La bioaumentación asegura que estén presentes los microorganismos específicos capaces de degradar al compuesto contaminante no deseado. Las bacterias son los microorganismos más comúnmente utilizados para la bioaumentación.

En condiciones controladas éste es un método práctico y económicamente efectivo para eliminar la contaminación por hidrocarburos. Los microorganismos deben estar presentes en suficiente cantidad y diversidad. También deben tener asegurados sus requerimientos esenciales para lo cual se controlan rigurosamente parámetros como: nivel de oxígeno,



nutrientes inorgánicos, acceso al sustrato, agua y otras condiciones como pH, temperatura, salinidad, propiedades del contaminante.

La aplicación de bacterias degradadoras de hidrocarburos en áreas contaminadas por petróleo ha sido considerada como una posible opción para la biorremediación tanto en ambientes terrestres como acuáticos, pero su aplicación requiere de un diagnóstico inicial que incluya el diseño de cuál es la solución idónea para sanear el área impactada que garantice el cumplimiento de las normas y exigencias ambientales establecidas para ese tipo de tecnología (Núñez, 2010).

### **Ventajas de la biorremediación**

La biorremediación es un método especialmente atractivo de restauración por varias razones:

- 1) Usualmente es mucho menos costosa que las tecnologías alternativas.
- 2) Es natural y normalmente no requiere el uso de agentes químicos como solventes o detergentes.
- 3) Transforma los contaminantes a productos no peligrosos, o los destruye completamente, en lugar de simplemente transferirlos a una fase diferente o a otra localidad (Tal como se hace con volatilización y rellenos industriales).

### **Desventajas de la biorremediación**

A este punto es importante mencionar que la biorremediación tiene sus limitaciones y no se debe esperar una panacea. Aunque los hidrocarburos en el intervalo de gasolina y diésel (n-alcanos) se biodegradan fácilmente, es relativamente difícil la restauración de sitios altamente contaminados por hidrocarburos poliaromáticos (HPAs) a través de la biorremediación. Esto se debe principalmente a la viscosidad alta y solubilidad baja de los HPAs, las cuales limitan el área superficial disponible para el ataque de las enzimas bacterianas. Otros factores limitativos pueden ser las concentraciones tóxicas de los hidrocarburos de bajo peso molecular, y las concentraciones altas de metales (que no son biodegradables). A causa de esto se debe de considerar la biorremediación como una de las alternativas de tecnologías para el saneamiento de sitios contaminados por hidrocarburos. Se tiene que evaluar su efectividad en términos de costo-beneficio y compararla con otras tecnologías. De cualquier modo, usualmente se compensan estas limitaciones por el ahorro en los costos, en comparación con otras tecnologías de restauración. La biorremediación representa del 30 al 40 % del costo del tratamiento químico, la incineración o el relleno industrial (Schoeder, 1999).





## **La biorremediación como rama de la biotecnología.**

La biorremediación surge como una rama de la biotecnología que busca resolver los problemas de contaminación mediante el diseño de microorganismos capaces de degradar compuestos que provocan desequilibrios en el medio ambiente.

Todos los contaminantes poseen características que los hacen capaces de perturbar el medio ambiente y provocar daño a la salud humana y del planeta. Crear estrategias de biorremediación para eliminarlos todos es un camino que se está iniciando para esta rama de la biotecnología.

Existen grupos de compuestos especialmente peligrosos para el hombre en los que la biorremediación ha logrado importantes avances. Uno de estos grupos son los organoclorados, compuestos orgánicos no naturales que tienen cloro en su molécula y son capaces de intervenir en los procesos celulares normales, entre otros la reproducción.

Es similar a la biotecnología, en general sus técnicas son específicas para casos particulares, porque dependen directamente de las condiciones del ecosistema a recuperar. A veces, biorremediar un ambiente contaminado puede requerir la elaboración de un microorganismo genéticamente modificado que sea eficiente sólo para ese caso.

Un evento más sencillo de biorremediación puede ser el del petróleo. Los derrames de crudo provocan un desequilibrio al aumentar la cantidad de carbono, lo que descompensa los niveles de nitrógeno y fósforo, en esas condiciones metabólicamente no se puede consumir el carbono. La biorremediación de petróleo consiste en verter los mismos nutrientes que están descompensados, fósforo, nitrógeno y dejar que los microorganismos que ya están presentes “hagan su trabajo” (Lorenzo, 2012).

## **Actualidad de la biorremediación**

La biorremediación se utiliza actualmente para degradar los desechos químicos orgánicos contenidos en el mar, suelos, manto acuífero, efluentes de plantas procesadoras de alimentos y compuestos químicos y los lodos petrolizados de las refinerías de petróleo, tanques de almacenaje, separadores de agua-petróleo, equipamiento de limpieza y derrames accidentales de petróleo.

## **Uso de organismos modificados genéticamente en biorremediación (perspectivas)**

En los últimos años, los avances en ingeniería genética han permitido el desarrollo de organismos transgénicos. Y la biorremediación hace uso de esta nueva tecnología para resolver varios problemas de contaminación. El futuro promete aún más.

Muchos grupos de investigación están desarrollando en el laboratorio, plantas y microorganismos genéticamente modificados para ser mejores agentes de biorremediación, es decir que degraden mejor o más eficientemente a los agentes contaminantes.

Por ejemplo, se puede utilizar material genético de bacterias resistentes a metales para insertarlo en el genoma de una planta que, entonces, adquiriría esta nueva característica.





Un grupo de investigación utilizó un gen llamado *merA*, que codifica para la enzima reductasa del ion mercúrico, altamente tóxico, que cataliza su reducción hasta la forma volátil y poco tóxica de mercurio elemental, gaseoso en condiciones de temperatura no muy elevadas (Díaz, 2013).

Esta investigación ha abierto el camino para que en el futuro sea posible realizar plantaciones arbóreas transgénicas que, mediante este proceso de fitovolatilización u otros parecidos, sean capaces de descontaminar terrenos con altos niveles de contaminantes.

Se están perfeccionando nuevos métodos de biotecnología para el tratamiento del agua, que eliminarán los compuestos que contengan fósforo, nitrógeno y azufre. Este bioprocesamiento se está extendiendo a varios procesos industriales, entre ellos los de las industrias petroquímicas, químicas y mineras, con el uso de bacterias oxidantes.

La biorremediación mediante bacterias ofrece grandes posibilidades de limpiar y descontaminar sistemas complejos y gracias a sus ventajas económicas y ambientales será una de las tecnologías más desarrolladas durante este siglo. Se están utilizando cepas especializadas de microorganismos de alta actividad para tratar agentes contaminantes en diferentes sectores, como las industrias que utilizan catalizadores, las textiles, las curtiembres, el procesamiento de celulosa y almidón, la galvanoplastia, la minería, el desengrasado y recubrimiento de superficies y la impresión (Díaz, 2013).

### **Nuevos desarrollos biotecnológicos en plantas y bacterias**

Entre los desarrollos biotecnológicos que se están llevando a cabo para procesos de fitorremediación se encuentran los siguientes:

- Rizofiltración para la extracción de Uranio de aguas subterráneas en Ashtabula, Ohio, EEUU.
- Rizofiltración a nivel de cultivo *in vitro* para detoxificar compuestos fenólicos en aguas contaminadas (por ejemplo los derivados de los herbicidas tradicionales y contaminantes como el 2,4-D) en la Universidad Nacional de Río Cuarto, Córdoba por el grupo de investigación de la Dra. Elizabeth Agostini.
- Bacterias *Pseudomonas* transgénicas que son capaces de degradar compuestos tóxicos que contienen cloro en compuestos menos nocivos.
- Microorganismos capaces de degradar *TNT*, un explosivo de gran potencia y muy agresivo para el entorno.
- Bacterias capaces de reducir las formas altamente tóxicas de mercurio en otras menos tóxicas y volátiles.
- Bacterias que transforman metales del suelo en formas menos tóxicas o insolubles. Por ejemplo: la reducción de cromo ( $\text{Cr}^{+6}$  a  $\text{Cr}^{+3}$ ).



- La utilización de la bacteria *Deinococcus radiodurans* para eliminación de elementos radiactivos presentes en el suelo y aguas subterráneas. Este microorganismo es un extremófilo que resiste condiciones extremas de radiación, sequedad, agentes oxidantes y diversos compuestos mutagénicos.
- Cianobacterias a las que se le han introducido genes de bacterias *Pseudomonas* con capacidad de degradar diferentes hidrocarburos o pesticidas (Díaz, 2013).

### **Biorremediación en Cuba.**

El incremento del transporte de hidrocarburos hacia y alrededor de Cuba, unido al crecimiento de la industria petrolera nacional provocó la necesidad de explorar la aplicación de tecnologías de biorremediación para coadyuvar a la protección del ambiente marino frente a derrames de petróleo y al incremento de la producción de petróleo por el uso de microorganismos.

Desde finales de la década de los 80 del siglo pasado en Cuba se ha trabajado en investigaciones relacionadas con el desarrollo de tecnologías para la biorremediación de ambientes impactados con petróleo y sus derivados. En particular, se estableció la Colección de Bacterias Marinas a partir del aislamiento, selección y conservación de bacterias heterótrofas de origen marino, teniendo en cuenta que la extensión y diversidad taxonómica de estos microorganismos representan un potencial para la obtención de productos naturales bioactivos.

En la actualidad la colección se encuentra en el Centro de Bioproductos Marinos (CEBIMAR), la cual cuenta con más de 400 cepas de bacterias aisladas del medio marino, muchas de las cuales son capaces de degradar el crudo, producir tensioactivos, ácidos orgánicos u otros metabolitos, con alta baroestabilidad y resistencia a las sales, que han permitido la formulación de diferentes bioproductos destinados al tratamiento de ecosistemas contaminados con petróleo y sus derivados.

La formulación de los biopreparados para la degradación de hidrocarburos incluye el cultivo de células libres e inmovilizadas a partir de cultivos axénicos o mixtos obtenidos por vía fermentativa. En particular se ha trabajado con cinco cultivos de bacterias, aislados de los sedimentos de la Bahía de Cárdenas, Matanzas, que han mostrado su capacidad de degradar las diferentes fracciones del crudo.

Entre los productos diseñados y evaluados por técnicas de inmovilización celular se incluye el BIOIL, *k*-BIOIL e IDO-225; mientras que el BIOIL-FC está diseñado a partir de un cultivo de células libres.

El desarrollo del bioproducto BIOIL-FC permitió diseñar un Servicio Ambiental demandado por el sector industrial vinculado al uso del petróleo y sus derivados para el saneamiento de la contaminación petrogénica. Este servicio es brindado por el Centro de Bioproductos Marinos (CEBIMAR) (Nuñez, 2010).



## BIOIL-FC, producto nacional

El BIOIL-FC es un bioproducto en forma de células libres y en su formulación contiene un cultivo mixto de bacterias, el cual presenta un amplio espectro de degradación de los hidrocarburos del petróleo. Su proceso de obtención es por vía fermentativa a partir de materias primas sencillas y su tecnología de producción a escala industrial está diseñada para disminuir los costos de acuerdo a los recursos y condiciones disponibles.

La velocidad de degradación de los hidrocarburos contaminantes a través de un proceso de biorremediación varía de acuerdo a las características y naturaleza del petróleo y del sistema impactado. El tiempo de recuperación con la aplicación de BIOIL-FC oscila entre uno y cuatro meses, teniendo en cuenta las condiciones y características de la matriz o sistema tratado, así como el tipo de hidrocarburo. En el mar se ha demostrado su eficacia en periodos entre 30 a 45 días, determinado por las condiciones climáticas, oceanográficas, entre otras. En otros medios acuáticos es importante la capacidad de mezclado y la velocidad de desplazamiento; con recuperación a los 35 a 60 días y en el caso de los suelos entre los 90 a 120 días en dependencia de su composición y condiciones de deterioro.

La primera experiencia fue desarrollada en 1990, en bioensayos a escala de laboratorio y de banco empleando residuales de la Refinería “Nico López” de la Habana y agua de formación de la Empresa de Extracción y Perforación de Petróleo Crudo en Varadero, Cuba. Las experiencias se realizaron en reactores aireados con un volumen de 200 L. Los resultados de estos ensayos demostraron que los cultivos empleados degradaban estos residuales en 19 días comparables a los referidos por el *American Petroleum Institute* (API).

Posteriormente fue desarrollada una tecnología de biorremediación con el producto BIOIL-FC para el tratamiento de derrames accidentales de crudo y sus derivados en diferentes ecosistemas naturales. En 1992 se llevó a cabo por primera vez el tratamiento biológico de un derrame de petróleo en Cuba. La aplicación del BIOIL-FC permitió en solo 21 días reducir la contaminación provocada por un derrame accidental de más de 100 toneladas de petróleo combustible pesado en la Bahía de Cienfuegos.

Además se ha aplicado en otros accidentes ocurridos en diferentes ecosistemas marinos como bahías abiertas, playas y manglares, con resultados de remoción de los hidrocarburos de más del 90%. También el producto ha sido utilizado con éxito para el saneamiento lagunas de oxidación y otros ecosistemas como ríos y ensenadas con excelentes resultados. Se ha demostrado que el proceso de biorremediación con este producto en condiciones naturales no afecta a los ecosistemas por lo que cumple con el principio de la seguridad ambiental donde ha sido aplicado.

## Conclusiones Parciales

El BIOIL-FC es efectivo frente a los hidrocarburos del petróleo en ausencia de fuentes de nitrógeno y fósforo lo cual lo hace más económico y menos tóxico al ambiente marino. Este producto mantiene su capacidad degradadora a altas concentraciones de hidrocarburos (hasta el 8 %) sin añadir nutrientes al medio de transformación (Fonseca, 2002). La aplicación del BIOIL-FC en la biorremediación ha resultado efectiva para reducir los daños ecológicos y



económicos ocasionados por derrames de hidrocarburos, garantizando una rápida recuperación del área impactada a un bajo costo aplicable a cualquier tipo de contaminación con hidrocarburos en diferentes ecosistemas naturales; así como en la industria (Nuñez, 2010).

### **Los 3 peores derrames de petróleo de la historia**

El desastre ambiental que ha vivido el Golfo de México causado por la explosión de la plataforma de perforación en aguas profundas es sin duda un desastre ecológico de proporciones épicas, pero ¿cómo ubicarse entre los peores derrames de petróleo de la historia? Esta lista revela los mayores derrames de petróleo que se produjeron en nuestro planeta.

#### **Colisión entre Atlantic Empress y el Aegean Captain (287,000 toneladas)**

El 19 de julio de 1979, el Mar Caribe frente a la costa venezolana cerca de la isla de Tobago fue el sitio de una tormenta tropical severa. Atrapados en esa tormenta había dos buques: el *Atlantic Empress* (un “superpetrolero” con su carga completa) y el *Aegean Captain*. Ambas embarcaciones colisionaron produciendo una gran explosión y el mayor derrame conocido hasta la fecha producido por el choque de dos barcos. Cerca de 2.2 millones de barriles de petróleo crudo se derramaron en las brillantes aguas azules de Tobago.

La década de 1970 fue el peor decenio en la historia de la humanidad en lo referido a derrames de hidrocarburos en el mar, siendo los derrames del Exxon Valdez y del Amoco Cádiz los que más daños causaron al medio ambiente.

#### **Derrame Ixtoc I (530.300 toneladas)**

Ixtoc I fue un pozo exploratorio de petróleo localizado en el Golfo de México, a 965 kilómetros al sur de Texas y 94 kilómetros de Ciudad del Carmen. El 3 de junio de 1979, sufrió un accidente durante la perforación y se transformó en el derrame no intencional más grande de la historia.

La empresa PEMEX estaba perforando a una profundidad 3.22 kilómetros un pozo de petróleo, cuando se perdió la barrena y la circulación de lodo de perforación. Debido a esto, se perdió la estabilidad y hubo una explosión de alta presión la cual provocó el “reventón”. El petróleo entró en ignición debido a una chispa y la plataforma colapsó.

Las corrientes llevaron el petróleo a las zonas costeras de Campeche, Tabasco, Veracruz y Tamaulipas, y también zonas de Texas resultaron contaminadas, por lo cual Estados Unidos pidió compensación lo cual México rechazó.

Durante los 280 días que siguieron desde el inicio del accidente del Ixtoc-1 (3 de junio de 1979 hasta el 24 de marzo de 1980) se derramó un volumen aproximado de 3.3 millones de



barriles de crudo (530.300 toneladas); de esta cantidad se quemó el 50%, se evaporó el 16 %, se recolectó el 5.4 por ciento y se dispersó el 28%, según informes de Pemex.

### **Derrame de petróleo en el golfo de Pérsico durante la guerra del golfo (entre 1.360.000 y 1.500.000 toneladas)**

El derrame de petróleo producido durante la llamada “Guerra del Golfo” es considerado como el mayor derrame de petróleo en la historia. Se produjo como resultado de las medidas adoptadas por el ejército de Iraq durante la guerra que libraron contra Estados Unidos en 1991.

El incidente causó daños considerables a la fauna del Golfo Pérsico, especialmente en zonas aledañas a Kuwait y el Iraq. Se estima que se derramaron 462 millones de galones de petróleo. La marea negra llegó a un tamaño máximo de **4.242 kilómetros cuadrados** con 12 centímetros de espesor.

Un reciente artículo del New York Times sugiere que se derramaron **36 billones** de galones durante la Guerra del Golfo, cifra que difiere significativamente de las estimaciones antes mencionadas (Velazco, 2003).

### **Consecuencia de los derrames petroleros**

No hace falta ser un experto en medio ambiente para saber que una marea negra causa graves destrozos en el medio ambiente. Las manchas de petróleo en las playas, las aves teñidas de negro y la indignación de la gente afectada por el vertido nos muestran la "cara oscura" de este desastre medioambiental.

Los daños que se producen en este tipo de catástrofes medioambientales dependen no sólo del tipo de hidrocarburo que se vierte, sino también del lugar y las condiciones en las que se produce el accidente.

En estos desastres las corrientes y los vientos juegan un papel especial, porque dependiendo de ellos el vertido ocupará más o menos superficie, es decir, se verá afectada la velocidad de avance de la marea negra. En el caso del Prestige (El Prestige fue un buque petrolero monocasco de Liberia, que operaba bajo bandera de Bahamas, que el 19 de noviembre de 2002 se hundió frente a las costas de Galicia (España), ocasionando un vertido de fueloil que provocó uno de los mayores desastres ecológicos de la historia del país.), las malas condiciones, además de la cantidad de fuel derramado, han hecho que se convierta en la marea negra que más kilómetros de costa ha contaminado.

### **Daños a la vida marina**

Cuando se produce el vertido, el hidrocarburo forma una mancha negra, una lámina que flota sobre el agua. Esta lámina impide que penetre la luz del sol y que se realice la fotosíntesis. Esto causa que los organismos primarios se vean afectados y con ellos toda la cadena alimenticia.



El plancton es la población que se ve afectada de una forma más directa. Estos microorganismos forman parte de la alimentación de muchos otros seres que habitan en el mar, entre ellos se encuentran las grandes ballenas.

Los moluscos bivalvos (mejillones, almejas, etc.) no han desarrollado la capacidad de asimilar ni eliminar el hidrocarburo, por lo que a pequeñas concentraciones de hidrocarburo en el agua, estos organismos se ven afectados seriamente

En el caso de los peces, encontramos diferentes comportamientos dependiendo de las especies. Existen peces que a 1000 ppm (partes por millón) no se ven afectados, y sin embargo existen larvas que ha pequeñas concentraciones de hidrocarburos mueren. El hidrocarburo afecta a sus estructuras respiratorias y mueren. Si logran sobrevivir, el petróleo se transmitirá a las especies que se alimenten de ellos.

Los cetáceos en principio no se tendrían que verse muy afectados de forma directa, puesto que se cree que son capaces de detectar una mancha de petróleo que flota en el agua y desviar su trayectoria. Pero sin embargo, como hemos dicho anteriormente, las grandes ballenas se ven afectadas de forma indirecta al desaparecer su alimento, el plancton.

Las poblaciones de cetáceos más pequeños y costeros, como los delfines, si se han detectado daños, por ejemplo con el derrame del Prestige, se han encontrado delfines muertos con una gran cantidad de petróleo pegado a su piel. Para estos animales también las barreras de contención que se colocan en la costa para detener el avance del petróleo, también son un peligro, puesto que quedan atrapados en ellas como si se tratase de unas redes.

Sin embargo lo que siempre hemos visto en los medios de comunicación son las aves impregnadas de hidrocarburo. Estos animales mueren por congelación puesto que el petróleo en sus plumas no permite el aislamiento térmico ni la impermeabilización de su cuerpo. La mayoría de aves que se encuentran "petroleadas" mueren en pocos días debido al mal estado en el que se encuentran. En las grandes catástrofes que han ocurrido en la historia han muerto miles y miles de aves por el derrame.

Como hemos señalado anteriormente los daños producidos por un vertido de hidrocarburo son diferentes dependiendo de las condiciones en las que se produzcan, del sitio y del tipo y cantidad de hidrocarburo derramado. Para determinar y cuantificar el desastre es necesario un estudio detallado de cada caso. Para saber el tiempo necesario de recuperación del lugar y de las poblaciones se requiere un seguimiento de la zona dañada y un monitoreo constante.

## **Daños al ecosistema terrestre**

Cuando la marea negra llega a las costas las playas se tiñen de negro y las rocas se cubren de una película de hidrocarburo. El crudo se introduce entre los granos de arena y penetra en el suelo, en este momento se produce la contaminación del terreno. Los seres vivos más afectados son los invertebrados que habitan en este ecosistema. Las poblaciones intersticiales que viven en este hábitat mueren.

La película de crudo forma una capa que impide el crecimiento de nuevas plantas y animales. Por eso la limpieza de las playas y líneas de costa son necesarias limpiarlas en profundidad para evitar que el hidrocarburo permanezca en el medio.





## Daños a la economía

Las pérdidas económicas asociadas a los vertidos de petróleo al medio marino son descomunales. Toda una población costera se puede ver afectada en mayor o menor medida. En los pueblos y ciudades costeras la pesca juega un papel importante en la economía del lugar. Al producirse un vertido de hidrocarburo los bancos de pesca se ven afectados. Pero también los animales que viven en las rocas y superficies (percebes, mejillones, marisco en general), así como la flora acuática.

La transformación de bellos paisajes en negros lugares manchados de hidrocarburos, hacen que el turismo se resienta y las actividades que dependen de él sufran grandes pérdidas económicas (hoteles, restaurantes, tiendas, etc.).

En estos casos las indemnizaciones son el único recurso que les queda a los pescadores que se ven afectados. Un plan para que el pago de estas indemnizaciones sea rápido y eficaz es lo que denuncian estas comunidades pesqueras (Nuñez, 2010).

## Conclusiones

En este trabajo se pudieron determinar los diferentes aspectos que hacen hoy en día de la biorremediación la técnica más eficaz para enfrentar desastres ecológicos que implican vertimiento de hidrocarburos u otros contaminantes en ambientes marinos. Se conceptualizó de manera precisa el término biorremediación. Se explicó las diferentes variantes de este método además de sus principales técnicas, que lo proponen como un método de uso extensivo debido al poco impacto ambiental que es capaz de generar el mismo y las grandes perspectivas que presenta en un futuro. También se mencionaron las grandes ventajas de la biorremediación, así como sus desventajas, dado que ningún sistema es ideal. Se demuestra la estrecha relación que existe entre la biorremediación y la biotecnología debido a la amplia utilización que están teniendo los microorganismos modificados genéticamente en las labores de saneamiento. Finaliza con un breve recorrido por lo que ha sido y en lo que se está convirtiendo la biorremediación como instrumento de trabajo para los distintos especialistas que atienden las afecciones marítimas antes mencionadas en Cuba, a través de un producto vanguardia como es el BIOIL-FC.



## Bibliografía

- Díaz, G *Biorremediación: Organismos que limpian el ambiente* [on-line], 2013 [citado: noviembre 25 de 2013], Disponible en: <http://www.vecinoscatan.com.ar/Word/Biorremediacion.doc>.
- Fonseca, E. *Biorremediación de hidrocarburos en ausencia de fuentes de nitrógeno y fósforo* [on-line], 2002 [citado: noviembre 25 de 2013], Disponible en: [http:// www.oceandocs.org](http://www.oceandocs.org).
- Lorenzo, E. *Biorremediación* [on-line], 2012 [citado: noviembre 25 de 2013], Disponible en: [http:// http://www.uah.es/tejedor\\_bio/bioquimica](http://www.uah.es/tejedor_bio/bioquimica).
- Nuñez, R. *Revista Electrónica de la Agencia de Medio Ambiente – Biorremediación de la contaminación de petróleo en el mar* [on-line], 2010 [citado: noviembre 23 de 2013], (Cuba) Disponible en: [http:// www.ama.redciencia.cu/articulos/19.02.pdf](http://www.ama.redciencia.cu/articulos/19.02.pdf).
- Sepúlveda, L. *Evolución de la Biorremediación en Ambientes Contaminados* [on-line], 2011 [citado: noviembre 26 de 2013], Escuela de Organización Industrial, (España) Disponible en: [http:// www.eoi.es/.../evolucion-de-la-biorremediacion-en-ambientes-contaminados](http://www.eoi.es/.../evolucion-de-la-biorremediacion-en-ambientes-contaminados).
- Schoeder, Terra Latinoamericana – *Potencial de la biorremediación de suelo y agua impactados por petróleo en el trópico mexicano* [on-line], 1990 [citado: noviembre 25 de 2013], (Mexico) Disponible en: [http:// www.redalyc.org/pdf/573/57317209](http://www.redalyc.org/pdf/573/57317209).
- Velazco, J. *Gaceta Ecológica 2003 – El Composteo: Una alternativa tecnológica para la biorremediación de los suelos en Mexico* [on-line], 2003 [citado: marzo 30 de 2010], (Mexico) Disponible en: [http:// www.dialnet.unirioja.es/servlet/articulo](http://www.dialnet.unirioja.es/servlet/articulo).

