

GESTIÓN Y BIORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS EN ANTÁRTIDA

Lucas Ruberto, Lucas Martínez Álvarez,
Francisco Massot y Walter Mac Cormack

ABSTRACT

El continente antártico era considerado hasta hace unos años como un sitio prístino. Sin embargo, la actividad humana allí ha cambiado esta condición, siendo la contaminación por hidrocarburos una problemática que genera atención y preocupación. Suelos de las inmediaciones de las bases muestran diferentes niveles de contaminación por combustibles derivados del petróleo, principalmente gasoil. La biorremediación es una técnica probada y eficiente para remover hidrocarburos contaminantes del suelo. La bioestimulación en biopilas constituye la estrategia más eficiente y probada para suelos antárticos aprovechando el potencial catabólico de los microorganismos, mientras que las ecopilas aparecen como una opción superadora que integra al proceso a sistemas biológicos más complejos como son las plantas vasculares, con el fin de lograr mayores niveles de remoción. Por último, surge como reflexión que es necesario desarrollar una logística específica adecuada para acortar los tiempos de ejecución de estos innovadores tratamientos de biorremediación.

PALABRAS CLAVES

Bioremediación, suelos antárticos, bacterias degradantes de hidrocarburos, biopilas.

INTRODUCCIÓN

La Antártida es el único continente del planeta para el cual la intención de preservarlo en su totalidad del daño antrópico fue consensuada y documentada. Para ello, los países signatarios del Tratado antártico (Antarctic Treaty, 1959) suscribieron también el protocolo sobre protección del medio ambiente, conocido como protocolo de Madrid (Secretariat of the Antarctic Treaty, 1991). A pesar de esta manifestación de intención y de las acciones que se implementaron en consecuencia, la Antártida no quedó completamente exenta de los efectos perjudiciales de la actividad humana. Por un lado, fenómenos naturales asociados al movimiento de los océanos y masas de aire, así como la fauna migrante transportan contaminantes desde otras partes del globo hasta la región del planeta que se encuentra por debajo del paralelo 60 de latitud sur. Por otro lado, las numerosas bases científicas permanentes y temporarias (COMNAP, 2017), la logística que las sostiene así como la navegación turística (y pesquera) introducen en el ambiente antártico compuestos contaminantes cuya presencia perdura en el tiempo y afecta al ecosistema (Bargagli, 2008; Aronson et al., 2011). De este modo, metales pesados (Bargagli et al., 1998; Espejo et al., 2014; Chu et al., 2019), hidrocarburos (Jackie M. Aislabie et al., 2004; Saul et al., 2005; Curtosi et al., 2007; Kukučka et al., 2010; Mac Cormack et al., 2011) y plásticos (do Sul et al., 2011; Lacerda et al., 2019) son frecuentemente reportados como compuestos contaminantes en el ambiente antártico, alertando a la humanidad respecto a uno de los impactos de la actividad humana sobre esa región.

En el continente antártico, las condiciones climáticas exigentes para la homeostasis térmica del ser humano, así como la tecnificación de las instalaciones, demandan un suministro de energía eléctrica permanente y confiable. Fuentes de energía renovable como el hidrógeno, la solar y eólica han sido evaluadas y en algunos casos utilizadas en ciertas bases (Marschoff, 1998; Henryson and Svensson, 2004; Tin et al., 2010) representando esto un gran progreso técnico. Sin embargo, hasta el día de hoy la generación de electricidad y calor a partir de combustibles fósiles, gasoil fundamentalmente, no ha podido ser reemplazada en su totalidad, sobre todo por dos de sus virtudes: eficiencia y confiabilidad. La energía termoeléctrica se obtiene utilizando motores de combustión interna y generadores de inducción. Esta tecnología es simple, conocida y fácil de mantener desde el punto de vista mecánico (Diesel Technology Forum, 2013; Fairfax et al., 2020). La densidad energética de los combustibles fósiles en general y del gasoil en particular es elevada y eso constituye una gran ventaja que impacta en el costo de la energía producida (Layton, 2008). Por otro lado, los motores diesel tienen una vida útil prolongada (aproximadamente 30.000 hrs para primera revisión profunda, dependiendo de modelo y calidad) y dado su costo, puede disponerse de unidades de respaldo en caso de falla o mantenimiento. Su capacidad de generación de energía no depende de las condiciones climáticas y por eso su provisión puede ser continua, estable y constante. Sin embargo, esta matriz energética dependiente de combustibles fósiles demanda un aparato logístico que la sostenga y que involucra costos significativos asociados principalmente al transporte, que en algunos casos llega a triplicar el valor de compra (Olivier et al., 2008). El consumo anual de gasoil se estima en millones de litros para todo el continente antártico. La base McMurdo por ejemplo, tiene requerimientos de gasoil que rondan los 5 millones de litros, mientras que bases más pequeñas consumen alrededor de 300000 L por año (Tin et al., 2010). Entre las bases argentinas, Marambio tiene requerimientos de gasoil que rondan el millón de litros por año mientras que Carlini utiliza cerca de 300.000 L.

Los hidrocarburos del petróleo representan el conjunto de contaminantes más habitualmente reportados en Antártida y son motivo de preocupación para todos los programas nacionales que desarrollan actividades allí. Más allá de la confiabilidad de los sistemas de generación de energía termoeléctrica, el uso, transporte y almacenamiento de gasoil representa un riesgo permanente de introducción de hidrocarburos en el medio ambiente, tanto en las bases como en las rutas marinas por las que se accede a ellas. Eventos como el del Bahía Paraíso en 1989 (Kennicutt et al., 1991, 1992), el Patriarcho en 2001 o el Explorer en 2007, entre varios otros (Ruoppolo et al., 2013) muestran que este riesgo es real y que sus consecuencias sobre los ecosistemas son, en algunos casos, severas.

Existen medidas de contención y herramientas para intervenir cuando un derrame de combustible ocurre en el mar. Barreras y bombas de extracción permiten circunscribir el problema y recuperar la mayor parte del material vertido antes que alcance costas y afecte a la fauna. También existe la opción de agregar dispersantes que actúen sobre los hidrocarburos rompiendo la película hidrofóbica que forman, atenuando de esta manera sus efectos perjudiciales y facilitando su degradación por mecanismos bióticos o abióticos. Sin embargo, estas operaciones solo son factibles si las condiciones meteorológicas y de navegabilidad lo permiten.

Cuando el derrame ocurre en suelos las estrategias de contención a aplicar son diferentes. Una gran parte de las bases antárticas se encuentran en zonas costeras. Esto significa que un derrame no contenido puede escurrir o lixiviar hacia la costa, afectando a la fauna que ocupa esa zona costera, o terminando en el mar donde, de no contarse con los medios adecuados, sus daños son más difíciles de mitigar. Por esta razón, en caso de ocurrir un derrame que afecte primariamente al suelo, es conveniente contenerlo en la capa superficial de mismo ya que allí puede ser tratado con relativa sencillez mientras que en el mar o sedimentos el tratamiento es más complejo y su recuperación en muchos casos, imposible. Para ello, el uso de materiales absorbentes y la construcción de barreras o terraplenes de contención son una opción adecuada.

La contención y recuperación del líquido constituye la primera fase de la respuesta técnica y operativa que puede desplegarse frente a un derrame de hidrocarburos. A fin de mantener el ambiente antártico libre o lo más libre posible de contaminación, es necesario remover los contaminantes que son vertidos en el mismo. Cuando se trata de suelos, esta situación puede resolverse de dos maneras diferentes. Por un lado, excavando el suelo contaminado y trasladándolo fuera del continente antártico para su tratamiento y devolución al sitio de origen, en el mejor de los casos, o para su disposición final en otro sitio. Este abordaje, si bien en primera instancia podría parecer una solución, resulta drástico tanto debido a su costo como a la complejidad logística asociada. Además, esa remoción de suelo constituye un impacto ambiental severo que modifica las condiciones naturales logradas por la naturaleza a través de procesos edafogénicos bióticos y abióticos de cientos o miles de años de duración (Beyer et al., 1995, 2000; Blume et al., 2002; Ugolini and Bockheim, 2008). En caso de tener la intención de devolverlo a su lugar de origen, hay que considerar nuevamente los costos de ese traslado y el hecho que el suelo estuvo expuesto a temperaturas, aire, flora y microflora alóctona. Por esas razones, y sin considerar tratamientos que cambien drásticamente la composición del material, el suelo que podría devolverse a su lugar de origen luego de un tratamiento fuera de Antártida sería una versión muy diferente a la original. En resumen, la devolución, salvo tratamientos muy sofisticados, no parece una alternativa viable en un continente tan particular como el antártico. Como alternativa

puede considerarse el tratamiento del suelo contaminado sin removerlo (in situ) o removiéndolo, pero sin trasladarlo (on-site).

Los métodos fisicoquímicos más comúnmente citados son la desorción térmica, el lavado y la oxidación química. Estos métodos presentan la ventaja de ser relativamente rápidos, pudiendo resolver el evento de contaminación en cuestión de días. Sin embargo, presentan dos grandes desventajas que se magnifican cuando la matriz a remediar se encuentra o proviene de Antártida. Por un lado, son costosos y a ese costo hay que sumarle el de transporte de la maquinaria necesaria y/o del suelo en caso de que el tratamiento no sea aplicable en Antártida. Por el otro, modifican profundamente las características del suelo incluso llegando a eliminar completamente a las comunidades microbianas autóctonas que lo habitan. Por ejemplo, los tratamientos térmicos, que alcanzan los 100 a 300°C en su versión suave y entre 300 y 550°C en su versión fuerte) destruyen o modifican las fracciones tanto mineral como orgánica de los suelos, alejándose del ideal de restablecer las condiciones originales del mismo (Vidonish et al., 2016). Los métodos de oxidación consisten en agregar al suelo una combinación de reactivos químicos para atacar a los compuestos orgánicos presentes en el mismo. Los más comúnmente referidos son los basados en la reacción de Fenton, que utilizan una combinación de peróxido de hidrogeno (H₂O₂) y hierro (Fe²⁺ o Fe³⁺) o aquellos cuyo reactivo principal es el persulfato (S₂O₈²⁻) (Palmroth, 2006; Palmroth et al., 2006; Yang et al., 2020). El principal inconveniente de estos métodos es la falta de especificidad de la reacción de oxidación, que degradada toda la materia orgánica sin distinguir si se trata de compuestos contaminantes o componentes naturales del suelo a tratar. Esto hace que el material resultante sea muy diferente al suelo original. El lavado consiste en una remoción parcial o total de los contaminantes utilizando una mezcla de agua y surfactantes que son puestos en contacto con el suelo a tratar y forzados a interaccionar con agitación mecánica (Kostecki et al., 2004; Fernández Rodríguez et al., 2014). Estos procesos también adolecen de inespecificidad ya que remueven por igual contaminantes y materia orgánica, así como también compuestos minerales solubles en agua. Adicionalmente, generan una nueva matriz (el agua de lavado en este caso) contaminada que requerirá un tratamiento adecuado. El lavado, sin embargo, a diferencia de los otros métodos fisicoquímicos, no resulta letal o tóxico para la comunidad microbiana autóctona y por esa razón podría combinarse con un método biológico.

En este escenario, el uso de herramientas biológicas (principalmente bacterias, hongos y plantas) que posean la capacidad de degradar o reducir los niveles de hidrocarburos preservando las características originales del suelo resulta imprescindible para llevar a cabo la remediación. Este aprovechamiento de seres vivos o sistemas biológicos (si es que tenemos en cuenta el uso de enzimas) para reducir matrices contaminadas es lo que se conoce como biorremediación y es una de las disciplinas más importantes de la biotecnología aplicada al cuidado del medio ambiente (Vallero, 2010).

El conjunto de métodos que constituyen la biorremediación presenta numerosas ventajas, ya que son considerablemente menos costosos que otras técnicas basadas en principios físicos o químicos (además de que pueden acoplarse a ellas); son simples de realizar y permiten su aplicación "in-situ". Por ser métodos basados en la actividad biológica, se encuentran afectados o modulados por factores ambientales. Entre ellos, la baja temperatura es de particular relevancia, disminuyendo la velocidad de las reacciones bioquímicas. Por esta razón, y en particular en sitios tan extremos como aquellos en Antártida, los procesos biológicos de remoción de contaminantes pueden conllevar tiempos más

largos. Pese a esto, la buena relación costo/beneficio y el hecho de ser una técnica muy amigable con el medio ambiente para la recuperación de pasivos ambientales, hacen que sea muy factible de aplicar en el continente blanco.

Entre las medidas y sugerencias que emanan del protocolo de protección ambiental para Antártida es de relevancia la prohibición de introducción de especies alóctonas en ese continente. Esta medida busca preservar la biodiversidad evitando (al menos limitando) el ingreso de especies potencialmente invasoras que cambien la composición de las comunidades autóctonas. Por esta razón, cualquier proceso de biorremediación debe diseñarse, planificarse y ejecutarse utilizando exclusivamente microorganismos autóctonos. Esta restricción impone la necesidad de obtener y desarrollar herramientas biológicas autóctonas adecuadas para remover contaminantes del ambiente antártico. Existen diferentes abordajes o estrategias que pueden aplicarse para eliminar contaminantes a través de métodos basados en sistemas biológicos, así como múltiples variantes y combinaciones de estas. Entre ellos, la bioestimulación es el más comúnmente referido. Consiste en explotar el potencial de la comunidad microbiana autóctona que habita el suelo contaminado favoreciendo su desarrollo y actividad catabólica. Esto se logra proveyendo nutrientes (oxígeno, nitrógeno y fósforo) en cantidades adecuadas y suficientes para que los microorganismos puedan utilizar las moléculas contaminantes como sustrato. Esta estrategia se fundamenta en la existencia en el suelo a tratar de cantidades suficientes de células microbianas con capacidad para degradar los contaminantes. Esta limitación es poco frecuente en suelos, ya que la amplia diversidad de microorganismos que allí habitan presenta un espectro muy versátil de vías metabólicas, sobre todo en los casos de contaminación crónica. Para el caso que esto no sea cierto, puede recurrirse al bioaumentación, que consiste en agregar al suelo contaminado microorganismos capaces de degradar los contaminantes. Mas allá de estas dos estrategias, también es de relevancia el uso de plantas para mejorar la eficiencia de la biorremediación. A estos procesos que involucran el uso de especies vegetales se los denomina genéricamente como fitorremediación.

La biorremediación es posible en Antártida y existen numerosos ejemplos de esta tecnología aplicada al tratamiento de suelos contaminados más allá del paralelo 60°.

Estrategias de biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos aplicadas en Antártida
Dentro de las estrategias de biorremediación, la bioestimulación es la que reporta mejores resultados y eficiencias en la remoción de hidrocarburos derivados del petróleo en suelos. Como se mencionó en el párrafo anterior, la bioestimulación consiste en optimizar las variables que puedan resultar limitantes para el desarrollo microbiano como pueden ser las concentraciones de nutrientes (Nitrógeno y Fósforo principalmente), el contenido de agua en el suelo (humedad), la disponibilidad de oxígeno y la temperatura. Dentro de estas variables, se ha demostrado que balancear la relación Carbono:Nitrógeno:Fósforo (C:N:P) resulta clave para obtener procesos de eficientes, incluso en suelos antárticos (Martínez Álvarez et al., 2015).

Para el caso del bioaumentación los microorganismos a inocular deben poseer la capacidad de poder degradar parcial o totalmente el contaminante presente. Suele utilizarse cuando el suelo no contiene microorganismos que puedan llevar a cabo la remediación, o cuando dicha velocidad sea muy baja. La utilidad y eficiencia de esta estrategia es muchas veces controversial, ya que en muchas ocasiones

los microorganismos agregados no logran establecerse en el suelo (compiten con los ya habitantes del suelo, que están mucho mejor adaptados a ese entorno). Sin embargo, en algunas ocasiones esta técnica se puede implementar conjuntamente a la adecuación de variables (bioestimulación + bioaumento), mejorando los niveles de remoción obtenidos. Una variación del bioaumento es la inoculación con bacterias capaces de producir surfactantes. Los surfactantes son esencialmente detergentes, que permiten aumentar la disponibilidad de las bacterias al hidrocarburo al generar una especie de emulsión que favorece la degradación de compuestos orgánicos (Mac Cormack and Fraile, 1997). Tal como se mencionó anteriormente, en el continente antártico hay que considerar que el Protocolo Ambiental de Madrid (1991) impide la introducción de especies de otras partes del mundo, por lo que, para llevar a cabo esta estrategia, es imprescindible el uso de microorganismos autóctonos del continente blanco.

Al momento de tener que aplicar una de estas estrategias en suelos contaminados del continente antártico, ya no sólo ha de considerarse el aspecto científico, sino que también es necesario tener en cuenta cómo transferir el conocimiento adquirido y gestado en un laboratorio, a un escenario real que requiere de aplicación concreta. Este salto tecnológico es imprescindible con el fin de lograr un servicio concreto para el ecosistema antártico: la recuperación del suelo frente a eventos de contaminación. Esta transferencia del laboratorio al campo es siempre difícil, ya que hay numerosas variables que no pueden controlarse, pero es particularmente compleja en Antártida debido a las extremas condiciones climáticas allí presentes.

Un formato que ha demostrado buenos resultados para la biorremediación de suelos en ambientes extremos es la utilización de biopilas (McWatters et al., 2016; Martínez Álvarez et al., 2017). Las biopilas consisten en un tratamiento “on-site” en el que el suelo contaminado es excavado y dispuesto en pilas o montones en un área de tratamiento determinada (generalmente en las inmediaciones del sitio de origen), que debe ser aislada del suelo circundante de manera de evitar el lixiviado del contaminante. En estas pilas también se favorece la biodegradación microbiana mediante la aireación (por mezclado o forzada), el agregado de nutrientes (la bioestimulación) o el ajuste de la humedad. Estas pilas suelen a su vez estar cubiertas, favoreciendo el aumento de la temperatura del suelo y el mantenimiento de la humedad en un nivel relativamente estable. Por otro lado, evitan la pérdida de nutrientes e hidrocarburos por lixiviación o lavado. Estas características son muy deseables para los tratamientos en bases antárticas, ya que de otra manera las bajas temperaturas, la cobertura por nieve o la modificación de la humedad podrían reducir drásticamente la eficiencia de estos procesos.

Este tipo de procesos han sido aplicados en el Ártico (Mohn et al., 2001; Gomez and Sartaj, 2013) y se ha estado desarrollando también de manera exitosa en bases antárticas en los últimos años. Principalmente Argentina y Australia (ambos miembros signatarios originales del Tratado Antártico) han implementado estas estrategias frente a eventos de contaminación por Gas Oil Antártico en sus bases (Tabla 1). Carlini (Arg.), Davis (Aus.) y Casey (Aus.), son algunas de las estaciones científicas en donde se han implementado exitosamente procesos de biorremediación de suelos (recuperando en algunos casos más de 10.000kg de suelo contaminado), demostrando que ambos países se encuentran a la vanguardia de la investigación y transferencia del conocimiento para prevenir, contener, mitigar y remediar el impacto antrópico en el continente blanco.

UNA ALTERNATIVA AÚN INEXPLORADA: LA FITORREMEDIACIÓN Y USO DE ECOPILAS

La península antártica es una región que difiere del resto del continente por poseer un clima, flora y fauna característicos. Si bien el clima es inhóspito para la mayoría de los organismos, en la extensión de este territorio se pueden encontrar las dos plantas vasculares consideradas autóctonas del continente, que son la *Deschampsia antarctica* y el *Colobanthus quitensis*. Estas plantas prosperan fundamentalmente en áreas costeras libres de hielo (Antártida marítima), que representan aproximadamente un 2% de la superficie del continente, y es en donde se llevan a cabo la mayoría de las actividades antrópicas.

La existencia de este recurso biológico permite la exploración de nuevos potenciales biotecnológicos en el campo de la biorremediación, mediante la aplicación de procedimientos que involucren al suelo contaminado, a estas especies vegetales y a los microorganismos asociados a ellas. Llamamos de forma general a todos estos procesos como métodos de fitorremediación. En la fitorremediación, se incrementa la velocidad de degradación del contaminante en el suelo como consecuencia de un aumento del número y de la actividad catabólica de los microorganismos que viven en la zona de influencia de la raíz, denominada rizosfera. Este tipo de procesos entonces explota la interacción sinérgica entre plantas y microorganismos para eliminar completamente o mitigar los efectos nocivos de los contaminantes en el ambiente

La fitorremediación tiene ciertas ventajas por sobre el resto de los procesos de biorremediación. Algunas generales ya fueron discutidas, pero otras merecen ser mencionadas: Son compatibles con otras tecnologías de remediación. Esto es, se pueden implementar conjuntamente o en tándem con los procesos de bioaumento o bioestimulación, o incluso con algún método fisicoquímico, por nombrar algunos. Son fáciles de mantener y por esto su implementación es simple. Muchas veces sólo requieren de irrigación y de un cuidado sanitario general. Si pensamos en el continente antártico, el trabajo de mantenimiento se reduce aún más, ya que las especies vegetales están muy bien adaptadas al clima y no existen otras especies que puedan actuar como malezas, ni patógenos relevantes que compitan por sustrato y nutrientes. La implantación de especies vegetales en suelos desprovistos de éstas (ya sea por estar muy contaminados o por no haber poseído originalmente cobertura vegetal), permite mejorar las propiedades de este al aportar el sistema radicular un incremento en la aireación, cambios en la estructura y un aumento de la actividad microbiológica, entre otros.

Tanto *D. antarctica* como *C. quitensis* prosperan fundamentalmente en áreas costeras libres de hielo y, en algunas zonas propicias, generan grandes tapetes verdes. *D. antarctica* pertenece a la familia Poaceae, y el género está compuesto por entre 30 y 40 especies (anuales y perennes) distribuidas en ambos hemisferios. Durante noviembre germinan las semillas y las matas del año anterior se recuperan. Esta planta es también capaz de crecimiento vegetativo, extendiendo las matas. Su capacidad de propagación es asombrosa. Se ha reportado que un individuo de esta especie puede reestablecerse y prosperar luego de ser transportada a otro sitio (Parnikoza et al., 2009). Esto le da la capacidad de establecer nuevas matas cuando individuos son arrastrados por el viento o trasladados por aves. Adicionalmente, estudios con otras especies de *Deschampsia* han demostrado que esta familia presenta tolerancia a ciertos niveles de hidrocarburos (Macoustra et al., 2015). Estas características hacen de *D. antarctica* una herramienta biotecnológica con características adecuada para remediación

*

de suelos contaminados con hidrocarburos, ya que plantines crecidos bajo condiciones controladas o tomados de sitios densamente poblados pueden ser trasplantados al suelo a remediar y de allí, establecerse, proveyendo las ventajas que se asocian a la presencia de una planta en la remoción de contaminantes. También se ha reportado que la inoculación de *D. antarctica* con bacterias tolerantes a la baja temperatura y alta salinidad, mejora la respuesta de la planta frente al estrés producido por ambientes extremos (Gallardo-Cerda et al., 2018). Esos resultados sugieren que la búsqueda de microorganismos tolerantes a condiciones ambientales antárticas que además sean capaces de promover el crecimiento vegetal permitirá incrementar la probabilidad de éxito de la implantación y, en consecuencia, del sistema de remediación.

Relevamientos recientes registraron matas de *D. antarctica* asociadas a suelos crónicamente contaminados con gasoil antártico en la base argentina Carlini. Durante la campaña antártica de verano (CAV) 2019-2020 determinó en algunos de estos suelos concentraciones de hidrocarburos totales del petróleo de alrededor de 1.000 mg Kg⁻¹. Estos antecedentes y los anteriormente mencionados, hacen de *D. antarctica* una especie potencialmente candidata a ser utilizada en un sistema de fitorremediación de hidrocarburos para suelos antárticos, ya que es requisito necesario, el contar con una especie vegetal que pueda soportar las concentraciones de hidrocarburos en los suelos que se quieren remediar.

Para el diseño de un proceso de fitorremediación, contar con una especie vegetal tolerante al contaminante es solamente el comienzo. El proceso de desarrollo de una estrategia de fitorremediación exitosa requiere de conocer cuáles son las dosis máximas de contaminante que puede tolerar el sistema, contar con microorganismos que degraden los hidrocarburos y que, asociados a la especie vegetal, pueda establecerse a lo largo del tiempo en el suelo y en su sistema radicular. Por último, un diseño de aplicación que contemple en este caso los volúmenes y el manejo del suelo, así como también las peculiaridades del clima.

El grupo de Microbiología ambiental del IAA se encuentra actualmente trabajando en todos los aspectos anteriormente mencionados para el desarrollo de una estrategia de fitobiorremediación específica, conocida como ecopila (Figura 2). Una ecopila consiste en el confinamiento del suelo contaminado mediante el uso de una membrana, a la cual se le provee aireación para favorecer los procesos aeróbicos microbianos y mientras que en su parte superior se implantan individuos de la especie vegetal inoculada con los microorganismos degradadores y promotores del crecimiento vegetal. Adicionalmente, se agregan nutrientes al suelo para estimular el crecimiento y actividades metabólicas de los microorganismos, y favorecer el desarrollo vegetal (Germaine et al., 2015). De esta forma, la ecopila es un diseño que combina bioestimulación y fitorremediación asistida por microorganismos, característica técnica superadora que posee la fitorremediación.

LOGÍSTICA ASOCIADA A LA BIORREMEDIACIÓN DE SUELOS EN ANTÁRTIDA

Atenuar el impacto de los eventos de contaminación con hidrocarburos en Antártida depende tanto de los desarrollos tecnológicos que buscan dar respuesta al requerimiento de métodos de remediación como de los procedimientos logísticos asociados.

Por cuestiones climáticas fundamentalmente, los tratamientos de biorremediación se ejecutan durante el período estival, así como también las tareas de reabastecimiento. Es durante el verano, cuando los suelos están con una cobertura nívea nula o mínima, se realiza el movimiento de los mayores volúmenes de combustibles hasta su almacenamiento. En caso de ocurrir un derrame que afecte al suelo durante estas operaciones, pudiendo contenerse y removerse con relativa facilidad para ser dispuesto para su tratamiento. Sin embargo, durante el resto de las estaciones del año los materiales y los errores humanos en el manejo y trasvase de combustibles son más frecuentes, sobre todo por las condiciones de temperatura que son exigentes para los materiales y las personas. Por esta razón es necesario y conveniente la existencia de procedimientos para la recolección, el acopio y disposición de los suelos contaminados hasta el momento del tratamiento. La presencia de maquinaria pesada o semi pesada facilita la construcción de taludes de contención, así como la remoción del material contaminado. Por otro lado, contar con stock de geomembrana que permite una ejecución temprana del tratamiento, cuando el evento de contaminación no ha envejecido, los hidrocarburos se encuentran menos adsorbidos a las partículas de suelo y por ende más biodisponibles que en un suelo envejecido.

Una cuestión no menor por considerar es que para poder diseñar y ejecutar un tratamiento de biorremediación de manera racional es necesario conocer la concentración de hidrocarburos en el suelo afectado. Para ello resulta conveniente contar en la base con equipamiento especializado (Cromatografía gaseosa o espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier) y personal instruido para realizar un muestreo robusto y significativo del suelo a tratar, así como para realizar la determinación analítica del contenido de hidrocarburos. De esa manera, el tiempo de respuesta entre el momento en que ocurre el evento de contaminación y el momento en que se comienza el tratamiento de biorremediación, puede acortarse significativamente con el consecuente beneficio que esto implica.

CONCLUSIONES

Para los países comprometidos con el cuidado de la calidad medio ambiental en Antártida es indispensable contar con tecnologías y procedimientos específicos para el tratamiento y recuperación de suelos contaminados. En ese sentido, las biopilas bioestimuladas mostraron ser una estrategia adecuada para las condiciones estivales antárticas proveyendo un sistema contenido que impide el lixiviado y además protege a la flora microbiana degradadora de hidrocarburos. Las ecopilas surgen como una versión superadora que permitiría una eficiencia de remoción aún mayor. Ambos tipos de tratamiento respetan la prohibición de introducir especies alóctonas y centran su potencial en la actividad de micro (bacterias y hongos) y macroorganismos (D. antártica).

A fin de disminuir el impacto de los hidrocarburos en el ambiente antártico, parece conveniente que las bases deben cuentan con un procedimiento de respuesta ante derrames, así como de un protocolo eficiente de biorremediación.

**GESTIÓN Y BIORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS
CON HIDROCARBUROS EN ANTÁRTIDA**

Base	País	Configuración	Estrategia de biorremediación	Cantidad de suelo (kg)
				860
Carlini	Argentina	Biopilas	Bioestimulación	860
Carlini	Argentina	Biopilas	Bioestimulación	14,000
Carlini	Argentina	Biopilas	Bioestimulación	1,700,000
Casey	Australia	Biopilas	Atenuación natural + Bioestimulación	
Concentración inicial del contaminante (ppm)		Eficiencia del proceso (%)	Referencia	
2,180		75.79	Martinez Alvarez et al 2017	
6,098		55.04	Martinez Alvarez et al 2020	
3,735		No publicado	No publicado	
3,531		74.31	Mc Watters et al 2016	

Tabla 1. Ejemplos de tratamientos de biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos en sistema de biopilas en bases antárticas



Imagen 1. Tanques de almacenamiento de gasoil en la base Argentina Marambio expuestos a condiciones ambientales invernales.

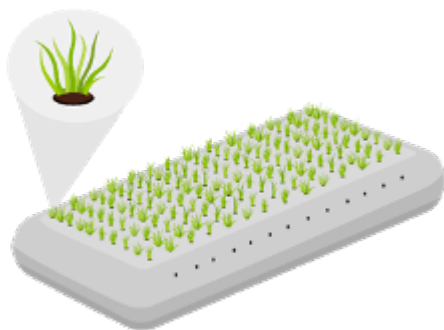


Imagen 2. *Diseño conceptual de una ecopila. El volumen de suelo a tratar se coloca en una membrana impermeable de dimensiones laterales a establecerse en función de la cantidad de suelo, y de profundidad aproximada de 30 cm. Se hacen orificios en la parte superior por donde se implantan los ejemplares de *D. antarctica* y se perforan los laterales de lado a lado para colocar tubos que permitan la aireación constante del suelo de manera pasiva.*

REFERENCIAS

- Antarctic treaty* (1959).
- Aronson, R.B., Thatje, S., McClintock, J.B., and Hughes, K.A. (2011) *Anthropogenic impacts on marine ecosystems in Antarctica*. *Ann N Y Acad Sci* 1223: 82–107.
- Bargagli, R. (2008) *Environmental contamination in Antarctic ecosystems*. *Sci Total Environ* 400: 212–226.
- Bargagli, R., Monaci, F., Sanchez-Hernandez, J.C., and Cateni, D. (1998) *Biomagnification of mercury in an Antarctic marine coastal food web*. *Mar Ecol Prog Ser* 169: 65–76.
- Beyer, L., Pingpank, K., Wriedt, G., and Bölter, M. (2000) *Soil formation in coastal continental Antarctica (Wilkes Land)*. *Geoderma* 95: 283–304.
- Beyer, L., Sorge, C., Blume, H.P., and Schulten, H.R. (1995) *Soil organic matter composition and transformation in gelic histosols of coastal continental antarctica*. *Soil Biol Biochem* 27: 1279–1288.
- Blume, H.-P., Beyer, L., Kalk, E., and Kuhn, D. (2002) *Weathering and Soil Formation*. In *Ecological Studies*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 115–138.
- Chu, W.L., Dang, N.L., Kok, Y.Y., Ivan Yap, K.S., Phang, S.M., and Convey, P. (2019) *Heavy metal pollution in Antarctica and its potential impacts on algae*. *Polar Sci* 20: 75–83.
- COMNAP (2017) *Antarctic Station Catalogue*. 34–35.
- Mac Cormack, W.P. and Fraile, E.R. (1997) *Characterization of a hydrocarbon degrading psychrotrophic Antarctic bacterium*. *Antarct Sci* 9: 150–155.
- Mac Cormack, W.P., Ruberto, L.A.M., Vodopivec, C.L., Curtosi, A., and Pelletier, E. (2011) *The Impact of Human Activity on Antarctic Coastal Areas: A Case Study of Hydrocarbon Contamination at Potter Cove, South Shetland*. *Ocean Yearb - Environ Coast Manag* 141–170.
- Curtosi, A., Pelletier, E., Vodopivec, C.L., and Mac Cormack, W.P. (2007) *Polycyclic aromatic hydrocarbons in soil and surface marine sediment near Jubany Station (Antarctica)*. *Role of permafrost as a low-permeability barrier*. *Sci Total Environ* 383: 193–204.
- Diesel Technology Forum* (2013) *Diesel Generators : A Reliable and Clean Source of Power*.
- Espejo, W., Celis, J.E., González-Acuña, D., Jara, S., and Barra, R. (2014) *Concentration of trace metals in excrements of two species of penguins from different locations of the Antarctic Peninsula*. *Polar Biol*

- 37: 675–683.
- Fairfax, S., Dowling, N., and Weidknecht, P. (2020) Reliability Assessment of a Large Diesel Generator Fleet. *IEEE Trans Ind Appl* 56: 942–951.
- Fernández Rodríguez, M.D., García Gómez, M.C., Alonso Blázquez, N., and Tarazona, J. V. (2014) Soil Pollution Remediation. In *Encyclopedia of Toxicology: Third Edition*. Elsevier, pp. 344–355.
- Gallardo-Cerda, J., Levihuan, J., Lavín, P., Osés, R., Atala, C., Torres-Díaz, C., et al. (2018) Antarctic rhizobacteria improve salt tolerance and physiological performance of the Antarctic vascular plants. *Polar Biol* 1–10.
- Germaine, K.J., Byrne, J., Liu, X., Keohane, J., Culhane, J., Lally, R.D., et al. (2015) Ecopiling: A combined phytoremediation and passive biopiling system for remediating hydrocarbon impacted soils at field scale. *Front Plant Sci* 5: 1–6.
- Gomez, F and Sartaj, M. (2013) Field scale ex-situ bioremediation of petroleum contaminated soil under cold climate conditions. *Int Biodeterior Biodegrad* 85: 375–382.
- Henryson, M. and Svensson, M. (2004) Renewable Power for the Swedish Antarctic Station Wasa.
- Jackie M. Aislabie, *, †, Megan R. Balks, ‡, Julia M. Foght, § and, and Waterhouse, E.J. (2004) *Hydrocarbon Spills on Antarctic Soils: Effects and Management*.
- Kennicutt, M.C., McDonald, T.J., Denoux, G.J., and McDonald, S.J. (1992) Hydrocarbon contamination on the Antarctic Peninsula: I. Arthur harbor—Subtidal sediments. *Mar Pollut Bull* 24: 499–506.
- Kennicutt, M.C., Sweet, S.T., Fraser, W.R., Stockton, W.L., and Culver, M. (1991) Grounding of the Bahía Paraiso at Arthur Harbor, Antarctica. 1. Distribution and fate of oil spill related hydrocarbons. *Environ Sci Technol* 25: 509–518.
- Kostecki, P., Morrison, R., and Dragun, J. (2004) Hydrocarbons. In *Encyclopedia of Soils in the Environment*. Elsevier Inc., pp. 217–226.
- Kukučka, P., Lammel, G., Dvorská, A., Klánová, J., Möller, A., and Fries, E. (2010) Contamination of Antarctic snow by polycyclic aromatic hydrocarbons dominated by combustion sources in the polar region. *Environ Chem* 7: 504.
- Lacerda, A.L. d. F., Rodrigues, L. dos S., van Seville, E., Rodrigues, F.L., Ribeiro, L., Secchi, E.R., et al. (2019) Plastics in sea surface waters around the Antarctic Peninsula. *Sci Rep* 9:.
- Layton, B.E. (2008) A comparison of energy densities of prevalent energy sources in units of joules per cubic meter. *Int J Green Energy* 5: 438–455.
- Macoustra, G.K., King, C.K., Wasley, J., Robinson, S.A., and Jolley, D.F. (2015) Impact of hydrocarbons from a diesel fuel on the germination and early growth of subantarctic plants. *Environ Sci Process Impacts* 17: 1238–1248.
- Marschoff, C.M. (1998) Transition from non-renewable to renewable energy sources: Fuel cells in Antarctica as an economically attractive niche. *Int J Hydrogen Energy* 23: 303–306.
- Martínez Álvarez, L.M., Lo Balbo, A., Mac Cormack, W.P., and Ruberto, L.A.M. (2015) Bioremediation of a petroleum hydrocarbon-contaminated Antarctic soil: Optimization of a biostimulation strategy using response-surface methodology (RSM). *Cold Reg Sci Technol* 119:.
- Martínez Álvarez, L.M., Ruberto, L.A.M., Lo Balbo, A., and Mac Cormack, W.P. (2017) Bioremediation of hydrocarbon-contaminated soils in cold regions: Development of a pre-optimized biostimulation biopile-scale field assay in Antarctica. *Sci Total Environ* 590–591:.
- McWatters, R.S., Wilkins, D., Spedding, T., Hince, G., Raymond, B., Lagerewskij, G., et al. (2016) On site remediation of a fuel spill and soil reuse in Antarctica. *Sci Total Environ* 571:.
- Mohn, W., Radziminski, C., Fortin, M.-C., and Reimer, K. (2001) On site bioremediation of hydrocarbon-

- contaminated Arctic tundra soils in inoculated biopiles. *Appl Microbiol Biotechnol* 57: 242–247.
- Olivier, J.R., Harms, T.M., and Esterhuysen, D.J. (2008) Technical and economic evaluation of the utilization of solar energy at South Africa's SANAE IV base in Antarctica. *Renew Energy* 33: 1073–1084.
- Palmroth, M. (2006) *Enhancement of in situ Remediation of Hydrocarbon Contaminated Soil*
- Palmroth, M.R.T., Langwaldt, J.H., Aunola, T.A., Goi, A., Puhakka, J.A., and Tuhkanen, T.A. (2006) Treatment of PAH-contaminated soil by combination of Fenton's reaction and biodegradation. *J Chem Technol Biotechnol* 81: 598–607.
- Parnikoza, I., Kozeretka, O., and Kozeretka, I. (2009) Is a translocation of indigenous plant material successful in the Maritime Antarctic? *Polarforschung* 78: 25–27.
- Ruoppolo, V., Woehler, E.J., Morgan, K., and Clumpner, C.J. (2013) Wildlife and oil in the Antarctic: A recipe for cold disaster. *Polar Rec (Gr Brit)* 49: 97–109.
- Saul, D.J., Aislabie, J.M., Brown, C.E., Harris, L., and Foght, J.M. (2005) Hydrocarbon contamination changes the bacterial diversity of soil from around Scott Base, Antarctica. *FEMS Microbiol Ecol* 53: 141–155.
- Secretariat of the Antarctic Treaty (1991) *Protocolo al tratado antártico sobre protección ambiental.*
- do Sul, J.A.I., Barnes, D.K.A., Costa, M.F., Convey, P., Costa, E.S., and Campos, L. (2011) Plásticos no ecossistema Antártico: Será que estamos vendo somente a ponta do iceberg? *Oecologia Aust* 15: 150–170.
- Tin, T., Sovacool, B.K., Blake, D., Magill, P., El Naggat, S., Lidstrom, S., et al. (2010) Energy efficiency and renewable energy under extreme conditions: Case studies from Antarctica. *Renew Energy* 35: 1715–1723.
- Ugolini, F.C. and Bockheim, J.G. (2008) Antarctic soils and soil formation in a changing environment: A review. *Geoderma* 144: 1–8.
- Vallero, D. (2010) CHAPTER 1 – Environmental Biotechnology: An Overview. *Environ Biotechnol A Biosyst approach* 1–44.
- Vidonish, J.E., Zygourakis, K., Masiello, C.A., Sabadell, G., and Alvarez, P.J.J. (2016) Thermal Treatment of Hydrocarbon-Impacted Soils: A Review of Technology Innovation for Sustainable Remediation. *Engineering* 2: 426–437.
- Yang, Z.H., Verpoort, F., Dong, C. Di, Chen, C.W., Chen, S., and Kao, C.M. (2020) Remediation of petroleum-hydrocarbon contaminated groundwater using optimized in situ chemical oxidation system: Batch and column studies. *Process Saf Environ Prot* 138: 18–26.