



*Ministerio de Ciencia, Tecnología  
e Innovación Productiva*

Secretaría de Planeamiento y Políticas en Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva

## **SECTOR AMBIENTE Y CAMBIO CLIMÁTICO**

### **PERFIL DE PROPUESTA: SISTEMAS DE GESTIÓN DE SITIOS CONTAMINADOS**

#### **1. Antecedentes**

La gestión de sitios contaminados debe incluir un conjunto de medidas correctivas que se aplican para mitigar o eliminar los problemas derivados de una disposición o almacenamiento inadecuado de materiales o residuos peligrosos, o bien de un accidente durante su generación o manejo. La importancia de la adecuada gestión reside en que los constituyentes de los residuos o materiales peligrosos pueden penetrar a través de los suelos y llegar a los acuíferos subterráneos; escurrir sobre las cuencas hidráulicas y contaminar aguas superficiales; moverse por el aire y, así, transferirse a lo largo de la cadena alimentaria, afectando por todas estas vías de exposición a los animales, las plantas y al hombre mismo.

El ciclo sistémico comprende un diagnóstico de situación de los sitios potencialmente contaminados, conforme a diferentes modalidades de exploración, de manera de posibilitar la identificación y registro de los sitios; la evaluación y caracterización de los sitios identificados; la determinación de la necesidad de ulteriores estudios o investigaciones, mediante muestreos, análisis no intrusivos y/o intrusivos, determinación de calidad del sustrato subyacente, etc.; la recomposición o restauración de los sitios contaminados; la asignación de nuevo uso del suelo y, en función de ello, protección de los sitios saneados, incluyendo el acondicionamiento final y la definición del plan de monitoreo.

La identificación inicial debe permitir evaluar la peligrosidad del sitio, de manera de asignar la debida prioridad a su gestión, en función de los efectos que pueda tener la contaminación sobre personas y bienes. Debe diseñarse de manera de posibilitar una discriminación, basada en datos limitados, de los sitios que tienen poca o ninguna amenaza hacia la salud humana y al ambiente, así como sitios que puedan constituir una amenaza y requieran de una investigación mas extensa y profunda.

Una vez elaborado un listado de los sitios peligrosos relevantes, será necesario realizar inspecciones, que cuenten con calidad suficiente para concluir con certeza si un sitio está o no contaminado con sustancias químicas y/o microorganismos patógenos. Esta fase comprende cinco actividades: visita al sitio, monitoreo de la contaminación ambiental, clasificación de contaminantes críticos, análisis preliminar de rutas de exposición y estimación



*Ministerio de Ciencia, Tecnología  
e Innovación Productiva*

Secretaría de Planeamiento y Políticas en Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva

preliminar del riesgo, calificando los sitios inspeccionados para determinar los pasos sucesivos de gestión.

Las tecnologías de remediación que deberán aplicarse dependen de las condiciones de los sitios a remediar, del o los tipos de contaminantes y, del origen de la contaminación. Existe gran heterogeneidad en los patrones de degradación de los lugares afectados. Si bien muchas de las tecnologías son conocidas a escala de laboratorio, deben escalarse a nivel de establecimiento, y generar una metodología propia para cada situación.

Puede establecerse una primera división de las técnicas de recuperación en dos grandes categorías en función de dónde se lleva a cabo el proceso de descontaminación (Sabroso González y Eixarch, 2004): en las técnicas "in situ" el suelo contaminado es tratado en su emplazamiento original, no se realiza excavación aunque a veces se remueve o mezcla en su localización original. Requieren tiempos de tratamientos muy largos, y los porcentajes de degradación de los contaminantes son pequeños. Son difícilmente aplicables en suelos de baja permeabilidad.

En las técnicas "ex situ", por su parte, el suelo contaminado es excavado, transportado y tratado en una determinada instalación. Si la instalación esta situada próxima a la zona de emplazamiento del suelo contaminado se denominan técnicas "on site", si por el contrario esta fuera del emplazamiento se denominan técnicas "off site". Son las más desarrolladas y las que más se han aplicado, incluyendo el lavado de suelos, la incineración y la aireación, entre otras.

La biorremediación tiene hoy en día gran aceptación como tratamiento para la recuperación de suelos contaminados con hidrocarburos y otros elementos contaminantes (Pandey y col., 2009). Las técnicas biológicas hacen uso de la capacidad natural de la microflora del suelo para degradar los contaminantes que se encuentran en el suelo. La recuperación puede llevarse a cabo con o sin adición de microorganismos. Cuando la contaminación se termina, los microorganismos mueren y finaliza el proceso.

Sin embargo, el proceso tiene una aplicabilidad limitada cuando se trata de suelos contaminados con mezclas complejas de HPA altamente hidrofóbicos. La baja solubilidad, conjuntamente con la tendencia a adsorberse a la materia orgánica y otras partículas del suelo, afectan directamente la biodegradación de los HPA, debido a la reducida transferencia de masas desde la matriz de suelo hacia la interface acuosa donde es asequible a los microorganismos, condicionando la biodisponibilidad del contaminante (Semple y col., 2007).



*Ministerio de Ciencia, Tecnología  
e Innovación Productiva*

Secretaría de Planeamiento y Políticas en Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva

La fitorremediación (técnicas biológicas de recuperación basadas en el uso de plantas), por su parte, es utilizada en muchos casos para el tratamiento de suelos contaminados por metales pesados. (Bernal y col., 2007)

La oxidación química, utilizando oxidantes fuertes en suelos y aguas contaminadas con HPA, es una estrategia que ha sido considerada efectiva para superar las limitaciones de la biorremediación. El conjunto de técnicas que utilizan la inyección de oxidantes fuertes para remediar suelos y aguas contaminadas ha sido denominado ISCO (in-situ Chemical Oxidation) (Huling y Pivetz, 2006). Entre los oxidantes más utilizados se encuentra el ozono (O<sub>3</sub>), el peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), el permanganato (MnO<sub>4</sub><sup>-</sup>) y el peroxodisulfato (S<sub>2</sub>O<sub>8</sub><sup>2-</sup>) (Huling y Pivetz, 2006). No obstante, los efectos colaterales de los procesos de oxidación sobre la calidad del suelo han sido solo parcialmente estudiados a través de ensayos de toxicidad de los productos generados durante el tratamiento (Palmroth y col., 2006) y no existe información suficiente respecto del impacto de este tipo de tratamiento sobre la diversidad de la comunidad microbiana del suelo y su aptitud posterior al tratamiento.

Los equipos de las universidades que tienen cercanía con parques industriales y polos petroquímicos tienen en sus equipos líneas de trabajo referidas a la gestión de suelos contaminados, en algunos casos, vinculadas a empresas del sector privado. Se pueden citar como ejemplo a las universidades nacionales de La Plata (UNLP), del Litoral (UNL) y del Sur (UNS).

En el ámbito de la SAYDS funciona el Programa para la Gestión Ambiental de Sitios Contaminados<sup>1</sup>. El mismo fue creado mediante la Resolución N° 515/2006 con dos objetivos:

- a) Identificar, sistematizar, calificar y cuantificar procesos de degradación por contaminación.
- b) Definir las estrategias de prevención, control y recuperación de sitios contaminados, desarrollando conjuntamente el soporte regulatorio indispensable bajo el concepto de presupuesto mínimo de protección ambiental.

El ámbito de aplicación del Programa son sitios contaminados de diversa naturaleza pudiendo incluir antiguas fábricas inactivas, depósitos clandestinos de sustancias químicas, sitios con residuos peligrosos abandonados, entre otros, los que serán investigados en sus matrices suelo, agua superficial y agua subterránea. No se incluye en este programa la problemática relacionada con la contaminación biológica, radiactiva y difusa.

---

<sup>1</sup> <http://www.ambiente.gov.ar/default.asp?idseccion=154>



*Ministerio de Ciencia, Tecnología  
e Innovación Productiva*

Secretaría de Planeamiento y Políticas en Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva

Para el logro de los objetivos planteados se instrumentarán acciones tendientes a identificar, sistematizar, calificar, cuantificar y posteriormente remediar y recuperar los sitios contaminados.

## **2. Identificación del problema**

Existe actualmente en el país una gran cantidad de sitios contaminados con diferentes tipos de compuestos, tanto orgánicos como inorgánicos, debido principalmente a las actividades de la industria minera y petroquímica, además de la disposición clandestina y los derrames de residuos peligrosos.

La presencia de contaminantes en el suelo puede crear problemas relacionados al uso del terreno, ya que los problemas pueden aparecer mediante contacto directo con los contaminantes, inhalación de componentes volátiles, etc. Los contaminantes en el suelo, dependiendo de su textura, pueden quedar más o menos atrapados en él y, si bien tiene una fracción mineral constitutiva, el suelo funciona y evoluciona con la fauna y la flora que lo constituye, por lo que los contaminantes que llegan al mismo intoxican o destruyen a muchos organismos, y cuando no son destruidos estos organismos pueden acumular compuestos tóxicos. El proceso está abierto al funcionamiento de la cadena trófica y a la circulación de contaminantes con la bioacumulación y/o biomagnificación del agente tóxico que repercuten en la fauna, la flora y finalmente en los humanos.

Existen casos en los cuales la contaminación del suelo no resulta visible directamente sino a partir de sus efectos nocivos, como ocurre en el lecho de ciertos cursos de agua o sistemas lacustres, que por acción de la contaminación conducida por el agua durante largos períodos de tiempo se han convertido en focos contaminantes que hacen estériles los esfuerzos por depurar esos ecosistemas acuáticos.

Cada sitio a tratar presenta un desafío diferente, y debe analizarse en términos de un conjunto de características, soluciones y costos. Las opciones de gestión de sitios contaminados dependen de diversas consideraciones generales, tales como el tipo de contaminante y sus características físicas y químicas —que a menudo determinan las particularidades de los sistemas de tratamiento; y, fundamentalmente, de la disponibilidad de tecnologías y de capacitación para su utilización efectiva y eficiente. Otros aspectos que condicionan los criterios para establecer los límites de limpieza incluyen la localización y las características de los sitios, el uso del suelo en ese lugar (industrial, residencial o agrícola) y las características naturales de los suelos, sedimentos o cuerpos de agua.



*Ministerio de Ciencia, Tecnología  
e Innovación Productiva*

Secretaría de Planeamiento y Políticas en Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva

También son consideraciones a tener en cuenta el manejo del material a tratar, incluyendo la posibilidad de conversión del contaminante a una forma en la que pueda tratarse y/o transportarse desde la fuente de la contaminación hasta el lugar de tratamiento —paso crítico en la mayoría de los procesos de tratamiento; los pre tratamientos para modificar las características naturales de un suelo contaminado —que pueden ser factores muy costosos en un proceso de remediación; las capacidades de las tecnologías de remediación, que pueden actuar conteniendo la contaminación, separando el contaminante del suelo o destruyendo el contaminante; y otros factores tales como la disponibilidad, fiabilidad (demostrada o proyectada), estado de desarrollo (laboratorio, escala piloto o gran escala) y costo de las tecnologías a emplear.

El ámbito de aplicación de la Propuesta son los sitios contaminados de diversa naturaleza, tales como antiguas fábricas o sedes de servicios públicos inactivos, viejos depósitos —muchas veces clandestinos— de sustancias químicas, sitios con residuos peligrosos abandonados y lechos de sistemas acuáticos, entre otros, que pueden ser identificados a partir de sus efectos sobre el suelo, el agua superficial y el agua subterránea.

En cada uno de esos casos, es necesario efectuar un diagnóstico de situación de los sitios potencialmente contaminados; identificar y registrar los mismos; evaluar y caracterizar los sitios identificados; determinar los posteriores estadios de investigación y recomposición que deberían llevarse a cabo; realizar un muestreo y análisis no intrusivo y/o intrusivo, incluyendo la determinación de la calidad del sustrato subyacente; la restauración de los sitios, de acuerdo a la nueva asignación de uso del suelo; el acondicionamiento final y la definición de un plan de monitoreo; y, finalmente, la protección de los sitios saneados para evitar su ulterior contaminación.

Se considera que deberían contemplarse las particularidades del sector petrolero, del sector minero —incluyendo la posibilidad de minería urbana— y de la concentración de contaminantes por vertidos históricos de residuos industriales.

### Sector petrolero

El petróleo bruto, gas natural y líquidos volátiles se obtienen usualmente desde depósitos geológicos, sacándolos a la superficie de la tierra a través de una perforación profunda. Generalmente, el fluido obtenido de los depósitos de petróleo, consiste en una mezcla de petróleo, gas natural, agua salada o salmuera, conteniendo tanto sólidos disueltos como en suspensión. Los pozos de gas pueden producir gas húmedo o gas seco, pero además en el caso del gas seco, normalmente se obtienen cantidades variables de hidrocarburos



*Ministerio de Ciencia, Tecnología  
e Innovación Productiva*

Secretaría de Planeamiento y Políticas en Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva

líquidos ligeros y agua salada. Esta agua también contiene sólidos en suspensión y disueltos y se encuentra contaminada por hidrocarburos.

En los pozos el petróleo asciende o bien mediante la presión natural existente en la formación o bien mediante una serie de operaciones realizadas desde la superficie. Los métodos más comunes para suministrar la energía necesaria para extraer el petróleo son: inyectar fluidos (normalmente agua o gas) en el depósito para mantener la presión que de otra manera bajaría durante la extracción; inyectar gas en la corriente que sale del pozo para hacer más ligera la columna de fluidos en el pozo; y utilizar varios tipos de bombas en el mismo pozo.

Se suelen utilizar varios sistemas de inyección de fluidos. Uno de ellos consiste en inyectar el agua en los depósitos geológicos para mantener la presión y estabilizar sus condiciones. Otro sistema, conocido como inundación, consiste en inyectar el agua en el depósito de manera tal que desplace el crudo hacia los pozos de producción. Este proceso es uno de los métodos de producción secundaria. Sucesivas inundaciones aumentan la producción del campo pero además incrementan la cantidad de agua a tratar. La inyección también se puede utilizar exclusivamente como procedimiento de vertido o descarga.

El lodo de perforación más utilizado es en base a ligno-sulfonatos; utilizándose además inyecciones con polímetros. Las piletas de inyección son excavadas a cielo abierto y no están impermeabilizadas, quedando destapadas luego de la perforación.

Una vez en la superficie, los diferentes constituyentes de los fluidos producidos desde los pozos de petróleo y gas son separados: gas de los líquidos, aceites del agua y sólidos de los líquidos. Los constituyentes que se pueden vender, normalmente los gases y el petróleo, se retiran de la zona de producción y los residuos, generalmente salmuera y sólidos, se eliminan luego de un tratamiento. En esta etapa los gases aún pueden contener cantidades importantes de hidrocarburos líquidos, y suelen ser tratados para su separación, en las plantas de gas.

El agua remanente debería ser tratada con el objeto de no contaminar la tierra y/o los cursos de agua; pero en la mayoría de los casos esto no se realiza (se envía a tierra y/o cursos de agua); constituyendo el mayor impacto ambiental que se produce en la etapa de exploración y explotación petrolera.<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup> Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios, Secretaría de Energía. Hidrocarburos. En Internet en:  
[http://energia3.mecon.gov.ar/contenidos/archivos/Reorganizacion/contenidos\\_didacticos/Hidrocarburos.pdf](http://energia3.mecon.gov.ar/contenidos/archivos/Reorganizacion/contenidos_didacticos/Hidrocarburos.pdf)



*Ministerio de Ciencia, Tecnología  
e Innovación Productiva*

Secretaría de Planeamiento y Políticas en Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva

La contaminación de los suelos por hidrocarburos se ocurre también por pérdidas o roturas de cañerías de conducción, lo que tiene un pronunciado efecto sobre las propiedades de los suelos, con procesos de salinización, de toxicidad sobre los microorganismos y mortandad de la vegetación. Los hidrocarburos policíclicos aromáticos (HPA) son contaminantes ambientales propios de los sitios donde han ocurrido derrames de petróleo. Varios de los HPA, son contaminantes persistentes en la matriz del suelo y sedimentos y refractarios a la degradación natural. Desde el descubrimiento de su poder cancerígeno, organismos internacionales, como la Organización Mundial de la Salud y la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica, han regulado el nivel permitido de estas sustancias en el medio ambiente (Amador Hernández et al., 1999).

Además de originarse en algunos procesos naturales (como los incendios forestales), los HPA son principalmente producidos por fuentes antropogénicas, incluyendo la combustión incompleta de combustibles fósiles y biomasa, el tráfico vehicular y la introducción en el mercado de productos de síntesis, derivados del petróleo (Wang y col., 2009).

En consecuencia, la concentración de HPA en el ambiente se ha incrementado considerablemente durante la última centuria. De particular interés resultan las altas concentraciones de HPA encontradas en sitios donde han sido manipulados combustibles fósiles (petróleo y carbón) y sus productos (Reichenberg y col., 2010). Los HPA no sólo constituyen un riesgo para el hombre y los animales, debido a sus propiedades tóxicas, mutagénicas y carcinogénicas, sino que implican un riesgo potencial para el suelo (Morelli y col. 1999, Ahlf y col., 2001, Pieper, S., 2004).

Por lo antes señalado se hace necesaria la implementación de tecnologías de gestión de dichos sitios, priorizando aquellas fuentes de contaminación más críticas y los espacios con mayor índice de degradación, a fin de controlar, disminuir o eliminar los contaminantes presentes en el medio reduciendo riesgos a la salud de la población.

### Sector minero

Como resultado de las actividades mineras, el suelo es alterado. Al momento de la extracción se generan anomalías biogeoquímicas, tales como el aumento de la cantidad de microelementos en el suelo, los cuales afectan negativamente la biota y calidad de suelo, como así también el número, diversidad y actividad de los organismos del suelo, inhibiendo la descomposición de la materia orgánica (Wong, 2003). Asimismo, Salomons (1995) considera que los residuos mineros estériles son tóxicos para los



*Ministerio de Ciencia, Tecnología  
e Innovación Productiva*

Secretaría de Planeamiento y Políticas en Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva

organismos vivos y son inhibidores de factores ecológicos, afectando el crecimiento de las plantas.

Los suelos que quedan tras una explotación minera contienen gran diversidad de materiales residuales —escombros estériles, entre otros— lo que representa graves problemas para el desarrollo de la cubierta vegetal, siendo sus características más notables las siguientes: clase textural desequilibrada, ausencia o baja presencia de la estructura edáfica, propiedades químicas anómalas, disminución o desequilibrio en el contenido de nutrientes fundamentales, ruptura de los ciclos biogeoquímicos, baja profundidad efectiva, dificultad de enraizamiento, baja capacidad de cambio, baja retención de agua y presencia de compuestos tóxicos.

Asimismo, los residuos son fácilmente erosionables tanto por erosión hídrica como eólica, provocando la liberación y dispersión de metales en períodos que pueden durar muchos años tras el cese de la actividad minera.

El tipo de elementos contaminantes así como su concentración en el medio depende de múltiples factores, entre los que destaca la naturaleza de cada depósito mineral, siendo frecuentes elementos como: As, Fe, Cu, Zn, Cd, Co, Ni, Pb, Hg, Tl, Se, Te y Sb. Así, cuando los residuos generados (escombreras, residuos de concentración o "colas") no se disponen de forma adecuada sobre el terreno, las actividades mineras pueden generar importantes problemas de contaminación de suelos y aguas subterráneas.

Por último, no debe dejarse de mencionar la posibilidad de depuración de lechos contaminados de cursos de agua y otros sistemas acuáticos, ya que la misma puede dar origen, paralelamente, a significativos aprovechamientos de metales pesados, comúnmente denominados como "minería urbana".

En consecuencia, también en este caso se hace necesaria la implementación de tecnologías de gestión de los sitios afectados, dando prioridad a las fuentes de contaminación más críticas y las situaciones que presenten mayor compromiso, a fin de controlar, disminuir o eliminar los contaminantes presentes en el medio reduciendo riesgos a la salud de la población.

### Concentración de contaminantes industriales

La contaminación del suelo puede ser atribuida también, y en algunos casos en gran medida, a procesos industriales y de provisión de servicios, ya sea por las emisiones generadas que pueden depositarse en suelos y vegetación, o bien directamente por los residuos industriales con inadecuada disposición.





*Ministerio de Ciencia, Tecnología  
e Innovación Productiva*

Secretaría de Planeamiento y Políticas en Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva

En las últimas décadas, la liberación de contaminantes al ambiente producida principalmente como consecuencia del desarrollo industrial, ha superado con creces los mecanismos naturales de reciclaje y autodepuración de los ecosistemas receptores. Este hecho ha conducido a una evidente acumulación de contaminantes en los distintos ecosistemas hasta niveles preocupantes para la salud humana y los sistemas productivos que utilizan el suelo como soporte orgánico. En función de ello, no solo es necesario reducir en todo lo posible la liberación de contaminantes, sino que además existe la necesidad de contar con procesos que permitan acelerar la degradación de los contaminantes preexistentes en el suelo.

Por ejemplo, la industria química produce gran cantidad de compuestos xenobióticos, cuya estructura química difiere considerablemente de los compuestos orgánicos naturales. Algunos de estos compuestos xenobióticos, con grupos halógenos y nitrogenados, utilizados como propelentes, refrigerantes, disolventes, bifenoles policlorados (PCB), plásticos, detergentes, explosivos y plaguicidas, son recalcitrantes (resistentes) a la biodegradación.

Asimismo, algunos de los xenobióticos sufren un proceso de biomagnificación en las redes tróficas. Este proceso se inicia con los microorganismos y causa la acumulación del xenobiótico en los niveles tróficos superiores, donde provoca graves daños ecológicos.

Toda esta problemática requiere de tecnologías apropiadas y apropiables, de manera de posibilitar el control de la contaminación y su difusión, en particular en los casos de mayor gravedad y extensión

### **3. Descripción de la propuesta**

#### **3.1. Objetivo General**

Disponer de nuevas tecnologías y procesos o modificaciones de los existentes para el diagnóstico, la identificación y registro, la caracterización y evaluación de sitios potencialmente contaminados, y para su ulterior restauración, recomposición o remediación de acuerdo a las características específicas de la contaminación y las condiciones del suelo y clima correspondientes.

#### **3.2. Objetivos Específicos**

- Desarrollar procesos y metodologías de identificación, caracterización, muestreo y análisis no intrusivo y/o intrusivo de sitios potencialmente contaminados.



*Ministerio de Ciencia, Tecnología  
e Innovación Productiva*

Secretaría de Planeamiento y Políticas en Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva

- Desarrollar procesos y metodologías de restauración, recomposición o remediación de sitios contaminados, adecuadas a diferentes tipos de contaminantes y áreas.
- Desarrollar sistemas integrales para la identificación, caracterización, remediación y monitoreo de sitios potencialmente contaminados.
- Desarrollar capacidades en instituciones/empresas proveedoras de servicios para la identificación, caracterización, remediación y monitoreo de sitios contaminados, utilizando las metodologías adecuadas a cada necesidad.

### **3.3. Resultados esperados**

- Disponer de nuevas tecnologías, procesos y metodologías a nivel comercial para la identificación, caracterización, muestreo y análisis no intrusivo y/o intrusivo de sitios potencialmente contaminados.
- Disponer de nuevas tecnologías, procesos y metodologías a nivel comercial para la restauración, recomposición o remediación de sitios contaminados.
- Disponer de criterios de evaluación de las tecnologías innovadoras según los distintos tipos de contaminantes y las características sitio-específicas.