

---

## GESTIÓN AMBIENTAL DE LA CONTAMINACIÓN DEL SUELO, AIRE Y AGUA

Daniel Coria

dcoria@ucel.edu.ar

Universidad del Centro Educativo Latinoamericano - UCEL

---

A mediados de este mes de mayo, los diarios del mundo publicaron una noticia no sorprendente pero sí alarmante: en la inmersión submarina más profunda jamás registrada, a casi 11.000 metros de profundidad, científicos estadounidenses encontraron restos plásticos, es decir, basura, contaminación. El sitio, específicamente, es el fondo de la Fosa de las Marianas, una grieta en el océano Pacífico occidental, el punto más profundo conocido de nuestro planeta. En un lugar al que jamás había llegado ningún ser humano, se encontraron huellas de la acción antrópica. Una bolsa plástica, naturalmente, no va a producir una catástrofe, pero su mera presencia es una marca inequívoca de los impactos negativos y perdurables que a corto, mediano y largo plazo genera la Humanidad en el medio ambiente.

El agua es solamente uno de los tres medios que, a lo largo de la historia, pero sobre todo en los últimos tres siglos, ha sufrido la contaminación acelerada producida por el ser humano: los otros dos son el suelo y el aire. En esta oportunidad, quisiera hablarles acerca de la contaminación de estos tres medios, pero también de la gestión ambiental para reducir o mitigar los impactos de esta contaminación.

Comencemos, aunque sea brevemente, por la definición de “medio ambiente”, concepto que a veces se confunde con el de “naturaleza”. Sin embargo, no deberían ser confundidos. La palabra “naturaleza” parece identificar aquello que brinda algún tipo de fruto (o mercancía, o tesoro, o amenaza, según la época y la ideología) del que el ser humano puede echar mano o que el ser humano debe eludir. “Medio

ambiente”, en cambio, incluye al ser humano en su definición: no hay medio ambiente sin ser humano, mientras que sí puede existir naturaleza sin seres humanos. El medio ambiente no es tal si el ser humano no es parte integrante. De la naturaleza, aún tenemos dudas. El medio ambiente es fuente de recursos naturales como materias primas y energía (recursos que no son siempre renovables, o bien no lo son a la tasa en que son consumidos), es soporte de actividades y es receptor de efluentes. Por ello, y para lograr un desarrollo sostenible, un concepto muy mentado pero poco practicado en nuestros días, es preciso utilizar los recursos atendiendo a las tasas que pueden ser asumidas por el medio, evaluar la situación de las actividades en territorios y ecosistemas con una elevada capacidad de acogida para ellas, y emitir efluentes en cantidades inferiores a la capacidad de recepción o asimilación del medio ambiente.

En la historia de nuestro planeta, el ser humano apareció tardíamente, sin embargo, ha sido capaz de modificar de manera notable el medio ambiente con sus actividades. Gracias a sus peculiares capacidades mentales y físicas, el *homo sapiens* pudo escapar de las constricciones medioambientales que limitaban a las restantes especies y logró modificar el medio ambiente para adaptarlo a sus necesidades. Es evidente que en este proceso se ha producido uno de los mayores problemas que hoy en día ponen en jaque, a un plazo desconocido, la existencia misma de la especie en la Tierra: este problema es la contaminación del medio ambiente, de los ecosistemas que posibilitan las diferentes formas de vida en

el planeta. ¿Qué es contaminar? Poner en peligro la salud del ser humano y otras especies, deteriorar los recursos naturales y los ecosistemas y deteriorar los bienes materiales. ¿Qué es un contaminante? Cualquier sustancia que llega a nuestro entorno por vía atmosférica, acuática o terrestre que impide o perturba la vida de los organismos y/o produce efectos nocivos a los materiales y al propio ambiente. Algunos ejemplos: pesticidas, metales pesados, hidrocarburos aromáticos policíclicos, compuestos orgánicos volátiles. ¿Puede prevenirse la contaminación? Sí, utilizando procesos, prácticas, materiales y productos que eviten, reduzcan o controlen la contaminación, lo que puede incluir el reciclado, el tratamiento, los cambios de procesos, los mecanismos de control, el uso eficiente de los recursos y la sustitución de materiales.

Pero es un hecho, sin embargo, que cada día aumenta la contaminación del suelo, el aire y el agua, que son los soportes sobre los que se asientan todos los fenómenos vitales que se desarrollan en nuestro planeta. Comencemos por el suelo. La formación del suelo es el resultado de una serie de procesos físicos, químicos y biológicos sobre el medio rocoso original. Es la parte más superficial de la litósfera y está constituido por una mezcla de partículas minerales, materia orgánica, aire y una disolución acuosa que rodea las partículas edáficas. En la formación de un suelo influyen el tiempo, las precipitaciones, la temperatura, la topografía del terreno, la vegetación, los microorganismos y material original. Los suelos contaminados provocan riesgos directos a la salud humana. Se denomina "suelo contaminado" a una porción de terreno, superficial o subterránea, cuya calidad ha sido alterada como consecuencia del vertido, directo o indirecto, de residuos o productos peligrosos. El origen de las alteraciones que se producen en el suelo no puede atribuirse a una sola causa. La contaminación puede aparecer como resultado de actividades industriales, agrícolas o de servicios (actuales o pasadas),

aunque el sector industrial es el principal agente contaminante. La deposición de residuos sobre un terreno sin control adecuado, las fugas de depósitos y tuberías enterradas y la práctica de algunas operaciones industriales sobre suelos mal protegidos (almacenamiento de productos, manipulación de materias primas, etc.), constituyen el origen de un elevado porcentaje de los suelos contaminados.

La contaminación del aire constituye un problema importante para la mayoría de las ciudades del mundo, y a menudo adquiere dimensiones regionales. La atmósfera, imprescindible para el desarrollo de la vida en la Tierra, dado que mantiene su temperatura al filtrar las radiaciones solares, impidiendo así cambios bruscos que la harían inhabitable, recibe las emisiones procedentes de la combustión y de otras actividades antropogénicas. Aunque el aire dispone de mecanismos naturales de limpieza, en algunas ocasiones la concentración de estos contaminantes es tan elevada que la atmósfera no puede eliminarlos. La contaminación atmosférica puede ser de dos tipos: física y química. La contaminación de naturaleza física es en realidad una contaminación energética, ocasionada por ondas mecánicas y/o electromagnéticas o bien por emisiones radiactivas. Entre las más destacadas están la contaminación acústica, la contaminación por radiación electromagnética y la contaminación radiactiva. La contaminación de naturaleza química consiste en que, una vez emitidos los contaminantes a la atmósfera, éstos pueden sufrir transformaciones químicas que alteren su naturaleza. Los contaminantes atmosféricos más destacados son, entre otros: el monóxido de carbono, los óxidos de nitrógeno, los óxidos de azufre, los hidrocarburos o compuestos orgánicos volátiles, las partículas, amoníaco, halógenos, metales, ozono, oxidantes fotoquímicos, sulfatos y nitratos.

La Tierra y la atmósfera que la envuelve contienen grandes cantidades de agua. Sin embargo, aunque resulte paradójico, el

agua es un recurso natural escaso. De la totalidad del agua que existe en la Tierra únicamente el 3% es agua dulce, y de ella el 79% se encuentra almacenada en forma hielo en los casquetes polares y en los glaciares, un 20% está constituida por aguas subterráneas y el resto son aguas superficiales. En otras palabras, el agua dulce potable supone solamente el 0,008% del agua terrestre. La contaminación del agua consiste en una modificación, generalmente provocada por el hombre, de la calidad del agua, modificación que la hace impropia o peligrosa para el consumo humano, la industria, la agricultura, la pesca y las actividades recreativas, así como para los animales domésticos y la vida natural. Hay contaminantes físicos, químicos y biológicos del agua, tanto de las aguas continentales, como de la atmosférica, las superficiales, las subterráneas y las marinas, entre los principales contaminantes se encuentran: los compuestos químicos inorgánicos como el arsénico y los elementos radiactivos, los compuestos químicos orgánicos como los hidrocarburos y los aceites, los bionutrientes como los nitratos y fosfatos, y los microorganismos como bacterias y hongos.

Los efectos negativos de la contaminación del suelo, el aire y el agua pueden mitigarse con una adecuada gestión ambiental. Naturalmente, lo ideal sería evitar la contaminación, pero si ésta se ha producido, deben tomarse las medidas necesarias para intentar reconstituir el medio dañado a su estado anterior. En ocasiones, estas medidas requieren importantes inversiones de recursos humanos y económicos para realizar el diagnóstico de la contaminación, su remediación y el monitoreo de los efectos logrados por la remediación. No me detendré mucho en este tema, que no es el objetivo de este encuentro, pero sí quisiera mencionar que precisamente debido a los altos costos involucrados en este proceso, cada vez más, en diferentes países del mundo, entre los cuales está Argentina, a las empresas se les está imponiendo por ley

la contratación de un seguro ambiental que pueda cubrir los gastos vinculados con episodios de una eventual contaminación y la necesidad de recomponer el medio impactado.

Como decía, una adecuada gestión ambiental de la contaminación producida en el suelo, el aire y el agua puede mitigar sus efectos negativos. Otra vez, comencemos por el suelo, medio al que le dedicaré un espacio mayor dado que en los últimos quince años me he dedicado especialmente, tanto a nivel teórico como práctico, a la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos.

Los casos de contaminación de suelos por sustancias peligrosas se verifican en todo el mundo y particularmente en Latinoamérica. Las razones involucran, entre otros factores: la falta de transporte por ferrocarril, la falta de mantenimiento de los tanques de gasolineras enterrados, el transporte dentro de los campos de sustancias como herbicidas y plaguicidas sin ningún tipo de control, las actividades mineras por la maquinaria pesada, la falta de disposición final de tanques con remanentes de combustibles o aceites, la falta de tratamiento de los aceites de transformadores eléctricos, el derrame accidental de hidrocarburos dentro de plantas industriales, las fumigaciones aéreas de campos con plaguicidas, etc. La falta de sanciones a los infractores es determinante en Latinoamérica para que el problema sea grave y vaya en aumento.

Si bien hay varios tipos de contaminación del suelo (física, biológica y química), la contaminación accidental más frecuente de suelos en Argentina se verifica con hidrocarburos provenientes de instalaciones fijas como destilerías de petróleo, tanques subterráneos de estaciones de servicio, etc., o con siniestros en rutas en los que se produce el derrame de derivados del petróleo transportados en camiones cisterna. El vuelco de camiones cisterna genera normalmente un derrame de su contenido de hidrocarburos o derivados que perjudica notoriamente el

suelo ya que la migración del contaminante se produce en forma vertical debido a la fuerza de gravedad. Su velocidad de dispersión, toxicidad, formación de fase sobre la napa freática, solubilidad en agua, pluma de dispersión, etc., deben ser estudiados para cada producto derramado a los efectos de dar rápida respuesta a la emergencia y encarar la remediación posterior. Es evidente, como decía, que la mejor manera de atacar el problema de contaminación por hidrocarburos es prevenir el incidente, pero en caso de producirse, los planes de contingencia tienen como finalidad que se inicien inmediatamente las operaciones anticontaminación con medios adecuados para minimizar los daños.

Los hidrocarburos volcados en suelos se transforman en residuos peligrosos. En materia legal, la ley de residuos tóxicos y peligrosos en Argentina es la Ley Nº 24.051, que en su decreto reglamentario Nº 831/93 establece valores guía de calidad de suelos para diferentes tipos de usos y en su Anexo I tipifica la corriente de desechos constituida. Pero en virtud de que los parámetros indicados son insuficientes, se utilizan en la práctica diferentes legislaciones extranjeras. Otro problema legal es que la ley Nº 24.051 no posee carácter de presupuestos mínimos, lo cual implica que su aceptación depende de cada jurisdicción.

Ante un caso concreto de contaminación de suelos por hidrocarburos, y teniendo en cuenta el comportamiento del petróleo en el suelo se presentan tres alternativas: a) no recuperación, b) contención o aislamiento de la contaminación y c) recuperación (tratamiento *in situ* o *ex situ*). En el primer caso, la decisión de no remediar el terreno contaminado implica que debe modificarse la asignación del suelo y delimitarse perfectamente el espacio afectado, además de efectuarse monitoreos que aseguren la imposibilidad de afectaciones a terceros. La segunda alternativa, la contención o aislamiento de la contaminación, consiste en establecer medidas correctas de

seguridad que impidan la progresión de la contaminación, mitigando de este modo los efectos adversos relacionados con la dispersión de sustancias contaminantes. El aislamiento puede utilizarse para reducir la volatilización, evitar la creación de lixiviados o la infiltración en capas freáticas. Finalmente, están las medidas de recuperación del suelo contaminado, en las cuales nos detendremos a continuación.

Las técnicas más recientes de evaluación de suelos contaminados se fundamentan en la metodología de análisis de riesgo ASTM E1739/95, elaborada por la *American Society for Testing and Materials*, y que se basa en el riesgo que presentan a la salud humana y al medio ambiente la sumatoria de riesgos individuales que presentan los agentes químicos presentes en el sitio. Una primera evaluación se fundamenta en la comparación de los valores de contaminantes individuales hallados en suelo contra los valores de referencia, que son muy conservadores.

El tratamiento y recuperación de suelos contaminados puede definirse como el conjunto de operaciones realizadas con el objetivo de controlar, disminuir o eliminar los contaminantes presentes. La selección de la mejor tecnología de remediación debe surgir como consecuencia de estudios ambientales, de una adecuada caracterización del suelo y de una valoración de los costos del proyecto. Estos estudios ambientales que deben realizarse previamente a cualquier método de remediación se dividen en: a) estudios fase I (regulados por la norma ASTM E1527-00) y b) estudios de fase II (regulados por la norma ASTM E1903-97). Si los estudios realizados revelan la necesidad de tomar acciones correctivas, se realizan estudios piloto y ensayos hidráulicos que permitan conocer mejor el subsuelo en general, a efectos de seleccionar la mejor tecnología y adecuarla al lugar a remediar. Los resultados de análisis y las consideraciones para la instalación de un determinado sistema se vuelcan en lo que se conoce como RAP (*Remedial Action Plan*), esto es,

Plan de Acción Correctiva o Plan de Remediación. Este plan debe elevarse a la autoridad ambiental competente para su aprobación ya que no es posible comenzar efectivamente la remediación hasta tener la aprobación de la propuesta. Naturalmente, el Plan tiene como objetivo seleccionar el método de remediación más apropiado para cada caso en particular.

Estos métodos son esencialmente cuatro: a) biológico, b) físico-químico, c) térmico y d) confinamiento. A su vez, pueden clasificarse en dos categorías: a) tratamiento *in situ*, que implica la eliminación de contaminantes sin sacar el terreno contaminado, y b) tratamiento *ex situ*, por el cual el material a tratar se lleva a un espacio confinado o se trata en instalaciones adecuadas. Las técnicas de remediación *in situ* son de menor costo y de bajo impacto ambiental inducido, pero presentan la desventaja de la escasez de certezas con respecto a los resultados finales. Las técnicas *ex situ*, si bien son altamente costosas, se destacan por su efectividad, dado que puede prescindirse de los factores externos como el clima y sobre todo porque el suelo contaminado es físicamente eliminado y el suelo nuevo que se incorpora se homogeneiza con el anterior no contaminado, lo que permite controlar mejor el proceso.

La bibliografía más reciente acerca de los diferentes métodos de remediación de suelos proporciona una lista exhaustiva de todas las técnicas existentes. En esta bibliografía se pone el énfasis en las ventajas y desventajas de cada uno de ellas respecto del tipo de contaminante, el tipo de suelo, la proximidad de la capa freática, la presencia de cursos de agua superficiales, etc. Pero en la aplicación práctica de estos métodos, surgen dificultades asociadas con tres factores: a) la falta de los necesarios estudios previos sobre composición y estructura de suelos, b) la falta, en Argentina, de una normativa nacional sobre límites de hidrocarburos residuales permitidos, y c) el hecho de que varios métodos que están descriptos no han

recibido aprobación por parte de las autoridades ambientales de aplicación. Nuestro propósito no es aquí detenernos en cada uno de ellos, sino centrar la atención en los cuatro métodos que han demostrado la mayor eficiencia de acuerdo con mi propia experiencia en tareas de campo realizadas en suelos contaminados accidentalmente por hidrocarburos:

a) “Bioventilación” (*Bioventing*): Es una técnica biológica *in situ* que se basa en la extracción de vapores del suelo mediante una diferencia de presión generada por el bombeo de aire desde el exterior. Se aplica en suelos no saturados contaminados con hidrocarburos. Los gases generados deben ser tratados, normalmente haciéndolos pasar por filtros que contengan sustancias retenedoras adecuadas para cada gas, como por ejemplo carbón activado.

b) “Extracción de vapores del suelo” (*Soil Vapor Extraction*): Es una técnica físico-química *in situ* por la cual los compuestos volátiles se remueven en fase vapor del suelo mediante la obtención de un gradiente de presión de acuerdo con las concentraciones de los gases contaminantes, por aplicación de vacío realizado a través de pozos de extracción. Se aplica para VOCs (compuestos orgánicos volátiles) y algunos combustibles volátiles pero no es adecuado para aceites, hidrocarburos pesados y PCBs (bifenilos policlorados). No es efectivo en suelos saturados y alto contenido de finos.

c) “Oxidación química”: Es una técnica físico-química que convierte contaminantes peligrosos en compuestos no peligrosos o menos tóxicos que son más estables, menos móviles y/o inertes. Los agentes oxidantes más usados son ozono, peróxido de hidrógeno y cloro. El agente oxidante más utilizado es el peróxido de hidrógeno por no dejar residuos posteriores a la oxidación. El medio debe ser acondicionado a pH 8,2 con el agregado de cal hidratada para mejorar la cinética de descomposición del peróxido de hidrógeno.

d) “Estabilización/solidificación”: Es una técnica físico-química en la cual los



contaminantes se ligan físicamente o son encapsulados dentro de una masa estabilizada (solidificación) o son inducidas reacciones químicas entre agentes estabilizantes y los contaminantes para reducir su movilidad (estabilización). Se debe comprobar la no lixiviación de la matriz formada por el suelo y el contaminante líquido en ensayos de laboratorio donde se verifique la resistencia de la matriz a lixiviar por ensayo a la compresión de probetas realizadas con el material a remediar.

Los costos de remediación de suelos contaminados están en función, principalmente, de tres factores: el tipo y cantidad de sustancia peligrosa derramada, las características fisicoquímicas del suelo impactado y el tiempo transcurrido desde que se produjo el derrame. De estos ítems surge el método de remediación empleado y el costo asociado. El mayor costo se dará cuando: la sustancia sea muy peligrosa, la cantidad derramada sea mayor, mayor sea su capacidad de percolación, el suelo sea muy permeable, sea prolongado el tiempo desde el derrame y la remediación se realice *ex situ*. Por estas variables se torna imposible determinar un precio estándar. Como idea general, una remediación *in situ* de 100 m<sup>2</sup> de suelo contaminado con 30.000 litros de hidrocarburos puede estar en estos días en el orden de 80.000 a 100.000 dólares. Con métodos *ex situ*, transporte de suelo contaminado, remediación y disposición final, el costo puede llegar a 150.000 dólares para la misma cantidad de suelo. Los montos más elevados se dan en el caso de remediación de aguas subterráneas. Estas aguas se contaminan por percolación de las sustancias peligrosas líquidas a través de los suelos, sobre todo los más permeables.

En general, puede decirse que los métodos de remediación *in situ* son preferibles, siempre que se den las condiciones, a los de remediación *ex situ*. La preferencia está basada en las siguientes razones: el costo es menor, se evita el transporte de residuos peligrosos con el consiguiente riesgo de

contaminar otras áreas, se determina el costo de remediación con mayor facilidad al evitar la dependencia de transportistas de residuos peligrosos e incineradores habilitados, no existe el problema del transporte de residuos peligrosos en distintas jurisdicciones y se evita transportar suelo de otras regiones para reemplazar el contaminado enviado a incinerar.

La posibilidad de detectar fehacientemente la extensión superficial y en profundidad en suelo de la contaminación por hidrocarburos mediante métodos no invasivos (como inducción electromagnética y el método geoelectrico) permite determinar cuál de las metodologías de remediación *in situ* se adecua mejor al caso particular. Es de importancia decisiva en la toma de decisión de esta metodología saber si la capa freática está impactada, lo que puede hacerse también por métodos no invasivos además de los tradicionales por toma de muestra de agua de los pozos freáticos realizados en el sitio.

Podemos concluir entonces que las metodologías de remediación *in situ* más adecuadas para suelos contaminados por hidrocarburos son: Bioventilación, Extracción de vapores del suelo, Oxidación Química, Estabilización / Solidificación. Otras metodologías *in situ* no son aplicables a siniestros en rutas por diferentes motivos: por las complicaciones operativas (fito-remediación), o la falta de disponibilidad del equipamiento necesario en el país (separación electrocinética), la no autorización de las autoridades de aplicación para inyectar fluidos a presión (fracturación), la no aplicabilidad a hidrocarburos (enjuague de suelos), el requerimiento de equipamiento de alta complejidad (tratamiento térmico) y los altos requerimientos locales de energía eléctrica y el alto costo de equipamiento (vitrificación). La decisión de la metodología de remediación es un balance entre aspectos técnicos, legales y económicos. Las limitaciones técnicas están dadas por: zona

de suelo contaminada saturada o no saturada, impactación o no de la capa freática, disponibilidad de empresas con equipamiento adecuado que puedan trasladarse al lugar de contaminación accidental, tipo de suelos y de hidrocarburo derramado, cantidad de suelo impactado, tiempo de demora entre la ocurrencia del siniestro y la llegada de la empresa de atención de la emergencia, accionar de los bomberos locales y la correcta identificación de la carga que transporta el vehículo siniestrado. En Argentina, las limitaciones legales están dadas por las diferencias entre las normativas provinciales (entre las normativas de las provincias entre sí y las de éstas con la normativa nacional) sobre derrame accidental de sustancias peligrosas que se transforman en residuos peligrosos, la demora en la aprobación de la metodología de remediación propuesta y las autorizaciones de Vialidad Nacional o Provincial para trabajos en banquetas de rutas. Las económicas están dadas por la existencia de límites en el monto a cubrir por algunas compañías aseguradoras.

Para el caso de impactación de la capa freática con hidrocarburos las metodologías más adecuadas son "Inyección de aire" (*Air sparging*), "Aplicación de alto vacío" (*Bioslurping*) y "Extracción en Doble Fase". En la toma de la decisión también influyen las características fisicoquímicas del producto derramado, en particular su tensión de vapor y su solubilidad en agua.

Para igual cantidad de suelo a tratar por método *in situ* y combustible derramado del tipo gasoil, es decir, no demasiado volátil, el método más eficiente y de menor costo total de remediación es el de Oxidación Química, en particular usando cal y peróxido de hidrógeno. Para el caso de suelos muy permeables y un producto derramado de alta velocidad de percolación es adecuada la combinación de dos métodos como Oxidación Química y Extracción en Doble Fase, dado que es altamente probable la contaminación de la capa freática. Esta operatoria eleva los

costos por las instalaciones necesarias, el mayor tiempo requerido de remediación y los problemas derivados de las inclemencias climáticas que demoran el proceso. Cuando la cantidad de material a tratar es muy grande (más de 3000 m<sup>3</sup>), la cantidad de producto derramada es considerable (más de 20.000 litros) y el producto no impactó la capa freática, debe analizarse la alternativa de la metodología de Estabilización / Solidificación, que presenta la ventaja de no mover grandes cantidades de suelo contaminado a otros lugares pero tiene el inconveniente de la posibilidad de lixiviación, mayor costo total y uso de grandes cantidades de cemento para formar la matriz sólida que retiene atrapado al hidrocarburo. Además, muchas autoridades de aplicación de distintas jurisdicciones no aceptan esta metodología.

Pasemos ahora a analizar la gestión ambiental de la contaminación del aire. La medida de este tipo de contaminación consiste en la evaluación de las concentraciones de los diferentes contaminantes, para lo cual es necesario tener claros dos conceptos básicos: emisión e inmisión. La "emisión" se define como el lanzamiento de materiales al aire, ya sea por un foco localizado (emisión primaria) o como resultado de reacciones fotoquímicas o cadenas de reacciones iniciadas por un proceso fotoquímico (emisión secundaria), mientras que la "inmisión" se entiende como la concentración de contaminantes a nivel del suelo, de modo temporal o permanente.

Las estrategias principales para el control de las emisiones son el mejoramiento del parque automotor, el mejoramiento de los combustibles y una mejor administración del transporte, lo que implica: a) medidas de mando y control como el establecimiento de límites máximos de emisiones, programas de inspección y mantenimiento, la prohibición de la circulación de autos, normas para la nafta, la utilización de combustibles alternativos, la planificación del uso de tierras y cambios

de las horas de trabajo, y b) incentivos del mercado como incentivos económicos, comercialización de permisos y créditos, impuestos y estudios de opciones de menor costo.

En cuanto al control de la contaminación por ruido, para evitar los efectos negativos que tiene el ruido sobre la salud humana es fundamental la reducción de la emisión y la exposición sonoras. Por ello, el control del ruido es un objetivo prioritario en la gestión medioambiental. El sonómetro es el instrumento básico que se utiliza en la medida del sonido. Es un aparato que responde al sonido de forma aproximadamente igual que el oído humano y que da medidas objetivas y reproducibles de su nivel. Existen distintos tipos de sonómetros en función de su precisión: el sonómetro de inspección, que es un sonómetro de baja precisión, el sonómetro de uso general, que tiene una precisión media, el sonómetro de gran precisión, y el sonómetro patrón, cuya precisión es máxima. En la medición del sonido se emplean, además del sonómetro, otros equipos como el calibrador acústico y la estación meteorológica. Antes de efectuar una medición, se debe asegurar que los equipos utilizados para su realización estén en perfectas condiciones técnicas y de calibración. La calibración es el conjunto de operaciones que permiten, en condiciones especificadas, conocer la precisión e incertidumbre en los aparatos de medida, por comparación con los correspondientes valores conocidos de una magnitud medida con un equipo patrón. Los principales planteamientos para reducir la exposición al ruido son: a) la reducción del ruido en la fuente emisora, b) la limitación de la transmisión del ruido y c) la reducción del ruido en el punto de recepción. En cuanto a la reducción del ruido en la fuente emisora, las acciones a realizar son: reemplazar las máquinas ruidosas por otras menos ruidosas, realizar una correcta distribución de las máquinas, reducir las vibraciones, reducir las fuerzas de impactos, aumentar el amortiguamiento, realizar un

buen mantenimiento de las máquinas y efectuar procesos de trabajo menos ruidosos. Las actuaciones sobre la fuente emisora son las medidas más eficaces, por eso son las primeras acciones que se deben realizar, porque actúan directamente sobre la causa que provoca el ruido, y a la larga, suelen ser las medidas más económicas. En relación con la limitación de la transmisión del ruido, las actuaciones sobre el medio de transmisión son las más utilizadas, entre ellas, se encuentran el uso de materiales absorbentes, la construcción de barreras acústicas, el confinamiento o cerramiento de equipos y el uso de atenuadores o silenciadores. Algunos ejemplos de barreras acústicas son las pantallas acústicas, los diques de tierra y las pantallas vegetales. El apantallamiento consiste en la inserción de una barrera acústica entre la fuente sonora y el receptor, creando una zona silenciosa denominada "zona de sombra". La atenuación en el receptor va a depender del material del que está constituida la barrera, sus dimensiones, la distancia entre la barrera y la fuente, y las características fonoabsorbentes de otras superficies próximas. El cerramiento, por su parte, consiste en el cierre de uno o varios equipos o de toda la instalación limitando la propagación al exterior del ruido con el fin de obtener una calidad acústica determinada. Las ondas, al cambiar de medio (aire, sólido, aire) sufren una pérdida de energía, ya que parte de su energía es reflejada al medio en que se propaga y parte es transmitida al segundo medio. Para saber si un cerramiento es o no eficaz, se debe determinar el aislamiento acústico que proporciona. El acondicionamiento y la corrección acústica de interiores se consiguen controlando el fenómeno de la reverberación, que consiste en el aumento del nivel sonoro debido a sucesivas reflexiones de las ondas al incidir sobre las superficies del recinto. El valor óptimo del tiempo de reverberación, parámetro que caracteriza el fenómeno, depende del tipo de audición a que se destine el recinto. Los materiales de control del tiempo de



reverberación son materiales porosos, materiales para argamasa, materiales perforados, paneles elásticos y paneles suspendidos. Por último, en cuanto a la reducción del ruido en el punto de recepción, las actuaciones sobre el receptor deben adoptarse en última instancia, ya que, en general, se trata de medidas de protección del trabajador, tales como la protección de audición, el horario restrictivo y la reducción del tiempo de exposición.

Otro modo de gestión ambiental relacionado con la contaminación del aire producida por procesos que generan efluentes gaseosos es el tratamiento de gases. Las metodologías son variadas:

a) Biofiltración: Los gases contaminantes son bombeados a través de un lecho de sustrato y se adsorben a su superficie, donde son degradados por microorganismos. Este método convierte a los contaminantes en subproductos inofensivos, con él se pueden tratar VOCs no halogenados e hidrocarburos de petróleo, y su aplicación en el control de olores de pilas de compostaje es exitosa. Sus desventajas son que el éxito del método depende de la biodegradabilidad de los componentes, los hongos fugitivos no actúan sobre los microorganismos de los efluentes contaminados, y que hay que realizar controles de temperatura para los biofiltros.

b) Destrucción por alta energía: El proceso utiliza fuentes de energía concentrada, como arcos de plasma de corrientes eléctricas muy elevadas. Sus ventajas son que destruye los VOCs, se pueden tratar casi todos los VOCs y SVOCs, tiene potencial para compuestos inorgánicos, y es útil para la destrucción de solventes clorados. Sin embargo, es una tecnología no completamente desarrollada hasta ahora.

c) Separación por membranas: Esta tecnología de separación de aire/vapores orgánicos involucra el transporte preferencial de vapores orgánicos a través de una membrana de separación no porosa. Permite el tratamiento de VOCs, cloroformo y tetracloruro de carbono, pero el manejo de

interferencias y obturantes de la membrana es difícil, no es posible manejar fluctuaciones en las concentraciones de VOCs, y las membranas son susceptibles a la humedad.

d) Oxidación: Con este método se destruyen compuestos orgánicos por combustión a alta temperatura (1000°C). Los compuestos gaseosos en concentraciones de traza se destruyen a temperaturas menores (450°C). Esta temperatura es menor que por combustión convencional. Sus ventajas son que permite tratar VOCs no halogenados, SVOCs e hidrocarburos de petróleo, y es una metodología efectiva tanto en metales nobles como básicos en la catálisis para la destrucción de hidrocarburos halogenados. Sus desventajas son que los venenos catalíticos pueden arruinar los catalizadores, y que deben usarse catalizadores especiales, materiales especiales y *scrubbers* para reducir las emisiones de gases ácidos.

e) *Scrubber*: Es un lavador de corriente gaseosa con un dispositivo de limpieza que sirve a los efectos de limpiar el gas y despojarlo de compuestos solubles o particulados. Permite tratar cloro, vapores ácidos, gases de incineradores o residuos líquidos y gases ácidos, pero existen dificultades en la operación con concentraciones excesivas de sales disueltas, el gas puede enfriarse previamente, y pueden producirse daños en los equipos.

f) Adsorción en carbón en fase gaseosa: En este método se bombean los gases de venteo a través de una serie de columnas o recipientes que contienen carbón activado, de esta manera se adsorben los contaminantes orgánicos. Es aplicable a gases con contenido de compuestos orgánicos, pero es necesario el pretratamiento de VOCs, no es un método recomendable para altas concentraciones de contaminantes, deben obtenerse permisos para manejo de sustancias peligrosas, la humedad reduce la capacidad del carbón, puede producirse crecimiento bacteriano e incendios en el carbón.

Finalmente, abordaremos la gestión ambiental de la contaminación del agua, en especial, nos referiremos al tratamiento de aguas residuales y a la remediación de aguas contaminadas. Las aguas residuales se someten a distintos tipos de procesos físicos, químicos y biológicos con el objeto de reducir la carga de contaminantes antes de su vertido al medio ambiente. Podemos dividir los vertidos en dos grandes grupos de aguas residuales: aguas residuales urbanas (ARU), y aguas residuales industriales (ARI). Las aguas residuales urbanas son las aguas residuales domésticas o su mezcla con aguas residuales industriales y/o aguas de escorrentía pluvial, mientras que las aguas residuales industriales son todas las aguas residuales vertidas desde locales utilizados para efectuar cualquier actividad comercial o industrial que no sean aguas residuales domésticas ni aguas de escorrentía pluvial. Las ARU procedentes de núcleos grandes y medianos se tratan en estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR), para el tratamiento de las ARI que sean biodegradables, las EDAR son similares a las que tratan las ARU adaptadas a cargas de contaminantes más altas. Si los vertidos contienen sustancias no biodegradables son necesarios procesos de depuración específicos para su eliminación. El tratamiento de las aguas residuales en las EDAR genera aguas tratadas y lodos a los que se debe dar un destino final apropiado. Los objetivos de una gestión adecuada de aguas depuradas son: el mantenimiento de la calidad del agua superficial, la adecuación del consumo de agua potable a las necesidades reales, el aumento de las reservas de agua potabilizable disponibles, la recarga de acuíferos por infiltración e inyección del agua, la creación de barreras contra la intrusión salina, y la distribución de la calidad de agua adecuada a cada uso. Los procesos unitarios para el tratamiento de aguas residuales pueden ser de tres tipos: físicos, químicos o biológicos. Los procesos físicos son los primeros métodos más empleados en el tratamiento de aguas residuales. En ellos predomina la acción de

las fuerzas físicas. Algunos de los más importantes son:

a) Desbaste: Su objetivo es eliminar de las aguas residuales los constituyentes que pueden dañar u obstruir las distintas unidades de la instalación, interfiriendo en los procesos de tratamiento posterior. Los elementos separadores pueden ser rejas de barrotes, constituidas por barras, alambres y tamices: telas metálicas o placas perforadas. La limpieza de las rejas puede efectuarse de forma manual o automática. Es necesario hacer la limpieza de forma periódica para evitar un aumento en las pérdidas de carga.

b) Homogeneización de caudales: Se emplea para amortiguar las variaciones de caudal y composición del agua residual. Puede realizarse de dos formas: en línea, en la cual la totalidad del caudal pasa por el tanque de homogeneización, y en derivación, en la cual el caudal que pasa por el tanque de homogeneización es el que excede un límite prefijado.

d) Sedimentación: La sedimentación consiste en la separación por acción de la gravedad de las partículas suspendidas cuyo peso específico es mayor que el agua. Son procesos que forman parte de todas las plantas de tratamiento de agua residual. Esta operación se emplea para la eliminación de arenas, materia en suspensión y flóculos que van sedimentando y se eliminan del fondo del tanque de sedimentación con un rascador automático.

e) Flotación: Los procesos de flotación se suelen emplear para la eliminación de partículas sólidas difíciles de eliminar por gravedad debido a su densidad. La separación se consigue introduciendo finas burbujas de gas, normalmente aire, en la fase líquida. Las burbujas se adhieren a las partículas, reduciendo la densidad de éstas y, por tanto, permitiendo su ascenso hasta la superficie del líquido, donde se recogen fácilmente mediante un rascado superficial.

f) Filtración en medio granular: El proceso de filtración se aplica para la eliminación de sólidos en suspensión y requiere un

efluente de baja concentración en sólidos. Las fases de la filtración en medio granular son filtración y lavado.

En cuanto a los tratamientos químicos, son procesos en los que las transformaciones se producen mediante reacciones químicas. Con el fin de alcanzar los objetivos del tratamiento del agua residual, los procesos químicos unitarios se llevan a cabo en combinación con las operaciones físicas unitarias. Los tres más importantes son:

a) Coagulación-floculación: Los procesos de coagulación y floculación facilitan la eliminación de los sólidos en suspensión y de las partículas coloidales. Ambos tratamientos van siempre unidos. La coagulación es la desestabilización de unas partículas de pequeño diámetro, llamadas coloides, responsables de la turbidez o del color del agua superficial, causada por la adición de un reactivo químico llamado coagulante, mientras que la floculación es la formación de aglomerados por unión de partículas en suspensión existentes en el seno del líquido, mediante la adición de un reactivo llamado floculante.

b) Ósmosis inversa: En el tratamiento de aguas residuales, la ósmosis inversa se utiliza para la eliminación de sólidos disueltos y contaminantes. Este proceso separa los contaminantes del agua residual forzando al agua a fluir a través de una membrana semipermeable mediante la aplicación de una presión.

c) Intercambio iónico: El fundamento del intercambio iónico es retener ciertos iones de la corriente residual, cediendo a cambio una cantidad equivalente de otros iones del mismo signo. De esta forma, cationes inocuos, como el hidrógeno, pueden sustituir metales pesados tóxicos, mientras que aniones inocuos, como el hidróxido, pueden sustituir aniones tóxicos como los fenoles y cianuros. Las resinas más utilizadas son las constituidas por poliestireno y poliamidas. Son muy útiles para la eliminación de trazas de metales pesados y para obtener aguas desmineralizadas.

Y finalmente, los tratamientos biológicos se

emplean para eliminar materia orgánica carbonosa del agua residual, para la desnitrificación, la eliminación de fósforo y la estabilización de fangos. Los dos principales son:

a) Tratamiento biológico aeróbico: En el proceso de tratamiento aeróbico del agua residual los microorganismos emplean la materia orgánica presente, junto al oxígeno disuelto, para producir el crecimiento de las células y dióxido de carbono y agua como productos finales. Los procesos principales se llevan a cabo con sistemas de cultivo en suspensión o cultivo fijo. En el cultivo en suspensión, se distinguen dos tipos de tratamientos: fangos activados, en los que el residuo orgánico se introduce en un reactor donde se mantiene un cultivo bacteriano en suspensión, manteniendo un ambiente aerobio mediante el uso de difusores o aireadores mecánicos que además facilitan el mezclado, y lagunas aeróbicas: el proceso biológico se realiza en lagunas de grandes extensiones en contacto con la atmósfera. El cultivo fijo, en cambio, se emplea para eliminar la materia orgánica, pero también se puede emplear para el proceso de conversión del nitrógeno amoniacal en nitrato (nitrificación). Los microorganismos están fijos en un soporte sólido introduciendo suficiente oxígeno para asegurar que el proceso sea aeróbico. Los procesos de cultivo fijo incluyen los filtros percoladores, los reactores biológicos rotativos de contacto (biodiscos) y los reactores de nitrificación de lecho fijo.

b) Tratamiento biológico anaeróbico: Transforma los residuos orgánicos en metano y dióxido de carbono en ausencia de aire. Los microorganismos anaeróbicos pueden estar dispuestos en suspensión o como cultivo fijo. Se espera que el uso de cultivos anaeróbicos fijos aumente con el tiempo, puesto que la cantidad de fangos que produce es considerablemente inferior a la que se produce en los procesos aeróbicos y, además, permite el aprovechamiento del gas metano provocado por la degradación de los compuestos orgánicos.

En cuanto a la remediación de aguas contaminadas, los métodos más frecuentes para el tratamiento de aguas superficiales, subterráneas y lixiviados pueden clasificarse, como en el caso de los suelos, como tratamientos *in situ* o *ex situ*, y en ambos casos existen métodos biológicos y físico-químicos, además de los métodos de contención. Los métodos biológicos *in situ* más comunes son dos:

a) Biorremediación mejorada: Con este método se favorece la tasa de biodegradación de contaminantes orgánicos por el aumento de concentración de receptores de electrones y nutrientes en el agua freática, agua superficial y lixiviado. El oxígeno es el principal receptor de electrones para la biorremediación aeróbica. Permite el tratamiento de VOCs no halogenados, SVOCs no halogenados y combustibles, pero deben tomarse muchas precauciones de seguridad, debe crearse un sistema de circulación de agua subterránea, existe el riesgo de una posible acumulación subterránea de vapores, y debe tratarse el agua subterránea.

b) Fitorremediación: Es una serie de procesos que utilizan plantas para remover, transferir, estabilizar y destruir contaminantes orgánicos / inorgánicos en agua subterránea, agua superficial y lixiviado. Contempla procesos como el control hidráulico, la fito-volatilización, fito-degradación y bio-degradación radicular. Permite tratar contaminantes orgánicos de corrientes líquidas industriales y se producen enzimas que catalizan la degradación, pero es de aplicación limitada, puede producir fototoxicidad y una transferencia de contaminantes, y requiere superficies extensas.

Por otro lado, los métodos fisicoquímicos *in situ* son:

a) *Air Sparging*: Se inyecta aire a la matriz saturada para remover contaminantes a través de su volatilización. Permite el tratamiento de VOCs y combustibles y tiene una alta capacidad de tratamiento en la

zona de aireación, pero hasta el momento hay poca información disponible, el equipo que se requiere es medianamente complejo, tiene nula efectividad en la recuperación de FLNA, es posible que se generen vapores peligrosos, y pueden presentarse dificultades por la heterogeneidad del suelo.

b) *Skimming*: Se utilizan membranas oleofílicas para la separación selectiva de productos de petróleo sobrenadantes en agua. Sus ventajas son que permite tratar hidrocarburos de petróleo en fase líquida no acuosa sobrenadante en agua subterránea, se utilizan equipos simples y comercialmente disponibles, y se recuperan volúmenes significativos de producto. Tiene dos desventajas: es aplicable a espesores reducidos y los tiempos de tratamiento son prolongados.

c) *Bioslurping*: Consiste en la aplicación de alto vacío a través de tubos de succión que interceptan los niveles de interfase de producto sobrenadante, paralelamente se hace vacío en el interior del pozo de extracción para favorecer la bioventilación de la zona de aireación. Posee numerosas ventajas: la estimulación de la biorremediación aeróbica de suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo, permite extraer producto sobrenadante, es aplicable a sitios con posición profunda del acuífero freático, se utiliza un equipamiento relativamente simple y comercialmente disponible, y tiene gran efectividad para la reducción de FLNA y remediación de la zona de aireación. Sus desventajas son que deben tratarse los gases de venteo, el posible mezclado de las fases y la formación de emulsiones.

d) Oxidación química: Convierte químicamente contaminantes peligrosos en compuestos no tóxicos o menos tóxicos, que son más estables y/o inertes. Presenta rápidas tasas de reacción en el subsuelo, pero pueden formarse subproductos tóxicos, generarse de gases y/o disturbios de la flora microbiana, y puede tener efectos negativos y reacciones violentas.

e) Barreras de tratamiento

pasivas/reactivas: Estas barreras permiten el paso de agua, causando la degradación o remoción de contaminantes. Pueden ser de embudo y trampa o paredes ferrosas de tratamiento. Permite el tratamiento de VOCs, SVOCs y contaminantes inorgánicos, pero puede producirse la pérdida de capacidad de reacción de las barreras pasivas y la posible disminución de la permeabilidad de la barrera, y el método está limitado a litologías subsuperficiales.

Los tratamientos biológicos *ex situ* más comunes son dos:

a) Biorreactores / biofiltros: Los contaminantes extraídos del agua subterránea se ponen en contacto con microorganismos en reactores con empaque (microbios adheridos) o soluciones suspendidas (microbios suspendidos). Permite el tratamiento de SVOCs, hidrocarburos de petróleo y otros materiales orgánicos biodegradables, pero posiblemente se necesite la adición de nutrientes, se provoque una probable toxicidad para los microorganismos y se produzcan microorganismos indeseados, además, deben tratarse los residuos y es preciso hacer controles de emisiones gaseosas.

b) Lagunas: Esta tecnología utiliza procesos naturales geoquímicos y biológicos inherentes a los ecosistemas de lagunas artificiales para acumular y remover metales, explosivos y otros contaminantes a partir de las aguas afluentes. Permite tratar el tratamiento de efluentes industriales, corrientes ácidas y controlar trazas de metales y otros materiales tóxicos, pero su efecto a largo plazo no está establecido, las lagunas envejecen, y tiene altos costos.

Por último, los tratamientos fisicoquímicos *ex situ* más frecuentes son los siguientes:

a) Adsorción / absorción: En la adsorción líquida los solutos se concentran en la superficie de un sorbente reduciendo la concentración del compuesto en la matriz líquida. Con este método puede tratarse la mayoría de los contaminantes orgánicos y

algunos inorgánicos, sin embargo, los compuestos solubles en agua y moléculas pequeñas no se adsorben bien, tiene costos altos, no es aplicable a sitios con altos contenidos de sustancias oleosas, y deben tratarse los residuos.

b) Carbón activado granulado: El agua subterránea se bombea a través de una serie de tanques o columnas que contienen carbón activado en el que los contaminantes orgánicos disueltos se adsorben. Permite el tratamiento de hidrocarburos, SVOCs y explosivos, es efectivo para pulir remanentes solubilizados, y tiene alta efectividad de remoción, pero debe reemplazarse o regenerarse periódicamente el carbón saturado, involucra altos costos de transporte y de descontaminación del carbón, y los compuestos altamente solubles en agua y las moléculas pequeñas no se adsorben.

c) Intercambio iónico: Remueve iones desde la fase acuosa por intercambio con otros iones disponibles en el medio de intercambio. Permite la remoción de metales disueltos y radionucleidos, pero sin embargo los aceites y las grasas en el agua pueden tapar las resinas de intercambio (y oxidantes pueden dañarlas) y debe tratarse el efluente líquido.

d) Precipitación / floculación / coagulación: Contaminantes disueltos se transforman en sólidos insolubles, facilitando la remoción posterior del contaminante desde la fase líquida por sedimentación o filtración. Sus ventajas son que convierte especies iónicas disueltas a partículas en fase sólida que pueden removerse por filtración, se aplica a la remoción de metales tóxicos disueltos y radionucleidos, y es posible recuperar los metales. Sus tres desventajas es que existe una posible necesidad de procesos adicionales, la de una posible generación de barros tóxicos, y tiene altos costos.

e) Barreras bentoníticas: Estas barreras subsuperficiales consisten en trincheras verticales excavadas y llenas con mezclas acuosas bentoníticas. Estas mezclas proveen contención y sostén a la excavación



y retardan el flujo subterráneo. Estas barreras alejan el flujo de agua subterránea lejos de captaciones de agua, redireccionan el flujo y/o proveen contención para otros sistemas, sin embargo, la metodología requiere esfuerzos considerables de obra civil, sólo contiene los contaminantes en áreas específicas, las barreras no resisten el ataque de ácidos, bases y otros, las barreras pueden deteriorarse y/o degradarse con el tiempo.

Como hemos podido ver, la gestión ambiental de la contaminación del suelo, el aire y el agua involucra numerosos factores que deben tenerse en cuenta a la hora de escoger una metodología de remediación para un medio contaminado: factores técnicos, ambientales y económicos. La creciente complejidad y gravedad de los problemas ambientales a diferentes escalas provoca que aumenten cada vez más la injerencia de los gobiernos, la formulación de legislación y diferentes instrumentos legales (como los seguros ambientales), la capacitación de los responsables de los sistemas de gestión ambiental en las empresas, y la búsqueda de soluciones tecnológicas innovadoras y eficaces a nivel ambiental y económico. El objetivo de la gestión ambiental, como se ha dicho, es prevenir la contaminación y, en caso de que ésta se haya producido, mitigar sus efectos negativos. Es evidente que no existe un rincón del planeta que esté libre de contaminación, como nos lo muestra el triste ejemplo de la bolsa plástica en el fondo de la Fosa de las Marianas. Pero también es evidente que es el momento de actuar para contribuir a la supervivencia del planeta y de nuestra especie.