

## Curso sobre contaminación de suelos y aguas subterráneas

Universidad Politécnica de Valencia

Valencia, 24 al 28 de septiembre de 2001

### CONTAMINACIÓN DEL SUELO DEBIDA A PROCESOS INDUSTRIALES

J.Manuel Álvarez-Campana Gallo  
Diputación Provincial de A Coruña  
josemanuel.alvarezcampana@dicoruna.es

**Resumen:** se pretende aportar una visión del ciclo completo del problema de los suelos contaminados por actividades industriales. Se parte de una revisión histórica de acontecimientos y causas que convierten esta cuestión en una de las de mayor complejidad técnica y científica de las disciplinas ambientales. Se advierte la importancia de abordar con amplitud el concepto de suelo contaminado, y de incorporar al estudio de componentes potencialmente contaminantes a todas las sustancias que intervienen en el ciclo del proceso industrial: materias primas, productos, subproductos y residuos; y no exclusivamente a estos últimos. Se insiste en la conveniencia de seguir un proceso secuencial de investigación de los emplazamientos, reforzado por el empleo de modelos conceptuales, destacando que esta es la forma más racional de abordar no solo la investigación sino también la acción de descontaminación y la evaluación de su eficacia. Se concluye planteando las tendencias de futuro y un conjunto de cuestiones abiertas para la reflexión.

#### Indice de contenidos

1. Antecedentes en la relación entre procesos industriales y contaminación de suelos .....	2
2. ¿Por qué los suelos contaminados han alcanzado tanta importancia? .....	6
3. Dimensión del concepto de suelo en emplazamientos industriales .....	8
4. Potencial contaminante de las actividades industriales .....	9
5. Contaminantes potenciales de origen industrial.....	13
5.1 Contaminantes químicos inorgánicos.....	13
5.2 Contaminantes químicos orgánicos .....	16
6. Metodología de investigación de suelos contaminados por actividades industriales .....	22
6.1. Estudio de la actividad .....	24
6.2. Estudio del medio físico.....	25
6.3. Campaña de muestreo y determinaciones analíticas .....	27
6.4. Evaluación de la contaminación.....	27
6.5. Modelo conceptual.....	28
6.6. Análisis de riesgos.....	30
6.7. Proyecto de recuperación o medidas correctoras .....	31
7. Tecnología en descontaminación de suelos afectados por actividades industriales .....	32
7.1 Control del emisor.....	34
7.2 Tratamiento <i>in situ</i> .....	35
7.3 Extracción del contaminante <i>in situ</i> y tratamiento .....	37
7.4 Extracción, tratamiento y reutilización del suelo .....	38
7.5. Extracción y eliminación del suelo .....	40
7.6. Otras medidas .....	41
8. Tendencias y futuro en relación con la contaminación del subsuelo .....	42
9. Referencias bibliográficas y documentales .....	44

## **1. Antecedentes en la relación entre procesos industriales y contaminación de suelos**

En los años sesenta nadie hablaba de contaminación de suelos. Los suelos contaminados se convierten en un problema a partir de los años setenta. La toma de conciencia de este problema se vincula a episodios traumáticos en distintos países y situaciones. Casi todos con un denominador común: la actividad industrial. En su mayor parte han tenido que ver con problemas de residuos industriales con efectos inicialmente desconocidos o descontrolados, y con un cambio de uso importante en el territorio, asociado en particular a la transformación de antiguos emplazamientos industriales en áreas residenciales.

No es coincidencia que estos hechos ocurriesen en países que actualmente muestran la mayor dedicación y sensibilidad ambiental, y que ahora tienen unas legislaciones muy rigurosas en materia de contaminación de suelos: Estados Unidos y Holanda. Tampoco es de extrañar que sea precisamente Holanda, en donde el 95% del suministro de agua potable a la población se realiza con aguas subterráneas, el país del mundo que tiene actualmente una de las políticas más rigurosa en cuanto a la contaminación de suelos y aguas.

Son numerosos los ejemplos de contaminación que en pocos años han despertado la preocupación por la contaminación del suelo, y por tanto del subsuelo y los acuíferos. En especial por la contaminación de origen industrial, particularmente compuestos químicos orgánicos.

Exponemos algunos de los primeros casos ocurridos en Holanda y Estados Unidos que ya pertenecen a la literatura clásica de los suelos contaminados. Se añaden ejemplos posteriores ocurridos centroeuropa y, finalmente casos más recientes en el País Vasco, Galicia y Andalucía. Este último, producido en el entorno de Doñana, tiene la particularidad, frente a la gradualidad habitual en este tipo de problemática, de estar ligado a un hecho catastrófico.

La experiencia de Lekkerkerk (Holanda). Este caso originó los procesos de descontaminación del suelo y del agua subterránea en los Países Bajos. En el año 1978, en Lekkerkerk, una pequeña población de la provincia de Holanda del Sur se había construido un nuevo barrio residencial en una antigua zona pantanosa, cuya superficie había sido elevada artificialmente con residuos sólidos. En Holanda los residuos inertes industriales, de demolición y domésticos han sido empleados con este fin desde

hace siglos (en la ciudad de Dordrecht se encontró una amplia colección de zapatos de cuero medievales, en un estado de conservación excelentes, que habían sido utilizados para pavimentar las calles terrosas de la ciudad). Sin embargo, en el caso de Lekkerkerk, los materiales de relleno contenían residuos industriales incontrolados. Con objeto de no alterar el uso del suelo, en 300 viviendas que ocupaban 6 has, se hizo necesaria la extracción de 100.000 m<sup>3</sup>. Los costes de descontaminación alcanzaron los 200 millones de florines (aprox. 13.000 millones de pesetas).

### Algunos casos de Estados Unidos

En Sant Louis Park, Minnesota, la contaminación por creosota del suelo y acuíferos se ha extendido durante 50 años. Se han tenido que abandonar pozos de abastecimiento a la población por las altas concentraciones de fenoles, un potencial carcinógeno.

En Jackson Township, New Jersey, cien sondeos próximos a un vertedero tuvieron que cerrarse a causa de la contaminación química orgánica. Aunque el vertedero, que nunca fue sellado adecuadamente y estaba situado sobre arenas permeables, sólo estaba autorizado para recibir lodos de depuradora y de tanques sépticos, los análisis químicos de muestras de agua subterránea de la zona mostraron elevadas concentraciones de benceno, metileno, cloro, tricloroetileno, etilbenceno y acetona. Los consumidores de estas aguas han tenido serios problemas de salud.

Aún mayor contaminación ocurrió en Rocky Mountain Arsenal, Denver, Colorado, en donde 7.770 has de suelos se contaminaron por productos procedentes de la fabricación de pesticidas.

El caso de Love Channel, Nueva York, en 1978, está en la mente de todo el mundo como desencadenante de toda la preocupación por la contaminación de suelos y aguas. La instalación de un área residencial y una escuela primaria, próximas a un vertedero incontrolado de residuos, implicó la aparición de enfermedades debido al contacto de la personas con PCB y dioxinas, debiendo darse el inmediato realojamiento de 800 familias. El coste sanitario y de operaciones superó los 58 millones de dólares.

República Eslovaca. Una de las mayores contaminaciones por hidrocarburos se detectó en el año 1972 en la refinería Slovnaft de Bratislava (Eslovaquia), situada en la margen izquierda del río Danubio, sobre un acuífero muy permeable y muy importante puesto que proporcionaba el agua para abastecimiento (1.000 l/s) a Bratislava. Se determinó que el origen de la contaminación estaba en las fugas durante la producción, manipulación y almacenamiento de estos productos de la refinería. Las

fugas que ocasionaron esta contaminación no excedieron del 0,1 % de la producción de la refinería, valor que se consideraba despreciable, pero que sin embargo ocasionó la contaminación descrita. El volumen de hidrocarburos flotantes se estimó en unos 100.000 m<sup>3</sup>, con un espesor medio de 24 cm en un área de la planta de 4,2 km<sup>2</sup>. En cuanto a los suelos contaminados, con un espesor medio de unos 2 metros, se estimó un volumen de 8.000.000 m<sup>3</sup>, con concentración de 0,1-10 g/kg de suelo. Durante la descontaminación se extrajeron 95.000 m<sup>3</sup> de hidrocarburos. Actualmente la contaminación se encuentra bajo control mediante una cortina hidráulica formada por 30 pozos de extracción.

República Checa. En enero de 1993, cerca de Brno, se fisuró una válvula situada en el mayor oleoducto entre Rusia y la República Checa, descargándose por ella un gran volumen de petróleo a través de su envoltura de grava. La solución que se le está dando es la excavación parcial del suelo contaminado y el resto mediante tratamiento por vía bacteriana, mientras que el petróleo se bombea desde las excavaciones y zanjas realizadas para su drenaje y contención.

Brasil. En julio de 2000, la rotura de una tubería subterránea de la empresa estatal Petróleo de Brasil (Petrobras) ocasionó el derrame de cuatro millones de litros de petróleo sobre un afluyente del Iguazú, lo que se considera como la mayor tragedia ecológica de Brasil en los últimos 25 años.

País Vasco. La muerte de dos personas, debida a la explosión que tuvo lugar en los sótanos de un edificio de Guernica en 1989, supuso el primer contacto serio con el problema de los suelos contaminados en el País Vasco. La explosión fue originada por la emanación de gases procedente de gasolina que se encontraba en las tierras que estaban por debajo del edificio.

Galicia. Los depósitos de lindano en Porriño (Pontevedra). Desde mediados de los años sesenta y hasta la actualidad, en el polígono industrial de Torneiros, en la localidad industrial de Porriño, ha existido la producción de pesticidas y biocidas, con residuos de alta toxicidad. A pesar de que hasta recientemente no se había señalado su efecto pernicioso por acumulación para la salud humana y el medio ambiente. En el proceso productivo del lindano se generaban residuos sólidos con contenidos elevados de diversos isómeros de hexaclorociclohexano (HCH) con potencial daño para la salud. Los residuos fueron depositados en huecos de extracciones de áridos en las terrazas del río Louro. Posteriormente la zona fue urbanizada con un polígono de

viviendas. El problema se ha extendido no solamente a la zona, sino también por el hecho de que se utilizaron tierras contaminadas para la construcción de subbases de carreteras de la zona en los años 70 y 80. Desde hace ya varios años se lleva a cabo un plan progresivo de descontaminación por parte de la Xunta de Galicia.

Andalucía. En abril de 1998, la rotura de una presa de residuos mineros de Aznalcóllar, puso en movimiento 5 hm<sup>3</sup> de agua y lodos con alto contenido en metales pesados (plomo, zinc, cobre, manganeso, cromo, cadmio, arsénico, cobalto...). En la balsa de lodos se acumulaban los estériles de lavado del yacimiento piritífero de Aznalcóllar. Tras la rotura se liberó aproximadamente el 15% del contenido de la balsa, cubriendo la riada de lodos tóxicos una superficie de más de 5.000 hectáreas en el entorno del Parque Nacional de Doñana. El impacto mundial de la noticia quedó reflejado al ocupar la primera página del *New York Times*.

A pesar de lo expuesto, el problema de contaminación de suelos de tipo industrial o asimilado no está exclusivamente ligado a la actividad industrial civil, sino también, especialmente en algunos países del antiguo bloque soviético, muy ligada a la existencia de bases militares. En la República Checa ha sido necesaria la creación de un fondo especial para la recuperación de los suelos y lucha contra la contaminación provocada por las antiguas bases militares de la Unión Soviética en el territorio.

Por su parte, las fuerzas aéreas de Estados Unidos realizan actualmente un intenso esfuerzo técnico y económico, dentro de un plan prioritario de inversiones, para la descontaminación y saneamiento de sus 206 bases militares.

En España, y a partir de 1993, el Ministerio de Defensa ha realizado una serie de contratos con empresas de consultoría ambiental, para la determinación y evaluación de la contaminación en una serie de bases militares, dentro de un proyecto piloto.

La sensibilización general al problema de los suelos contaminados tiene su respuesta en España a través del Plan Nacional de Recuperación de Suelos Contaminados 1995-2005, cofinanciado entre el Ministerio de Medio Ambiente (antes MOPTMA) y las Comunidades Autónomas, con un volumen de inversión estimado en 64.000 millones de pesetas.

## **2. ¿Por qué los suelos contaminados han alcanzado tanta importancia?**

Como hemos visto, el proceso de toma de conciencia de la existencia de graves alteraciones de orden ambiental ligada a los suelos ha tardado tiempo en asentarse en la cultura ambiental. El origen de este problema, que se vincula muy especialmente con el ámbito industrial, tiene cinco causas fundamentales, y sobre las que conviene detenerse.

- ✓ La priorización por parte de la administración ambiental y del sector industrial en la resolución de los problemas ambientales evidentes, especialmente los relacionados con la calidad del aire y de las aguas superficiales. La industria, en general, ha priorizado la resolución de los problemas más acuciantes en relación con la seguridad e higiene, con la contaminación atmosférica y la contaminación de las aguas litorales y fluviales. Esto se ha ido consiguiendo mediante un equilibrio permanente entre las exigencias legales, las posibilidades económicas, la mejora de la producción y la presión de los grupos sociales. No obstante, algunos aspectos que no son de fácil percepción (ej. estado del subsuelo) han ido quedando más descuidados, lo que puede presentar una fuente de riesgos para la salud humana y el medio ambiente.
- ✓ Los avances producidos por la investigación científica sobre la incidencia de diversos compuestos sobre la salud y el medio ambiente. En los últimos 25 años, el incremento de investigación sanitaria y ambiental en compuestos de aplicación comercial y de sus residuos, fundamentalmente en el campo de la química orgánica, ha revelado que la interacción de los mismos puede producir graves problemáticas de la salud o el medio ambiente. Lo que en un momento fueron compuestos creados para resolver problemas, se han convertido, tras su detallado análisis, en problemas ambientales de necesaria solución. Son ejemplos notables los problemas que se han encontrado con los pesticidas (ej. DDT, lindane) y otros compuestos de usos industriales extensos (ej. compuestos orgánicos con metales pesados, disolventes, etc).
- ✓ La creciente aproximación entre las zonas industriales y las zonas residenciales, como fruto de una competencia de usos. El crecimiento de las ciudades se está realizando, en muchas ocasiones, hacia zonas que nacieron con vocación industrial, encontrándose de esta forma problemas en la competencia por el uso del suelo. El

valor del suelo residencial supera en mucho al industrial, configurando una situación de competencia creciente. El ejemplo de Santa Cruz de Tenerife es paradigmático en esta problemática de competencia por el suelo, habiéndose notado el desarrollo de la ciudad hacia zonas que en origen se encontraban a una distancia razonable de ésta, y que fueron planificadas y desarrolladas como de uso industrial (el ensanche sur de la ciudad a partir del complejo industrial de la zona de refinería).

- ✓ La falta de una atención específica a la problemática de los suelos contaminados en la legislación ambiental. El suelo y subsuelo, tanto en la fase rocosa como en la líquida, es uno de los medios naturales en que menos se ha incidido a la hora de su legislación ambiental en España. No es hasta la ley de residuos de 1998 cuando se menciona expresamente, pero aún de forma incompleta, el problema de los suelos contaminados. Debido a esta ausencia, las referencias normativas al subsuelo han de inspirarse generalmente en valores adoptados en otros países y bajo condiciones ambientales muy distintas de las propias. Esto ha conducido a una dificultad añadida: ¿con qué valores comparo un suelo para saber si está contaminado?
  
- ✓ Las particularidades técnico-científicas propias del proceso de contaminación del suelo: a) puede afectar a la fase sólida: suelo y estructura geológica; y a la líquida: aguas infiltradas y aguas de circulación profunda; b) presenta un carácter generalmente acumulativo y aparece desfasado en su evidencia (meses o años) respecto al origen temporal del problema; c) tiene una gran dificultad de cuantificación y modelización en cuanto a su comportamiento (en suelos y aguas); d) en general, presenta un coste muy elevado de recuperación.

La conjunción de estos cinco factores hace que hoy en día la disciplina de investigación y tratamiento de suelos contaminados pueda considerarse una de las más complejas.

### **3. Dimensión del concepto de suelo en emplazamientos industriales**

En el ámbito de los suelos contaminados el propio concepto del suelo tiene un significado muy amplio, que se extiende más allá de los suelos naturales, abarcando también a los suelos antropizados y a suelos francamente antropizados o a rellenos.

Esto es debido a que el proceso de contaminación industrial, caso de ser *in situ*, se origina de una actividad productiva, en cuyas instalaciones se realizan los vertidos de residuos industriales o componentes del ciclo industrial. Estas instalaciones suelen tener adecuadas sus soleras, al menos desde el punto de vista constructivo, lo que hace que raramente se encuentre un suelo natural dentro de una instalación industrial. No obstante, en los pocos casos en que esto ocurre, o cuando existe un transporte ilegal de los residuos para ser vertidos en otro lugar puede ser que el depósito del residuo se realice sobre un suelo natural. De todas formas, lo normal es que el suelo que sufre la contaminación esté ya parcial o totalmente antropizado, aunque esto no indique necesariamente un caso de contaminación.

Un suelo natural mantiene sus horizontes básicos y la interrelación entre ellos. En el suelo antropizado puede estar removido el primero o los primeros horizontes, habiendo perdido el suelo parte de su capacidad de desarrollo y evolución. En el extremo se encuentran los rellenos, donde la capa de suelo natural ha sido sustituida íntegramente por materiales seleccionados o no, generalmente subproductos de otras operaciones. En este sentido se insiste en considerar el suelo como un espacio de uso, en el que sus condiciones no deban interferir los usos futuros del terreno, y como un nexo de unión entre una fase del medio físico (suelo) y otras fases (ciclo hídrico y atmosférico).

En relación con los contaminantes, el suelo también puede definirse como la zona situada por encima del nivel freático (zona no saturada), un escenario de singulares características.

Llegado este punto interesa, por su gran precisión técnica, exponer la definición que en la Ley 10/98, de Residuos, se hace del suelo contaminado como *todo aquél cuyas características físicas, químicas o biológicas han sido alteradas negativamente por la presencia de componentes de carácter peligroso de origen humano, en concentración tal que comporte un riesgo para la salud humana o el medio ambiente, de acuerdo con los criterios y estándares que se determinen por el Gobierno.*



#### **4. Potencial contaminante de las actividades industriales**

Durante algún tiempo se ha venido trabajando con la premisa de que solamente los residuos, especialmente aquellos de carácter peligroso, producidos en la gran multiplicidad de procesos industriales, podrían ser los causantes de contaminación de suelos. En este sentido, podemos afirmar que se ha superado la equivalencia *residuo=contaminante industrial*, que no hacía sino distorsionar el problema. Como hemos visto, muchos de los problemas de contaminación de suelos no se relacionan sólo con una deficiente gestión de los residuos, sino que también la deficiente gestión (almacenamiento, trasiego, procesos químicos, etc) en materias primas, subproductos y productos industriales está siendo causa de graves problemas en los suelos.

Por esta razón, y como se ha expuesto en el apartado anterior, a la hora de referirse a la contaminación de suelos, la ley de residuos habla de **componentes** en lugar de residuos al objeto de incluir, además de los residuos aquellas materias primas, que si bien han sido utilizadas en los procesos productivos de ciertas actividades industriales, por fugas, mala práctica o simple manipulación, pueden pasar al suelo contaminado.

Por esta razón se insistirá en el apartado de metodología en lo importante que es establecer un balance integral de masas y energía del proceso industrial, considerando sus fases gaseosa, líquida y sólida.

Con esta visión, los focos contaminantes más frecuentes, asociados a distintas actividades industriales de potencial contaminante, son: (1) Almacenamiento deficiente de materias primas, productos, subproductos y residuos; (2) Pérdidas en los procesos industriales (especialmente en tanques enterrados y conducciones); (3) vertederos y plantas de tratamiento de residuos urbanos mixtos, industriales y mineros.

La actividad industrial como foco contaminante del suelo puede extenderse en el tiempo, si no se toman las debidas medidas en el desmantelamiento, más allá del cese de la propia actividad industrial. Existen casos graves de contaminación de suelos ligados a antiguas instalaciones industriales.

A estas dificultades debe añadirse las derivadas de la complejidad de los compuestos utilizados en la industria. Uno de los principales problemas de la contaminación de los suelos y del agua subterránea son los productos químicos orgánicos. Sólo en USA se crean más de 250.000 nuevos cada año. Los que más problemas dan son los sintéticos orgánicos que suelen ser carcinógenos o tóxicos. Mas de un millón ya existen y varios miles se desarrollan cada año.

En la tabla adjunta se exponen los componentes importantes para distintos sectores industriales.

### Componentes principales de diversos sectores industriales

<b>SECTOR INDUSTRIAL</b>	
- Extracción y procesado de minerales y combustibles	
	Materias primas Disolventes, floculantes, extractantes... Lixiviados de escombreras Hidrocarburos, fenoles, compuestos de azufre
- Producción industrial de materiales y productos químicos	
Amplia variedad sector → amplia gama productos	
	Petroquímica Farmacia pinturas, barnices, adhesivos electroquímica curtidos, tenerías
- Transformación materiales y productos químicos	
Amplia variedad sector → amplia gama productos	
restos materias primas, disolventes, detergentes, tintes...	

No obstante lo expuesto, se insiste en el interés que tiene el estudio de los potenciales efectos de los residuos industriales en el ámbito de suelos contaminados. A este respecto, se aporta, como ejemplo, la tabla con la clasificación de residuos inventariados en Galicia, como un paso previo para el establecimiento de zonas de riesgo.

Clasificación de residuos peligrosos inventariados en Galicia  
(fuente P.R.I. Galicia, 1995; en CONSELLERÍA DE INDUSTRIA, 1995)

CATEGORÍAS	TIPOS DE RESIDUOS	CÓDIG. CER *
<i>Categoría 1</i> <b>Residuos de preparación y tratamientos de superficies</b>	- Cianurados con metales pesados distintos al cromo	110101
	- Sin cianuro conteniendo cromo	110103
	- Ácidos no especificados en otra categoría	110106
	- Alcalis no especificados en otra categoría	110107
	- Lodos de fosfatación	110108
	- Lodos y sólidos de procesos de temple que no contienen cianuros	110302
<i>Categoría 2</i> <b>Disolventes y residuos que contienen</b>	- Otros disolventes orgánicos, FFDU □ de plásticos	070204
	- Otros disolventes orgánicos, FFDU de tintes orgánicos	070304
	- Otros disolventes orgánicos, FFDU de pesticidas orgánicos	070404
	- Otros disolventes orgánicos, FFDU de productos farmacéuticos	

CURSO SOBRE CONTAMINACIÓN DE SUELOS Y AGUAS SUBTERRÁNEAS  
Contaminación del suelo debida a procesos industriales

CATEGORÍAS	TIPOS DE RESIDUOS	CÓDIG. CER *
<b>disolventes</b>	organohalogenados	070503
	- Otros disolventes, residuos de desengrase de metales	140103
	- Disolventes no halogenados (industria eléctrica)	140303
<i>Categoría 3</i> <b>Mezclas aceite-agua y emulsiones</b>	- Emulsiones no cloradas	130105
	- Aceites y sentinas recogidas en muelles	130402
	- Otras emulsiones	130505
<i>Categoría 4</i> <b>Aceites usados, productos aceitosos</b>	- Otros aceites hidráulicos	130107
	- Otros aceites lubricantes	130203
	- Aceites de aislamiento con PCB/PCT	130301
	- Aceites no clorados usados de aislamiento	130303
	- Aceites minerales de aislamiento	130305
	- Aceites usados no especificados	130601
	- Transformadores y condensadores con PCB/PCT	160201
<i>Categoría 5</i> <b>Residuos de pinturas, barnices, tintes y colas</b>	- Pintura o barniz sin disolventes halogenados	080102
	- Lodo de pintura o barniz con disolventes halogenados	080106
	- Lodo de pintura o barniz sin disolventes halogenados	080107
	- Residuos no especificados en otra categoría	080199
	- Tinta sin disolvente halogenado	080302
	- Pegamento sin disolventes halogenados	080402
	- Lodo de pegamento sin disolventes halogenados	080406
<i>Categoría 6</i> <b>Residuos de cocción, fusión e incineración</b>	- Cenizas volantes de fuel	100104
	- Escorias no tratadas, industria del acero	100202
	- Revestimientos y refractarios, industria del acero	100206
	- Revestimientos de cuba, termometalurgia del aluminio	100307
<i>Categoría 7</i> <b>Residuos de síntesis orgánica</b>	- Lodos y residuos sólidos aceitosos	050100
	- Lodos del tratamiento in situ de efluentes	050101
	- Lodos de fondos de tanques	050103
	- Otros alquitranes	050108
	- Catalizadores usados	050302
	- Líquidos de limpieza	070201
	- Residuos de la FFDU de productos farmacéuticos	070500
	- Pesticidas	200119
<i>Categoría 8</i> <b>Residuos minerales líquidos y lodos de tratamiento químico</b>	- Sosa	060202
	- Amoniaco	060203
	- No especificados en otra categoría, procesos químicos inorgánicos	
	- Soluciones de fijado de fotografías	060299
	- Productos químicos desechados	090104
		180204
<i>Categoría 9</i> <b>Residuos minerales</b>	- No especificados en otra categoría, procesos químicos inorgánicos	060299
	- Con mercurio	060404
	- De otros procesos químicos inorgánicos	061300

CATEGORÍAS	TIPOS DE RESIDUOS	CÓDIG. CER *
<b>sólidos y lodos de tratamiento químico</b>		
<i>Categoría 10</i>	- No especificados en otra categoría, procesos químicos inorgánicos	060299
<b>Residuos de procesos de descontaminación</b>	- Sales y soluciones con cianuros, procesos químicos inorgánicos	060311
	- Con mercurio, procesos químicos inorgánicos	060404
	- Lodos de tratamiento de gases en industrias del acero	100204
	- Lodos de hidróxidos metálicos e insolubilización de metales	190201
	- Residuos de desarenado	190802
	- Mezclas de grasa y aceite, residuos de EDAR	190803
	- Lodos de tratamiento de aguas residuales industriales	190804
	- Resinas de intercambio de iones usadas	190806

□ Fabricación Formulación Distribución y Utilización

**CER\*:** Decisión del Consejo del 22/12/94, por la que se establece una lista de residuos peligrosos en virtud del apartado 4 del artículo 1 de la Directiva 91/689/CEE del Consejo relativa a Residuos Peligrosos (94/904/CEE)

Uno de los problemas más recurrentes, y que acompaña frecuentemente a otros tipos de contaminaciones de suelos, está relacionado con las **fugas industriales de hidrocarburos**. Este problema se extiende, en medida no despreciable, a depósitos auxiliares y establecimientos de distribución de hidrocarburos. Las fugas de los hidrocarburos pueden aparecer durante la producción, manipulación, almacenamiento y transporte. En cuanto a su naturaleza pueden distinguirse:

- ✓ fugas sistemáticas, de largo plazo. Como por ejemplo debidas a pequeños defectos en los tanques, tuberías, durante la producción o manipulación
- ✓ fugas ocasionales. Tienen su origen normalmente en negligencias durante las distintas fases del proceso. Las fugas son ocasionales y de pequeña cantidad, y
- ✓ fugas accidentales. Son en su mayoría esporádicas, escapándose gran cantidad de hidrocarburos. Están causadas por instalaciones defectuosas, negligencias y por casualidades -como accidentes de cisternas, sismos,... Normalmente se conocen las cantidades introducidas.

De todas estas fugas las que se consideran más peligrosas son aquellas que permanecen ocultas, no siendo descubiertas hasta que se produce la contaminación de pozos, ríos, etc. Su detección previa es consecuentemente difícil y costosa. Un análisis retrospectivo ha mostrado cómo las causas más frecuentes son las fugas a largo plazo y ocasionales, en los lugares e envase o bombeo de las cisternas o tanques. Además es preciso destacar las fugas en transportes (accidentes), aeropuertos (fugas de

combustible durante el arranque de los aviones), aguas de refrigeración, residuos de industria petroquímica, etc.

## **5. Contaminantes potenciales de origen industrial**

Los contaminantes industriales de origen industrial, ya sea en materias primas, productos, subproductos o residuos, suelen estudiarse separando, fundamentalmente por razones de estado, movilidad y estabilidad, en el grupo de los compuestos inorgánicos y orgánicos. Se exponen las formas más frecuentes de ambos.

### **5.1 Contaminantes químicos inorgánicos**

Los contaminantes químicos inorgánicos de mayor importancia en el ámbito de los estudios de suelos contaminados son : Arsénico (As), Cadmio (Cd), Cinc (Zn), Cobre (Cu), Cromo (Cr), Manganeso (Mn), Mercurio (Hg) y Plomo (Pb). Se tratan también los cianuros.

Se repasa brevemente la forma de aparición, comportamiento, origen y peligrosidad de estos contaminantes potenciales. En este sentido debe recordarse que es la concentración y no sólo la presencia, la que permite distinguir un elemento dado de un contaminante como tal.

Arsénico (As). El arsénico se encuentra libre en la naturaleza, siendo un sólido de color gris acero, quebradizo. Todos los compuestos solubles son venenosos, adquiriendo los organismos que los consumen cierta tolerancia a los mismos. El origen natural del mismo queda minimizado debido al aporte que se hace artificialmente como consecuencia de su utilización como pesticidas, y por tanto dentro del ciclo de fabricación de los mismos. Los arsenitos se utilizan como herbicidas y los arseniatos como insecticidas. Las especies de arseniato precipitan o son adsorbidas por los óxidos de hierro hidratados, por el hidróxido de aluminio, y por las arcillas. Pueden encontrarse niveles alto de arsénico en cenizas del proceso de tostado de piritas y otros sulfuros metálicos. Es muy conocido el peligro que encierra el arsénico para la salud humana, siendo más tóxicos los compuestos inorgánicos que los orgánicos y de entre aquellos la forma trivalente más que la pentavalente.

Cadmio (Cd). En las aguas naturales no se encuentra prácticamente, ya que además el ión  $Cd^{2+}$  y complejos de ácidos húmicos, se pueden encontrar las sales

$\text{CdCO}_3$  y  $\text{Cd}(\text{OH})_2$ , las cuales son muy insolubles. Los envenenamientos de cadmio producen hipertensión arterial y la enfermedad llamada Itai-Itai del Japón, siendo un carcinógeno comprobado. Constituye uno de los tóxicos más peligrosos para la vida acuática y aún a niveles subtóxicos puede disminuir el valor comercial de peces y mariscos.

Cinc (Zn) El cinc se encuentra en la naturaleza como sulfuro  $\text{ZnS}$  (blenda), carbonato  $\text{ZnCO}_3$  (smithsonita), silicato  $\text{Zn}_2\text{SiO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  (calamina), siendo un constituyente de la encina responsable de la descomposición del ácido carbónico. Se encuentra raramente en las aguas naturales, por lo que su presencia puede ser debida a contaminación por residuos industriales. Aparece en forma inorgánica, iónica o coloidal, siendo los iones más frecuentes en el agua el  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Zn}(\text{OH})^+$  y  $\text{Zn}(\text{Cl}_3)^-$ . Tanto el cinc como sus sales son muy tóxicas a concentraciones de 40 a 50 mg/l, produciendo náuseas y fatiga.

Cobre (Cu) Se encuentra libre en la naturaleza y combinado, formando numerosos compuestos. Se presenta muy raramente en las aguas naturales. No obstante, el cobre se encuentra en el agua asociado con materia orgánica coloidal. Se encuentran en la misma los iones siguientes:  $\text{Cu}^+$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Cu}(\text{OH})^+$  y  $\text{Cu}(\text{NH}_3)_x^{2+}$ . Las formas minerales son tóxicas para las algas. El sulfato de cobre hidratado tiene una fuerte acción bactericida y algicida, lo que es aprovechado para tratar el agua en distintas condiciones. El sulfato de cobre no destruye ni elimina la materia orgánica, sino que mata las algas casi instantáneamente actuando sobre las paredes celulares e impidiendo la llegada del oxígeno al protoplasma. Los peces son especialmente sensibles a este ión, especialmente la trucha. En ocasiones su muerte no es debida a la acción directa del ión cobre, sino a la desoxigenación producida por éste en las aguas.

Cromo (Cr) El cromo no existe libre en la naturaleza, siendo la forma mineral más frecuente la cromita  $\text{Fe}(\text{CrO}_2)_2$ . Normalmente no existe en las aguas naturales, por lo que su presencia suele estar asociada a procesos de contaminación de origen industrial (ej. talleres de cromado, tenerías). Este metal puede presentarse en varios estados de oxidación, pero en los sistemas acuosos sólo se encuentran el trivalente y el hexavalente. El cromo trivalente se encuentra en el agua principalmente como catión, siendo el hidróxido muy insoluble ( $K_s = 10^{-30}$ ) mientras que el cromo hexavalente se encuentra como anión en las formas  $\text{HCrO}_4^-$ ,  $\text{CrO}_4^{2-}$  o  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$  dependiendo una u otra del pH, y siendo todas ellas muy solubles. El cromo, particularmente el

exavalente, es un tóxico muy fuerte si se inhala, pudiendo producir cáncer de pulmón en las personas expuestas a ése, así como sensibilizaciones en la piel.

Manganeso (Mn) No se encuentra libre en la naturaleza, sino formando los minerales pirolusita  $MnO_2$ , braunita  $Mn_2O_3$ , blenda de manganeso  $MnS$ , etc. Generalmente no se encuentra en las aguas naturales, sólo y excepcionalmente en aguas ácidas asociado al hierro, y en el caso de contaminación de origen industrial.

Mercurio (Hg). El mercurio puede encontrarse como metal (valencia cero), como ión monovalente +1 (mercurioso) y como ión divalente +2 (mercúrico). Amalgama metales y forma complejos orgánicos, siendo el más característico el  $CH_3Hg^+$  extraordinariamente tóxico. En el agua se encuentra en forma inorgánica y orgánica, principalmente en las formas de  $HgCl_2^+$ ,  $CH_3Hg^+$  y  $Hg(NH_3)_4^{2+}$ . Con el pH superior a 5 y condiciones oxidantes, predomina el mercurio metálico. Tiene una alta toxicidad para el ser humano, especialmente cuando se encuentra en forma orgánica, la cual con la ingestión de sólo unos pocos miligramos produce enfermedad. Los complejos orgánicos son del orden de 100 veces más tóxicos que los del mercurio inorgánico.

Plomo (Pb) Si el plomo se pone en contacto con aguas muy salinas, se forman sales insolubles (sulfatos, carbonatos de plomo, calcio, etc) que impiden un ataque posterior. Sin embargo el agua poco o nada mineralizada procedente de lluvia o zonas graníticas, con oxígeno disuelto, atacan el metal con formación de hidróxido de plomo  $Pb(OH)_2$  que es ligeramente soluble. En el agua natural se encuentra en forma de  $Pb^{2+}$ ,  $Pb(OH)^+$  y  $(CH_3)_4Pb$ . En este medio, los complejos más significativos, si el agua contiene carbonatos, son:  $PbCO_3$ ,  $Pb(OH)_2$  y  $Pb_3(OH)_2(CO_3)_2$ , siendo el carbonato soluble en un rango de pH de 5 a 8, el hidróxido por encima de 8,5 y el hidrocarbonato de plomo en un rango de 7,5 a 8,5.

También son agresivas al plomo las aguas ácidas, favoreciendo igualmente la disolución la presencia en nitratos, así como cuando se encuentran juntos el oxígeno y el anhídrido carbónico. La temperatura es otro de los factores que aumenta la agresividad. Las sales de plomo tienen una toxicidad muy alta. Ingestiones o exposiciones diarias bajas al plomo pueden producir intoxicación crónica debido a que este elemento se acumula en los tejidos, especialmente en el óseo. Es el único contaminante en su género que es capaz de ser absorbido en fase sólida, lo que no ocurre con los demás contaminantes, los cuales se absorben en fase líquida o gaseosa.

Cianuros El ácido cianhídrico HCN, los cianuros CN<sup>-</sup> y los cianuros complejos (ferrocianuros, tiocianatos, etc) son un conjunto de compuestos que presentan una toxicidad muy fuerte, más los primeros que los últimos, dependiendo asimismo del compuesto de que se considere; por ejemplo los cianuros alcalinos son más tóxicos que los sulfocianuros. A dosis de 0,1 mg/l ya experimentan su acción tóxica en los peces. En relación con la flora bacteriana, los sulfocianuros son menos tóxicos que los cianuros. Esta toxicidad depende de la concentración, del pH, de la temperatura, etc. Los cianuros alcalinos disueltos, por oxidación, se transforman en carbonatos alcalinos, lo cual hace que disminuyan extraordinariamente sus propiedades tóxicas. Su papel en el agua es importante, ya que es un fuerte agente complejante, estando la toxicidad de los complejos en razón inversa a su estabilidad. Los cianuros presentes en las aguas tienen su origen fundamentalmente en una contaminación por las fábricas de gas, coquerías, altos hornos, instalaciones de cianuración y galvanoplastia, etc.

## **5.2 Contaminantes químicos orgánicos**

Algunos de los compuestos químicos orgánicos más comunes que pueden aparecer como contaminación en suelos y aguas son hexacloroetano, etilenodibromilo, pentaclorofenol, lindano, tetracloroetileno, tetracloruro de carbono, cloroformo y arocloro1254 PCB, cloroetanos, y cloroetilenos, fenoles, benceno, tolueno, metanol, acetonas, etc.

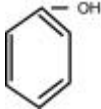
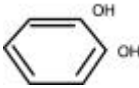
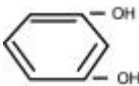
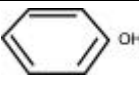
Su multiplicidad hace imposible un repaso profundo de los mismos, por lo que se exponen algunos de los compuestos de mayor importancia en el ámbito de los suelos contaminados, agrupados bajo las denominaciones genéricas más empleadas, aunque ello considerado sin carácter exhaustivo: (1) Fenoles; (2) Plaguicidas; (3) BTX's (benceno, tolueno y xileno); (4) PCB's (bifenilos policlorados); (5) PAH's (hidrocarburos aromáticos policíclicos)

### **5.2.1. Fenoles**

Los fenoles son compuestos orgánicos en los que el grupo OH de los alcoholes se encuentra unido a un grupo bencénico. Además del fenol propiamente dicho, también llamado hidroxibenceno y ácido fénico, se incluye en este grupo los creosoles



CH<sub>3</sub>-C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>-OH y los difenoles, pirocatequina, resorcina e hidroquinona, entre otros. Su estructura y composición se expone a continuación:

fenol (hidroxibenceno, ácido fénico)	
Pirocatequina	
Resorcina	
Hidroquinona	

Estructura básica del grupo de los fenoles

No se encuentran de forma natural en los suelos y aguas, siendo siempre su presencia causada por contaminación de tipo industrial o minero. Su origen principal es el agua de lavado de aguas de hulla, lignito o turba, aguas de lavado de coquerías, destilerías de alquitrán, fábricas de materias plásticas, y de determinados colorantes. A dosis del orden de 1 mg/l la presencia de fenoles se revela como tóxico para los peces, y en concentraciones menores su toxicidad aparece frente a los organismos presentes de los cursos y masas de agua (moluscos, algas, protozoos, bacterias) provocando una disminución del poder autodepurador de los mismos. Su biodegradación presenta dificultades como consecuencia de sus propiedades bacteriostáticas y bactericidas, pero ésta se realiza, aunque lentamente, por medio de microorganismos particulares, siendo esta flora principalmente de la familia de las *Pseudomonadáceas*.

### 5.2.2. Plaguicidas

Se han utilizado las propiedades antisépticas de muchos de los hidrocarburos clorados para luchar contra vectores de enfermedades de animales o vegetales; otras, sin embargo, pueden actuar como cancerígenos para los humanos. Los plaguicidas son diversos productos químicos destinados a luchar contra los parásitos, tanto animales como vegetales, que constituyen las plagas en general. Si actúan contra determinadas

plagas en agricultura se les llama pesticidas, que a su vez pueden ser insecticidas si se utilizan contra plagas de insectos, fungicidas si se utilizan contra hongos, bactericidas contra bacterias, herbicidas, etc.

Entre los insecticidas se encuentra el DDT, lindano, clordano, aldrín, etc. Son débilmente solubles en el agua, lo que no facilita su difusión, aunque por otra parte son bioacumulables y muy difícilmente biodegradables, siendo transmitidos a través de la cadena alimentaria. Gran parte de los plaguicidas orgánicos han sido prohibidos después de años de empleo, debido a las sospechas sobre su carácter tóxico. En la tabla adjunta, se presentan los plaguicidas que han sido más utilizados, sus fórmulas y posible acción sobre el organismo humano:

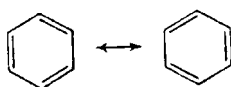
Plaguicidas más utilizados, fórmula y posible acción en seres humanos (CATALÁN, 1990)

PLAGUICIDA	FÓRMULA	ACCIÓN EN LOS HUMANOS
Aldrín	$C_{12}H_6Cl_6$	neurotóxico; carcinógeno sospechoso
Clordano	$C_{16}H_6Cl_6$	carcinógeno sospechoso
DDT	$C_{14}H_9Cl_5$	neurotóxico
Dieldrín	$C_{12}H_4OCl_6$	neurotóxico; carcinógeno sospechoso
Endrín	$C_{12}HOCl_6$	neurotóxico; carcinógeno sospechoso
Heptacloro	$C_{10}H_5Cl_7$	neurotóxico; carcinógeno sospechoso
Heptacloro epoxi	$C_{10}H_3OCl_7$	neurotóxico
Lindano	$C_6H_6Cl_6$	carcinógeno sospechoso

### 5.2.3. BTX's (benceno, tolueno y xileno)

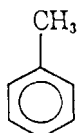
En este grupo se incluyen los hidrocarburos aromáticos benceno, tolueno y xileno que forman parte de la gasolina hasta integrar un 24% de su composición. A continuación se analizan las propiedades y toxicidad de cada uno de ellos.

*Benceno* ( $C_6H_6$ ) es un líquido volátil, incoloro e inflamable, con un característico olor dulce en pequeñas concentraciones y desagradable e irritante a altas concentraciones. Es también un excelente disolvente. Su presentación molecular es la siguiente:



El benceno es un componente de las gasolinas. La concentración del benceno en la fase de vapor de la gasolina es menor que su concentración en el líquido, pero depende en cualquier caso de la concentración de otros hidrocarburos y aditivos metálicos. Químicamente el benceno es bastante estable, pero bajo condiciones favorables, uno o más átomos de hidrógeno de la molécula pueden ser sustituidos por átomos de halógenos, o por grupos de ácidos como nítricos o sulfúricos. Los agentes que dan lugar más comúnmente a estas reacciones de sustitución son el ácido nítrico, ácido sulfúrico, cloro y bromo que actúan como reactivos electrofílicos. El benceno es una sustancia venenosa para el hombre, con efectos de toxicidad crónica aguda. Así los efectos a corto plazo por inhalación, ingestión o contacto dérmico de benceno son inmediatamente notorios, pero los efectos de la exposición crónica a bajas concentraciones de benceno son difícilmente detectables, pues actúa fundamentalmente en la sangre, por lo que requieren una vigilancia periódica.

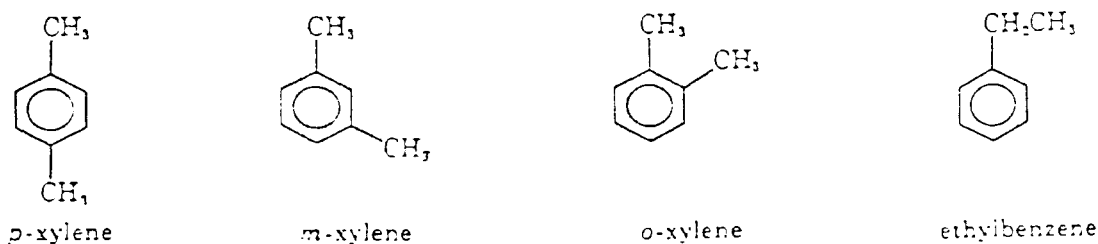
*Tolueno* ( $C_7H_8$ ) es el alquilbenceno de menor peso molecular. La sustitución del radical alquilo cambia las características físicas, su adsorción, partición y características metabólicas. La representación de su molécula es la siguiente:



El tolueno o metilbenceno es un líquido claro, incoloro, no corrosivo e inflamable, con un olor dulce y penetrante parecido al del benceno.

La toxicidad del tolueno se asemeja a la del benceno excepto en sus características hemotóxicas. Asimismo, en exposiciones humanas crónicas el tolueno se manifiesta como un tóxico moderado.

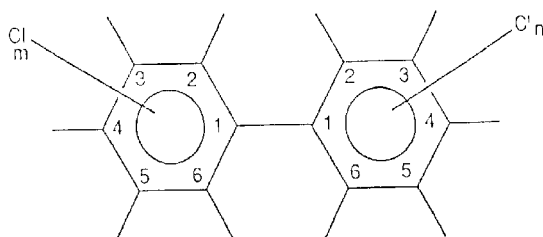
*Xileno*. Los xilenos o dimetilbencenos son isómeros  $C_8$  del benceno con forma molecular ( $C_8H_{10}$ ). Los tres isómeros en los que aparece son o-, m-, ó p-xileno, o el 1,2-, el 1,3- y 1,4-dimetilbenceno respectivamente. La representación de la molécula de los xilenos y el etilbenceno es la siguiente:



El xileno se da en varios productos petrolíferos, en el carbón de nafta, y como una impureza en petroquímicos, al igual que el benceno y el tolueno. Los isómeros del xileno son considerados como líquidos muy inflamables. Los xilenos muestran una moderada toxicidad. Los estudios en animales muestran que el xileno es más tóxico que el tolueno. A pequeñas dosis de xileno se producen efectos tóxicos umbrales; a altas dosis, el xileno es más tóxico que el tolueno, produciendo efectos pulmonares y dermatológicos.

#### 5.2.4. PCB's (bifenilos policlorados)

Los PCB's son mezclas de compuestos aromáticos fabricados mediante la cloración de los bifenilos en presencia de un catalizador adecuado. Están presentes en el medioambiente de una forma generalizada debido principalmente a su larga persistencia y a sus características fisico-químicas. Teóricamente es posible la existencia de 209 congéneres, pero únicamente es probable encontrar unos 130 en los productos comerciales. La fórmula química y estructura de los PCB's puede presentarse como aparece a continuación, siendo  $n$  el número de átomos de cloro presentes en la molécula (puede variar este número entre 1-10).



Todos los congéneres de los PCB's son lipofílicos y tienen una solubilidad muy pequeña en agua. Debido a esto, entran fácilmente en la cadena alimenticia, acumulándose en los tejidos grasos. Entre los posibles orígenes de este producto puede citarse que los PCB's se han utilizado en sistemas cerrados y abiertos. Dentro de los primeros se han empleado en condensadores, en tubos fluorescentes de

iluminación y como refrigerantes dieléctricos en transformadores. Se han usado en plastificantes, pinturas resistentes a agentes químicos, compuestos de sellado y unión de juntas, lubricantes, adhesivos, fluidos resistentes al fuego, fluidos de transferencia calorífica, dispersantes de insecticidas y papeles de calco sin carbón.

A mitad de los años 70 se abandonó el uso en sistemas abiertos y actualmente los PCB's también están prohibidos en sistemas cerrados (ECC, 1989). Los PCB's fueron estudiados por el grupo IARC (Internacional Agency for Research on Cancer) en 1978 y en 1987. En este último año, considerando las evidencias existentes en animales de laboratorio y en humanos, el grupo IARC concluyó que los PCB's son *probables cancerígenos* para el hombre. Existe suficiente evidencia de cancerogénesis en animales de laboratorio producida por varias mezclas de PCB's, incluidos Aroclor 1260 y 1254, y Kaneclor 500. De la capacidad carcinogénica de estos compuestos en el hombre se tiene evidencia limitada. Los PCB's están dentro del grupo 2A de la clasificación de la IARC.

#### 5.2.5. PAH's (hidrocarburos policíclicos aromáticos)

Los hidrocarburos aromáticos policíclicos son un grupo de sustancias químicas que están presentes en el medioambiente como contaminantes ubicuistas, a menudo en cantidades muy pequeñas, del orden de mg/Kg ó ng/m<sup>3</sup>. Normalmente los PAH representan una fracción muy importante de los compuestos aromáticos policíclicos totales. Tienen altos puntos de fusión y son virtualmente insolubles en agua, siendo su presión de vapor baja. Generalmente son solubles en grasas, aceites y disolventes orgánicos. La mayor fuente de emisión de estos contaminantes químicos son las incineradoras, las calefacciones domésticas y los vehículos de gasolina o gasoil. Las emisiones de estos productos procedentes de las calefacciones alimentadas con carbón o con madera, son varios ordenes de magnitud mayores que aquellas alimentadas con gas. Distinguimos los siguientes compuestos dentro del grupo genérico de los PAH's (hidrocarburos aromáticos policíclicos).

<b>COMPUESTO</b>	<b>FÓRMULA</b>	<b>APARICIÓN</b>	<b>EFECTOS</b>
FLUORANTENO	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>	No existe producción comercial ni uso conocido de este compuesto. Se encuentra de forma generalizada en productos resultantes de procesos de combustión incompleta. Asimismo, se encuentra en los combustibles fósiles.	componente mayoritario del contenido total de PAH presente en el medioambiente. La exposición humana se produce principalmente a través del humo del tabaco, de la inhalación de aire contaminado y por ingestión de comida y agua contaminada por efluentes de




COMPUESTO	FÓRMULA	APARICIÓN	EFECTOS
			combustiones
BENZO(b) FLUORANTENO	C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	No se produce comercialmente y no existe un uso conocido de este compuesto	Esta clasificado (IARC) como <i>probable cancerígeno</i> para el hombre (grupo 2 B). Hay suficiente evidencia de que el benceno(b)fluoranteno es cancerígeno para animales de laboratorio. No se dispone de datos acerca de su teratogenicidad.
BENZO(k) FLUORANTENO	C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	Este producto forma parte del contenido total de PAH presente en el medioambiente. La exposición humana al mismo tiene lugar principalmente a través del humo del tabaco, de la inhalación de aire contaminado y por la ingestión de comida y agua contaminada por efluentes procedentes de combustiones	Está catalogado por la IARC como probable cancerígeno para el hombre (grupo 2 B). Existe <i>suficiente evidencia</i> de que el benzo(k)fluoranteno resulta cancerígeno para animales de laboratorio.
BENZO(a) PIRENO	C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	No existe producción comercial de esta sustancia ni uso conocido. La exposición humana tiene lugar principalmente a través del humo de tabaco, de la inhalación de aire contaminado y por la ingestión de comida y agua contaminada por efluentes de procesos de combustión.	Está catalogado como probable cancerígeno para el hombre (grupo 2A) según IARC. Hay evidencia suficiente de que el benzo(a)pireno es cancerígeno para animales experimentales de laboratorio.
BENZO(g,h,i) PERILENO	C <sub>22</sub> H <sub>12</sub>	No existe producción comercial de este producto ni uso conocido del mismo. La exposición humana tiene lugar principalmente a través del humo del tabaco, de la inhalación de aire contaminado y por la ingestión de comida y agua contaminada por efluentes de procesos de combustión.	Los datos existentes son inadecuados para permitir una evaluación de la carcinogenicidad de este compuesto en animales de laboratorio (grupo 3, clasificación IARC). Tampoco hay datos disponibles sobre su teratogenicidad.
INDENO(1,2,3-cd) PIRENO	C <sub>22</sub> H <sub>12</sub>	No existe producción comercial ni uso conocido de esta sustancia. La exposición humana tiene lugar principalmente a través del humo del tabaco, de la inhalación de aire contaminado y por la ingestión de comida y agua contaminada por efluentes de procesos de combustión.	Está clasificada por IARC como <i>probable cancerígeno</i> para el hombre (grupo 2B). Existe <i>suficiente evidencia</i> de que el indeno(1,2,3-cd)pireno es carcinogénico para animales de laboratorio. No se dispone de datos acerca de su teratogenicidad.



## **6. Metodología de investigación de suelos contaminados por actividades industriales**

Un problema se convierte en tal desde el momento en que es percibido. ¿Cómo puede originarse esta percepción?. Lamentablemente, son muchas las ocasiones en que la percepción se produce cuando el problema es grave y patente, y el daño potencial ya ha sido causado. En el caso de los suelos, como se ha visto más arriba, los problemas suelen tener un efecto diferido en el tiempo (meses o años).

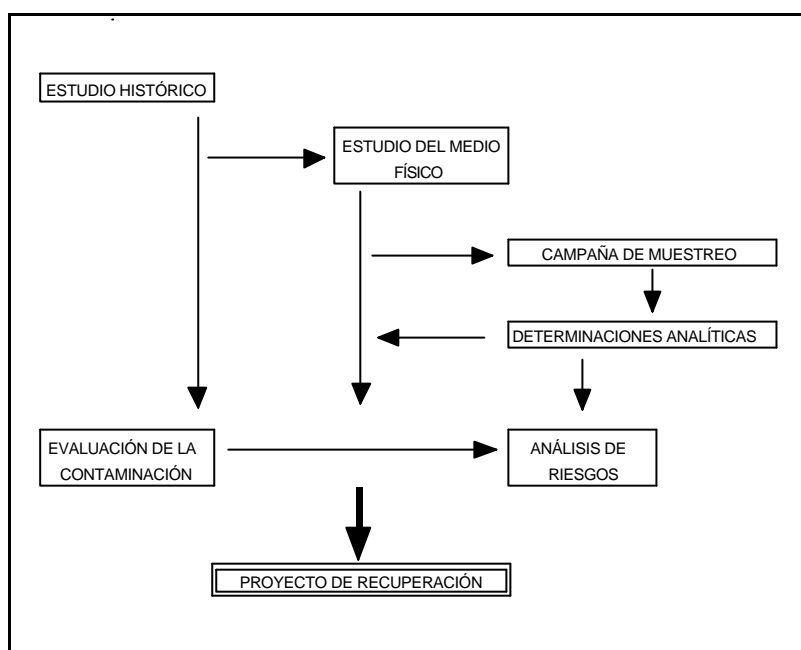
Cuando existe conciencia de la posibilidad de un problema ambiental de estas características en una industria uno debe preguntarse: ¿en qué situación ambiental se encuentra el suelo y subsuelo de mis instalaciones? O bien, cuando se va a producir una modificación, ambientalmente responsable, del uso de un suelo industrial que pasa a suelo de tipo residencial, uno debe preguntarse, incluso a pesar de que en el momento no se disponga de legislación específica en este sentido: ¿se encuentra el suelo y subsuelo de mi instalación en condiciones ambientales que no supongan riesgos para la salud humana, el medio ambiente o los nuevos usos a que se destina? En caso de que pueda existir algún tipo de riesgo, debe continuarse la pregunta: ¿en qué medida puede existir riesgo, y que procedimientos técnicos son los más adecuados para eliminar esos riesgos? En estos casos, y de forma general, existe una metodología científica completa que permite contestar a estas preguntas, y que va a desarrollarse a continuación.

La metodología que se expone tiene aplicación directa tanto para establecimientos industriales en activo (ej. industria petroquímica, fabricación cerámica, tenerías) como antiguos establecimientos industriales. Consideraremos que el objetivo general de la investigación consiste en acometer la caracterización del suelo potencialmente contaminado en un emplazamiento, así como la redacción del proyecto de recuperación en el que se contemple el grado de descontaminación a alcanzar, y la técnica a aplicar, escogida entre las diversas alternativas viables. Este objetivo general pretende conseguirse a través de la realización de los siguientes objetivos parciales:

<b>OBJETIVOS PARCIALES DE LA INVESTIGACIÓN DE UN EMPLAZAMIENTO POTENCIALMENTE CONTAMINADO</b>	
	1.- Estudio histórico -industrial del emplazamiento INSTALACIONES Y PROCESOS
	2.- Definición del medio físico en donde se sitúa el emplazamiento contaminado MODELO CONCEPTUAL PREVIO
	3.- Definición de los tipos de contaminantes y sus defectos sobre el conjunto de los medios: aire, suelo y agua. MODELO CONCEPTUAL DEFINITIVO

	4.- Establecimiento del nivel de riesgo de la contaminación y la vulnerabilidad del medio y de su entorno. ANÁLISIS DE RIESGOS
	5.- Redacción de los Proyectos de Rehabilitación de los espacios contaminados o medidas correctoras a integrar en proyectos futuros

Este conjunto de objetivos parciales de la investigación de un emplazamiento, se articulan en un diagrama de flujo como el que se expone en la figura adjunta:



### 6.1. Estudio de la actividad

En esta fase inicial se procederá a la recogida de la información existente sobre los procesos productivos y de los vertidos y residuos a lo largo del tiempo sobre el emplazamiento. Se recogerá información sobre la vida útil de generación de los residuos, así como de los procesos seguidos, eventualmente, durante las tareas de desmantelación y removilización de los residuos y vertidos.

Para ello se consultará, en lo posible, los sucesivos propietarios de las instalaciones y terrenos, así como los Organismos públicos que tengan alguna participación en el historial de los emplazamientos. Se definirán con precisión al menos los siguientes elementos: 1) antecedentes generales; 2) historial cronológico del terreno; 3) identificación de zonas diferenciadas; 4) relación entre zonas diferenciadas y riesgos asociados; 5) sucesos relevantes. Este estudio tiene un planteamiento intrínseco de utilidad para los fines del Proyecto, por lo que la obtención de datos debe restringirse a esta cuestión.

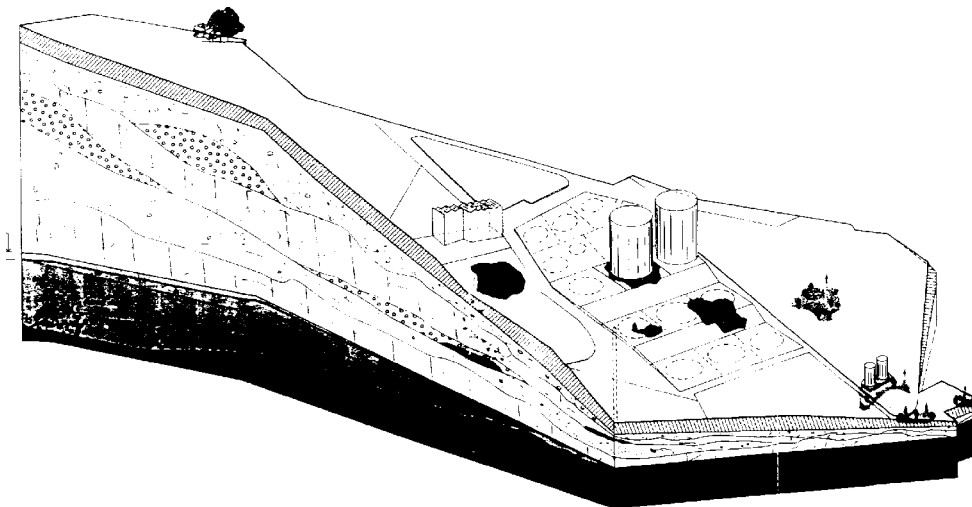


Especialmente en el caso de espacios ocupados por antiguos establecimientos industriales el estudio histórico debe ser preciso y objetivo. La fidelidad en la cronología de los hechos es fundamental. Las informaciones deberían ser contrastables y estar documentadas adecuadamente (informes de empresa, informes de la administración, análisis, denuncias, etc). Desafortunadamente, en muchas ocasiones este análisis histórico no deja de ser una secuencia de relatos orales no contrastados satisfactoriamente. Se ha revelado el interés por trabajar con historiales que se apoyen en documentos fotográficos (ej. series oficiales de fotografías aéreas) o cartográficos. Es del mayor interés, asimismo, la identificación a lo largo del tiempo de los titulares de terrenos, instalaciones industriales, residuos, etc.

Sin duda, el resultado más consistente desde el punto de vista científico-técnico es el que se alcanza al disponer, incluyendo su distribución espacial, el diagrama y balance de masas completo del proceso productivo.

## **6.2. Estudio del medio físico**

El objetivo de esta fase es, junto con la información procedente del estudio anterior, conocer las afecciones medioambientales que origina el suelo potencialmente contaminado, los medios de dispersión, y las rutas que conlleven una exposición con riesgo para la salud humana y los ecosistemas. El objetivo final a que debe conducir esta fase es a la elaboración de un modelo conceptual previo del medio físico que permita comprender el emplazamiento en investigación. Este modelo conceptual debe estar representado a través de cortes y, preferiblemente, de un esquema tridimensional del emplazamiento, semejante al que aparece en la figura adjunta.



Esquema tridimensional del modelo conceptual de un emplazamiento contaminado

El proceso interno de desarrollo de esta fase comprende la realización de los siguientes trabajos: 1) determinación de niveles de referencia; 2) estudio geológico; 3) estudio hidrogeológico; 4) estudio edafológico. La determinación de los niveles de referencia implica la definición de aquellos valores de concentraciones que están fuera de las condiciones naturales y que son atribuibles a procesos de contaminación.

El estudio del medio físico debe partir de una precisa definición cartográfica y topográfica del emplazamiento y de su entorno, para lo cual se realizará previamente el levantamiento taquimétrico y planimetría topográfica del mismo, con escala de referencia 1:1.000 - 1:500.

El estudio geológico debe comprender la descripción detallada del entorno geológico en que se sitúa el emplazamiento, para lo que se dispondrá de la cartografía geológica editada, de fotointerpretación a partir de pares estereoscópicos del emplazamiento, y de los resultados obtenidos en los trabajos de perforación y ensayos complementarios que se realicen. La aplicación de técnicas geofísicas (ej. sísmica, georradar, etc) puede ser de notable importancia para el conocimiento suficiente de la estructura del subsuelo. Tienen importancia notable en este apartado la definición de las formaciones superficiales en cuanto a variaciones de potencia y composición litológica y granulométrica. Las formaciones de sustrato deberán estar caracterizadas en cuanto a su morfología y estructura, sobre todo en una proyección hacia el comportamiento hidrogeológico de dichos materiales.

A partir de la caracterización geológica básica se procederá a la definición de los aspectos hidrogeológicos de detalle que caracterizan el emplazamiento. Debe tenerse presente que la vía más importante de movilización de contaminantes la constituyen las aguas subterráneas. Se ha de partir de la precisión del entorno hidrológico en cuanto a drenaje superficial, precipitación, e infiltración, obteniéndose los volúmenes de agua que se infiltran en los suelos y que confieren alta movilidad a los contaminantes.

Conocido el balance de agua en el terreno ha de procederse a definir el esquema de detalle de circulación de las aguas subterráneas, para lo que habrá de determinarse la morfología de la superficie piezométrica. Para ello se precisa la realización de sondeos piezométricos en proporción adecuada a la superficie y variaciones morfológicas del emplazamiento en estudio. En los sondeos realizados se procederá a la realización de los ensayos de permeabilidad y velocidad del flujo subterráneo, a fin de determinar las condiciones hidrodinámicas del drenaje subterráneo. En cualquier caso, en la realización de los estudios hidrogeológicos del emplazamiento se considerarán detalladamente las variaciones de comportamiento en función de cambios en los tipos de depósitos.

### **6.3. Campaña de muestreo y determinaciones analíticas**

Deberá recoger la metodología de la red de muestreo, así como la localización, número de muestras, profundidad, técnica del muestreo, etc, para cada tipo de medio, bien sea suelo, aguas, residuo, o cualquier agente de dispersión, y deberá definir: 1) distribución de las zonas ó áreas contaminadas; 2) naturaleza de la contaminación; 3) rutas de dispersión de los contaminantes; 4) identificación de los receptores del riesgo actuales y futuros. La red de muestreo a emplear debe apoyarse en los resultados de la fase II, sustanciados en el modelo conceptual, y teniendo presente de forma especial las heterogeneidades del medio, tanto físicas como de comportamiento, puesto que son los factores que la experiencia ha determinado como claves para el éxito de los objetivos de la fase de muestreo. Los criterios básicos de la red deben ser: representatividad, fiabilidad, y operatividad.

Deberán especificarse los parámetros a estudiar en las determinaciones analíticas en función de la caracterización de los contaminantes que se realice sobre vertidos, aire, suelos y aguas, así como sus concentraciones y forma o estado de presentación.

Esta fase se apoya en los conocimientos de campo y, de forma especial, en el estudio histórico-industrial del emplazamiento, para conocer aquellos compuestos que tienen mayor probabilidad de estar presentes en el medio investigado. El estudio de los contaminantes probables debe comprender no sólo las formas originales de aparición, sino también aquellas formas químicas que pueden haberse producido posteriormente por degradación o interacción química. En general, debe contemplarse la posibilidad de analizar: 1) metales pesados; 2) cianuros; 3) sustancias aromáticas volátiles; 4) hidrocarburos policíclicos aromáticos; 5) hidrocarburos clorados volátiles; 6) combinaciones orgánicas halogenadas; 7) PCB`s y plaguicidas organoclorados; 8) aceites minerales.

### **6.4. Evaluación de la contaminación**

Una vez obtenida la información precedente de la caracterización del medio físico y los resultados analíticos deberá efectuarse una evaluación que recoja: 1) tipología de los residuos y de los contaminantes; 2) extensión de la contaminación; 3) interacción con los medios (aire, agua y suelo); 4) vulnerabilidad del medio; 5) volúmenes contaminados.

Los valores obtenidos de los distintos parámetros corresponden a valores puntuales cuya representatividad está ligada a la representatividad de la red de muestreo. Para su interpretación debe tenerse bien presente esto, así como los rangos propios o valores de oscilación de los parámetros, e incluso el porcentaje de error

asumido en las determinaciones analíticas. Los resultados, así entendidos, deben contrastarse con los niveles de referencia existentes en la normativa aplicable. Caso de no existir estos valores, o estar en desarrollo, deberán compararse con algún otro nivel de referencia estandarizado (ej. Norma holandesa, US-EPA, etc) previa justificación de su uso.

El resultado de estos trabajos debe ir acompañado de esquemas y planos en los que se recoja esta información, su distribución, cartografía con la situación y límites del residuo, los suelos, y las aguas afectadas tanto superficiales como subterráneas, así como un modelo espacial de la contaminación. El esquema más adecuado para el establecimiento de los mecanismos de producción, migración e interacción de contaminantes se encuentra en un **adecuado modelo conceptual**. Un paso siguiente debería ser la modelización matemática del sistema.

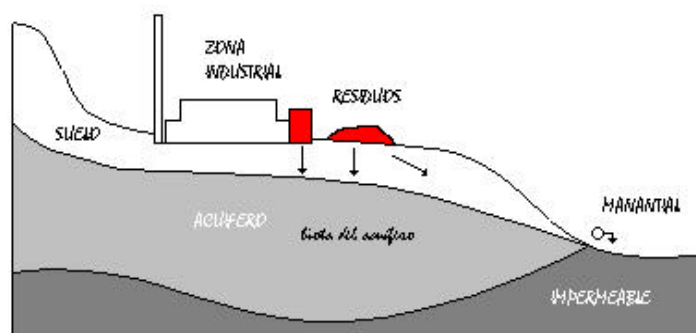
### **6.5. Modelo conceptual**

El modelo conceptual es una herramienta metodológica muy poderosa para cualquiera de las disciplinas ambientales. Organiza la información disponible y permite establecer conclusiones preliminares de gran valor que incorporan la certidumbre sobre la problemática que se esté tratando. El modelo conceptual de un suelo potencialmente contaminado debe poder ser analizado y comprendido tanto por especialistas como por no especialistas. Se revela así como una de las interfaces más valiosas para la comprensión de la envergadura y alcance de la problemática de los suelos contaminados.

Un modelo conceptual es la expresión gráfica simplificada de los elementos más importantes de la realidad que queremos representar. Los antecedentes de modelos conceptuales aplicados al campo de las ciencias y tecnologías ambientales se encuentran en los desarrollos gráficos más tempranos vinculados a la teoría de sistemas. Posteriormente han recibido un gran impulso con el desarrollo de los procedimientos de modelización matemática, que han precisado una expresión más rigurosa de las relaciones entre sistemas o subsistemas naturales.

Uno de los motivos que explica la ralentización en el desarrollo de diversas disciplinas de las ciencias ambientales se encuentra precisamente en la falta de extensión de las técnicas de definición y desarrollo de los modelos conceptuales. En particular y a modo de ejemplo, puede afirmarse que la investigación -y actuaciones posteriores- en emplazamientos industriales contaminados no ha conseguido mostrar toda su influencia e importancia por esta razón.

El modelo conceptual es una herramienta secuencial de análisis e interpretación de la realidad. Podemos empezar con un ejemplo sencillo



Modelo conceptual de una industria en el entorno de manantial

En la figura observamos, en un corte del terreno –modelo bidimensional-, la ubicación de una zona industrial, destacando los focos potenciales de contaminación de los suelos y aguas. Por debajo se ha marcado el perfil del suelo y subsuelo, distinguiendo desde el punto de vista hidrogeológico tres fases: (1) fase no saturada (suelo), (2) fase saturada con aguas subterráneas (acuífero), y (3) fase no saturada por la característica intrínseca del subsuelo de impermeabilidad (sustrato impermeable). Se indica también el punto de afloramiento del manantial, que drena el acuífero. Este modelo, aunque sencillo, constituiría una herramienta potente para empezar a analizar la posible interacción entre los focos potenciales de contaminación y la calidad de las aguas subterráneas.

Se ha comentado más arriba que un modelo conceptual es una herramienta de análisis secuencial. Esto es porque se trata de una herramienta de perfeccionamiento progresivo. En este caso nos permitiría evaluar, por ejemplo, necesidades ulteriores de investigación, o definir los sistemas de seguimiento y control de la contaminación. Una vez que se disponga de la información complementaria necesaria: caracterización de potenciales contaminantes, caracterización del suelo, espesor de la zona no saturada, calidad natural de las aguas del acuífero, calidad de las aguas del manantial, puede llegar a definirse con relativa facilidad la existencia o no de riesgo de contaminación.

El modelo conceptual del territorio y de la actividad es siempre una herramienta necesaria para iniciar el proceso técnico de evaluación ambiental. Veamos cuáles son los pasos para construir un modelo conceptual. En primer lugar debe definirse el ámbito del modelo y el modo de construcción del mismo. Para ello conviene saber con qué tipo de modelos se puede contar. Esto está generalmente en relación con la función del modelo y los datos disponibles, como se verá más adelante. En la tabla adjunta se exponen los tipos de modelos conceptuales.

La tabla puede sugerir que la tipología de modelos es muy compleja, pero esto no es así en ningún modo. Se trata solamente de los tipos que pueden surgir de combinar los criterios de: referencia geográfica (si está o no referenciado al territorio), generalidad o especificidad (si los contenidos son generales o específicos del caso), y globalidad o parcialidad (si está referido a todos los vectores de potencial impacto o integradores, o solamente a alguno de ellos).

<b>TIPOS MODELOS</b>	<b>General</b>	<b>específico</b>
<b>No referenciado</b>	Modelo conceptual no referenciado, general (global o parcial)	Modelo conceptual no referenciado, específico (global o parcial)
<b>Referenciado (bidimensional)</b>	Modelo conceptual referenciado bidimensional, general (global o parcial)	Modelo conceptual referenciado bidimensional, específico (global o parcial)
<b>Referenciado (tridimensional)</b>	Modelo conceptual referenciado tridimensional, general (global o parcial)	Modelo conceptual referenciado tridimensional, específico (global o parcial)

## 6.6. Análisis de riesgos

Mediante la interpretación de los resultados obtenidos en las fases anteriores, deberá efectuarse un análisis de las afecciones y alcance de la contaminación sobre suelos y aguas, así como una evaluación de los riesgos potenciales que conlleva el emplazamiento y el alcance que deben tener las medidas de recuperación.

El análisis debe permitir evaluar: 1) riesgos para la salud humana; 2) riesgos para los ecosistemas; 3) riesgos de dispersión y afección a otros comportamientos ambientales; 4) riesgos para explotación de labores agrícolas, ganaderas y forestales; 5) otros riesgos (riesgos constructivos, de uso de material, etc)

El análisis de riesgos, con desarrollo según metodología particularizada, está vinculado a los usos existentes en el territorio afectado por la contaminación, y también a los usos futuros o previsibles en el caso de intervención para la restauración del terreno o para la clausura de la fuente contaminante. El resultado sintético del análisis debe conducir al establecimiento de un cuadro de riesgos, pudiendo tomarse como ejemplo alguno análogo al expuesto. Los elementos que deben aparecer siempre en este análisis son los valores de comparación de muestreo con las concentraciones dadas en los niveles de comparación, la exposición del tóxico o compuesto peligroso al uso, y la caracterización del riesgo, como resultado de esta combinación.

<b>TÓXICO ANALIZADO</b>	<b>Plomo</b>	<b>BTX</b>	<b>PCB´s</b>
origen en emplazamiento	pinturas, tráfico intenso	disolventes	transformadores, fluidos y lubricantes

Problemática del tóxico	probablemente cancerígeno	veneno con efectos tóxicos agudos, etc	probablemente cancerígeno
Aparición en emplazamiento	zona 1	zonas 1, 2	zona 4
uso futuro previsto	industrial	industrial equipamiento	urbano, jardines
Comparación con NIVEL riesgo Xi muestreo / C hum tóx.	$Xi < C \text{ hum tox}$	$Xi > C \text{ hum tox}$	$Xi = C \text{ hum tox}$
Origen de la contaminación	superficial	superficial	profunda
Exposición	no significativa/ no existe	significativa ref. nivel	no significativa/ no existe
Caracterización del riesgo	NO EXISTE RIESGO	RIESGO MEDIO	RIESGO BAJO

Tabla de síntesis de análisis de riesgos (datos supuestos)

La definición de los niveles de intervención, ligados a los términos de análisis de riesgos, debe hacerse por comparación, en ausencia de normativa vigente a este respecto, con valores como los de la Norma holandesa, valores de intervención propuestos por la US-EPA, propuestas de normativa de la Unión Europea, o valores empleados en comunidades como la Comunidad Autónoma del País Vasco, por ejemplo.

La selección de unos valores u otros de comparación está muy ligada a las condiciones ambientales y a los usos existentes o que se puedan prever del territorio. Para que haya riesgo significativo debe, pues combinarse los siguientes factores: 1) presencia de contaminante por encima de nivel de referencia (relacionado con el uso) y; 2) exposición directa o indirecta al contaminante.

### **6.7. Proyecto de recuperación o medidas correctoras**

A partir de las conclusiones de los apartados anteriores, debe realizarse presentarse un informe en el que se defina el alcance de la recuperación a alcanzar en función del análisis de riesgos, y los usos futuros del suelo.

Para estas condiciones se realizará una valoración de las diferentes técnicas aplicables para el saneamiento o descontaminación y un análisis de los costes-beneficio ambiental, expresado como la eficacia-alcance del método. En el siguiente apartado se exponen algunos de los sistemas de tratamiento de suelos más habituales en los casos de contaminación de origen industrial. Finalmente una vez seleccionada la solución más adecuada, se procederá a la redacción del Proyecto de recuperación que se deberá desarrollar con sus correspondientes unidades de obra, precios unitarios y costes contemplando al menos: 1) obra civil; 2) medidas de Seguridad e Higiene; 3) gestión; 4) transporte; 5) tratamiento; 6) seguimiento y control ambiental.

Esta secuencia de fases es válida tanto para emplazamientos en que se mantiene la actividad como antiguos emplazamientos industriales. No obstante, en el caso de los emplazamientos en activo, las investigaciones de este tipo deben permitir, de forma complementaria, el establecimiento de una red de control y seguimiento ambiental. Las experiencias realizadas por diversas industrias en los últimos años, especialmente en el sector petroquímico, les han proporcionado ventajas notables, no solamente en el plano ambiental, sino también en los de seguridad y, especialmente, de producción.

### **7. Tecnología en descontaminación de suelos afectados por actividades industriales**

La tabla adjunta recoge las tecnologías básicas para la corrección de suelos contaminados. Han sido agrupadas de acuerdo con el tipo de actividad, desde acciones limitadas (por ejemplo, control del emisor) hasta acciones completas (por ejemplo, extracción y eliminación del suelo). Algunas técnicas pueden realizarse de diversas maneras (por ejemplo, la tecnología correctora se puede realizar in situ o después de excavar el suelo).

Formas de operación de corrección de suelos (de MONTGOMERY, 1993)

<b>Formas de operación de corrección de suelos</b>			
<b>Tipo</b>	<b>Operaciones</b>	<b>Contaminante comprobado</b>	<b>Contaminan. potencial</b>
<b>Control del emisor</b>	Aislamiento del emisor	4,7,12	
	Inmovilización	6,12	1,2,3,4
	Reducción de la volatilización		1,2,3,4
<b>Tratamiento in situ</b>	Biodegradación	1,2,3,4	5,9,14
	Extracción por vapor	1,3	2,4
	Fijación/vitrificación	13	varios
	Estabilización	7,8,12,13,15	1,2,3,4
	Degradación química	1,2,3,4,6,12	
<b>Extracción del contaminante in situ y tratamiento del</b>	“Flushing” del suelo	1,2,3,4,6,8,10,12	
	Extracción por vapor	1,3	2,4



CURSO SOBRE CONTAMINACIÓN DE SUELOS Y AGUAS SUBTERRÁNEAS  
Contaminación del suelo debida a procesos industriales

<b>contaminante</b>			
<b>Extracción, tratamiento y reutilización del suelo</b>	Lavado de suelo	6,12	todos sin 7,13
	Estabilización solidificación	7,8,12,13,15	1,2,3,4
	Biodegradación	1,2,3,4	5,9,14
	“Landfarming” Compostaje	1,2,3,4	
	“Stripping” térmico a bajas temperaturas	1,3	
	Atenuación	12	
<b>Extracción y eliminación del suelo</b>	Incineración (tratamiento térmico)	1,2,3,4,5,9,10,14, 16	15
	Vertedero	1,2,3,4,6,7,10,11	
NOTAS			
Los parámetros son:		9 PCB (bifenilos policlorados)	
1 compuestos orgánicos halogenados volátiles		10 sustancias corrosivas orgánicas	
2 compuestos orgánicos halogenados semivolátiles		11 elementos tóxicos no metálicos	
3 compuestos orgánicos volátiles no halogenados		12 metales no volátiles	
4 compuestos orgánicos semivolátiles no halogenados		13 materiales radioactivos	
5 pesticidas		14 cianuros orgánicos	
6 metales volátiles		15 cianuros inorgánicos	
7 amianto		16 agentes oxidantes y reductores	
8 sustancias corrosivas inorgánicas			

A continuación se describen brevemente algunas de las técnicas más utilizadas para descontaminación de suelos.

## 7.1 Control del emisor

Aislamiento del emisor Consiste en el control del emisor limitando el potencial de migración de los contaminantes. Los dos tipos básicos son: cobertura (con membranas sintéticas, arcillas, asfalto, cemento, agentes sellantes químicos) y barreras sub-superficiales (paredes de cemento o cerrado por paredes de bentonita o cemento, cortinas de lechada de cemento o solidificación química. Esta tecnología suele usarse como medida temporal o para evitar la entrada de los contaminantes en los cursos de agua. Los factores que afectan a la eficacia de esta técnica son la movilidad de los contaminantes, la profundidad del agua subterránea o de la capa impermeable. Las precauciones a tomar al dejar el contaminante en su localización actual, y la limitación del uso del suelo después del tratamiento.

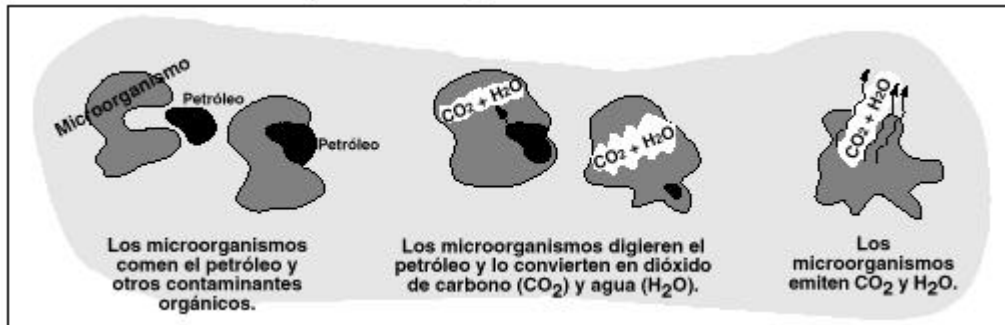
Inmovilización *in situ* Implica la reducción de la tasa de liberación y movimiento de contaminantes, introduciendo un aditivo en el suelo mediante aplicación superficial (infiltración), inyección de líquidos en el subsuelo, inyección subsuperficial o mezclado del suelo. Los sistemas principales para inmovilización son la sorción, el intercambio iónico y la precipitación. Puede usarse en los suelos que han sido extraídos para ser tratados (ver lavado del suelo).

Los factores que controlan la eficacia de esta técnica son el tipo de contaminante, las características del suelo (permeabilidad, arenas no finas para su mezcla *in situ*), presencia de obstáculos subterráneos que impidan la mezcla subsuperficial, profundidad de la contaminación en el suelo y existencia, a poca profundidad, de un acuífero utilizable.

Reducción de la volatilización *in situ*: se pretende suprimir las corrientes de aire, para evitar que la volatilización de compuestos orgánicos cause impactos. Suele considerarse una medida correctora temporal. Los métodos incluyen la reducción del volumen de poros con vapor en el suelo, mediante la adición de agua o compactación, la disminución de la temperatura del suelo y sellado de la capa superficial de suelo (ver aislamiento del emisor - cubrimiento). Los factores que controlan su eficacia son la volatilidad del contaminante, el área de la zona contaminada, y hay que tener en cuenta que sólo es una solución temporal.

## 7.2 Tratamiento *in situ*

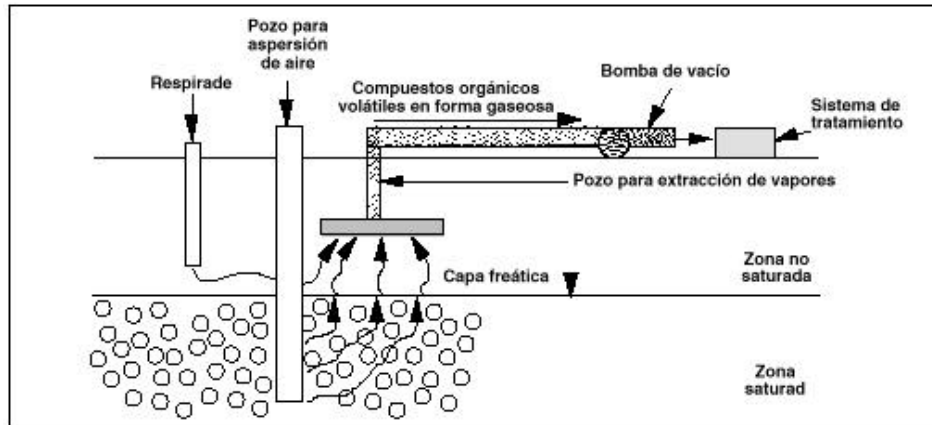
**Biodegradación:** Los microorganismos ingieren contaminantes y, mediante procesos metabólicos, transforman los contaminantes en sustancias menos tóxicas. Se precisan organismos específicos para cada contaminante. Puede realizarse como tratamiento *in situ* o como tratamiento bio-reactor en suelos excavados.



Esquema de biodegradación aerobia en el suelo (ref. US-EPA, 1996)

Los factores que controlan su eficacia son la capacidad de que los microorganismos prosperen (puede ser difícil introducir especies no nativas), niveles de oxígeno disuelto (puede incrementarse bombeando aire o peróxido de hidrógeno), humedad y permeabilidad del suelo (contaminantes y microorganismos deben poder moverse), temperatura (controla la tasa de crecimiento de los microorganismos), nutrientes (estimulación del crecimiento biológico mediante la adición de nutrientes), contenido orgánico del suelo ( $> 10\%$ ), pH del suelo ( $> 5,5$ ), factores de inhibición del crecimiento y productos secundarios de la biodegradación (algunos contaminantes son convertidos en sustancias más tóxicas, compuestos móviles).

**Extracción por vapor:** Consiste en la extracción de los constituyentes del suelo en fase vapor, sea pasivamente o mediante sistemas de bombeo (succión). El aire extraído se descarga directamente a la atmósfera o se trata (por ejemplo, adsorción por carbono, oxidación catalítica, oxidación térmica). Se puede estimular la extracción mediante inyección de aire a alta presión o caliente.



Extracción de vapores del suelo y aspersión de aire (ref. US-EPA, 1996)

Los factores que controlan la eficacia son: tipo de contaminante (se precisa una presión de vapor alta 1 mm. Hg) y solubilidades acuosas bajas (2.000 mg/l), tipo de suelo (suelos de permeabilidad moderada), grado de humedad ( un alto contenido de humedad disminuye la eficacia), contenido de arcillas (un alto contenido de arcillas puede retener materia orgánica), cubrimiento de la superficie del suelo (mejor no permeable), imposibilidad de limpiar el suelo hasta niveles profundos y relación dudosa entre la concentración en el gas del suelo y la del propio suelo y el agua subterránea.

Fijación o vitrificación *in situ*: La fijación es un proceso mediante el cual el material del suelo se convierte en una masa sólida por procesos químicos o fisicoquímicos (ver estabilización /solidificación). La vitrificación tiene lugar cuando los suelos se transforman en una sustancia parecida al vidrio (fusión) mediante electricidad volatilizándose parte de los contaminantes. A menudo se precisa tener un sistema para la recolección y tratamiento de los gases emitidos. Los factores que controlan la eficacia son las propiedades del suelo (bajo contenido de humedad), disponibilidad de electricidad, espacios vacíos y cantidad de material combustible en el subsuelo y aguas subterráneas poco profundas.

Estabilización/solidificación: es la mezcla de suelos contaminados con aditivo que inmoviliza el contaminante. La solidificación es la mezcla de suelos contaminados con un aditivo que endurece e inmoviliza el contaminante. Los aditivos potenciales son sustancias derivadas de cemento, cal, materiales termoplásticos, polímeros orgánicos, solidificación (cenizas, polímeros, serrín, etc.) Pueden realizarse *in situ* o en suelos extraídos.

Los factores que controlan la eficacia son el tipo de suelo y distribución del tamaño de las partículas, alto nivel de materia orgánica, aceites y grasas en cantidades superiores al 1%, uso potencial de materiales estabilizantes/solidificantes, aceptación legislativa (especialmente para la incorporación de asfalto), impacto desconocido a largo plazo, y presencia de cromo, mercurio, plomo, plata (transformación por oxidación en formas más tóxicas y móviles).

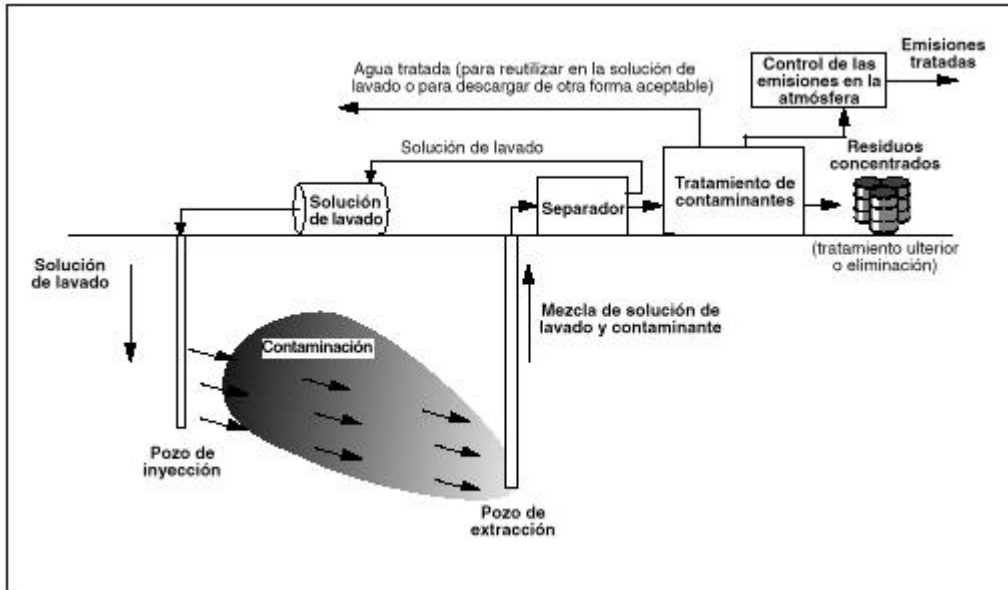
Degradación química *in situ*: Consiste en la adición de una sustancia química para inducir la degradación química. Existen tres tipos de degradación: oxidación mediante aireación o adición de agentes oxidantes: reducción de adición de agentes reductores: polimerización de ciertas sustancias orgánicas mediante la adición de hierro y sulfatos. Puede introducirse el aditivo mediante aplicación superficial (infiltración), inyección subsuperficial de líquido o inyección subsuperficial y mezclado del suelo.

Los factores que controlan la eficacia son el tipo de contaminantes, las características del suelo (permeabilidad para la inyección del aditivo, arenas, materiales no finos para su mezclado *in situ*), presencia de obstáculos subterráneos que impidan el mezclado subsuperficial, profundidad de la contaminación del suelo, utilización del acuífero poco profundo, y oxidación que puede producir contaminantes más tóxicos (por ejemplo, mercurio, cromo).

### **7.3 Extracción del contaminante *in situ* y tratamiento**

Flushing del suelo (lavado por lixiviado): Consiste en la adición por inyección superficial o subsuperficial de agua con un aditivo químico en el suelo, *in situ*. Al entrar en contacto con el agua, los contaminantes se movilizan y ésta es recogida mediante sistemas de drenaje. El agua se descarga directamente o se trata (véase figura).

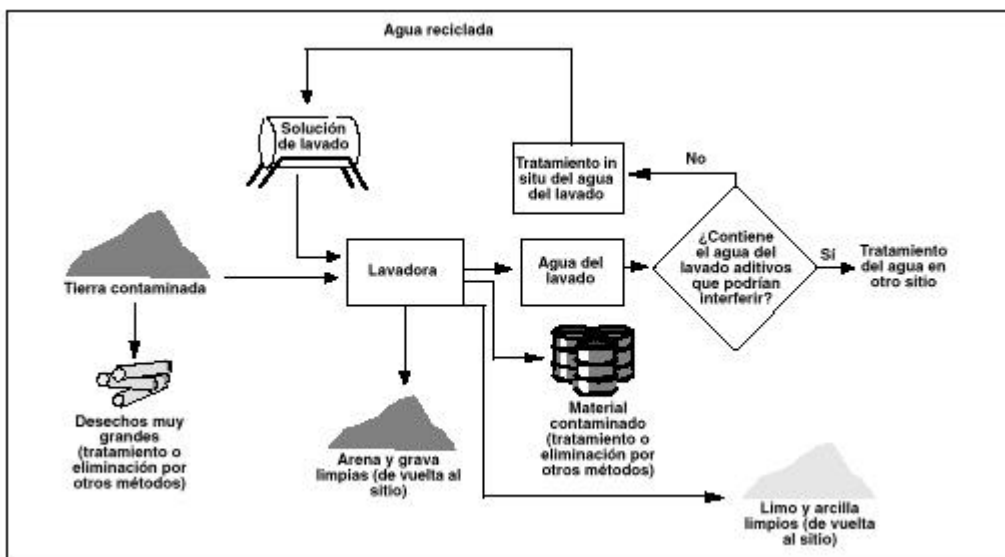
Los factores que controlan la eficacia son el aditivo químico, (específico para cada contaminante), el tipo de contaminación (puede haber problemas caso de haber varios contaminantes, con concentraciones variables), características del suelo (se precisa un suelo consistente, permeabilidad del suelo que permita la infiltración del aditivo, capa no permeable para prevenir la infiltración vertical, bajo contenido orgánico), un potencial limitado de tratamiento de las aguas residuales, reducción de la permeabilidad del suelo debida a aditivos, poca profundidad del acuífero, y una alta toxicidad por parte de los contaminantes.



Esquema de una instalación para el lavado de los suelos (ref. US-EPA, 1996)

#### 7.4 Extracción, tratamiento y reutilización del suelo

Lavado del suelo: El suelo contaminado se trata con agua y aditivos químicos, movilizándose así los contaminantes de las partículas de suelo: posteriormente el agua residual se trata o descarga. La extracción química implica la separación de suelos en varias fracciones: materia orgánica, agua y sólidos particulados. Algunos contaminantes pueden recuperarse para su uso posterior (fig. 11)



Proceso de lavado del suelo (ref. US-EPA, 1996)

Los factores que controlan la eficacia son las características de los contaminantes (tipo, solubilidad, coeficiente de partición, densidad, volatilidad), características del suelo (tamaño de partícula -los materiales finos y arcillas son difíciles, un alto contenido en materia orgánica tampoco es conveniente), cantidad de suelo a tratar, variaciones en la concentración del contaminante, uso último del suelo tratado y tratamiento/eliminación de las aguas residuales.

Landfarming/Compostaje: Como la biodegradación, que implica la ingestión de contaminantes por parte de microorganismos y transformación del contaminante mediante procesos metabólicos en sustancias menos tóxicas. Compostaje significa almacenamiento de materiales altamente biodegradables y estructuralmente firmes, con un pequeño porcentaje de residuos no biodegradables.

Los factores que controlan la eficacia son los que los contaminantes sean biodegradables aeróbicamente, disponibilidad de áreas abiertas, características del suelo (contenido de humedad del suelo, permeabilidad, temperatura, nutrientes, pH), profundidad de las aguas subterráneas y de la capa impermeable, limitaciones legislativas, potencial de migración de los contaminantes hacia el agua subterránea y potencial de emisión aérea.

Stripping térmico a baja temperatura: Los suelos se pasan por un sistema con superficies que transfieren calor, donde un flujo de aire inducido desorbe los compuestos volátiles. Estos pasan posteriormente por un sistema de adsorción por carbono o sistema quemador. A continuación se eliminan las cenizas volátiles.

Los factores que controlan la eficacia son el tipo de contaminante (constante de Henry superior a  $0,003 \text{ atm}\cdot\text{m}^3 \text{ mol}$ ), presencia de metales o contaminantes metálicos, inorgánicos o no volátiles, características del suelo (un alto porcentaje al arcilla o limos, materiales densamente empaquetados, materiales rocosos, alto contenido en humedad son todos factores desfavorables), permiso gubernativo para el incinerador y emisiones aéreas potenciales.

Atenuación: Consiste en la mezcla de suelo contaminado con suelo limpio. Es posible usarlo como primer paso a un tratamiento adicional (por ejemplo, biodegradación, compostaje landfarming).

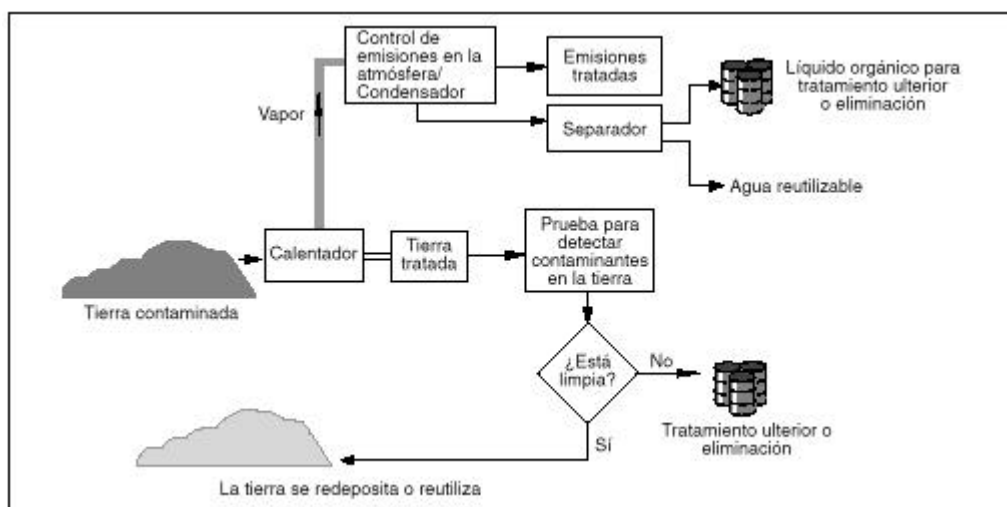
Los factores que controlan la eficacia son el tipo de contaminante presente (irrealizable cuando se trate de una sustancia tóxica o presente en alta concentración), utilidad del suelo resultante, regulaciones legislativas, además del hecho que sólo se ha realizado una dilución, pero no se ha eliminado el problema.

## 7.5. Extracción y eliminación del suelo

Incineración (tratamiento térmico 1): La combustión controlada (oxidación) de un contaminante bajo condiciones de oxidación neta con destrucción superior al 99,99%. Los tipos básicos incluyen horno rotatorio, lecho fluidizado, oxidación por aire húmedo, eléctrico infrarrojo y pirolítico. Las ventajas incluyen reducción del volumen, destoxificación, recuperación de la energía y recuperación de materiales. Puede realizarse en el mismo emplazamiento o fuera de éste.

Los factores que controlan la eficacia son requisitos legislativos, contaminantes (tipo, concentración, volumen), suelos con alto contenido de humedad, altos niveles de sustancias orgánicas halogenadas o fosfatos orgánicos, presencia de metales, preocupación por las emisiones aéreas, especialmente las relacionadas con metales. La incineración de los PCB y dioxinas requieren temperaturas superiores por lo que sólo son aplicables con ciertos incineradores.

Desorción térmica (tratamiento térmico 2): En tratamientos térmicos para ciertos compuestos (hidrocarburos, disolventes) mezclados con tierras se está realizando la desorción térmica, con calentadores desde 90° hasta 540°C. La desorción térmica es diferente de la incineración. La desorción térmica usa el calor para separar física-mente los contaminantes de la tierra, que después se someten a un tratamiento ulterior. La incineración usa el calor para destruir los contaminantes.



Desorción térmica (ref. US-EPA, 1996)

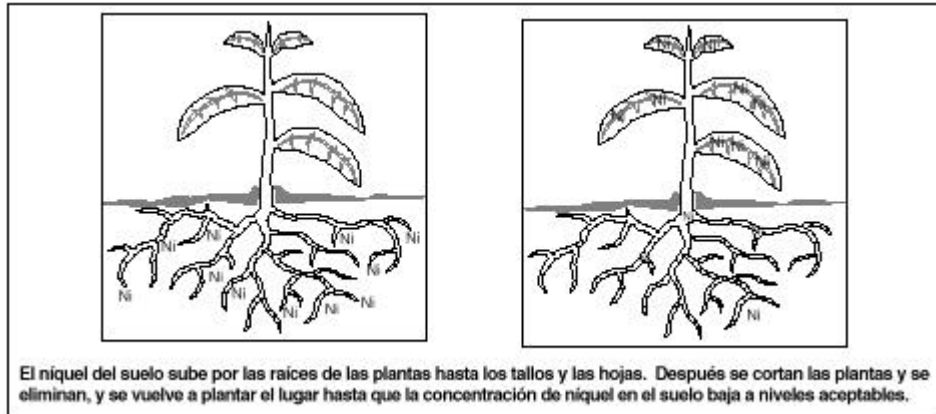


Vertedero: Colocación de los residuos en un ambiente subterráneo seguro, provisto de algún tipo de sistema de impermeabilización (simple o doble), sistemas de recolección de lixiviado y tratamiento, sistema de control de la escorrentía y posiblemente sistemas de solidificación de los residuos. Los tipos de vertedero incluyen vertederos bajo tierra y en zanja o valle.

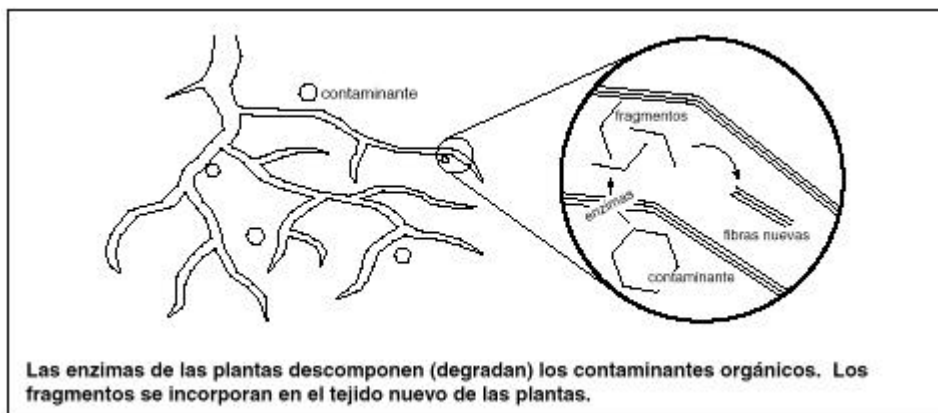
Los factores que controlan la eficacia son del tipo de contaminante (problemas con sustancias reactivas, corrosivas, etc. que cambian a lo largo del tiempo), disponibilidad de emplazamiento adecuado, área del terreno, profundidad del agua subterránea, impermeabilización del suelo, contenido de humedad en el suelo y en los residuos, diseño del sistema de impermeabilización y procedimiento operativos, y aceptación pública y gubernamental de la eliminación en vertedero.

## **7.6. Otras medidas**

Medidas fitocorrectivas: Consisten en el uso de árboles y plantas para limpiar aguas o suelos contaminados. Las plantas actúan como filtros o trampas y pueden descomponer o degradar contaminantes orgánicos o estabilizar contaminantes metálicos. Las funciones de descontaminación que pueden producir las plantas son diversas: 1) fitoextracción: algunas plantas se caracterizan por la extracción selectiva de compuestos del suelo (ej. níquel), que son captados y pasan a formar parte de la estructura vegetal (véase figura); 2) rizofiltración: se produce de forma análoga a la fitoextracción, salvo con la diferencia de que en este caso las plantas se cultivan con la raíz en agua y luego se disponen para la absorción directa de aguas o lixiviados contaminantes; 3) fitodegradación: es un proceso fundamentalmente enzimático por el que las raíces de las plantas causan reacciones químicas rápidas (ej. degradación de compuestos orgánicos).



Captación de metales (níquel) por fitoextracción (ref. US-EPA, 1996)



Destrucción de contaminantes orgánicos por fitodegradación

## 8. Tendencias y futuro en relación con la contaminación del subsuelo

En este último apartado se señalan algunos elementos de reflexión hacia el futuro, dejando abiertos una serie de puntos para su posterior debate:

- ✓ **Tendencias de la Unión Europea.** El V Programa de la Unión Europea ya proponía un nuevo planteamiento de la política del medio ambiente, basado en tres observaciones fundamentales: 1) las medidas aplicadas han reducido las tendencias negativas observadas en el estado del medio ambiente, pero no han conseguido revertirlas; 2) el modelo actual de desarrollo no es sostenible, no podrá seguir su desarrollo indefinidamente ni puede legarse; 3) no es posible responder únicamente a los problemas ambientales mediante la normativa; es preciso apelar al sentido de responsabilidad de los agentes del desarrollo (administración y sectores industriales) y de la población.

- ✓ **Necesidad de precauciones especiales**. La transformación de un suelo de carácter industrial en residencial no puede tener sólo un carácter formal (recalificación urbanística), sino que debe pasar también por un estricto control técnico y científico que asegure la viabilidad y condiciones de esta modificación (con especial atención a antiguos establecimientos industriales e instalaciones militares)
  
- ✓ **El futuro está en el control preventivo: las redes de control ambiental**. Las características de la contaminación del subsuelo como medio hacen necesario disponer de redes de control ambiental que permitan la detección temprana de posibles episodios de contaminación. La red optimiza el control de unas variables seleccionadas en puntos geográficos representativos de un fenómeno que evoluciona espacial y temporalmente. Se destaca como ejemplo la red de control ambiental del suelo y subsuelo que está desarrollando actualmente la refinería de Santa Cruz de Tenerife.
  
- ✓ **Otros elementos para un debate general sobre la contaminación del subsuelo**. Se plantean, y quedan abiertas para debates futuros, seis preguntas sobre la problemática que se ha estado tratando:
  - ⇒ ¿qué orden de prioridad ha de tener la descontaminación de suelos frente a otras problemáticas de orden ambiental?
  - ⇒ ¿es preferible recuperar suelos contaminados para destinarlos a nuevos usos o utilizar los suelos no contaminados para nuevas actividades?
  - ⇒ ¿quién tiene la responsabilidad de estudiar, proyectar y sanear los suelos contaminados?
  - ⇒ ¿cuáles deben ser los niveles adecuados de intervención en un emplazamiento contaminado?
  - ⇒ ¿los niveles obtenidos al sanear un suelo deben ser tales que permitan cualquier uso futuro del suelo, o deben orientarse al uso previsto?
  - ⇒ ¿se está considerando verdaderamente al suelo como un elemento común de los ciclos naturales (ej. del ciclo hidrológico) o simplemente como una superficie de uso?

## **9. Referencias bibliográficas y documentales**

- ABRAMS, R.H. & LOAGUE, K. (2000) "Legacies from three former manufactured-gas plants: impacts on groundwater quality". *Hydrogeology Journal*, vol. 8, num 6 December 2000, pp 594-607
- ÁLVAREZ-CAMPANA, J.M. (1996) "La contaminación de las aguas subterráneas en Galicia. Caso del entorno hidrogeológico del río Louro". *Tierra y Tecnología*, nº 12, 1996
- ÁLVAREZ-CAMPANA GALLO, J.M. (2001) "Suelos contaminados: problemática, metodología y normativa". Curso de Gestión Ambiental en la Empresa. Escuela de Organización Industrial-Fondo Social Europeo. ETSICCP. Universidad de A Coruña. 107 pp.
- ARNAIZ, J.A. & BENITO, J. (1991) "Suelos contaminados y su saneamiento" *Ingeniería Química*, junio 1991
- AZKONA, A. (1993) "Metodología para la elaboración del Plan Director para la Protección del Suelo en la Comunidad Autónoma del País Vasco". *Residuos*, año III, nº 6 nov-dic. 1993
- BERG, Van den R.; DENNEMAN, C.A.J.; y RIELS, J.M. (1993) "Risk assessment of contaminated soil: Proposals for adjusted, toxicologically bases Dutch soil clean-up criteria" In: Contaminated Soil '93, pp. 349-364. Eds. Kluwer Academic Publisher. Netherlands
- BIRKELAND, P.W. (1984) "Soils and Geomorphology". Oxford University Press. Oxford.
- BRUJIN, P.J. de (1994) "El desarrollo de la descontaminación de aguas subterráneas en Holanda". *Tierra y Tecnología*, 1994
- CATALÁN LAFUENTE, J. (1990) "Química del Agua". Librería Editorial Bellisco (MBH). Madrid, 1990
- CHAPMAN, A. (1994) "Acidic minewater treatment" *World Water and Environmental Engineering*, jun. 1994
- CONSELLERÍA DE INDUSTRIA E COMERCIO (1995) "Plan de Gestión de Residuos Peligrosos y Suelos Contaminados de Galicia". Consellería de Industria e Comercio. Xunta de Galicia
- DEPARTAMENTO DE URBANISMO, VIVIENDA Y MEDIO AMBIENTE (1993) "Análisis de la situación de los suelos contaminados en la Comunidad Autónoma del País Vasco". *Revista Técnica de Medio Ambiente (RETEMA)*, nov-dic, 1993
- EMALDI, M.; GÓMEZ, A. & ZUBIAGA, R. (1990) "El Papel de los Sistemas Expertos en suelos contaminados". *Revista Técnica de Medio Ambiente (RETEMA)*, 1990
- EYSER (1995) "Contaminación de suelos". Nota interior 1/95. Departamento de Medio Ambiente. EYSER, Estudios y Servicios, S.A
- FETTER, C.W. (1988) "Applied Hydrogeology". Ed. 1988
- GARCÍA, M. (1994) "Evaluación de la contaminación y recuperación de suelo contaminado por hidrocarburos" *Oilgas* dic. 1994
- GARCÍA DE CORTÁZAR, A. ; HOLZWARTH, W. & PAMO, J. (1994) "Investigación y saneamiento de terrenos afectados por líquidos contaminantes". *Ingeopres*, 1994

- GARCÍA DE CORTÁZAR, A.; FERNÁNDEZ, A. y PAMO, J. (1995) “Síntesis de la investigación de los terrenos contaminados en el aeropuerto de Sondika (Bizkaia)” *Residuos* 1995
- GÓMEZ, J.M.; RODRÍGUEZ, R.A.; GARCÍA, R.A.; & GARCÍA, F. (1994) “Limpieza de suelos contaminados mediante aireación *in situ* (características de los contaminantes)”. *Ingeniería Química*, junio 1994
- HARPER, J. & HEALEY, K. (1994) “On-Site Holistic Treatment” *World Water and Environmental Engineering*, jun. 1994
- HOLMAN, I.P.; PALMER, R.C.; LEONAVICIUTE, N. (2000) “Using soil and Quaternary geological information to assess the intrinsic groundwater vulnerability of shallow aquifers: an example from Lithuania”. *Hydrogeology Journal*, vol. 8, num 6 December 2000, pp 636-645
- JARAMILLO, A. (1992) “Recuperación de zonas alteradas por minería”. *Revista Técnica de Medio Ambiente (RETEMA)*, 1992
- KAYÁ, A. & FANG, H.Y. (1997) “Identification of contaminated soils by dielectric constant and electrical conductivity” *Journal of Environmental Engineering*, nº 2, february 1997
- LeGRAND, H.E. & ROSEN, L. (1992) “Common Sense in Ground-Water Protection and Management in the United States”. *Ground Water*, vol. 30, nº 6 nov-dec. 1992
- MAZADIEGO, L.F.; LLAMAS, J.F. & LLOPIS, J.F. (1992) “Métodos Geoquímicos de superficie en prospección de hidrocarburos”. *Ingeopres*, nº 3, may-jun. 1992
- MONTGOMERY, R. (1993) “Investigación y corrección de suelos contaminados”. *TecnoAmbiente*, 1993
- MUZIKAR, R. & ROGEL, J.M. (1993) “Contaminación de suelos y aguas subterráneas por fugas de hidrocarburos”. *TecnoAmbiente*, nº 26, marzo de 1993
- OCAÑA, L. (1994) “Muestreo y monitorización de la zona no saturada”. En: Curso sobre Caracterización y control de la contaminación del suelo y subsuelo por vertidos urbanos e industriales. Universidad de Oviedo, 1994
- OCAÑA, L. (1994) “Protocolo de toma de muestras de agua y suelos”. En: Curso sobre Caracterización y control de la contaminación del suelo y subsuelo por vertidos urbanos e industriales. Universidad de Oviedo, 1994
- PARENT, X. (1992) “Le Traitement des sols contaminés”. *Travaux* mai 1992
- PARRY, J. (1994) “Cultivos que eliminan la contaminación por metales”. *TecnoAmbiente*, abril 1994
- PENDÁS, F. (1994) “Las nuevas tecnologías para la caracterización y control de la contaminación en el suelo y subsuelo”. En: Curso sobre Caracterización y control de la contaminación del suelo y subsuelo por vertidos urbanos e industriales. Universidad de Oviedo, 1994
- PENDÁS, F. (1994) “Legislación sobre contaminación en la U.E. , España, y legislación en USA”. En: Curso sobre Caracterización y control de la contaminación del suelo y subsuelo por vertidos urbanos e industriales. Universidad de Oviedo, 1994
- US-EPA (1996) “Guías del ciudadano”. Programa de Residuos sólidos y respuesta en situaciones de emergencias. Environ. Protection Agency, 1996
- VÁZQUEZ, A. & RODRÍGUEZ-AVELLO, A. (1992) “La bioremediación como técnica mineralúrgica de depuración de suelos contaminados”. *Ingeopres*, nº 3, mayo-junio 1992

W.W.E.E. (1994) "Passive Remediation Systems" *World Water and Environmental Engineering*, jun. 1994

ZIELINSKI, J. (1994) "Groundwater Bioremediation" *World Water and Environmental Engineering*, jun. 1994