

1. CONTAMINACIÓN DE SUELOS A PARTIR DE RESIDUOS PELIGROSOS

1.1 ASPECTOS GENERALES

Son diversos los tipos de instalaciones y usos por los que se acumulan residuos peligrosos y que constituyen por tanto fuentes directas de contaminación por compuestos orgánicos. Entre ellas se pueden citar de forma específica los vertederos urbanos y los depósitos subterráneos (en especial de productos derivados del petróleo).

Sobre los residuos peligrosos es conveniente describir las propiedades químicas o características que muestra el residuo. En especial deben señalarse cuatro características junto con los métodos de ensayo para su evaluación: inflamabilidad, corrosividad, reactividad y toxicidad.

Inflamabilidad

Un residuo peligroso muestra características de inflamabilidad si presenta alguna de las siguientes propiedades:

1. El material es un líquido, pero no es una disolución acuosa, que contiene menos de un 24% de alcohol en volumen y presenta un punto de inflamación a temperatura $<60^{\circ}\text{C}$ según el ensayo propuesto

por la norma ASTM D-93-79 ó D-93-80 (métodos EPA 1010 ó 1020).

2. El material no es líquido y es capaz en condiciones estándar de presión y temperatura de producir fuego por fricción, absorción de humedad, o cambios químicos espontáneos, y, cuando arde lo hace de forma violenta y persistente creando un riesgo.
3. El material es un gas comprimido inflamable. Entendiendo por gas comprimido el que exhibe una presión > 40 psi a 70°C encerrado en un cilindro. El gas es inflamable si una mezcla del mismo del 13 % o inferior con aire puede inflamarse a presión y temperatura atmosférica.
4. El material es una sustancia oxidante, esto es, un material que genera oxígeno suficiente para estimular la combustión. Como ejemplos pueden citarse los cloratos (ClO_3^-), percloratos (ClO_4^-), permanganatos (MnO_4^-), peróxidos (H_2O_2 ó Na_2O_2), y nitratos (NH_4NO_3).

Corrosividad

Un residuo peligroso es corrosivo si una muestra representativa del mismo presenta alguna de las siguientes características:

1. El material es acuoso y presenta un $\text{pH} > 12.5$ ó < 2 (métodos EPA 9040 y 9041)
2. El material es un líquido y corroe un acero SAE 1020 a una velocidad superior a 6,35 mm por año a temperatura de 55°C , según el ensayo EPA 1110.

En el primer ensayo propuesto hay que tener en cuenta que el pH de las disoluciones alcalinas cambia drásticamente con la temperatura, reduciéndose al aumentar ésta.

Reactividad

Un residuo peligroso es reactivo si una muestra representativa del mismo tiene alguna de las siguientes propiedades:

1. El material es normalmente inestable y experimenta con facilidad cambios violentos sin que se detone
2. El material reacciona violentamente con agua
3. El material forma con agua mezcla potencialmente explosiva
4. Al mezclarlo con el agua, el material genera gases tóxicos o humos en cantidades peligrosas para la salud humana o el medio ambiente.

5. El material es una sustancia que contiene sulfuro o cianuro, que en un rango de pH de 2 a 12,5 pueda generar H₂S o HCN en cantidades peligrosas para la salud humana o el medio ambiente.
6. El material puede detonar si se le somete a una fuente activante o se le calienta estando confinado.
7. El material es capaz de detonar o experimentar descomposición explosiva bajo condiciones de presión y temperatura estándar.

Toxicidad

La toxicidad se evalúa a través de una lista de sustancias específicas cuya presencia en un residuo en niveles superiores a los establecidos se considera tóxica. Sin embargo, la existencia de estas sustancias en un residuo no determina de forma intrínseca el carácter peligroso o no peligroso del mismo.

1.2 CONTAMINACIÓN DE SUELOS A PARTIR DE VERTEDEROS URBANOS

La peligrosidad dependerá de las características del emplazamiento. Si el vertedero se ubica en un lugar controlado, estará aislado del entorno, mientras que en la mayoría de los restantes vertederos, el residuo está en contacto con el suelo, y las aguas de lluvia producen lixiviados que percolan y se mezclan con los ácidos procedentes de la descomposición de la materia orgánica, de esta forma se solubilizan numerosos materiales alcanzando las aguas subterráneas. Para conocer la lixiviación potencial de las sustancias orgánicas peligrosas de estos vertederos se utiliza la prueba TCLP ("Toxic Characteristics Leaching Procedure) recogido en el método EPA 1311.

En la tabla 1.2.1. se exponen valores de los mínimos niveles toxicológicos (Minimal Risk Level, MRL) obtenidos por diversas organizaciones, especialmente de la *Agency for Toxic Substances and Disease Registry* (ATSDR). Otra forma para determinar su toxicidad ha sido desarrollada por la EPA mediante la definición de la dosis oral de referencia (RfDo) para compuestos sistémicos y el factor de la pendiente oral (Sfo) para compuestos carcinogénicos. Los valores deducidos por la EPA para las distintas sustancias orgánicas se encuentran recogidos en el Anexo II.

Tabla 1.2.1.- Nivel mínimo de riesgo (MRL) para compuestos característicos en vertederos

Compuesto	MRL (inhalación)	MRL (oral)	Acción final
Tetracloruro de carbono	0,05 ppm (intermedio) 0,2 ppm (agudo)	0,007 mg/kg/día (intermedio) 0,02 mg/kg/día (agudo)	Hepática
Clordano*	0,0002 mg/m ³ (intermedio) 0,00002 mg/m ³ (crónico)	0,0006 mg/kg/día (intermedio) 0,01 mg/kg/día (agudo) 0,0006 mg/kg/día (crónico)	Hepática
Clorobenceno *	-----	0,4 mg/kg/día (intermedio)	Hepática
Cloroformo	0,05 ppm (intermedio) 0,1 ppm (agudo) 0,02 ppm (crónico)	0,1 mg/kg/día (intermedio) 0,3 mg/kg/día (agudo) 0,01 mg/kg/día (crónico)	Hepática
Cloruro de vinilo*	0,2 ppm (agudo) 0,04 ppm (crónico)	0,00002 mg/kg/día (crónico)	Desarrollo, hepática (inhalación) Hepática
o-cresol*		0,05 mg/kg/día (agudo)	Respiratoria
m-cresol*	-----	0,05 mg/kg/día (agudo)	Neurológica
p-cresol*		0,05 mg/kg/día (agudo)	Neurológica
1,4-diclorobenceno	-----	-----	-----
1,2-dicloroetano	-----	-----	-----
1,1-dicloroetileno	-----	-----	-----
2,4-dinitrotolueno	-----	-----	-----
Endrin*	-----	0,002 mg/kg/día (intermedio) 0,0003 mg/kg/día (crónico)	Neurológica
Heptaclor*	-----	-----	-----
Heptaclor epóxido*	-----	-----	-----
Hexaclorobenceno*	-----	0,008 mg/kg/día (agudo) 0,0001 mg/kg/día (intermedio) 0,00002 mg/kg/día (crónico)	Desarrollo Reproducción Desarrollo
Hexaclorobutadieno*	-----	0,0002 mg/kg/día (intermedio)	Renal
Hexacloroetano	6 ppm (agudo) 6 ppm (intermedio)	1 mg/kg/día (agudo) 0,01 mg/kg/día (intermedio)	Neurológica (inhalación) Hepática (oral)
Lindano*	-----	0,01 mg/kg/día (agudo) 0,00001 mg/kg/día (intermedio)	Neurológica Inmunológica
Metoxiclor*	-----	0,005 mg/kg/día (intermedio)	Reproducción
Metil etil cetona	-----	-----	-----
Nitrobenceno	-----	-----	-----
Pentaclorofenol*	-----	0,005 mg/kg/día (agudo) 0,001 mg/kg/día (intermedio) 0,001 mg/kg/día (crónico)	Desarrollo Reproducción Endocrina
Piridina	-----	-----	-----
Tetracloroetileno	0,2 ppm (agudo) 0,04 ppm (crónico)	0,05 mg/kg/día (agudo)	Neurológica (inhalación) Desarrollo (oral)
Toxafeno*	-----	0,005 mg/kg/día (agudo) 0,001 mg/kg/día (intermedio)	Hepática
Tricloroetileno	2 ppm (agudo) 0,1 ppm (intermedio)	0,2 mg/kg/día (agudo)	Neurológica (inhalación) Desarrollo (oral)
2,4,5-triclorofenol	-----	-----	-----
2,4,6-triclorofenol	-----	-----	-----

* Compuestos orgánicos de interés en suelos por razones de persistencia y/o toxicológicas

A continuación se exponen algunas propiedades generales y toxicológicas de sustancias que son posibles de encontrar en los diferentes tipos de vertederos. Algunas de ellas, como por ejemplo los plaguicidas, se describirán en apartados posteriores ya que, aunque es posible su existencia en vertederos, su encuadre más natural es con el conjunto de fitosanitarios.

Tetracloruro de carbono

El tetracloruro de carbono es un líquido claro que se evapora con mucha facilidad. La mayor parte del tetracloruro de carbono que se vierte al medio ambiente está en forma de gas. Antiguamente era muy usado como disolvente para la limpieza y como fumigante, más recientemente ha sido empleado como pesticida aunque para este uso dejó de emplearse en 1986. Los niveles de fondo de este compuesto en agua, aire y suelo son muy bajos y únicamente existe exposición a niveles mayores en sitios industriales específicos donde el tetracloruro de carbono continúa empleándose, así como en vertederos químicos donde las emisiones al aire, agua y suelo son incontroladas.

Con respecto a su toxicidad se han realizado numerosos estudios, así es posible indicar que la inhalación de tetracloruro de carbono provocó numerosas muertes en el pasado cuando su uso era común. Por otra parte, la inhalación puede provocar efectos sistémicos respiratorios (edema pulmonar), cardiovasculares (arritmias cardíacas), gastrointestinales (náuseas y vómitos), hematológicos, neurológicos (depresión del sistema nervioso central) y hepáticos. No existen estudios suficientes para establecer que la inhalación de tetracloruro de carbono esté relacionada con la aparición del cáncer. (ATSDR, 1994).

Por otra parte, ingestión de soluciones concentradas de tetracloruro de carbono puede causar la muerte en humanos en horas. La ingestión de concentraciones menores puede provocar efectos sistémicos respiratorios, gastrointestinales, neurológicos, hepáticos y renales. La EPA indica que hay suficientes evidencias para indicar que el tetracloruro de carbono es carcinogénico en animales y que es posible o probable carcinogénico en humanos.

Clordano (ver fitosanitarios)

Clorobenceno

El clorobenceno es un líquido incoloro de origen artificial, empleado como disolvente y en la producción de otros compuestos químicos. Puede

persistir durante meses en los suelos. Puede aparecer alrededor de vertederos químicos donde las emisiones al aire, agua y suelo son incontroladas.

No existen estudios suficientes para evaluar los efectos sistémicos en humanos provocados por la inhalación e ingestión de clorobenceno, aunque la ATSDR ha determinado el MRL por ingestión (Tabla 1.2.1), y sus posibles efectos hepáticos.

Actualmente no existen estudios de su influencia en el desarrollo del cáncer en humanos por su inhalación e ingestión.

Cloroformo

El cloroformo también se conoce como triclorometano y la mayor parte del que se encuentra en el medio ambiente procede de la industria. Fue el primer anestésico que se empleó durante las operaciones de cirugía, aunque hoy en día no se usa como tal. Actualmente se emplea en la mayoría de las bebidas acuosas y en aguas residuales para destruir bacterias. El cloroformo se evapora muy rápidamente cuando se expone al aire, también se disuelve fácilmente en agua, y no se mantiene en los suelos.

Cloruro de vinilo

El cloruro de vinilo, también se conoce como cloroeteno, cloroetileno, monocloroetileno. La mayor parte del cloruro de vinilo fabricado se utiliza en la producción de PVC. El cloruro de vinilo líquido se evapora pasa al aire con facilidad por evaporación, y en el caso de estar en suelos o aguas se evapora con rapidez si está cercano a la superficie. El cloruro de vinilo no se encuentra normalmente en zonas urbanas, o rurales en cantidades detectables por los métodos tradicionales de análisis, sin embargo se encuentra en el aire en zonas cercanas a industrias de plásticos y vertederos.

La inhalación de cloruro de vinilo puede provocar la muerte y en menores concentraciones tener efectos gastrointestinales, hepáticos y en el sistema reproductor. Aunque algunos datos relacionan su inhalación con la aparición de cáncer, no existen datos estadísticos suficientes como para generalizar.

Con respecto a la ingestión no existen estudios suficientes sobre los efectos respiratorios, cardiovasculares, gastrointestinales, renales u oculares en humanos o animales.

Cresoles

Hay tres isómeros del cresol: o-cresol, p-cresol (que tienen toxicidades similares) y m-cresol, que posee menor toxicidad. Pueden aparecer en estado sólido, en el caso de los cresoles puros, o tender a líquidos, mezclas. Aunque no se evaporan rápidamente de las aguas, en ríos y lagos se puede eliminar rápidamente por la acción de bacterias.

No existen estudios sobre la influencia de la inhalación de los cresoles en humanos, por el contrario la ingestión puede provocar la muerte. Con respecto a los efectos sistémicos, su ingestión produce trastornos gastrointestinales, hematológicos, respiratorios y neurológicos. Por otra parte, la EPA ha asignado a los tres isómeros la clasificación C, como posible carcinogénico humano.

1,4-Diclorobenceno

El 1,4-diclorobenceno también se conoce como para-DCB o p-DCB y se utiliza como desodorante por su alto poder en el control de olores, y como insecticida para frutas.

La IARC no ha determinado la concentración mínima de este compuesto (Tabla 1.2.1), debido a que no existen estudios suficientes sobre los efectos derivados de su ingestión o inhalación. Aunque la EPA lo ha clasificado como posible carcinogénico humano (B2), lo que significa que existen suficientes evidencias en animales e inadecuados o inexistentes estudios epidemiológicos.

1,2-Dicloroetano

El 1,2-dicloroetano es un líquido artificial que no se encuentra de forma natural en el medio ambiente. La mayor parte del 1,2-dicloroetano fabricado se emplea en la fabricación de cloruro de vinilo, para la fabricación de plásticos. También puede emplearse como aditivo en gasolinas para reducir el contenido en plomo.

Cuando es vertido en suelos pasa al aire y aguas subterráneas, y en el caso de permanecer los organismos presentes en los suelos pueden

transformarlo en compuestos menos dañinos, aunque esto ocurre de manera lenta.

La inhalación e ingestión de 1,2-dicloroetano puede ser letal en humanos, y aunque puede producir algunos efectos sistémicos, el reducido número de estudios actual hace que no se haya determinado el nivel mínimo de riesgo (MRL) para este compuesto (Tabla 1.2.1)

1,1-Dicloroetileno

En suelos el 1,1-dicloroetileno puede evaporarse al aire o percolar a través del suelo mediante la acción de la lluvia y llegar de esta forma a las aguas subterráneas. De igual forma a lo que ocurre con otros compuestos, la acción de los microorganismos del suelo puede degradarlo a compuestos menos peligrosos, aunque esto ocurra de forma muy lenta.

La exposición continuada a este compuesto puede tener efectos muy severos, aunque la información sobre su toxicidad es insuficiente como para establecer el nivel mínimo de riesgo que presenta (Tabla 1.2.1).

2,4-Dinitrotolueno

El 2,4-dinitrotolueno (2,4-DNT) y el 2,6-dinitrotolueno (2,6-DNT) son dos de las formas del dinitrotolueno. Es usado para producir poliuretano, explosivos y airbags para automóviles. Permanece en el medio ambiente durante largo tiempo.

Cuando se ingiere 2,4-DNT y 2,6-DNT, se transforman en diferentes sustancias en el hígado y los intestinos. Después la mayoría de estos compuestos son eliminados pasadas 24 horas por la orina y heces. No se ha determinado el nivel mínimo de riesgo para el DNT. Aunque la EPA lo ha clasificado como probable carcinogénico humano B2.

Endrin (ver fitosanitarios)

Heptaclor y heptaclor epóxido (ver fitosanitarios)

Hexaclorobenceno

El hexaclorobenceno no aparece de forma natural, es un subproducto en la fabricación de disolventes, otros compuestos clorados y pesticidas. Ha sido ampliamente usado como pesticida aunque ya no se utiliza como tal.

Tiende a permanecer en el medio ambiente durante largo tiempo, sobre todo en suelos donde su vida media es de 3 a 6 años. No se disuelve fácilmente en agua, permaneciendo la mayor parte en las partículas del fondo de lagos y ríos. Tampoco la evaporación es significativa bajo condiciones normales.

No hay estudios suficientes sobre la influencia de la inhalación de hexaclorobenceno como causa mortal o en la producción de efectos sistémicos. Durante los años 1980-1989 en la Provincia de Tarragona se produjo un incremento significativo en el cáncer de tiroides, cierto tipo de cáncer de piel y de pulmón, en la localidad de Flix, cercano a una fábrica de organoclorados que produjo altos niveles de hexaclorobenceno en el ambiente durante décadas. Sin embargo este estudio no fue concluyente y además no existen más datos que lo relacionen con la evolución del cáncer.

La ingestión de hexaclorobenceno provocó numerosas muertes durante los años 50 en Turquía. La ingestión continuada de hexaclorobenceno ha sido relacionada con efectos negativos en el desarrollo humano. La EPA ha establecido que el hexaclorobenceno es un probable carcinogénico humano (B2).

Hexaclorobutadieno

El hexaclorobutadieno, también conocido como HCBD, perclorobutadieno o Dolen-Put, es un líquido incoloro artificial que no se evapora con facilidad. Se forma durante el procesado de otros compuestos como son el tetracloroetileno, tricloroetileno o tetracloruro de carbono. Constituye un producto intermedio en la fabricación del caucho y lubricantes, y es empleado como fluido hidráulico. Entra en el medio ambiente como resultado de depósitos posteriores a su uso industrial. No se conoce bien que es lo que sucede cuando entra en contacto con los suelos, aunque se supone que permanece en ellos por algún tiempo.

No existen estudios suficientes sobre la inhalación de este compuesto y con respecto a la ingestión lo único que puede indicarse es que puede tener efectos sobre el riñón. La IARC ha determinado que el hexaclorobutadieno no es clasificable como carcinogénico en humanos, pero ha indicado que existen algunas evidencias de su carácter carcinogénico en ratas. Por otra parte la EPA ha determinado que es un posible carcinogénico humano.

Hexacloroetano (ver fitosanitarios)

Lindano o Hexaclorociclohexano (ver fitosanitarios)

Metoxiclor (ver fitosanitarios)

Nitrobenceno

El nitrobenceno se produce en grandes cantidades para uso industrial. En gran proporción se utiliza para la fabricación de anilina. También se emplea para producir aceites lubricantes para motores y maquinaria. Pequeñas cantidades pueden usarse para drogas, pesticidas y caucho sintético. Los niveles de nitrobenceno que se encuentran en la naturaleza son extremadamente bajos, usualmente <1 ppb.

Su contacto puede causar irritación de piel y ojos y altas concentraciones pueden alterar algunos parámetros de la sangre. Otros efectos son náuseas, vómitos, dolor de cabeza e irritabilidad. Si la exposición es extremadamente alta el nitrobenceno puede provocar coma. El consumo de alcohol durante la exposición puede incrementar los efectos dañinos del nitrobenceno. Hay poca información disponible sobre sus efectos por una exposición de larga duración y no se sabe con certeza si puede causar cáncer.

Pentaclorofenol

El pentaclorofenol es una sustancia sintética que ha sido empleada como herbicida y pesticida, y que actualmente es usado como protector de la madera. Sus propiedades físicas y químicas sugieren que no se evaporará demasiado a la atmósfera y que la mayoría se mantendrá en las partículas sólidas y se trasladará con el agua. El movimiento dependerá de la acidez de los suelos.

La inhalación de pentaclorofenol puede irritar la piel y los ojos. Por otra parte la ingestión puede provocar alteraciones de la sangre, el sistema nervioso central, el sistema inmunológico y el digestivo. La ingestión de grandes cantidades de pentaclorofenol durante mucho tiempo en animales de laboratorio ha mostrado su influencia en el desarrollo del cáncer. La IARC ha determinado que es un posible carcinogénico en humanos y la EPA lo ha clasificado como probable carcinogénico humano.

Piridina

La piridina es un líquido inflamable, de olor desagradable, que se utiliza como disolvente para fabricar diferentes medicamentos, vitaminas,

harinas comestibles, pesticidas, pinturas, productos del caucho y adhesivos. La piridina líquida se evapora fácilmente al aire y se mezcla fácilmente en el agua.

La piridina y los compuestos que contienen piridina se presentan en el medio ambiente en muy bajos niveles. Normalmente no se encuentran en suelos cercanos a vertederos y áreas industriales.

Existen pocos estudios para determinar la toxicidad de la piridina, aunque los existentes indican que pueden producir efectos neurológicos, renales, irritación en la piel y en ojos. No se han determinado los MRL de la piridina (Tabla 1.2.1) y no se conoce que pueda causar cáncer, defectos de nacimiento o problemas con la reproducción.

Tetracloroetileno

El tetracloroetileno es un compuesto químico que es usado ampliamente en operaciones de limpieza en seco y desgrasado de metales. Se evapora con facilidad y se encuentra a menudo en aguas.

Altas concentraciones de vapor de cloroetileno constituyen a la vez un potente anestésico y produce arritmia al alterar los niveles de epinefrina. Se ha comprobado que su inhalación puede producir la muerte. Por otra parte la exposición a este compuesto altera el sistema nervioso central (falta de coordinación, efectos anestésicos) y puede tener efectos negativos sobre la reproducción (desordenes menstruales y abortos espontáneos). Ha sido ampliamente usado como anestésico general porque a altas concentraciones produce la pérdida de conciencia. En sitios cerrados y mal ventilados puede causar dolores de cabeza, insomnio, confusión, náuseas, dificultades en el habla y muerte.

En cuanto a su influencia en el desarrollo del cáncer, se han realizado numerosos estudios epidemiológicos sobre los trabajadores de limpieza y de tintorerías, aunque es difícil saber cuales de los efectos se deben al tetracloroetileno y cuales a otros disolventes del petróleo.

Toxafeno (ver fitosanitarios)

Tricloroetileno

El tricloroetileno, también conocido como Vitran, es un disolvente ampliamente usado para eliminar la grasa de piezas metálicas. Anteriormente ha sido empleado como anestésico. Entra en el medio

ambiente por evaporación procedente de fábricas que lo utilizan para remover la grasa de los metales. Aunque se evapora con facilidad puede permanecer en suelos y aguas subterráneas.

La inhalación e ingestión de altas concentraciones de tricloroetileno puede provocar la muerte. En menores concentraciones se asocia con efectos neurológicos y del desarrollo. Se han efectuado estudios para evaluar su potencial carcinogénico aunque no existe evidencia directa de su influencia en un aumento del nivel de riesgo.

2,4,5-triclorofenol y 2,4,6-triclorofenol (ver fitosanitarios)

1.3 CONTAMINACIÓN A PARTIR DE DEPÓSITOS SUBTERRÁNEOS

Existe un gran número de depósitos subterráneos en especial para almacenar productos derivados del petróleo. La caracterización analítica de este problema tienen una doble faceta, por un lado, el analito relacionado con el petróleo debe separarse de la matriz sólida del suelo o del agua subterránea, por otro, debe llevarse a cabo una determinación cualitativa y cuantitativa de la sustancia en cuestión.

Las principales sustancias que pueden contaminar los suelos procedentes de estas instalaciones se agrupan de la manera que sigue a continuación.

1.3.1. Hidrocarburos totales del petróleo (TPH).

El término hidrocarburos totales del petróleo (*TPH*) se emplea para describir un grupo de compuestos que provienen del petróleo crudo, que se emplean con posterioridad en la fabricación de una amplia variedad de productos comerciales (gasolina, fueloil, aceites lubricantes, disolventes, aceites minerales,...). Es importante entender que los TPH son una mezcla compleja que típicamente contiene cientos de compuestos, entre los que existen hidrocarburos alifáticos (de cadena simple, ramificados, cicloalcanos y alcanos) y compuestos aromáticos (benceno, alquilbenceno, naftaleno, PAH, etc.). Además, muchos de los productos del petróleo, contienen aditivos como alcoholes, éteres, metales y otros compuestos que pueden afectar a la toxicidad de la mezcla global.

Debido a su gran variedad tanto en el petróleo crudo como en los derivados, no es práctico analizarlos por separado y en su lugar puede ser más útil medir la cantidad total de TPH, aunque esta cantidad no sea un indicador directo del riesgo para la salud humana o el medio ambiente.

Para poder relacionar los contenidos en TPH con esos riesgos hay que tener en cuenta que el número de hidrocarburos individuales identificados en los TPH puede oscilar entre varios centenares e incluso llegar a mil. De todos ellos sólo se dispone de datos de toxicidad de 95 y sólo se considera que existen datos suficientes para poder establecer criterios toxicológicos en 25, y de ellos solo se han establecido MRL para 12 de esos compuestos, (antraceno, benceno, etilbenceno, fluoranteno, fluoreno, n-hexano, naftaleno, tolueno, m-xileno, p-xileno, xilenos y 1-metil-naftaleno) (TPHCWG 1997).

Por todo ello no es posible dar un valor de toxicidad general para los TPH. Esta situación plantea indecisiones, que por otra parte son comunes a otras mezclas de compuestos químicos. Se deben considerar los resultados de la toxicidad conjunta, o por el contrario seleccionar la de los compuestos más tóxicos. En el caso de los TPH la situación se complica puesto que la composición puede variar grandemente durante tomas de muestras sucesivas.

Esta situación ha provocado numerosas investigaciones que tenían como objetivo primordial clasificar los TPH en fracciones de similares características de transporte medioambiental, y que normalmente tuvieran propiedades toxicológicas semejantes aunque pueden existir excepciones (por ejemplo el benceno es carcinógeno y los otros compuestos de su grupo no).

En este sentido se ha realizado un gran esfuerzo por los Grupos de Trabajo de la ATSDR y TPHCWG proponiendo 6 grupos de sustancias, siendo tres fracciones aromáticas y otras tres alifáticas (Tabla 1.3-1). Los efectos provocados en la salud se basan en los compuestos representativos o mezclas para cada una de las fracciones empleando el *mínimo nivel de riesgo (MRL)* desarrollados por la ATSDR.

Tabla 1.3-1. Fracciones de los TPH y compuestos representativos.

Fracción química, en EC*	Compuestos representativos
Aromática	
EC ₆ -EC ₉	benceno, tolueno, etilbenceno y xilano
EC _{>9} -EC ₁₆	Isopropil benceno, nafatleno
EC _{>16} -EC ₃₅	Fluoreno, fluoranteno, benzo(a)pireno
Alifática	
EC ₅ -EC ₈	n-hexano
EC _{>8} -EC ₁₆	JP-5, JP-7, JP-8, keroseno
EC _{>16} -EC ₃₅	Aceites minerales

8# EC= índice del equivalente de n° de carbonos, basado en el tiempo de retención equivalente en una columna CG, normalizado para el n-alcano

En general, para cada fracción la toxicidad potencial viene dada por la toxicidad del/los representante(s) más tóxico(s). De esta manera a pesar del abundante número de compuestos que existen en los TPH, sólo es necesario analizar un pequeño número de compuestos para determinar su toxicidad. La influencia en la salud de cada fracción puede por lo tanto caracterizarse basándose en sus componentes más representativos.

La ATSDR ha desarrollado los MRL para varios TPH individuales y para productos del petróleo específicos, algunos de los cuales se indican en

la tabla 1.3-2, en la que además se señala la clasificación carcinogénica para los componentes de los *TPH* según la IARC y la EPA.

Tabla 1.3-2.- MRL y clasificación carcinogénica para componentes de los TPH

Fracción	Compuesto	MRL (inhalación)	MRL (oral)	Clasificación carcinogénica según la IARC ^a	Clasificación carcinogénica según la EPA ^b
Alif1	n-hexano	0,6 ppm (crónico)	ND	ND	Grupo D
Alif2	Gasolina de automóviles	ND	ND	ND	ND
	Combustible de aviones	9 mg/m ³ (intermedio, JP-4) 3 mg/m ³ (intermedio, JP5/8) 0,3 mg/m ³ (crónico, JP-7)	ND	Grupo 3	ND
	Fueloil	0,02 mg/m ³ (agudo, combustible diesel) 0,01 mg/m ³ (intermedio, keroseno)	ND	Grupo 2 ^a : petróleo refinado Grupo 2B: combustible diesel marino y fueloil residual Grupo 3: combustible aviones combustible diesel destilado	ND
Alif3	Aceites minerales	ND	ND	ND	ND
Arom1	Benceno	0,05 ppm (agudo) 0,04 ppm (intermedio)	ND	Grupo 1	Grupo A
	Etilbenceno	0,2 ppm (intermedio)	ND	ND	Grupo D
	Tolueno	3 ppm (aguda) 1 ppm (crónica)	0,8mg/kg/día (aguda) 0,02 mg/kg/día (intermedia)	ND	Grupo D
	Xilanos	1 ppm (aguda) 0,7 ppm (intermedia) 0,1 ppm (crónica)	1 mg/kg/día (aguda, p-xilano) 0,2 mg/kg/día (intermedia) 0,6 mg/kg/día (intermedia, m-xilano)	Grupo 3	Grupo D
Arom2	Naftaleno	0,002 ppm (crónico, naftaleno)	0,05 mg/kg/día (agudo, naftaleno) 0,02 mg/kg/día (intermedio, naftaleno) 0,07 mg/kg/día (crónico, 1-metilnaftaleno)	Grupo 3	Grupo D
Arom3	PAH	ND	0,6 mg/kg/día (intermedio, acenafteno) 0,4 mg/kg/día (intermedio, fluoranteno y fluoreno) 10 mg/kg/día (intermedio, antraceno)	Grupo 2 ^a : benzo(a)antraceno, benzo(a)pireno Grupo 2B: benzo(b)fluoranteno, benzo(j) fluoranteno, indeno 1,2,3-c,d) pireno Grupo 3: antraceno, benzo(g,h,i)perileno y PAH adicionales	Grupo B2: benzo(a)antraceno, benzo(b)fluoranteno, benzo(a)pireno, criseno, dibenzo(a,h)-antraceno, indeno 1,2,3-c,d) pireno Grupo D: acenaftinelo, antraceno, fluoranteno

ND: no disponible

a: Clasificación carcinogénica según la IARC: Grupo 1= carcinogénico en humanos; Grupo 2^a= probablemente carcinogénico en humanos; Grupo 2B= posible carcinogénico en humanos; Grupo 3= no clasificable como carcinogénico en humanos.

b: Clasificación carcinogénica según la EPA: Grupo A= carcinogénico en humanos; Grupo B2= probablemente carcinogénico en humanos; Grupo C= posible carcinogénico en humanos; Grupo D= no clasificable como carcinogénico en humanos.

Fracciones Alifáticas: Alif1: EC₅-EC₈; Alif2: EC₈-EC₁₆; Alif3: EC₁₆-EC₃₅

Fracciones Aromáticas: Arom1: EC₆-EC₉; Arom2: EC₉-EC₁₆; Arom3: EC₁₆-EC₃₅

Otra forma para determinar su toxicidad ha sido desarrollada por la EPA mediante la definición de la dosis oral de referencia (RfDo) para compuestos sistémicos y el factor de la pendiente oral (Sfo) para compuestos carcinogénicos. Los valores deducidos por la EPA para las distintas sustancias orgánicas se encuentran recogidos en el Anexo II.

El Total Petroleum Hydrocarbon Criteria Working Group (TPHCWG, 1999) ha desarrollado los parámetros toxicológicos para las distintas fracciones en las que se clasifican los TPH (Tabla 1.3.3).

Tabla 1.3.3.- Criterios de Toxicidad para las fracciones TPH (TPHCWG, 1999b)

nº de carbonos equivalentes	RfD (mg/kg/d)	Rfc (mg/m ³)
Fracciones Alifáticas		
>5-6 y 6-8	5,0	18,4
>8-10, 10-12 y >12-16	0,1	1,0
>16-35	2,0	No disponible
Fracciones Aromáticas		
>5-7 (benceno)	No disponible	No disponible
>7-8 (tolueno)	0,2	0,4
>8-10, 10-12 y >12-16	0,04	0,2
>16-21 y >21-35	0,03	No disponible

Cada una de las fracciones de los TPH y sus características toxicológicas serán objeto de estudio en los apartados siguientes.

1.3.2. Fracción aromática EC₅-EC₉: Benceno, Tolueno, etilbenceno y xilano (BTEX).

La fracción aromática EC₅-EC₉ tiene como compuestos representativos al benceno, tolueno, etilbenceno y xilano (isómeros o-, m-, p- individuales y mezclados). Aunque el estireno debería estar en esta fracción no se incluye porque según TPHCWG (1997) no es constituyente significativo de los productos del petróleo.

Los BTEX han sido objeto de estudios toxicológicos individuales (ATSDR 1994c, 1997^a y b, 1999^a y b), así como conjuntos (ATSRD2001).

Con respecto a la exposición por inhalación todos los BTEX causan efectos neurológicos, que consisten principalmente en la depresión del sistema nervioso central. En relación con su carácter carcinogénico, el benceno ha sido el único BTEX que ha sido clasificado como carcinogénico para humanos (Según la EPA, pertenece al Grupo A, que engloba a aquellos compuestos para los que existe evidencia de su influencia carcinogénica), especialmente está asociado con la leucemia. Tolueno y xileno han sido clasificados por la EPA como pertenecientes al

Grupo D (no clasificables como carcinogénicos en humanos), por otra parte aunque etilbenceno ha sido clasificado también como perteneciente al Grupo D, estudios posteriores han evidenciado que son carcinogénicos en ratas y ratones, por lo que es necesario re-evaluación.

Por otra parte los estudios relativos a la exposición oral son menos numerosos, aunque muestran que los BTEX causan depresión del sistema nervioso central, especialmente para tolueno y p-xilano. Los BTEX pueden también causar efectos renales o hepáticos por vía oral. El benceno causa los mismos efectos hematológicos por vía oral que por inhalación y también es considerado como carcinogénico. Los otros BTEX son considerados como no carcinogénicos (Grupo D) por vía oral.(Tabla 1.3.1)

1.3.3. Fracciones aromáticas combinadas EC_{>9}-EC₁₆

Este grupo se puede subdividir en las siguientes fracciones:

- 4# Fracción EC₉-EC₁₀: incluye isopropilbenceno, n-propilbenceno, metil-etilbenceno, algunos isómeros del trimetilbenceno y butilbencenos ramificados. Ninguno de estos compuestos ha sido objeto de estudio toxicológico por parte de la ATSDR.
- 4# Fracción EC_{>10}-EC₁₂: incluye n-butily n-pentilbenceno, isómeros del trimetilbenceno, indano, metilindano y naftaleno. Actualmente sólo está disponible el perfil toxicológico del naftaleno (ATSDR 1995d)
- 4# Fracción EC_{>12}-EC₁₆: incluye alquilbenceno multisustituídos, bifenilos, mono y dimetilnaftaleno y PAH, incluyendo acenafteno y acenaftileno. Los monometilnaftaleno (1- y 2-metilnaftaleno) se discuten en el perfil toxicológico del naftaleno (ATSDR 1995e) y acenafteno y acenaftileno en el perfil toxicológico de los PAH (ATSDR 1995e).

Con respecto a la exposición por inhalación hay que destacar según TPHCWG (1997) una mezcla de compuestos aromáticos C₉, que consista esencialmente en isómeros del trimetilbenceno y metiletilbenceno, tiene efectos críticos renales y hepáticos. Por otra parte, el nafatelno causa frecuentemente anemia y efectos oculares en humanos (especialmente en niños). Aunque este compuesto ha sido clasificado por la EPA como perteneciente al Grupo D, debería ser reconsiderado, puesto que probablemente sería más apropiado clasificarlo en el Grupo C (posible carcinogénico en humanos) (ATSDR 1999b).

En relación con la exposición oral el isopropilbenceno, que ha sido clasificado en el Grupo D, tiene efectos críticos renales, mientras que el

1,2,5-trimetilbenceno produce una combinación de efectos renales y hepáticos (EPA 1998). La ingestión de naftaleno produce anemia y aunque ha sido clasificado dentro del Grupo D, existen evidencias posteriores que indicarían que sería conveniente incluirlo dentro del Grupo C (EPA, 1998). Bifenilo (EPA 1998) y acenaptileno (ATSDR 1999b) han sido clasificados dentro del Grupo D.(tabla 1.3.1.)

1.3.4. Fracciones aromáticas combinadas EC_{>16}-EC₃₅: PAH

Estas fracciones corresponden íntegramente a hidrocarburos aromáticos policíclicos PAH, cuyo perfil toxicológico ha sido estudiado por la ATSDR (ATSDR 1995e) y aunque acenafteno y acenaftileno pertenecen a la fracción aromática EC_{>12}-EC₁₆ se discutirán en este apartado. Estas fracciones se pueden subdividir en:

- 4# Fracción EC_{>16}-EC₂₁: incluye antraceno, fluoreno, fenantreno y pireno.
- 4# Fracción EC_{>21}-EC₃₅: incluye benzo(a)antraceno, benzo(b)-, benzo(j)- y benzo(k)fluoranteno, benzo(g,h,i)pireno, benzo(e)pireno; criseno, dibenzo(a,h)antraceno, fluoranteno e indeno(1,2,3-c,d)pireno.

No se han determinado el nivel de riesgo mínimo (MRL) de estos compuestos por inhalación pero se ha comprobado que la exposición al benzo(a)pireno causa efectos en la respiración (ATSDR1995f). Aunque los compuestos de este rango de EC no son volátiles (TPHCWG 1997c) y por lo tanto la exposición a la inhalación debe ser mínima, es posible inhalar partículas que contengan PAH.

La ingestión de PAH puede provoca alteraciones hepáticas, renales e inmunológicas (ATSDR 1995e, EPA 1998). Con respecto a su caracter carcinogénico: fluoreno, antraceno, pireno, fenantreno, fluoranteno y benzo(g,h,i)pireno, han sido clasificados como pertenecientes al Grupo D, mientras que el resto [benzo(a)antraceno, benzo(b)-, benzo(j)- y benzo(k)fluoranteno, benzo(e)pireno; criseno, dibenzo(a,h)antraceno e indeno(1,2,3-c,d)pireno] han sido clasificados como probable carcinogénicos en humanos (Grupo B2) (ATSDR 1995e; EPA 1997a, 1998).(tabla 1.3.1)

1.3.5. Fracciones alifáticas combinadas EC₅-EC₈

Esta fracción incluye n-pentano, n-hexano, dimetilbutilbutano, metilpentanos, ciclopentanos, alquenos, n-heptano, n-octano,

trimetilpentano, ciclohexano, metilciclopentano, metilciclohexano. De todos los compuestos que constituyen esta fracción sólo el n-hexano ha sido objeto de estudio toxicológico (ATSDR 1999b).

La exposición al n-hexano por inhalación e ingestión puede causar neuropatías periféricas en humanos y animales, así como depresión del sistema nervioso central en el caso de que la exposición sea a niveles altos. El n-hexano pertenece al Grupo D, por lo que no ha sido considerado como carcinogénico en humanos.(tabla 1.3.1)

1.3.6. Fracciones alifáticas combinadas EC_{>8}-EC₁₆

Esta fracción incluye n-nonano, n-decano, n-undecimodecano, n-dodecano, compuestos C₉-C₁₀ ramificados, pentilciclopentano, n-tri-, tetra-, penta- y hexadecano y algunos alquenos. Ninguno de los compuestos que pertenecen a esta fracción ha sido objeto de estudios toxicológicos.

1.3.7. Fracciones alifáticas combinadas EC_{>16}-EC₂₅

Esta fracción incluye n-hepta, n-octa y n-nonadecano, n-eicosadecano, n-henueicosano, n-docasano, n-tetracosano, n-hexacosano. Estos compuestos forman parte de los aceites minerales, que además contienen hidrocarburos ramificados y cíclicos. Existe poca información disponible sobre los efectos en la salud de estos productos, por lo que no se ha determinado el nivel mínimo de riesgo (MRL) de los mismos.

1.3.8. Productos comerciales del petróleo de alto consumo.

Se exponen a continuación los riesgos para la salud de los productos del petróleo de gran consumo. Estos productos tienen composiciones que son mezcla de las fracciones citadas en los párrafos anteriores, por esta razón, los riesgos toxicológicos de sus componentes ya se han comentado.

Gasolina para automóviles y Combustibles de aviones (GRO)

La gasolina está compuesta de una compleja mezcla de hidrocarburos volátiles derivados del petróleo y aditivos (ATSDR 1995a, IARC 1989a). La composición de la gasolina varía ampliamente dependiendo de la composición del petróleo crudo del que ha sido refinado, del proceso de refinamiento empleado y de los tipos y cantidades de compuestos no hidrocarburos adicionados para impartir propiedades funcionales específicas de la gasolina. Las condiciones específicas del

mercado, parcialmente en respuesta a la regulación, son determinantes en el refinado y manufactura de ciertas gasolinas.

En general la gasolina contiene fundamentalmente hidrocarburos alifáticos del rango C_4 - C_{12} , con la siguiente distribución: alcanos (4-8%), alquenos (2-5%), isoalcanos (25-40%), cicloalcanos (3-7%), cicloalquenos (1-4%) y aromáticos (20-50%). El benceno contenido en la gasolina es 0,12-3,5%.

Por otra parte los aditivos son: tetraetilplomo, 1,2-dibromoetano, detergentes (sulfonatos), antioxidantes (p-fenildiamina) y agentes anti-hielo (alcoholes). Además, para estimular a los octanos se adicionan productos como etanol y MTBE.

La inhalación, ingestión y exposición dérmica a la gasolina ha sido asociada con irritación, dolores de cabeza, náuseas y otros síntomas neurológicos (ATSDR 1995a). La ingestión de grandes cantidades de gasolina también puede producir efectos respiratorios como neumonías y edema pulmonar. Aunque no se han determinado MRL para la gasolina debido fundamentalmente a la variabilidad presente en su composición, las posibles repercusiones toxicológicas hay que buscarlas teniendo en cuenta las fracciones a las que pertenece (tablas 1.3.1. y 1.3.2.).

Por otra parte, se han realizado numerosos estudios epidemiológicos considerando la fracción gasolina (GRO) globalmente, pero ninguno demuestra de manera concluyente correlaciones con enfermedades, especialmente cancerígenas (tabla 1.3.2.)(EPA 1995a). Aunque como medida precautoria, EPA (1987c) ha clasificado la gasolina como perteneciente al Grupo B2 (probable carcinogénico humano), y la IARC (1989a) en el grupo B2 (también como posible carcinogénico en humanos), basándose en estudios de alteración del ADN en ratas y ratones y en la presencia entre sus componentes de benceno y 1,3-butadieno.

Con respecto a los combustibles de aviones tales como JP-5, JP-7 y JP-8 tienen la misma composición que el keroseno (que consiste fundamentalmente en hidrocarburos de rango C_9 - C_{12}), mientras que el JP-4 está compuesto por hidrocarburos de más espectro (C_4 - C_{16}). Como aditivos contienen antioxidantes, dispersantes y/o inhibidores de corrosión.

De la misma manera que ocurre con la gasolina la composición va a depender de la del petróleo crudo y del proceso de producción. En general están compuestos fundamentalmente por hidrocarburos alifáticos,

representando los aromáticos un 20%. El benceno suele ser <0,02% y no contienen PAH.

La exposición directa de estos productos puede producir efectos respiratorios y gastrointestinales. Sin embargo, el número de estudios epidemiológicos es reducido y no permite concluir sobre la posibilidad de que produzcan efectos más graves (ATSDR,1998 y IARC, 1989).

Gas-oil y Fuel-oil (DRO)

Los DRO consisten en una compleja mezcla de hidrocarburos alifáticos, que representan el 80-90%, e hidrocarburos aromáticos (entre 20 y 10%). En los diesel ligeros fundamentalmente los hidrocarburos son del rango C₉-C₁₆ mientras que en los medianamente ligeros son del rango C₁₁-C₂₀. En ambas fracciones el contenido en PAH es menor del 5%.

La composición de los DRO pesados es compleja, conservando más de un 15% de residuos de destilación y con contenidos en PAH superiores al 5%. Además puede contener una proporción significativa de compuestos que contienen sulfuros y nitrógeno.

La ingestión accidental de keroseno causa efectos respiratorios (edema pulmonar), depresión del sistema nervioso central e irritación gastrointestinal (ATSDR 1995f). La ausencia de datos adecuados ha hecho que la ATSDR (1995f) no haya establecido MRL por inhalación ni por ingestión. La ausencia de suficientes datos también ha motivado que la ATSDR no se haya definido sobre la naturaleza carcinogénica de estos compuestos (ATSDR 1995f). De igual manera la IARC (1989b) concluyó que las evidencias del efecto carcinogénico en humanos de los diesel ligeros no son suficientes, mientras que sí existen para los diesels pesados. Por ello la IARC indica que la fracción residual de los fueloils son posibles carcinogénicos humanos (Grupo B2), y la fracción destilada ligera no es clasificable como carcinogénica en humanos (Grupo 3).

Aceites minerales

Los aceites minerales están constituidos por una compleja mezcla de hidrocarburos alifáticos de bajo y alto peso molecular (C₁₅-C₅₀), hidrocarburos aromáticos, metales y aditivos. Su composición varía ampliamente dependiendo de la composición original del petróleo, del proceso de refinado usado, de los tipos de aditivos, de la eficacia y tipo de motor en el que es usado, del tipo de combustible empleado en el motor, y del tiempo que el aceite es usado en el motor. Los hidrocarburos

constituyentes son principalmente alcanos, cicloalcanos ramificados y aromáticos y los aditivos son detergentes y sales metálicas (sales de molibdeno y zinc) y compuestos organometálicos. Se ha demostrado que el uso continuo en los motores incrementa su contenido en metales y PAH.

Los estudios realizados indican que no existe toxicidad en el uso de aceites minerales y que en el caso de existir se debe a los aditivos presentes o a los productos de descomposición o a la acumulación de contaminantes debida a su uso (ATSDR 1997c). La EPA (1998b) y la IARC (1996) ha clasificado a los aceites minerales como no carcinogénicos para humanos, ya que no existen evidencias adecuadas. No obstante, es de resaltar que el contenido en PAH, que sí son carcinogénicos, aumenta con su empleo.

Asfalto

El asfalto es una compleja mezcla de hidrocarburos de alto peso molecular, predominantemente cicloalcanos y compuestos aromáticos (IARC 1985). También contienen algunos compuestos de sulfuros, nitrógeno, oxígeno y metales pesados.

Se han realizado estudios sobre sus efectos por inhalación, que concluyen que existen suficientes evidencias de que es carcinogénico en animales, aunque no existen evidencias concluyentes de su efecto carcinogénico en humanos (IARC 1985).

1.4 CONTAMINACION A PARTIR DE OTRAS FUENTES

1.4.1. Contaminación por fitosanitarios

La ATSDR ha desarrollado los MRL para varios fitosanitarios como se señalan en la tabla 1.4.1., así como su acción toxicológica principal sobre humanos.

Tabla 1.4.1.- MRL para fitosanitarios

Compuesto	MRL (inhalación)	MRL (oral)	Acción Final
Aldrín*	-----	0.002 mg/kg/día (agudo) 0.00003 mg/kg/día (crónico)	Desarrollo Hepática
Dieldrín*	-----	0.0001 mg/kg/día (intermedio) 0.00005 mg/kg/día (crónico)	Neurológica Hepática
Endrín*	-----	0.002 mg/kg/día (intermedio) 0.0003 mg/kg/día (crónico)	Neurológica
Cloropirifos*	-----	0.003 mg/kg/día (aguda) 0.003 mg/kg/día (intermedio) 0.001 mg/kg/día (crónico)	Neurológica
Endosulfán*	-----	0.005 mg/kg/día (intermedio) 0.002 mg/kg/día (crónico)	Inmunológica Hepática
HCH (ζ)*	-----	0.008 mg/kg/día (crónico)	Hepática
HCH (η)*	-----	0,2 mg/kg/día (agudo) 0,0006 mg/kg/día (intermedio)	Desarrollo Hepática
HCH (ν) ó lindano*	-----	0,01 mg/kg/día (agudo) 0,00001 mg/kg/día (intermedio)	Neurológica Inmunológica
DDT*	-----	0,0005 mg/kg/día (agudo) 0,0005 mg/kg/día (intermedio)	Desarrollo Hepático
DDD/DDE*			
Malatión	0.2 mg/m ³ (intermedio) 0.02 mg/m ³ (crónico)	0.02 mg/kg/día (intermedio) 0.02 mg/kg/día (crónico)	Neurológica Respiratoria
Metilparatión*	-----	0,0007 mg/kg/día (intermedio) 0,0003 mg/kg/día (crónico)	Neurológica Hematológica

* Compuestos orgánicos de interés en suelos por razones de persistencia y/o toxicológicas

Aldrín/Dieldrín/Endrín

Aldrín y dieldrín son insecticidas de estructura similar que no aparecen de forma natural en la naturaleza. Ambos pueden afectar al sistema nervioso e incluso pueden provocar la muerte en caso de ingestión accidental, aunque no existe evidencia de su influencia en el desarrollo del cáncer.

La exposición al aldrín y dieldrín se produce por ingestión de alimentos contaminados, ya que las plantas lo toman de los suelos y lo almacenan. El aldrín pasa directamente a dieldrín en plantas y animales.

El endrín es un sólido que se utiliza como pesticida para el control de insectos, roedores y pájaros. Debido a su cercana asociación al endrín aldehído y al endrín cetona, el perfil toxicológico es conjunto.

El endrín no se disuelve bien en agua, ha sido encontrado en aguas profundas y superficiales. Sólo aparece en el aire cuando es aplicado como pesticida en suelos agrícolas.

La ingestión de endrín puede causar la muerte y daños graves del sistema nervioso central. La EPA y la IARC han determinado que el endrín no es clasificable como carcinogénico humano porque no existe suficiente información para establecer esta clasificación.

Clordano

El clordano es un compuesto químico artificial que ha sido ampliamente usado como pesticida hasta hace relativamente poco tiempo. No se trata de un compuesto individual sino de una mezcla de al menos diez compuestos mayoritarios, de los que los más representativos son trans-clordano, cis-clordano, η -clordano, heptaclor y trans-nonaclor. Se trata de una mezcla insoluble en agua y cuya descomposición es muy lenta, de hecho puede permanecer en los suelos por periodos superiores a 20 años. Desaparece de los suelos por evaporación, siendo esta más efectiva en suelos arenosos (ATSDR, 1994b).

La exposición al clordano en grandes cantidades puede provocar la muerte, pequeñas cantidades afectan al sistema nervioso central y al sistema digestivo principalmente. De tal forma que su inhalación puede alterar los niveles de sustancias hepáticas, afectar al sistema inmunológico, así como producir alteraciones del sistema nervioso central (dolores de cabeza, irritabilidad, excitabilidad, convulsiones, ...). Aunque su inhalación ha sido asociada con el aumento de ciertos tipos de cáncer de piel, al estar asociado a otros pesticidas como (aldrin y heptaclor) estos efectos no pueden ser atribuidos inequívocamente al clordano.

La ingestión accidental de clordano ha provocado la muerte en niños. Aunque su ingestión provoca alteraciones gastrointestinales (náuseas, dolor abdominal, diarrea), hepáticas y hematológicas los datos actuales son insuficientes para evaluar su nivel de efecto en humanos (ATSDR 1994b). Por el contrario si se han descritos las alteraciones provocadas en el sistema nervioso central (ataxia, dolor de cabeza, irritabilidad, excitabilidad, confusión, convulsiones, coma,...). No existen estudios sobre la influencia de la ingestión de clordano en la aparición del cáncer.

Clorofenoles

Los clorofenoles constituyen un grupo de 19 compuestos diferentes de los cuales 2,4,5-triclorofenol y 2,4,6-triclorofenol están clasificadas como sustancias peligrosas de vertederos (Tabla 1.2.1). Pueden entrar en el medio ambiente cuando se usan como pesticidas.

La IARC ha determinado que los clorofenoles como grupo son posiblemente carcinogénicos humanos, por su parte la EPA ha indicado que el 2,4,6-triclorofenol es un probable carcinogénico.

Cloropirifo

El cloropirifo es un insecticida organofosforado que ha sido ampliamente usado en casas y granjas. Su introducción en el medio ambiente se debe a su aplicación o a la volatilización a partir de depósitos de residuos de este compuesto. Generalmente permanece en los suelos donde fue aplicado ya que queda adherido a partículas del suelo. No es soluble en agua por lo que las pequeñas cantidades que pueden pasar a las aguas naturales permanecerán cerca de la superficie y posteriormente se evaporarán.

La exposición a pequeñas cantidades de cloropirifos puede causar dolores de cabeza, fatiga, náuseas, alteraciones intestinales y cambios en el ritmo del corazón. Por otra parte la exposición a altos niveles de este compuesto puede provocar parálisis, pérdida de la conciencia e incluso la muerte. La EPA no lo ha clasificado carcinogénico (Clase D).

DDT/DDD/DDE

El DDT (1,1,1-tricloro-2,2-bis(-clorofenil) etano) ha sido ampliamente usado en el control de insectos. El DDT de alto grado está constituido por una mezcla de tres formas, *p,p'*-DDT (85%), *o,p'*-DDT (15%), *o,o'*-DDT (trazas), e incluso puede contener como contaminantes DDE (1,1-dicloro-2,2-bis(p-clorofenil)etileno) y DDD (1,1-dicloro-2,2-bis(p-clorofenil)etano). El DDD también puede emplearse como pesticida pero su uso ha estado menos extendido que el del DDT. La mayor parte del DDT que aparece en el medio ambiente es el resultado de su uso como insecticida, ya que ha sido uno de los más empleados en el pasado. DDE y DDD sólo se encuentran en el medio ambiente como efecto de la contaminación por DDT.

La presencia de DDT en el aire, aguas y suelos se produce al pulverizar sobre suelos agrícolas y bosques grandes cantidades para controlar los insectos de gran tamaño. También aparecen cuando se evapora de aguas y/o suelos contaminados. Este ciclo de evaporación y deposición puede repetirse varias veces, esto hace que DDT, DDD y DDE puedan recorrer largas distancias en la atmósfera. De hecho se ha encontrado restos de estos compuestos en nieve y animales de las regiones Antártica y Ártica, donde nunca se habían empleado. A veces el DDT puede aparecer en los suelos a partir de vertederos.

DDT, DDE y DDD permanecen en los suelos durante mucho tiempo, eventualmente DDT se puede descomponer en DDE y DDD por la acción de microorganismos. Generalmente permanecen en las capas superficiales de los sólidos y sólo en pequeñas proporción pasan a las capas profundas y a las aguas superficiales. El tiempo que el DDT permanece en los suelos depende de factores como la temperatura, componentes sólidos del suelo y humedad del clima. Por ejemplo, su degradación en climas tropicales es más rápida por ser la acción de microorganismos y la evaporación más activas, pudiendo desaparecer en menos de un año, mientras que en otros climas la mitad de la cantidad inicial de DDT puede permanecer durante 20, 30 o más años.

El consumo de alimentos con grandes cantidades de DDT provoca alteraciones del sistema nervioso central (náuseas, dolor de cabeza, vómitos, ...). Los estudios sobre animales muestran que el DDT puede causar cáncer y por ello la IARC ha determinado que el DDT puede posiblemente causar cáncer en humanos; la EPA por su parte, ha indicado que DDT, DDE y DDD son probablemente carcinogénicos humanos.

1.2.Dicloropropano (ver apartado 1.4.2)

1,2,3-Dicloropropeno (ver apartado 1.4.2)

1,2- Dibromoetano (ver apartado 1.4.3)

Endosulfan

El endosulfan es un insecticida preparado a partir de una mezcla de dos compuestos: alfa y beta ($C_9H_6Cl_6O_3S$). Se utiliza en el control de insectos en plantaciones de cereales, te, frutales, verduras, tabaco y

algodón. También se emplea para conservar la madera. Este compuesto aparece en el aire, agua y suelo cuando se fabrica o cuando se emplea como pesticida. Es aplicado a menudo pulverizando sobre cereales, lo que hace que pueda distribuirse a largas distancias. Aunque parte del endosulfan que aparece en los suelos puede evaporarse y descomponerse, puede permanecer durante años en el suelo antes de descomponerse del todo. Por otra parte, no se disuelve con facilidad en agua, y la mayor parte del que aparece se sitúa en la superficie del agua, adsorbido en partículas del suelo que flotan o en el fondo.

La exposición a altas concentraciones de estos compuestos afecta al sistema nervioso e incluso puede provocar la muerte. Por otra parte no se conocen los efectos provocados en el cuerpo humano por pequeñas concentraciones. No existen evidencias de su influencia en el desarrollo del cáncer por lo que la ATSDR y la EPA no lo han clasificado como causante de cáncer.

Heptaclor y heptaclor epóxido

Heptaclor y heptaclor epóxido son compuestos químicos sintéticos que en el pasado han sido empleados como insecticida para el hogar. Constituye el 10% en peso del pesticida clordano.

La inhalación e ingestión de estos compuestos puede producir algunos efectos sobre el sistema nervioso central. El reducido número de estudios toxicológicos, hace que no se haya determinado el nivel mínimo de riesgo (MRL) para este compuesto (Tabla 1.2-2)

Hexacloroetano

El hexacloroetano, conocido también como percloroetano, hexacloruro de carbono y HCE constituye uno de los ingredientes de algunos fungicidas, insecticidas, lubricantes, plásticos y celulosa.

Su inhalación e ingestión causan efectos neurológicos y hepáticos. La IARC ha determinado que el hexacloroetano no es clasificable como carcinogénico en humanos, mientras que la EPA lo ha clasificado como posible carcinogénico humano (tabla 1.2.2).

Lindano (γ-hexaclorociclohexano)

El hexaclorociclohexano (HCH), también conocido como hexacloruro benceno, es un compuesto químico sintético que presenta ocho isómeros, nombrados según la posición de los átomos de hidrógeno en la

estructura. Una de estas formas, gamma-HCH (o ν -HCH, comúnmente denominado lindano) se produce y emplea como insecticida de frutas, vegetales y cereales. Aunque virtualmente las propiedades insecticidas sólo se encuentran en el isómero ν -, las formas alfa (ζ), beta (η), delta(ι) y epsilon(κ) pueden aparecer en el producto final. El lindano permanece en el aire más de 17 semanas dependiendo de las condiciones atmosféricas. En suelos, sedimentos y agua se descompone en sustancias menos tóxicas por la acción de algas, hongos y bacterias. En general no permanece más de 30 días en aguas naturales y no se conoce con exactitud el tiempo que los isómeros HCH permanecen en el suelo.

La toxicidad de los distintos isómeros es variable, siendo con respecto a una exposición aguda el más tóxico en el ν -HCH, seguido de ζ -, ι - y η -HCH; mientras que en el caso de una exposición crónica el isómero η es el más tóxico seguido de ζ -, ν - y ι -HCH. Este incremento de la toxicidad del η -HCH con el tiempo de exposición se debe probablemente a que su vida media y acumulación en el cuerpo es mayor.

Los estudios realizados sobre la toxicidad del HCH en humanos por inhalación son limitados, aunque se ha comprobado que los vaporizadores de ν -HCH fueron responsables de fallecimientos (Loge 1965). Por el contrario no se ha encontrado efectos letales relacionados los otros isómeros con fallecimientos.

La ingestión de ν -HCH ha provocado muertes ocasionales. Con respecto a los efectos sistémicos del ν -HCH, provoca disminución del apetito, vómitos, náuseas y diarreas, desórdenes en la sangre, dolores de cabeza y posibles cambios en los niveles de hormonas sexuales. Se ha comprobado que los isómeros ζ -, η -, y ν -HCH son carcinogénicos en ratas y ratones, aunque no existen evidencias en humanos y actualmente su carácter carcinogénico está en revisión.

Metilparatión

El metilparatión ($C_8H_{10}NO_5PS$) es un pesticida que elimina los insectos de los cereales, y usualmente se distribuye por fumigación desde avioneta. El metilparatión puede aparecer en dos formas: cristalizado o en forma líquida que contienen un 80% de metilparatión y como disolvente ingredientes inactivos. La mayor parte del metilparatión permanece en las áreas donde es aplicado, pudiéndose mover, en parte, por la acción de la lluvia y el viento. La persistencia en el medio ambiente varía entre unos días a varios meses. En los suelos se degrada rápidamente por la acción de

bacterias, pero cuando las concentraciones son elevadas la degradación no es tan rápida.

El metilparatión puede afectar al sistema nervioso, de tal manera que la exposición a altas concentraciones provoca pérdida de conciencia, confusión, visión borrosa, falta de coordinación e inclusive la muerte. No se conocen los efectos provocados en el cuerpo humano por pequeñas concentraciones. No existen evidencias de su influencia en el desarrollo del cáncer.

Malation

El malation ($C_{10}H_{19}O_6PS_2$) insecticida empleado en cultivos de cereales, en productos almacenados y en jardines particulares. Se utiliza puro o en disoluciones al 50%.

Aparece en el medio ambiente como consecuencia de su producción o de la aplicación desde el aire en cultivos agrícolas y puede desplazarse a otras áreas por la acción de la lluvia y el viento. La persistencia varía desde unos días a varios meses, aunque normalmente se descompone en pocas semanas debido a la acción del agua, la luz solar y las bacterias que se encuentran en el suelo y aguas.

El malatión afecta al sistema nervioso por lo que indirectamente puede influir en la función normal de otros órganos. La exposición a altas cantidades dificulta la respiración, produce vómitos, diarrea, dolor de cabeza, visión borrosa, pérdida de conciencia y la muerte. Por otra parte, la exposición a niveles bajos produce efectos en las funciones del sistema nervioso central aunque los problemas en la salud son pocos o no llegan a existir. No se existen evidencias concluyentes de su influencia en el desarrollo del cáncer, por lo que la IARC ha determinado que es no clasificable como carcinogénico.

Metoxiclor

El metoxiclor es también conocido como DMDT, y es empleado para el control de insectos. No se encuentra de forma natural en el medio ambiente, aparece cuando se aplica en bosques, agricultura y granjas. Suele ser aplicado desde avionetas, por lo que este proceso favorece la contaminación de suelos y aguas adyacentes. El metoxiclor no tiende a moverse rápidamente de un lugar a otro y permanece en la parte superficial del suelo, aunque los productos de su descomposición pueden pasar a zonas interiores. El proceso de degradación puede durar meses. Puede acumularse

en organismos vivos, incluyendo algas, bacterias, caracoles, almejas y algunos peces.

Existen muy pocos estudios sobre la toxicidad del metoxiclor en humanos, pero es conocido que su exposición en altos niveles ha provocado efectos sobre el sistema nervioso central de animales. Algunos de los productos de su descomposición pueden causar efectos similares a los provocados por el estrógeno, con lo que pueden afectar a la reproducción. No existe suficiente información sobre su influencia carcinogénica, aunque la mayoría de los datos existentes indica que no causa cáncer. Tanto la IARC como la EPA han indicado que no es clasificable como carcinogénico humano.

Toxafeno

El toxafeno, también conocido como (canfeclor, clorocanfeno, polychlorocanfeno y canfeno clorado), es un insecticida que contiene aproximadamente 670 compuestos. Normalmente se encuentra como sólido o gas. Este insecticida entra en el medio ambiente aplicado sobre suelos o procedente de vertederos de residuos peligrosos o por vertidos durante su almacenamiento o transporte.

No existen estudios suficientes sobre los efectos de la inhalación del toxafeno. Por el contrario su ingestión en dosis prolongadas puede resultar fatal y en dosis menores puede provocar alteraciones del sistema nervioso central y hepáticas. La EPA ha determinado que el toxafeno es un probable carcinogénico humano

1.4.2. Bifenilos policlorados (PCB) y otros productos clorados

Algunos de los derivados clorados de los hidrocarburos se han tratado en el apartado 1.2, tal es el caso de 1,2-dicloroetano, tetraclorometano, tetracloroetileno, tricloroetileno, cloruro de vinilo, monoclorobenceno, hexaclorobenceno, triclorofenol y heptacloro. Por otra parte no existe perfil toxicológico de diclorometano, triclorometano, pentaclorobenceno, tetraclorofenol, cloronaftaleno. Por todo ello en este apartado sólo se comentarán los siguientes compuestos: PCB, 1,2-dicloropropano y 1,3-dicloropropeno (Tabla 1.4-2).

Tabla 1.4.2.- MRL para los derivados clorados.

Compuesto	MRL (inhalación)	MRL (oral)	Acción Final
PCB*	-----	0,03 σ g/kg/día (Intermedio)	Neurológico
		0,02 σ g/kg/día (Intermedio)	Inmunológico
1,2-dicloropropano	-----	-----	-----
1,3-dicloropropeno*	-----	-----	-----

* Compuestos orgánicos de interés en suelos por razones de persistencia y/o toxicológicas

Bifenilos Policlorados (PCB)

Los PCB son un grupo de compuestos sintéticos que pueden causar diferentes efectos peligrosos. No existen fuentes naturales de PCB en el medio ambiente. Normalmente entran como una mezcla que contiene varios bifenilos policlorados individuales en los que el contenido en cloro es variable.

Una vez en el medio ambiente no se descomponen con facilidad y pueden permanecer por largos periodos de tiempo, ya que pueden circular con facilidad entre aire, agua y suelo. Por ejemplo, los PCB pueden entrar en el aire por evaporación desde el suelo y agua. Una vez en el aire pueden ser transportados a distancias lejanas, de tal forma que se han encontrado en nieve o aguas marinas en áreas lejanas a donde se vertieron, tales como el ártico. Están presentes en partículas del suelo o como vapor en la atmósfera. Normalmente los PCB pesados aparecen en sedimentos mientras que los más ligeros pueden evaporarse al aire. Estos compuestos no se degradan con facilidad en los suelos y pueden permanecer en ellos durante meses o años, en concreto aquellos que contienen más átomos de cloro se descomponen con mayor lentitud.

La mayoría de los estudios sobre humanos no muestran una relación clara entre la exposición a niveles de PCB y los efectos en la salud. Algunos estudios indican que pueden producir alteraciones gastrointestinales, en la sangre, depresión y fatiga. Por otra parte basándose en evidencias de cáncer en animales, el Departament of Health and Human Services (DHHS) ha establecido que pueden considerarse razonablemente como carcinogénicos, mientras que la EPA y la IARC han determinado que son probablemente carcinogénicos para humanos.

1,2-dicloropropano

El 1,2-dicloropropano es un líquido incoloro que forma parte del grupo de compuestos orgánicos volátiles (VOC). Se evapora rápidamente a temperatura ambiente. Ha sido empleado para fumigar granjas y suelos. La descomposición en suelos estimada experimentalmente es de 99% en

diez días, mientras que en el aire y aguas subterráneas la descomposición es más lenta. Aunque no se conoce exactamente la vida media en el aire se estima mayor de 23 días, y en el agua subterránea entre 6 meses y 2 años.

Altos niveles de exposición a 1,2-dicloropropano produce dolores de cabeza, náuseas, anemia, coma e incluso la muerte. No existen estudios de los efectos provocados en humanos por la exposición a niveles bajos tanto para pequeños o grandes períodos de tiempo. No existen evidencias de su influencia en el desarrollo del cáncer.

1,3-dicloropropeno

El 1,3-dicloropropeno es un líquido incoloro de olor dulce, que se disuelve en agua y se evapora con facilidad. Se utiliza como pesticida en cereales, aplicándose pulverizado. Una vez en los suelos se descompone rápidamente en compuestos más pequeños, que pueden ser dañinos para la salud.

Los principales efectos del 1,3-dicloropropeno en la salud son náuseas, vómitos, irritación de la piel, ojos y nariz, dificultades respiratorias, dolor de cabeza y fatiga. No existen evidencias de su influencia en el desarrollo del cáncer.

1.4.3. Otros contaminantes

En este apartado se describirán aquellos compuestos orgánicos que no se pueden incluir dentro de los grupos anteriormente comentados, pero que son peligrosos por su toxicidad y cuyos niveles mínimos de riesgo están recopilados en la tabla 1.4-3.

Tabla 1.4.3.- MRL para otros compuestos.

Compuesto	MRL (inhalación)	MRL (oral)	Acción Final
Acetona	26 ppm (aguda) 13 ppm (intermedia) 13 ppm (crónica)	2 mg/kg/día (intermedia)	Neurológico Hepático
Acrilonitrilo	0,1 ppm (aguda)	0,1 mg/kg/día (aguda) 0,01 mg/kg/día (intermedia) 0,04 mg/kg/día (cronica)	Neurológico Desarrollo Hematológico
Acroleína	0,00005 ppm (aguda) 0,000009 ppm (intermedia)	0,0005 mg/kg/día (cronica)	Ocular Respiratorio Hematológico
1,2-dibromoetano*	-----	-----	-----
2,3,7,8-Tetraclorodibenzo-p-dioxina*	-----	0,0002 mg/kg/día (aguda) 0,00002 mg/kg/día (intermedia) 0,000001 mg/kg/día (cronica)	Inmunológico Desarrollo
Estireno	0,06 ppm (crónica)	0,2 mg/kg/día (intermedia)	Neurológico Hepático
Fenol	-----	-----	-----
Di (2-etil) ftalato*	-----	0,01 mg/kg/día (intermedia)	Desarrollo
Di-N-butil ftalato	-----	0,5 mg/kg/día (aguda)	Desarrollo
Di-N-octil ftalato	-----	3 mg/kg/día (aguda) 0,4 mg/kg/día (intermedia)	Hepático
Metil Butil Éter (MTBE)	0,6 ppm (aguda) 0,3 ppm (intermedia) 0,3 ppm (crónica)	0,2 mg/kg/día (aguda) 0,06 mg/kg/día (crónica)	Neurológico Hepático
p-Cloroanilina	-----	-----	-----

* Compuestos orgánicos de interés en suelos por razones de persistencia y/o toxicológicas

Acetona

La acetona es un compuesto químico que se encuentra de forma natural en el medio ambiente y que se produce en la industria. Existe en bajos niveles en el organismo humano, siendo empleada por el mismo para producir azúcar y materia grasa. Entra en el aire, agua y suelo como resultado de procesos naturales y de las actividades humanas. Los niveles de acetona en los suelos pueden ser altos debido a su presencia en depósitos de residuos. Su persistencia en el suelo no es grande por a la acción destructiva de los microorganismos.

Como ya se ha indicado es un compuesto que aparece de forma natural en el organismo y su exposición a altos niveles induce a cierta lentitud en su degradación, aunque la mayoría se elimina tres días después

de la exposición. Estos niveles elevados no provocan problemas en la salud e incluso pueden prevenir convulsiones. La EPA ha determinado que no es clasificable como carcinogénico en humanos.

Acrilonitrilo

El acrilonitrilo es un líquido incoloro artificial, empleado mayoritariamente en la fabricación de plástico, fibra acrílica y caucho sintético. Debido a que se evapora con rapidez se encuentra en el aire alrededor de las plantas químicas donde se fabrica. Se descompone con facilidad en el aire. Puede encontrarse en pequeñas cantidades en suelos y aguas cercanos a las fábricas o a depósitos de residuos peligrosos. Su descomposición en el agua puede producirse en una o dos semanas, pero puede variar dependiendo de las condiciones del entorno.

La exposición a altos niveles de acrilonitrilo durante largo tiempo puede producir la muerte, mientras que su exposición a estos niveles durante corto espacio de tiempo afecta al sistema nervioso, incluyendo los síntomas dolor de cabeza y náuseas. No existen suficientes evidencias de su influencia en el desarrollo del cáncer.

Acroleína

La acroleína es un líquido claro o amarillo de olor desagradable y que arde con facilidad. La acroleína no permanece durante largo tiempo en el aire o en agua, mientras que la que entra en los suelos es lavada con agua, pasa a vapor y posteriormente se oxida, aunque no se conoce con exactitud la duración de este proceso. Se emplea en la fabricación de otros compuestos químicos y pesticidas. Pequeñas cantidades de acroleína pueden entrar en el aire durante la combustión de árboles y plantas así como por la combustión de gasolinas y otros derivados del petróleo.

La exposición a altos niveles de acroleína durante largo periodo de tiempo puede afectar seriamente a los pulmones e incluso provocar la muerte. No existen datos suficientes como para indicar su influencia en la producción de cáncer en humanos.

1,2-dibromoetano

El 1,2-dibromoetano es un pesticida y un aditivo de la gasolina. Es obtenido mayoritariamente de forma artificial aunque también puede aparecer naturalmente en el océano en pequeñas cantidades. Se evapora con facilidad y puede disolverse en agua, puede permanecer en aguas

subterráneas y suelos durante largo tiempo y se descompone rápidamente en el aire.

No se conoce el efecto de la inhalación de altos niveles. El DHHS ha determinado que razonablemente el 1,2-dibromoetano puede anticiparse como carcinogénico.

2,3,7,8-Tetraclorodibenzo-p-dioxina (2,3,7,8-TCDD) y Dioxinas policloradas (CDD)

Las CDD son una familia de 75 compuestos diferentes conocidos comúnmente como dioxinas policloradas. Estos compuestos tienen efectos peligrosos en la salud. El grupo de las CDD está dividido en ocho grupos de compuestos según el número de átomos de carbono. El grupo de un átomo de cloro se denomina dioxinas monocloradas. El de dos a ocho átomos de cloro se llaman dicloro dioxinas (DCDD), tricloro dioxinas (TrCDD), tetraclorodioxinas (TCDD), pentacloro dioxinas (PeCDD), hexaclorodioxinas (HxCDD), heptaclorodioxinas (HpCDD) y octaclorodioxinas (OCDD). El 2,3,7,8-TCDD sirve como un prototipo para el grupo de CDD.

Cuando entran en el medio ambiente tienden a asociarse con cenizas, suelos o cualquier superficie de alto contenido orgánico. Aparecen de forma natural, y también se producen por actividades humanas de manera no intencionada por los procesos de combustión industriales, municipales y domésticos. Por otra parte el 1,3,7,8-TCDD es un subproducto de la producción de 2,4,5-triclorofenol. Las CDD permanecen durante largo tiempo en el medio ambiente.

Su ingestión tiene efectos en el sistema inmunológico y en el desarrollo. El DHHS ha determinado que la 2,3,7,8-TCDD puede en algunos casos causar cáncer. Por su parte la IARC indicada que aunque puede causar cáncer no es posible clasificarlo como carcinogénico. Por último la EPA ha determinado que la 2,3,7,8-TCDD es un posible carcinogénico humano cuando es considerado sólo y cuando está asociado con fenoxiherbicidas y/ clorofenoles. La EPA también ha determinado que la mezcla de CDD con seis átomos de cloro es un probable carcinogénico humano.

Estireno

El estireno es un líquido incoloro que se evapora con facilidad y que se usa mayoritariamente en la fabricación de caucho y plásticos. También

se presenta en la combustión de combustibles de automóviles o de cigarrillos. Se descompone con facilidad en el aire, usualmente uno o dos días. Se evapora de suelos y aguas superficiales y las cantidades que permanecen se descomponen por la acción de bacterias.

La mayoría de los problemas de salud que produce la exposición a altos niveles de estireno afecta al sistema nervioso, provocando depresión, problemas de concentración, náuseas y cansancio. La IARC ha determinado que el estireno es un posible carcinogénico humano.

Fenol

El fenol es un compuesto natural, que además es producido por el hombre. Uno de los usos más extendidos es la producción de resinas fenólicas. También se emplea en la producción de caprolactam (compuesto empleado en la manufactura de nylon6 y otras fibras sintéticas) y de bifenoA (que se utiliza en la producción de epóxido y otras resinas). Generalmente en los suelos su tiempo de vida es muy corto, ya que desaparece completamente en dos o cinco días.

Los efectos crónicos derivados de altas exposiciones son pérdida de peso, anorexia, fatiga y efectos en el sistema inmunológico. La IARC considera que el fenol no es clasificable como carcinogénico en humanos.

Ftalatos

Di-n-Butil ftalato es un líquido incoloro que no aparece de manera natural. Se utiliza en la fabricación de cloruro de polivinilo (PVC). En aguas y suelos es descompuesto por bacterias, este proceso puede ocurrir en un día o puede tardar más de un mes. No existe evidencia de su influencia en el desarrollo del cáncer, por lo que la EPA ha determinado que no es clasificable como carcinogénico en humanos.

Dietilftalato es un líquido incoloro artificial que es usualmente usado en la fabricación de plásticos flexibles, también se emplean en cosméticos, insecticidas y aspirinas. En suelos que contienen materia orgánica se adhiere a las partículas donde puede eventualmente descomponerse, en suelos con menos materia orgánica desaparece del mismo y pasa a las aguas subterráneas. No existe información sobre los efectos provocados por el dietilftalato en la salud humana, ni sobre sus efectos carcinogénicos.

Di (2-etilhexil) ftalato (DEHP) es un compuesto artificial que es usualmente usado en la fabricación de plásticos flexibles. Cuando es vertido en suelos se une fuertemente a los componentes del mismo, su persistencia depende de la rapidez de la degradación microbiológica ya que no es volátil ni fácilmente lixiviable por las aguas. Debido a que no se evapora con facilidad aparece en muy pequeñas concentraciones en el aire. No existen evidencias concluyentes sobre efectos adversos en humanos en los niveles encontrados en el medio ambiente. La EPA ha indicado que el DEHP es un probable carcinogénico humano, mientras que la IARC recientemente ha cambiado su clasificación inicial de “posible carcinogénico humano” por “su imposibilidad de clasificarlo como carcinogénico”.

Metil *terc*-butil éter (MTBE)

El MTBE es el nombre común de un compuesto sintético llamado metil *terc*-butil éter. Constituye un aditivo de combustibles, como agente oxigenante que favorece la combustión especialmente durante los meses de invierno. Este compuesto se evapora con mucha facilidad de los contenedores abiertos. Una vez en el aire se descompone con rapidez, siendo su vida media cuatro horas. Como la mayor parte de éteres y alcoholes se disuelve en agua.

Su inhalación provoca dolor de cabeza, náuseas, irritación de nariz y garganta y confusión. La IARC y la EPA no lo ha clasificado como carcinogénico.

1.5 ATENUACION NATURAL DE LA CONTAMINACIÓN DE LOS SUELOS

La atenuación natural de los contaminantes en el medio ambiente es su estabilización/degradación/mineralización por procesos naturales. Estos procesos han llegado a ser preferidos en algunos casos a los métodos de regeneración para algunos tipos de contaminantes. Los hidrocarburos ligeros del petróleo, como el benceno, tolueno, etilbenceno y xileno (BTEX), naftaleno, e hidrocarburos de cadena lineal se degradan con facilidad. Sin embargo, los trimetilbencenos (TMB), hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH), alcanos de cadena ramificada, y cicloalcanos son persistentes. Algunos materiales oxigenados como el metil-*t*-butil eter se degradan con facilidad, mientras que el 1,4-dioxano es inerte. Por último la atenuación de los disolventes clorados depende del compuesto y de las condiciones del medio.

La atenuación natural provocada por microorganismos es en definitiva una reacción de óxido-reducción que precisa de la presencia de cuatro agentes: un donador de electrones (reductor), una fuente de alimento (carbono), un aceptor de electrones (oxidante), y una colonia de microorganismos. Los contaminantes pueden degradarse por pérdida o ganancia de electrones, dependiendo del compuesto y de las condiciones. Los hidrocarburos del petróleo se degradan como donadores de electrones y además sirven de fuente de alimento. Los aceptores de electrones más comunes por su potencial de oxidación reducción y eficiencia son el oxígeno molecular (+820 mV), nitrato (+740 mV), Fe (III) (-50 mV), sulfato (-220 mV), y el dióxido de carbono del propio contaminante. Esta última situación se presenta cuando el potencial del medio se sitúa por debajo de -220 mV y el proceso se denomina metanogénesis, debido a la producción de metano como producto final.

En estas degradaciones participan procesos anaeróbicos y aeróbicos. No obstante, por debajo de la superficie del residuo o suelo contaminado, las cantidades de oxígeno disuelto son muy limitadas, y la degradación aeróbica no es importante, siendo sustituida por el proceso anaeróbico.

Los disolventes clorados son más resistentes a la atenuación natural que los hidrocarburos del petróleo. El percloroeteno (PCE), tricloroeteno (TCE), dicloroetenos (DCE), cloroformo, y tetracloruro de carbono sólo se degradan bajo condiciones anaeróbicas, esto es, condiciones metanogénicas donde ellos actúan como aceptores de electrones. Este tipo de atenuación se denomina atenuación de Tipo I. El cloruro de vinilo, producto de gran toxicidad, es la sustancia final mayoritaria. En algunos casos se inyecta

gasolina o disoluciones con azúcares en la capa inferior del suelo para proporcionar suficientes donadores de electrones y carbono que aseguren la adecuada atenuación de los PCE y TCE. El cloruro de vinilo, los etanos clorados conteniendo hasta cuatro átomos de carbono, y los mono-, di-, tri-, y tetraclorobencenos son resistentes a las condiciones de metanogénesis, sin embargo, se degradan como donadores de electrones bajo condiciones aeróbicas.

Los procesos de regeneración, desarrollados bajo condiciones de atenuación natural precisan de un análisis intenso y continuado de las aguas subterráneas, tanto en la zona donde está presente el frente de contaminación como fuera de él, para ser utilizado como valores de control. Las tablas 1.5.1 y 1.5.2 muestran algunos de los análisis que se requieren y las tendencias que se observan en los diferentes tipos de atenuación.

Aunque los análisis sobre evaluación de la atenuación natural de contaminantes se llevan a cabo en el laboratorio, algunos analitos deben estudiarse en el lugar de muestreo, como el potencial de oxidación reducción (ORP), oxígeno disuelto (DO), conductividad, hierro (II), pH y metano, lo que obliga al empleo de equipos de análisis portátiles. Así se emplean sondas/electrodos para la medida del DO, conductividad, pH, temperatura, y ORP. El metano se analiza con cromatógrafos de gases portátiles y el Fe(II) con colorímetros provistos de baterías.

Tabla 1.5.1.- Tendencia de los parámetros analíticos de los hidrocarburos del petróleo en el curso de su atenuación natural

Uso del oxígeno	DO	Disminuye
	BTEX	Disminuye
	TMB (trimetilbenceno)	Constante
	Cloruro	Constante
	Conductividad	Constante o incrementa
	Alcalinidad	Aumenta
Denitrificación	Nitrato	Disminuye
	BTEX	Disminuye
	TMB	Constante
	Cloruro	Constante
	Conductividad	Constante
	Alcalinidad	Aumenta
Uso del hierro	Fe(II)	Aumenta
	BTEX	Disminuye
	TMB	Constante
	Conductividad	Constante
	Cloruro	Constante
	Alcalinidad	Aumenta
Uso del sulfato	Sulfato	Disminuye
	Sulfuro	Aumenta
	BTEX	Disminuye
	TMB	Constante
	Conductividad	Constante
	Cloruro	Constante
	Alcalinidad	Aumenta
Metanogénesis	Metano	Aumenta
	BTEX	Disminuye
	TMB	Constante
	Conductividad	Constante
	Cloruro	Constante
	Alcalinidad	Constante

Tabla 1.5.2.- Tendencia de los parámetros analíticos de los disolventes clorados en el curso de su atenuación natural

Tipo 1	PCE, TCE	Disminuye
	Cloruro de vinilo	Aumenta
	BTEX	Disminuye
	TMB	Constante
	Cloruro	Aumenta
	Metano	Aumenta
	Alcalinidad	Aumenta
	Hidrógeno	Aumenta hasta valor cte
	ORP	< -240
Tipo 2	Percloroetano(PCE), Tricloroetano (TCE)	Constante
	Cloruro de vinilo	Disminuye
	Diclorobenceno (DCB), Triclorobenceno (TCB)	Disminuye
	BTEX	Disminuye
	TMB	Constante
	Cloruro	Aumenta
	Metano	Constante
	Hidrógeno	Constante
	Alcalinidad	Aumenta
	ORP	> +800
	DO	Disminuye