

Capítulo II
La Contaminación del Suelo

“La ciencia es como la tierra, sólo se puede poseer un poco de ella”.

Voltaire (1694-1778, escritor y pensador francés)

El suelo es un recurso vital. Es el soporte físico sobre el que se asientan todos los seres vivos (Seoáñez Calvo, M., 1999a). Es también la fuente primordial de materias primas y constituye uno de los elementos básicos del medio natural. Desde hace siglos la humanidad ha utilizado el suelo para desarrollarse y conseguir mejorar sus condiciones de vida. Sobre él se realizan todos los procesos de producción del hombre, como la agricultura, la industria, las infraestructuras urbanas, etc.

Además, el suelo es un componente muy específico de la biosfera porque actúa como amortiguador natural controlando el transporte de elementos y sustancias químicas a la atmósfera, la hidrosfera y la biota. Por tanto, el mantenimiento de las

funciones ecológicas del suelo es responsabilidad de la humanidad (Kabata-Pendias, A. y Pendias, H., 1992d).

Sin embargo, el suelo no ha sido tenido en cuenta como recurso medioambiental hasta hace relativamente poco (Seoánez Calvo, M., 1999a) aun cuando éste constituye uno de los medios receptores de la contaminación más sensibles y vulnerables (Real Decreto 9/2005, de 14 de enero, 2005).

Antes de la década de los 70 se hablaba de la contaminación del aire y del agua, pero al suelo se le consideraba con una capacidad de autodepuración casi infinita. La sensibilidad mundial comenzó a cambiar a partir de la declaración de la “Carta Europea de Suelos” desarrollada por la Comunidad Europea en 1972, la cual define el suelo como uno de los más preciados activos de la humanidad sobre el que viven hombres, animales y plantas, lo califica como un recurso limitado fácilmente destruible y manifiesta que debe ser protegido contra la erosión, la contaminación, el daño que puede causar el desarrollo urbano, y las prácticas agrícolas y selvícolas, para acabar afirmando que los Gobiernos y personas con autoridad deben impulsar medidas específicas para planificar y administrar los recursos del suelo.

Pero fue en el año 1992, en la Cumbre de Río, donde se reconoció la importancia de la protección de los suelos y de sus usos potenciales en el contexto de un desarrollo sostenible, en particular contra la contaminación procedente de acciones o actividades de origen antrópico (Real Decreto 9/2005, de 14 de enero, 2005).

La contaminación es uno de los problemas más importantes del suelo (AEMA-PNUMA, 2002) y se asocia con la entrada de sustancias que, a partir de una cierta concentración deben considerarse como no deseables (Porta, J.; López-Acevedo, M.; Roquero, C., 1994).

Por tanto, la contaminación del suelo consiste en la introducción de elementos extraños al sistema suelo o la existencia de un nivel inusual de uno propio que, por sí mismo o por su efecto sobre los restantes componentes, genera un efecto nocivo para los organismos del suelo, sus consumidores, o es susceptible de transmitirse a otros sistemas (Martínez Sánchez et al., 2005).

El suelo puede contener una gran variedad de elementos químicos, por lo que puede resultar difícil establecer a partir de qué momento, un mismo elemento deja de ser beneficioso o indiferente, para pasar a tener la calificación de contaminante (Porta, J.; López-Acevedo, M.; Roquero, C., 1994).

Los efectos desfavorables de los contaminantes en el suelo como sistema (Genou *et al.*, 1992; Porta, J.; López-Acevedo, M.; Roquero, C., 1994) son:

- Destrucción del poder de autodepuración por procesos de regeneración biológica normales, al haberse superado la capacidad de aceptación del suelo. Se ve afectado el ciclo biogeoquímico y la función de biofiltro.
- Disminución cualitativa y cuantitativa del crecimiento de los microorganismos del suelo, o bien alteración de su diversidad, lo que hace aumentar la fragilidad del sistema.
- Disminución del rendimiento de los cultivos con posibles cambios en la composición de los productos, con riesgo para la salud de los consumidores, al entrar determinados elementos en la cadena trófica.
- Contaminación de las aguas superficiales y freáticas por procesos de transferencia. Se alcanzan concentraciones superiores a las consideradas aceptables.

- Disminución de las funciones de soporte de actividades de ocio. Los espacios contaminados presentan problemas de salubridad para los usuarios.

La legislación española en materia de suelos contaminados debe enunciar en primer término la Ley 20/1986, de 14 de mayo, básica de Residuos Tóxicos y Peligrosos, que sentó los principios fundamentales para dar respuesta a las demandas de la sociedad en el ámbito medioambiental mediante la reducción de la generación de los residuos en los propios procesos productivos, la creación de una red de infraestructuras para su tratamiento y la eliminación y recuperación de los espacios contaminados por compuestos tóxicos y peligrosos.

Desde su promulgación, la normativa se fue ampliando y perfeccionando para ir acomodándose a las nuevas exigencias y desafíos medioambientales (EMGRISA, 2004):

- Real Decreto 833/1988 de 20 de julio. Aprobación del Reglamento que desarrolla la Ley 20/1986.
- Plan Nacional de Residuos Industriales, marzo de 1989.
- P.6. Programa de identificación, Control y Recuperación de Espacios afectados por RTPs, (1989-1993).
- Inventario Nacional de Suelos Contaminados (1990-1994).
- Plan Nacional de Recuperación de Suelos Contaminados (1995-2005), de 28 de abril de 1995.
- Resolución del Ministerio de Medio Ambiente sobre Convenios Marco de Colaboración con las C.C.A.A.

La adaptación de la normativa española en materia de residuos a la de la Unión Europea obligó a redactar una nueva ley de residuos que sustituyese a la de 1986 arriba mencionada: la Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos que, por primera vez en España estableció una legislación básica en materia de protección del suelo frente a la contaminación puesto que hasta la promulgación de dicha ley en España no se disponía de ninguna norma legal que permitiera proteger los suelos contra la contaminación y, en el caso de los ya contaminados, identificarlos y caracterizarlos utilizando para ello una metodología normalizada y técnicamente rigurosa (Real Decreto 9/2005, de 14 de enero, 2005).

2.1.-Tipos de contaminación: contaminación local y contaminación difusa.

A menudo se distingue entre la contaminación edáfica proveniente de fuentes claramente delimitadas (contaminación local o puntual) y la causada por fuentes difusas (Martínez Sánchez et al., 2005).



Figura 2.1.- Contaminación local y difusa del suelo. Fuente: AEMA, 2002.

2.1.1.- Contaminación Local.

La contaminación local o puntual (lugares o emplazamientos contaminados) aparece en las zonas que rodean a la fuente contaminante, en las que existe una relación directa con el origen de la contaminación. Va unida generalmente a la minería, las instalaciones industriales, los vertederos y otras instalaciones, tanto en funcionamiento como tras su cierre. Dichas prácticas pueden suponer un riesgo tanto para el suelo como para el agua (Martínez Sánchez et al., 2005).

La contaminación local es un problema de reciente aparición. Aunque las zonas más extensas y afectadas se concentran alrededor de regiones muy industrializadas en el noroeste de Europa, existen terrenos contaminados por todo el continente y suele afectar a zonas de alta densidad urbana y con larga tradición de industrias pesadas, o bien a los alrededores de antiguas instalaciones militares. También son importantes las fugas de antiguos vertederos, en la mayoría de los países analizados por término medio, el 65% de los residuos urbanos generados en la UE (190 millones de toneladas en 1995) acaba en vertederos. En Europa occidental, central y oriental, la contaminación del suelo afecta a grandes zonas y se debe a la urbanización y a la industrialización (Martínez Sánchez et al., 2005).

Las causas principales de contaminación local en una selección de países europeos están representadas en el siguiente gráfico.

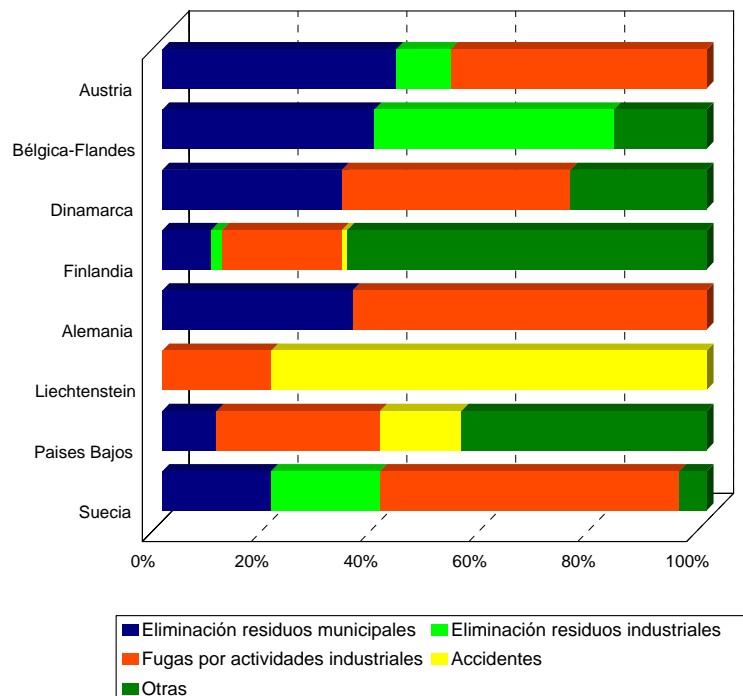


Figura 2.2.- Causas principales de contaminación local en una selección de países europeos. Modificado de AEMA, 2002.

En la figura 2.3 aparece la ubicación de las zonas que tienen muchas probabilidades de presentar suelos contaminados (datos de la ubicación de las zonas de industria pesada) y las zonas en las que se ha observado contaminación real del suelo. No hay un seguimiento armonizado a nivel Europeo de la contaminación local y muchos países todavía no tienen inventarios nacionales (Martínez Sánchez et al., 2005).

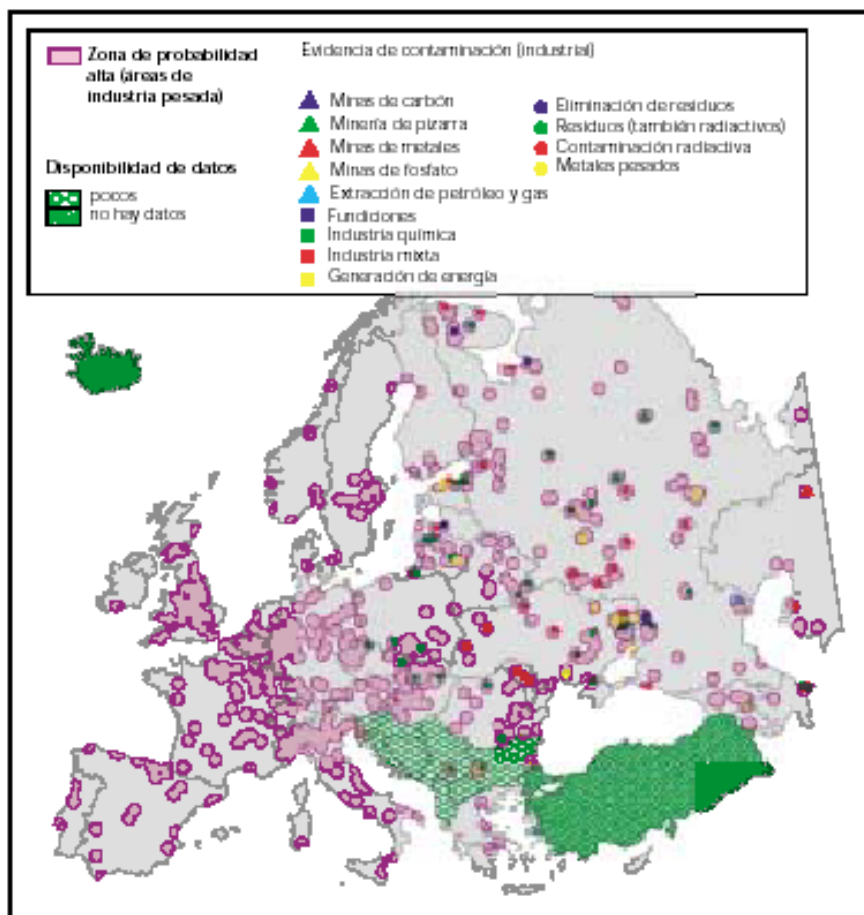


Figura 2.3.- Probables zonas con problemas de contaminación local en Europa.
Fuente: AEMA, 2002.

Las zonas en las que la probabilidad de contaminación local es elevada se encuentran en Europa noroccidental, desde Nord-Pas de Calais en Francia a la región

del Rin-Ruhr en Alemania, atravesando Bélgica y Países Bajos. Otras zonas incluyen la región Saar de Alemania; Italia septentrional, al norte del río Po, de Milán a Padua; la región que se encuentra en la confluencia de Polonia, la República Checa y Eslovaquia, con Cracovia y Katowice en el centro (el llamado Triángulo Negro); y las zonas que rodean a las principales aglomeraciones urbanas de Europa (Martínez Sánchez et al., 2005).

Se estima que en la UE el número de terrenos contaminados oscila entre 300.000 y 1.500.000 de Has. La gran diferencia entre ambas cifras se debe a la falta de acuerdo para alcanzar una definición común de terreno contaminado así como a la diferencia de criterios a la hora de establecer los niveles aceptables de riesgo, los objetivos de protección y los parámetros de exposición (Martínez Sánchez et al., 2005).

2.1.2.- Contaminación Difusa.

La contaminación difusa está causada generalmente por el transporte de sustancias contaminantes, tanto solubles como particuladas, a lo largo de amplias zonas con frecuencia alejadas de la fuente de origen. Pueden ser metales pesados, sustancias acidificantes, sobrecarga de nutrientes (eutrofización), etc. Si se exceptúa la acidificación, no existe una contaminación difusa que afecte de manera extendida a todos los suelos europeos, ésta se da asociada a algunos usos del suelo. Así, en determinadas zonas restringidas, la contaminación puede ser elevada (en las zonas urbanas y en los complejos industriales), originada tanto por fuentes difusas (transporte por carretera) como por otras localizadas (vertederos). En zonas agrícolas, el principal problema puede ser la contaminación difusa (Martínez Sánchez et al., 2005).

En los Estados miembros de la UE, los datos relativos al uso de productos químicos en la agricultura o los informes nacionales del estado del medio ambiente, han servido de aproximación para valorar la contaminación difusa de las zonas agrarias, por lo que es probable que no se hayan localizado todas las áreas de mayor riesgo. La figura 2.4 muestra las zonas con alta probabilidad de contaminación difusa del suelo y zonas en las que la contaminación es un hecho probado (Martínez Sánchez et al., 2005).

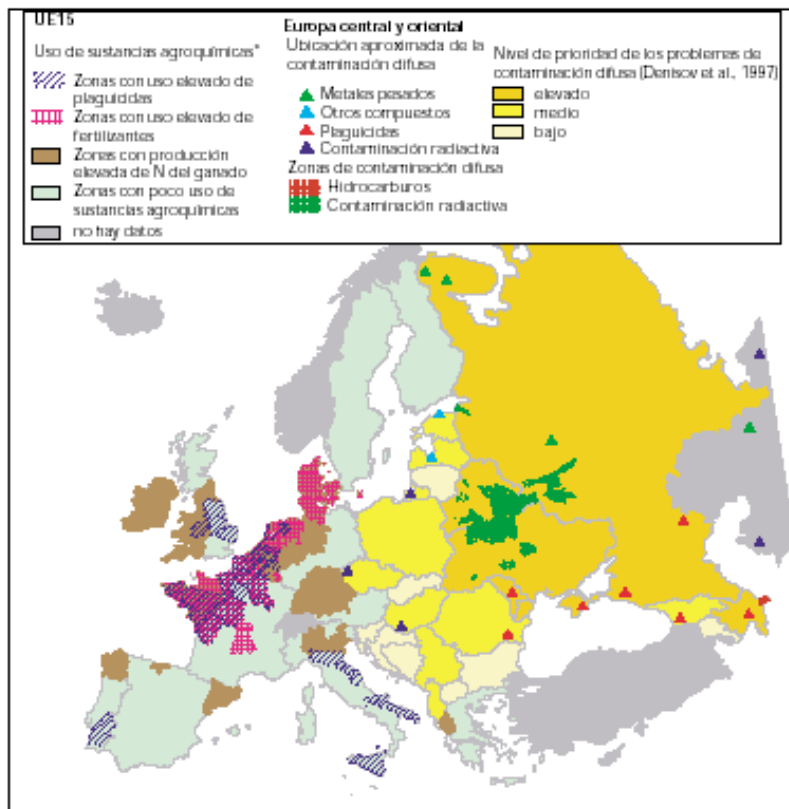


Figura 2.4.- Probables zonas con problemas de contaminación difusa en Europa.
Fuente: AEMA, 2002.

La intensidad de uso de productos agroquímicos es más acusada en las tierras bajas de Europa occidental: Dinamarca, Países Bajos, Bélgica, Luxemburgo y el

norte de Francia. En Europa oriental, los problemas de contaminación difusa de los suelos son mayores en Azerbaiyán, Bielorrusia, Moldavia, Rusia y Ucrania. En Escandinavia, es importante la contaminación atmosférica acidificante procedente de procesos industriales, y de otra índole, de Europa occidental, central y oriental, los vientos dominantes que transportan los contaminantes hacia el norte y se depositan allí (Martínez Sánchez et al., 2005).

Los costes de la contaminación difusa del suelo no se manifiestan tanto en lo relacionado directamente con el suelo como en las consecuencias de la menor capacidad de amortiguación del suelo. Aunque todavía no se ha estimado el coste exacto, se sabe que la eliminación de compuestos orgánicos, plaguicidas, nutrientes y metales pesados presentes en el agua resulta muy costosa (Martínez Sánchez et al., 2005).

2.2.- Contaminación por metales pesados.

2.2.1.- Introducción.

Se considera metal pesado aquel elemento que tiene una densidad igual o superior a 5 g/cm^3 cuando está en forma elemental, o cuyo número atómico es superior a 20 (excluyendo los metales alcalinos y alcalino-térreos). Su presencia en la corteza terrestre es inferior al 0.1% y casi siempre menor del 0.01%. Junto a estos metales pesados hay otros elementos químicos que aunque son metales ligeros o no metales se suelen englobar con ellos por presentar orígenes y comportamientos asociados (García, I. y Dorronsoro, C., 2005).

Dentro de los metales pesados hay dos grupos (García, I. y Dorronsoro, C., 2005):

- Oligoelementos o micronutrientes, que son los requeridos en pequeñas cantidades, o cantidades traza por plantas y animales, y son necesarios para que los organismos completen su ciclo vital. Pasado cierto umbral se vuelven tóxicos. Dentro de este grupo están: As, B, Co, Cr, Cu, Mo, Mn, Ni, Fe, Se y Zn.
- Metales pesados sin función biológica conocida, cuya presencia en determinadas cantidades en seres vivos lleva apareja disfunciones en el funcionamiento de sus organismos. Resultan altamente tóxicos y presentan la propiedad de acumularse en los organismos vivos. Son, entre otros: Cd, Hg, Pb, Sb, Bi, Sn, Tl, etc...

El contenido de metales pesados en suelos, debería ser únicamente función de la composición del material original y de los procesos edafogenéticos que dan lugar al suelo. Pero la actividad humana ha incrementado el contenido de estos metales en el suelo en cantidades considerables (García, I. y Dorronsoro, C., 2005), de hecho la entrada de metales pesados en el suelo ha ido aumentando desde que comenzó la industrialización (Han et al., 2003).

Muy tóxicos y fácilmente disponibles				Contaminantes prioritarios según la EPA				Metales y no metales que aparecen en concentración superior a la normal por causas antrópicas.	
As	Pd	Zn	Tl	Sb	Pb	Cr	Hg	Ag	Pb
Co	Ag	Sn	Pb	As	Hg	Cu	Tl	As	Sb
Bi	Cd	Se	Te	Be	Ni	Zn		Cu	Sn
Ni	Pt	Cu	Hg	Cd	Se			Hg	Zn
Sb								Ni	

Tabla 2.1.- Metales tóxicos de interés (según diversos autores).
Fuente: Seoáñez Calvo, M. 1999b.

2.2.2.- Síntesis de la biogeoquímica de As, Cd, Pb y Zn.

La importancia de las características biogeoquímicas de los metales pesados reside en el papel que desempeñan al incorporarse en la cadena trófica y su influencia en la salud humana como último eslabón en dicha cadena. Por ello creemos conveniente incorporar una síntesis del papel que arsénico, cadmio, plomo y cinc pueden desempeñar a este respecto.

2.2.2.1.- Arsénico.

El arsénico se presenta en forma libre en pequeñas cantidades; en la corteza terrestre representa el 1.8×10^{-4} en peso. El mineral más corriente es la arsenopirita, FeAsS, (O'Neill, P., 1995) del que se obtiene el elemento por calentamiento. Es un constituyente natural de los minerales de plomo, cinc, oro y cobre, que puede liberarse durante el proceso de fundición de los mismos. Los gases y el material particulado de la minería y fundiciones pueden actuar como fuentes contaminantes de arsénico (Adriano, D.C., 2001a).

En los suelos está uniformemente distribuido en los tipos de rocas más importantes ya que tiene gran afinidad a formar o existir en muchos minerales. Aunque los minerales y compuestos de arsénico son fácilmente solubles, la migración de arsénico está muy limitada debido a la fuerte adsorción por arcillas, hidróxidos y materia orgánica (Kabata-Pendias, A., 2001).

Los estados de oxidación más comunes del arsénico son -3, 0, +3 y +5. De ellos As^0 y As^{3+} son característicos de ambientes reductores. Los aniones complejos AsO_2^- , AsO_4^{3-} , HAsO_4^{2-} y H_2AsO_3^- son las formas móviles más comunes del

arsénico, si bien la movilidad de éste en el suelo es proporcional a la cantidad de arsénico existente e inversamente proporcional al tiempo y a los contenidos en óxidos hidratados de hierro y aluminio (Kabata- Pendias, A. y Pendias, H., 1992a; Kabata-Pendias, A., 2001).

Las reacciones del arsénico en los suelos están gobernadas por sus estados de oxidación (Kabata- Pendias, A. y Pendias, H., 1992a; Kabata-Pendias, A., 2001).

Su toxicidad depende de la concentración de arsénico soluble, siendo el arseniato sódico y el trióxido de arsénico los más tóxicos (Kabata- Pendias, A. y Pendias, H., 1992a).

Se acumula en el hígado, riñones, piel, pelo y uñas; se elimina por la orina. La ingestión de dosis crecientes habitúan el organismo al veneno y lo hacen más resistente.

El arsénico inorgánico es un cancerígeno para el hombre. Se ha observado una alta incidencia de cáncer de piel y, posiblemente otros cánceres, en poblaciones que consumen agua de bebida con altas concentraciones de arsénico (IHOBE, 1998).

Un efecto adverso significativo es la enfermedad de los pies negros, cuya incidencia aumenta con la edad y la dosis. También se ha observado aumento de la incidencia de hiperpigmentación y queratosis (IHOBE, 1998).

Por vía inhalatoria el efecto crítico es el cáncer de pulmón. Se ha observado un incremento de la incidencia de cáncer de pulmón en varios grupos expuestos ocupacionalmente a compuestos de arsénico inorgánico (IHOBE, 1998).

Se estima que la producción mundial de arsénico al año oscila entre 75.000 y 100.000 toneladas, de las cuales Estados Unidos utiliza la mitad. Los compuestos de arsénico se utilizan principalmente en la agricultura y silvicultura como plaguicidas,

herbicidas y silvicidas (Adriano, D.C., 2001a). Se usa también en bronce, pirotecnia, en la industria microelectrónica y en la manufactura de semiconductores. Algunos de sus compuestos se han usado en la construcción de láseres ya que convierte la electricidad en luz coherente, en la industria del vidrio, colorantes, etc (Jiménez, A., 2003a).

2.2.2.2.- Cadmio.

Representa el 1.5×10^{-5} % en peso de la corteza terrestre. No se encuentra nativo. Frecuentemente se presenta en pequeñas cantidades asociado a minerales de cinc, tales como la esfalerita (ZnS). Minerales propios son la greenockita o blenda de cadmio (CdS) (que es el único importante), la otavita (CdCO₃) y la monteponita (CdO) (Jiménez, A. 2003b).

El nivel natural de cadmio en el suelo es generalmente <1 ppm. Puede existir de forma natural en altas concentraciones cuando se encuentra asociado a minerales de cinc, o en áreas cercanas a depósitos de cadmio. Básicamente se recupera como subproducto de los procesos de fundición y refinamiento de concentrados de cinc en una proporción de 3.0-3.5 kg·tm⁻¹ de cinc (Adriano, D.C., 2001b).

Se encuentra muy asociado con el cinc en su geoquímica ya que ambos elementos tienen estructuras iónicas y electronegatividades similares y son fuertemente calcófilos, aunque el cadmio presenta una afinidad más fuerte que el cinc por el azufre (Alloway, B. J., 1995a).

La principal especie de cadmio en la solución del suelo es Cd²⁺ aunque también puede formar los siguientes iones complejos: CdCl⁺, CdOH⁺, CdHCO₃⁺,

CdCl_3^- , CdCl_4^{2-} , $\text{Cd}(\text{OH})_3^-$ y $\text{Cd}(\text{OH})_4^{2-}$ junto con complejos orgánicos (Kabata-Pendias, A. y Pendias, H., 1992b; Kabata-Pendias, A., 2001).

En suelos contaminados las especies de cadmio soluble predominantes son el ion libre Cd^{2+} junto con otras especies neutras como CdSO_4 o CdCl_2 , presentes en cantidades crecientes donde el pH es mayor que 6.5 (Alloway, B. J., 1995a).

El cadmio no tiene función biológica esencial y tanto él como sus compuestos son muy tóxicos para plantas y animales (Alloway, B. J., 1995a).

El riñón es el órgano diana para el cadmio y el efecto crítico es la proteinuria. La concentración crítica de cadmio en la corteza renal que produciría un 10% de prevalencia de proteinuria de bajo peso molecular en la población general es aproximadamente 200 mg/kg, la cual se alcanzaría tras una ingesta diaria de aproximadamente 75 μg por persona durante 50 años. La tasa de absorción de cadmio varía con la fuente: 2.5 % para el procedente de los alimentos y 5% para el procedente del agua (IHOBE, 1998).

Estudios de inhalación han demostrado un incremento altamente significativo del cáncer de pulmón en ratas dependiente de la dosis. También se ha observado en varios estudios un exceso de cáncer de pulmón entre trabajadores expuestos al cadmio (IHOBE, 1998).

Casi todo el cadmio se obtiene como subproducto en el procesado de minerales de cinc, cobre y plomo. El cadmio es componente de algunas de las aleaciones de más bajo punto de fusión. Se emplea mucho en recubrimientos de acumuladores y rectificadores. También en muchos tipos de soldadura, baterías de níquel-cadmio recargables, reactores nucleares. Su óxido, hidróxido y cloruro se usa en galvanotecnia, su sulfuro como pigmento amarillo, los silicatos y boratos se emplean en los tubos de TV color, etc. (Jiménez, A. 2003b).

2.2.2.3.- Plomo.

Entre los metales pesados de número atómico mayor de 60, el plomo es el más abundante en la corteza de la tierra (Adriano, D.C., 2001d). Su concentración en suelos no contaminados no supera los $20 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Davies, B. E., 1995).

Aunque hay más de 200 minerales de plomo, destaca la galena (PbS , 87% Pb en peso) que forma cristales cúbicos de gran tamaño, la anglesita (PbSO_4) y la cerusita (PbCO_3) (Adriano, D.C., 2001d). Otros minerales (sin valor económico) son, minio (Pb_3O_4), piromorfita ($\text{Pb}_5(\text{PO}_4)\text{Cl}$), boulangerita ($\text{Pb}_5\text{Sb}_4\text{S}_{11}$), crocoíta (PbCrO_4), wulfenita (PbMoO_4), etc (Jiménez, A. 2003c). También se acumula con cinc y cadmio en depósitos minerales. (Adriano, D.C., 2001d).

El plomo es un tóxico cuya ingestión (en forma de vapor, humo o polvo) provoca saturnismo y que se acumula en los huesos. Niños de hasta 6 años (los niños absorben 4-5 veces más plomo que los adultos) y mujeres embarazadas son los grupos más susceptibles de sufrir los efectos del plomo (IHOBE, 1998).

Como otros metales pesados el plomo se une e inactiva los grupos $-\text{SH}$ de proteínas, inhibe la biosíntesis del grupo hemo y puede sustituir al calcio en los huesos y en procesos bioquímicos (incluso pequeñas dosis de Pb pueden causar neurotoxicidad ya que sustituye al Ca^{2+} en las funciones nerviosas). Es tóxico para mamíferos y aves y se concentra en todos los organismos acuáticos. Se han observado problemas en la reproducción, una menor supervivencia y limitaciones en el crecimiento con niveles tan bajos como $1,0\text{-}5,1 \mu\text{m}/\text{l}$ de Pb en agua (Alloway, B. J., 1995b).

Está clasificado como un posible cancerígeno en humanos. Existen estudios epidemiológicos en trabajadores pero no pueden considerarse definitivos. Si está

suficientemente demostrada la cancerogenicidad en animales, (carcinoma renal en ratas y ratones y gliomas en ratas y cáncer de pulmón en ratones) (IHOBE, 1998).

Existen muchas fuentes de plomo y entre ellas podemos mencionar las fundiciones y actividades mineras, los abonos, las aguas residuales, tuberías, conductos, soldaduras y la contaminación procedente de los tubos de escape de los automóviles. El plomo también se usa en pinturas, vidrios, insecticidas, baterías (se emplea el metal y su óxido), municiones, recubrimiento de cables, etc.

2.2.2.4.- Cinc.

El cinc ocupa el puesto número 24 entre los elementos más abundantes de la corteza terrestre Su contenido en la litosfera está en torno a $70 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Krauskopf, 1979; Adriano, D.C., 2001f), estando ampliamente distribuido. La principal fuente de cinc son los minerales ZnS de los que él forma parte (esfalerita, wurtzita...) y, en menor extensión de minerales como la smithsonita (ZnCO_3), la willemita (Zn_2SiO_4), la cincita (ZnO), la cincosita (ZnSO_4), la franklinita (ZnFe_2O_4) o la hopeita ($\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$) (Lindsay, 1972; Kiekens, L., 1995).

El cinc es divalente en todos sus compuestos. El ion Zn^{2+} es incoloro y existe en forma hidratada en soluciones acuosas neutras y ácidas; sin embargo en solución alcalina precipita el hidróxido, pero en exceso de base dicho hidróxido se redisuelve para formar el ion zincato, $\text{Zn}(\text{OH})_4^{2-}$. Debido a su naturaleza anfótera, el cinc forma gran variedad de sales; los cloratos, cloruros, sulfatos y nitratos son solubles en agua mientras que los óxidos, carbonatos, fosfatos, silicatos y sulfuros son relativamente insolubles en agua (Adriano, D.C., 2001f). También forma complejos con cloruros, fosfatos, sulfatos, nitratos y también con compuestos húmicos (Lindsay, 1979; Adriano, D.C., 2001f).

El contenido de cinc en los suelos depende de la naturaleza de la roca madre (Kabata-Pendias, A., y Pendias, H., 1992c), de la materia orgánica, de la textura y del pH (Adriano, D.C., 2001f). En suelos no contaminados la concentración de cinc total es 10-300 mg·Kg⁻¹ con un promedio de 50 mg·kg⁻¹ (Lindsay, W. L., 1972).

El cinc puede ser considerado, junto con el cadmio, como un metal muy móvil y biodisponible (Kiekens, L., 1995) Entre otros factores que afectan a la movilidad y biodisponibilidad del cinc se encuentran el pH, la materia orgánica y el potencial redox. La solubilidad del cinc es baja, a pH ácido predomina la forma Zn²⁺ alcanzando concentraciones de 10⁻⁴ M mientras que a pH alcalino esta concentración disminuye considerablemente (10⁻⁸ M) ya que precipita como Zn(OH)₂. La movilidad del cinc decrece con el incremento de los valores de pH. (Zauner, G., Monn, L., Stahr, K.; 1999)

El cinc no presenta un gran interés desde el punto de vista toxicológico. (Kiekens, L., 1995) La toxicidad del cinc generalmente está limitada a casos de sobredosis accidental o usos terapéuticos de altas dosis de cinc (Van Campen, 1991; Adriano, D.C., 2001f).

Ingestas elevadas de cinc pueden alterar el balance del cobre, considerado importante porque deficiencias crónicas de cobre pueden producir efectos adversos al metabolismo del colesterol. También se ha asociado el descenso de los niveles de lipoproteínas de alta densidad como un efecto del cinc. (IHOBE, 1998).

El cinc se utiliza principalmente como baño protector sobre un gran número de metales para prevenir la corrosión y en aleaciones como el latón y el bronce. Los metales galvanizados tienen muchas aplicaciones en la construcción, transporte e industria. El cinc y sus compuestos son componentes de muchos artículos domésticos como utensilios, cosméticos, pomadas, antisépticos, astringentes, pinturas, barnices, linóleos y cauchos. También se utilizan en la manufactura de pergaminos, vidrio, llantas de automóviles, pantallas de televisión, pilas y aparatos eléctricos. Otros usos

incluyen fertilizantes agrícolas, insecticidas, endurecedores en cementos y hormigones, en la imprenta y secado de prendas textiles, en la producción de adhesivos, como flujo en operaciones metalúrgicas y como conservador de la madera (Adriano, D.C., 2001f).

2.2.3.- Fuentes de contaminación por metales pesados.

Los suelos son minerales meteorizados enriquecidos por otros componentes como la materia orgánica mineralizada y en estado de descomposición. En los suelos, los metales son una parte de los minerales del suelo o existen principalmente como complejos particulados de diferentes formas (Novotny, V., 1995).

Los metales pesados pueden acumularse en el suelo tanto a partir de procesos naturales como a partir del desarrollo de un amplio grupo de actividades antrópicas. Las fuentes naturales son la roca madre y los minerales metálicos; las fuentes antrópicas se extienden desde la agricultura (fertilizantes, abonos animales, plaguicidas, etc.), la metalurgia (minería, fundición, manufactura metálica, etc.), la producción de energía (gasolinas con plomo, manufactura de pilas, plantas de energía, etc.), y la microelectrónica hasta los depósitos de residuos (Alloway, B. J., 1995b).

2.2.3.1.- Minería y fundición metalífera.

Aunque las técnicas actuales de la minería y fundición son generalmente bastante eficientes y, por tanto, los fragmentos de roca finamente molidos y

partículas residuales de minerales no eliminados por los procesos de separación producidos contienen concentraciones de metal relativamente pequeñas, históricamente, a lo largo del siglos XIX y mediados del XX, dichos fragmentos y partículas residuales poseían contenidos de metal muy altos debido a que los procesos de separación del mineral eran menos eficientes. Por tanto estas partículas residuales, que pueden ser transportadas por el viento y/o el agua, constituyen una significativa fuente de contaminación por metales de suelos circundantes a zonas de minería y fundición y en suelos aluviales aguas abajo (Alloway, B. J., 1995b).

Una vez en el suelo, los fragmentos de mineral sufren reacciones de oxidación y meteorización que dan como resultado la incorporación y posterior distribución de iones metálicos en el mismo (Alloway, B. J., 1995b).

2.2.3.2.- Materiales agrícolas y hortícolas.

Las prácticas agrícolas constituyen una importantísima fuente de metales en el suelo en muchas partes del mundo, especialmente en zonas de intensa actividad (Alloway, B. J., 1995b). Las principales fuentes son:

- Impurezas en los fertilizantes: Cd, Cr, Mo, Pb, U, V, Zn.
- Aguas y fangos residuales; especialmente Cd, Ni, Cu, Pb, Zn (y otros muchos elementos).
- Estiércoles, principalmente de aves y cerdos, de la intensa producción animal: Cu, As, Zn.
- Plaguicidas: Cu, As, Hg, Pb, Mn, Zn.
- Residuos derivados de los fertilizantes orgánicos: Cd, Cu, Ni, Pb, Zn.

- Conservantes de la madera: As, Cu, Cr.
- Corrosión de objetos metálicos: Zn, Cd.

2.2.3.3.- Deposición atmosférica.

En países industriales, la deposición atmosférica puede ser una importante fuente de metales para los suelos. De hecho en muchas regiones constituye la principal fuente de entrada de metales en suelos agrícolas y plantas (Haygarth y Jones, 1992) por la deposición superficial sobre las hojas o la cantidad y translocación de los metales transportados por el aire, que entran en los ecosistemas en forma particulada (Adriano, D.C., 2001e).

Metaloides volátiles como Se, As, Hg y Sb pueden ser transportados en forma gaseosa o enriquecidos en partículas, mientras otros metales como Cu, Pb y Zn sólo son transportados en fase partícula (Adriano, D.C., 2001e).

2.2.3.4.- Combustión de fuel fósil.

En general, la combustión de fuel fósil da como resultado la dispersión de un amplio número de metales pesados, como son Pb, Cd, Cr, Zn, As, Sb, Se, Ba, Cu, Mn, U y V, sobre un gran área, aunque no todos esos elementos están presentes en concentraciones significativas en todos los tipos de carbón y petróleo. La combustión de gasolinas con plomo ha sido la mayor fuente de este metal en el medioambiente y ha afectado a una gran proporción de suelos de la superficie terrestre (Alloway, B. J., 1995b).

2.2.3.5.- Industrias metalúrgicas.

Las industrias metalúrgicas pueden contribuir a la contaminación del suelo de varios modos (Alloway, B. J., 1995b):

- i. Por emisión de aerosoles y polvo que son transportados por el aire y eventualmente depositados sobre los suelos y vegetación;
- ii. Por efluentes líquidos que pueden contaminar los suelos en periodos de inundación.
- iii. Por la creación de vertederos de residuos en los que los metales pueden ser corroídos y lixiviados al suelo.

Muchos metales pesados se utilizan en aleaciones y aceros, por ello tanto la manufactura de esos materiales, como su fabricación o reciclaje pueden derivar en contaminación medioambiental (Alloway, B. J., 1995b).

2.2.3.6.- Industria microelectrónica.

Debido a que un amplio número de metales pesados, entre los que se incluyen: Cu, Zn, Ag, Au, Pb, Sn, Y, W, Cr, Se, Sm, Ir, In, Ga, Ge, Re, Tb, Co, Mo, Hg, Sb, As y Gd (MAFF, 1986), se utilizan en la manufactura de semiconductores, cables, contactos y otros componentes electrónicos puede existir contaminación medioambiental procedente de la citada manufactura así como del contacto accidental con el suelo y sus residuos (Alloway, B. J., 1995b).

2.2.3.7.- Industrias químicas.

Otras fuentes significativas de contaminación de los suelos por metales pesados son las manufacturas y/o usos y eliminación de, entre otros, pilas, pinturas y pigmentos, catalizadores, polímeros estabilizantes, plásticos, productos médicos, aditivos en aceites y lubricantes, etc. (MAFF, 1986; Alloway, B. J., 1995b).

2.2.3.8.- Eliminación de residuos.

La acumulación y eliminación de residuos domésticos, municipales e industriales puede llevar a la contaminación del suelo por metales pesados de varias maneras (Alloway, B. J., 1995b).

El depósito de residuos sólidos municipales sobre el suelo puede ocasionar la dispersión de metales pesados, como Cd, Cu, Pb, Sn y Zn en el suelo, aguas subterráneas y superficiales si el citado depósito no se efectúa de la forma correcta en un lugar preparado y destinado para tal fin. Por otra parte la incineración de residuos puede conducir a la emisión de aerosoles de metales (Cd, Pb) si no se dispone del equipo de control de contaminación adecuado (Alloway, B. J., 1995b).

La acumulación temporal de residuos industriales, como los procedentes de las actividades derivadas de la minería, fundición e hidrometalurgia pueden causar una contaminación del suelo de importante magnitud que, a menudo no se pone de manifiesto hasta que no se efectúa un estudio detallado de la zona cuando dicho lugar ya no se utiliza para tal fin (Alloway, B. J., 1995b).

2.2.3.9.- Actividades deportivas, guerras y entrenamientos militares.

Actividades deportivas como la caza pueden ocasionar la entrada de determinados metales pesados como Pb, Sb y a veces Ni en determinados tipos de suelos (Alloway, B. J., 1995b).

También se encuentran significativamente contaminadas en el mundo las áreas y escenarios donde se han efectuado batallas y escaramuzas ya que en la mayoría de suelos los metales pesados persisten durante siglos. En adición a los campos de batalla, los suelos en los que se efectúan entrenamientos militares, los campos y bases aéreas y navales también se encuentran significativamente contaminadas con metales pesados (Alloway, B. J., 1995b).

En la tabla 2.2 (Anexo Tablas) se recogen las fuentes naturales y antrópicas de algunos metales traza incluidos en la lista de contaminantes prioritarios.

Ver ANEXO TABLAS