



FACULTAD DE FARMACIA
UNIVERSIDAD COMPLUTENSE

TRABAJO FIN DE GRADO
COMPORTAMIENTO Y TRANSPORTE DE LOS
CONTAMINANTES EN EL SUELO

Autor: Silvia del Amo Carramiñana

Fecha: Febrero 2020

Tutora: Maria Teresa de la Cruz Caravaca

ÍNDICE

	Pág
1. Resumen	2
2. Introducción	2
2.1. Contaminación del suelo.....	2
2.2. Panorama Europeo y Nacional.....	3
2.3. Consecuencias de la contaminación del suelo en la salud y en el medio ambiente	4
3. Objetivos	5
4. Material y métodos	5
5. Resultados y discusión	6
5.1. Origen y fuente de los principales contaminantes.....	6
5.2. Factores que rigen el transporte de los contaminantes.....	8
5.2.1. Propiedades del suelo que influyen en el comportamiento de los contaminantes	9
5.2.2. Propiedades de los contaminantes que influyen en su movilidad.....	11
5.3. Mecanismos de transporte de los contaminantes en el suelo.....	12
5.4. Actuación sobre el problema de los suelos contaminados.....	14
5.4.1. Medidas de control, seguimiento y vigilancia.....	15
5.4.2. Evaluación del Impacto Ambiental.....	16
6. Conclusiones	17
7. Bibliografía	18

1. Resumen

El suelo es un medio heterogéneo y dinámico. Es fundamental para el medioambiente y los ecosistemas, por lo que es imprescindible que el suelo se encuentre en condiciones adecuadas y evitar su contaminación. Cuando se liberan sustancias contaminantes al medio pueden afectar al suelo de forma puntual o difusa y llegar a afectar a otros medios como la atmósfera y el agua.

La contaminación del suelo va a provenir en mayor medida de procesos industriales y del tratamiento de residuos, siendo los metales pesados y los compuestos orgánicos los principales contaminantes del suelo. Tanto a nivel europeo como nacional se ha empezado a recoger datos acerca de suelos para determinar el estado de los mismos, y en caso de que estén contaminados emprender medidas para su tratamiento. Sin embargo todavía hace falta más datos sobre suelos contaminados, además de consenso y unificación acerca de este tema y cómo abordarlo.

La contaminación del suelo no solo va a producir diferentes efectos en los seres humanos como cáncer y otras afectaciones funcionales, sino que también produce efectos ecotoxicológicos como envenenamiento de la flora y animales, y afectación de otros compartimentos ambientales.

Esta revisión bibliográfica estudia los principales contaminantes que van a afectar al suelo, su procedencia, el transporte de los contaminantes en el suelo, y medidas preventivas y de control para evitar y tratar la contaminación del suelo.

2. Introducción

2.1 - Contaminación del suelo

El suelo es la capa superior de la corteza terrestre, compuesta por materiales minerales, materia orgánica, organismos vivos, agua y aire, se trata de un sistema dinámico y abierto constituido por tres fases: la fase sólida, formada por la materia orgánica y los minerales del suelo; la fase líquida, que comprende el agua y las soluciones del suelo y la fase gaseosa, formada por los gases presentes en los poros del suelo no ocupados por el agua. Se considera un medio muy complejo y variable, además de un recurso no renovable ya que el proceso de formación del mismo es extremadamente lento, se estima que la formación de tan solo 2-3 cm de suelo puede llevar hasta 1000 años (FAO, 2019).

El suelo juega un papel importante en el medioambiente, ya que determina la sostenibilidad de los ecosistemas, tanto naturales como agrarios, en los que constituye un reservorio temporal del ciclo del agua a la que filtra y depura en su recorrido hacia los acuíferos. Además sirve de soporte a todos los seres vivos del ecosistema, vegetales y animales, a los que suministra el agua y los nutrientes que necesitan para el desarrollo completo de su ciclo vital (Espejo Serrano, 2016). Su calidad se relaciona con su capacidad para cumplir funciones como almacenamiento, filtración, amortiguación y transformación de diferentes elementos como el agua y nutrientes (Comisión de las Comunidades Europeas, 2006).

La descarga de sustancias provenientes del medio natural y de actividades humanas pueden provocar su contaminación y degradación, ocasionando alteraciones desfavorables de naturaleza física, química y biológica de sus propiedades, que se traduce en la disminución de la capacidad actual y potencial del suelo para producir bienes y servicios (Lenoir y Tornari,

2004). Por todo ello es fundamental que el suelo se encuentre en condiciones adecuadas y evitar su contaminación. Las principales amenazas a las que se encuentra sometido son: erosión, disminución de la materia orgánica, sellado, compactación del suelo, contaminación difusa y puntual, pérdida de biodiversidad y salinización (Comunidades Europeas 2009).

La liberación de una sustancia contaminante al medio y la posible afección a los diferentes compartimentos ambientales viene determinada por las características físico-químicas de la sustancia vertida y por las propiedades del suelo. Según el R.D.9/2005 un suelo contaminado es aquel cuyas características han sido alteradas negativamente por la presencia de componentes químicos de carácter peligroso de origen humano, en concentración tal que comporte un riesgo inaceptable para la salud humana o el medio ambiente, y se haya declarado por resolución expresa (Agencia Europea del Medio Ambiente, 1995).

La contaminación del suelo puede ser puntual cuando se localiza en un área restringida o puede ser difusa cuando las concentraciones de contaminantes se extienden a grandes áreas. Este tipo de contaminación puede estar generada por deposición atmosférica, prácticas agrícolas, mal tratamiento de aguas residuales y purines de granjas de cerdos.

Por tanto, la contaminación de suelos constituye un problema grave que afecta no solo a las funciones del suelo, sino a la calidad del aire y del agua, por lo que conocer cómo se mueven y responden los diferentes contaminantes en este medio es fundamental para dar una respuesta eficaz.

2.2 - Panorama Europeo y Nacional

El suelo se encuentra en peligro debido a amenazas como la erosión, la salinización, la pérdida de biodiversidad y la contaminación. La contaminación del mismo va a ser producida en mayor medida por actividades industriales que puede liberar contaminantes como metales pesados, hidrocarburos y aceites minerales, así como la fertilización, la aplicación de fitosanitarios y el tratamiento de residuos. Un 45% del suelo europeo tiene un bajo contenido en materia orgánica y se estima que existan 3'5 millones de sitios potencialmente contaminados en la EU-25 (Base de Datos Corine Land Cover, 2000).

A nivel europeo todavía falta mucho consenso acerca de la contaminación del suelo y esto se debe a varias razones. El suelo es un medio muy variable, cambia mucho de unas regiones a otras e incluso dentro del mismo país, por lo que las actuaciones necesarias de remediación y conservación deberán ser específicas al tipo de suelo. Otro de los problemas que entraña el panorama actual es que todavía se desconoce con exactitud cuánta extensión de suelo podría estar contaminado y en qué grado. En el 7º Programa de Acción Ambiental se recogen los compromisos a nivel europeo para reducir la erosión del suelo, aumentar la materia orgánica en el suelo, limitar los efectos causados por humanos en el suelo, gestionar el terreno de una forma sostenible y remediación de suelos contaminados (Eurostat, 2014).

En septiembre de 2006 se implementó la Estrategia Temática para la Protección del Suelo a nivel europeo, la cual tiene como objetivos el uso del suelo de forma sostenible a la vez que su protección, preservación de la funcionalidad del suelo y restauración de suelos degradados. En los años 2011 y 2012 el Centro de Datos de Suelo Europeo de la Comisión Europea llevó a cabo un proyecto para recopilar datos sobre sitios contaminados, utilizando la EIONET-SOIL. Gracias a los datos obtenidos de los diferentes países sabemos puede haber más de 2'5 millones de emplazamientos potencialmente contaminados y 342.000 emplazamientos contaminados identificados. Los deshechos municipales e industriales son los que más contribuyen a la contaminación del suelo, llegando a suponer un 38% de la misma, seguido

del sector industrial/comercial que constituye un 34% de la contaminación del suelo. Se ha podido determinar que los aceites minerales y los metales pesados son los contaminantes mayoritarios de estos emplazamientos al constituir el 60% de la contaminación del suelo (Panagos et al, 2013).

A nivel nacional, durante los años 1991 y 1992 se ejecutó el primer Inventario de Suelos Contaminados, el cual pretendía identificar actividades potencialmente contaminantes del suelo y vertederos incontrolados de residuos. Se identificaron 4.532 emplazamientos potencialmente contaminados, de los cuales 250 se sometieron a una caracterización y evaluación de riesgo. En los años 1994 y 1995 se realizó una segunda fase de caracterización en la que se contó con 115 emplazamientos anteriormente inventariados. A partir de ese momento han sido las Comunidades Autónomas las que se han encargado de actualizar y mejorar el inventario. Este inventario lo que pretende es establecer la prioridad de acción frente a los suelos contaminados (Conde, 2015)

2.3 - Consecuencias de la contaminación del suelo en la salud y en el medio ambiente

La contaminación de suelo puede llegar a producir problemas en la salud humana y de los ecosistemas. Hay que tener en cuenta que es uno de los medios de soporte de la agricultura y por tanto si hay compuestos contaminantes presentes en los suelos destinados para dicho fin pueden llegar a pasar a los cultivos, entrando así a la cadena alimenticia. Estos contaminantes también pueden llegar al agua de consumo con las consecuencias que ello puede acarrear. Tanto los metales pesados como los compuestos orgánicos van a producir diferentes efectos en el cuerpo humano y en la salud.

Los compuestos orgánicos como los hidrocarburos clorados son capaces de producir un aumento de la incidencia de diferentes tipos de cáncer como linfoma, leucemia, cáncer de hígado y de mama. Hidrocarburos aromáticos policíclicos también han demostrado ser carcinogénicos. Los fenoles han demostrado producir daño en el hígado y el riñón, y tener efectos neurotóxicos. Otros compuestos orgánicos como benceno, tolueno, etilbenceno y xileno pueden producir cáncer, irritación respiratoria y daños en el sistema nervioso central. Los diferentes metales pesados no solo son considerados carcinogénicos, sino que también producen efectos tóxicos en el sistema nervioso central, hígado, riñones, corazón, pulmones, piel y en la reproducción (Panagos et al, 2013).

Los peligros que puede presentar la contaminación del suelo no solo van a ser problemas toxicológicos a nivel de la salud humana sino que también se pueden presentar problemas eco-toxicológicos como envenenamiento de la flora ya que éstas pueden absorber los contaminantes a través de las raíces o las hojas, intoxicaciones de los animales por contacto con el agua, tierra o forraje contaminados, peligros físicos como pueden ser explosiones y fuego en caso de tratarse de elementos inflamables o explosivos, corrosión y deterioro de infraestructuras, y peligro de contaminación de otros compartimentos ambientales como pueden ser aguas superficiales, subterráneas, atmósfera, etc (Conde, 2015)

3. Objetivos

El objetivo fundamental es revisar el comportamiento y transporte de los contaminantes en el suelo. Conocer los procesos implicados permitirá la aplicación de medidas correctoras y/o preventivas que sirvan para disminuir o evitar la transferencia de los contaminantes a otros sistemas naturales como el agua o la atmósfera.

Para lograr este objetivo se establecen como objetivos específicos:

- Conocer el origen y las fuentes de los principales contaminantes que llegan al suelo, determinando los tipos de contaminantes asociados a las diferentes actividades que generan la contaminación.
- Revisar los mecanismos de Retención, Eliminación y Transformación de los contaminantes en el suelo. Al ser de diversa naturaleza su comportamiento y transporte en el medio estará regido por diferentes factores y procesos.
- Proponer medidas de actuación que eviten la contaminación o que dificulten la transferencia a otros sistemas y por tanto limiten su extensión.

4. Material y métodos

Para la realización de este trabajo bibliográfico he revisado artículos, libros, revistas, posts y páginas de internet. Se ha llevado a cabo una búsqueda y análisis de información usando recursos como Science Direct (<http://www.sciencedirect.com>) y Google Academic (<https://scholar.google.es/>), donde se han podido encontrar artículos científicos sobre la contaminación del suelo, contaminantes inorgánicos (principalmente metales pesados) y contaminantes orgánicos gracias a la utilización de palabras clave como soil, soil pollution, heavy metal pollution, organic compounds pollution.

También se han utilizado fuentes de información en libros de referencia o artículos científicos facilitados por la tutora o encontrados en Google (www.google.es). Para el conocimiento del marco regulatorio se ha revisado el BOE (Boletín Oficial del Estado) así como diferentes publicaciones en las páginas oficiales de los Ministerios, Guías Técnicas de las diferentes Comunidades Autónomas y organismos a nivel Europeo.

Se han consultado revistas científicas referentes a la contaminación, toxicología y medio ambiente tales como International Organization of Scientific Research Journal of Environmental Science, Toxicology And Food Technology, The Scientific World Journal, Health and Environment Alliance, Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, International Research Journal of Environment Sciences.

5. Resultados y discusión

5.1 Origen y fuentes de los principales contaminantes

La revisión sobre los contaminantes del suelo se centrará en contaminantes inorgánicos (principalmente metales pesados) y compuestos orgánicos.

Los metales pesados son un conjunto de elementos metálicos de elevada densidad comprendida entre 4 g/cm³ hasta 7 g/cm³. Algunos de estos metales son esenciales a concentraciones normales para el ser humano, pero por lo general los metales pesados tienden a generar problemas medioambientales, destacando el mercurio (Hg), el plomo (Pb), el cadmio (Cd) y el talio (Tl), así como el cobre (Cu), zinc (Zn) y cromo (Cr) (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2020). La contaminación por metales pesados puede ser de origen natural (naturaleza geogénica) o antropogénica. Para considerar peligrosa un tipo de contaminación, los elementos deben superar los niveles genéricos de referencia. Las fuentes y el origen de estos contaminantes pueden ser diferentes dependiendo del elemento que se trate

- Cadmio: El cadmio puede incorporarse al suelo agrícola a partir de fertilizantes fosfatados ya que éstos se obtienen de rocas fosfóricas las cuales contienen niveles de metales pesados. Otra forma de que alcance suelos agrícolas es mediante el uso de lodos de aguas residuales para la fertilización cuando estos lodos provienen de aguas que reciben efluentes industriales. Una forma de contaminación local de cadmio es mediante vía aérea por polvo y aerosoles que pueden provenir de actividades como la minería, metalurgia y plantas incineradoras. Los combustibles fósiles también son una fuente de contaminación por metales pesados ya que al volatilizarse y formar cenizas pueden pasar a la atmósfera y acabar depositándose en el suelo y masas de agua, por lo que en áreas cercanas a plantas termoeléctricas y vías de tránsito de automóviles esta contaminación va a ser mayor (Herrera Marcano, 2011).
- Cromo: El cromo lo podemos encontrar como Cr (III) el cual es esencial para una normal tolerancia a la glucosa o como Cr (VI) que es un conocido carcinógeno. El cromo puede provenir en gran medida de desechos de la industria metalúrgica, ya que la escoria producida muchas veces se deshecha sin ningún tipo de control, pudiendo la escoria quedar expuesta al oxígeno atmosférico y por tanto oxidarse de Cr (III) a Cr (VI) siendo éste más tóxico además de presentar mayor solubilidad y movilidad (Shadreck, M., 2013), (Curtis & Klaassen, 2008).
- Cobre: el cobre es un elemento esencial para los seres humanos. Es muy utilizado debido a su conductividad eléctrica y térmica, por ser un metal muy versátil y sus propiedades antimicrobianas (Copper Alliance, 2019). La contaminación por cobre puede provenir de residuos de minas e industria metalúrgica, industria química, industria textil y del cuero (Kabir et al, 2012).
- Mercurio: el mercurio lo podemos encontrar de diferentes formas como mercurio elemental, mercurio inorgánico, metilmercurio, etil-mercurio y fenil-mercurio. El 70% de la contaminación por mercurio proviene de actividades humanas incluyendo muchos procesos industriales como pueden ser la quema de carbón, incineración o deshecho de

productos que contienen mercurio, utilización de mercurio para la producción de cloro en la industria de cloralcalina, producción de zinc, acero y otros metales, producción de cemento, minería y reciclaje. También puede proceder de fenómenos naturales como volcanes, degradación de minerales o evaporación de suelos (Health and Environment Alliance, 2020).

- Plomo: Las fuentes principales de contaminación del suelo por plomo son: fuentes fijas de emisiones como pueden ser fundiciones metalúrgicas, incineradoras, áreas que contienen escoria de minas y vertederos para baterías de plomo ácido, y emisiones de gasolina con plomo (U.S. Environmental Protection Agency, 2020).
- Zinc: el Zn juega un papel importante en muchos procesos biológicos y es un elemento traza esencial para un adecuado crecimiento y reproducción de las plantas y la salud de animales y humanos (Noulas et al, 2018). La contaminación por Zinc puede ser originada por residuos de minería, industria metalúrgica y fundiciones, plantas de industria química, industria textil como parte de la tinción e impresión, industria del cuero, industrias de minerales no metálicos como cementeras, fábricas de cerámica y fábricas de baterías (Kabir et al, 2012).
- Níquel: el Ni aparece de forma natural en el suelo, aunque a concentraciones muy bajas. El níquel puede aparecer en el suelo como consecuencia de varias actividades antropogénicas como fundición, minas de metales, emisiones de vehículos, quema de combustibles fósiles, residuos de hogares e industrias, aplicación de algunos fertilizantes y abonos orgánicos (Gopal et al, 2014).
- Arsénico: el arsénico en forma elemental está presente de forma natural en el medio ambiente proviniendo principalmente de actividad ígnea, pero también puede aparecer en el medio ambiente a través de actividades antropogénicas. La mayor parte del As liberado al suelo proviene de desechos comerciales, cenizas del carbón, industria minera y por la industria del acero. También se ha encontrado contaminación por As proveniente del uso de insecticidas utilizados en ganado para prevenir pulgas y garrapatas. La continua aplicación de fertilizantes fosfatados que contienen niveles traza de As también provocan como resultado contaminación del suelo por As (Stoeppler & Vahter, 1994).

Respecto a los compuestos orgánicos son un conjunto de compuestos entre los que vamos a encontrar dioxinas y derivados y otros COPs (contaminantes orgánicos persistentes). Son mayoritariamente compuestos organoclorados que tienen diversas aplicaciones, no solo en industria sino también en agricultura. Los más destacables son biocidas entre los que encontramos el hexaclorociclohexano (HCH), compuestos químicos industriales como bifenilos policlorados (PCB), y compuestos originados en procesos de combustión, de origen natural y/o antropogénico como las dioxinas, furanos e hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP). Todos estos compuestos se degradan lentamente en el medioambiente y pueden producir problemas graves de toxicidad, desde disrupción hormonal hasta carcinogenicidad. El Convenio de Estocolmo, que entró en vigor en el 17 de mayo de 2004, es un instrumento jurídico cuyo objetivo es proteger la salud y el medio ambiente mediante la reducción o eliminación de la producción y uso de estos contaminantes. Inicialmente en el Convenio de

Estocolmo se incluyeron 12 COP, y posteriormente se ha ido incluyendo más componentes. Los COPs podemos dividirlos según su utilización y origen en 3 grupos:

- COP para utilización como fitosanitarios y/o biocidas: Los productos fitosanitarios están compuestos por varias sustancias activas e ingredientes y su función principal es proteger a los vegetales de organismos que son nocivos para ellos, así como la eliminación de otras plantas que son consideradas como no deseables. Se aplican con el objetivo de aumentar el rendimiento de los cultivos y garantizar la seguridad de los alimentos obtenidos. Por otra parte, los biocidas se utilizan en otros sectores no agrícolas con el fin de destruir, neutralizar, impedir o contrarrestar la acción de organismos nocivos mediante medios químicos o biológicos. En este grupo podemos encontrar insecticidas organoclorados como aldrina, dieldrina, DDT, etc. Aunque el uso de muchos de estos compuestos ya esté prohibido todavía es posible encontrar restos de ellos en animales con mayor contenido graso y alimentos grasos de animales terrestres ya que son sustancias liposolubles y tienden a acumularse. En alimentos vegetales no se encuentran en niveles tan elevados.
- COP de uso industrial: los compuestos orgánicos tienen diversas propiedades como pueden ser aislamiento, resistencia al fuego y estabilidad y es por ello que se utilizan en la fabricación de muchos productos a nivel industrial. Actualmente estos compuestos suponen un enorme problema debido a su amplia utilización en productos electrónicos y el alza de la producción de éstos a nivel mundial, ya que los residuos de aparatos electrónicos van en aumento, y estos compuestos son muy persistentes y se encuentran en elevadas concentraciones en el medio ambiente. Algunos compuestos de este grupo son el hexabromobifenilo (HBB) utilizado como retardante de llama, PCBs utilizados como fluidos de intercambio térmico, PCCC como retardantes de llama de uso textil, etc. La utilización de la mayoría de estos compuestos está también prohibida o regulada, por lo que podremos encontrarlos mayoritariamente en muchos productos fabricados a nivel industrial previo a los años 2000 o años anteriores que es cuando empezó a restringirse su uso.
- COP emitidos de forma no intencional: pueden originarse y liberarse en procesos térmicos y de combustión de materia orgánica y cloro. Suelen producirse cuando las combustiones no son completas como es el caso de las dioxinas y los furanos. También podemos encontrar hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) que se encuentran en combustibles fósiles (del Cerro Martín et al, 2012).

5.2 Factores que rigen el transporte de los contaminantes

Los contaminantes presentes en el suelo van a ser capaces de transportarse a través de él y sufrir diferentes transformaciones. Estos procesos no solo dependen de las características propias de cada contaminante, sino que también las propiedades del suelo en que se encuentren van a influir en el resultado final. Es por ello necesario estudiar y analizar estas características para poder determinar el impacto real que puede tener la contaminación por un compuesto concreto en el suelo.

5.2.1 Propiedades del suelo que influyen en el comportamiento de los contaminantes

○ pH: el pH del suelo mide la concentración de hidrogeniones (H^+). En el suelo, estos hidrogeniones pueden encontrarse en la solución o adsorbidos a la materia coloidal del suelo (principalmente arcillas y materia orgánica), encontrándose en un equilibrio dinámico ya que cuando se eliminan H^+ de la solución pasarán a liberarse H^+ adsorbidos. Por esta razón el suelo tiende a mantener los valores de pH. Los principales factores que van a determinar el pH del suelo son: la materia original del suelo, el contenido en materia orgánica y microorganismos, las precipitaciones de la zona y el complejo adsorbente. Dependiendo del pH los contaminantes pueden variar su grado de ionización, lo cual puede ser determinante a la hora de sufrir transformaciones o ser transportados en el medio. Además, el pH puede generar modificaciones en el suelo, ya que pH muy ácidos producen una intensa alteración de los minerales y la estructura del mismo se vuelve inestable, y pH alcalinos pueden producir que suelos arcillosos se dispersen, destruyéndose su estructura (Maycotte Morales, 2011)

Los metales pesados (a excepción de As y Cr) a pH ácidos están presentes en la solución del suelo, y por tanto aumentará su movilidad.

○ Condiciones redox: el potencial redox del suelo hace referencia a su capacidad reductora u oxidativa. Las condiciones redox del suelo van estrechamente ligadas al pH y la cantidad de agua, ya que modifica la cantidad de aire, O_2 y CO_2 , y la cantidad de materia orgánica. La materia orgánica es la principal fuente reductora del suelo ya que tiende a oxidarse. El agua provoca una depleción de oxígeno y por tanto genera un ambiente reductor. El oxígeno del aire va a ser el principal agente oxidante. Todos estos factores que determinan el potencial redox van a afectar a aquellos componentes que pueden estar en el suelo en varios estados de oxidación, afectando principalmente al nitrógeno, hierro, azufre y manganeso (Ibáñez, 2019), (Jordán López, 2005). Las condiciones redox del suelo van a determinar la forma en la que se encuentren los diferentes contaminantes en el suelo y por tanto la forma en la que interaccionen con el mismo.

○ Textura: la textura del suelo va a venir determinada por la distribución del tamaño de partículas que lo conforman. Según el tamaño de partícula podemos establecer diferentes clases texturales. El tamaño de las partículas que constituyen el suelo va a determinar la superficie interna y el número y tamaño de poros. A menor tamaño de partícula mayor es la superficie interna del suelo y por tanto mayor será la superficie de intercambio catiónico del mismo. A su vez un menor tamaño de partícula disminuye la porosidad y ralentiza la circulación del agua. Por lo general los suelos arenosos y limosos van a tener una baja proporción de materia orgánica, retienen peor el agua y en el caso de los suelos arenosos presentan mayor permeabilidad y aireación que el resto. Los suelos arcillosos poseen gran capacidad de agregación, tienen gran capacidad de intercambio catiónico, mejoran la reserva de nutrientes, retienen mejor el agua, pero tienen una baja porosidad, pudiendo hacerlos impermeables. Como es lógico, al tener cada tipo de textura diferentes propiedades también tendrán diferentes comportamientos frente a los contaminantes. Las arenas son muy inertes, pero al tener mayores poros y menor superficie de intercambio catiónico los contaminantes presentarán mayor movilidad, mientras que los suelos arcillosos presentan mayor capacidad de amortiguación, ya que son capaces de fijar y transformar los contaminantes (Jordán López, 2005). Por lo general, los suelos arcillosos

tienen mayor capacidad de retención y por tanto los metales pesados presentarán menor movilidad, mientras que en los suelos arenosos estos metales, escasamente retenidos, van a ser capaces de llegar hasta el nivel freático.

o Materia orgánica: está constituida por una mezcla compleja y heterogénea de restos de vegetales, animales, microorganismos y las sustancias resultantes de su degradación físico-química. La materia orgánica va a influir en la estructura del suelo, la capacidad de retención de agua y nutrientes del mismo, y las reacciones bioquímicas que pueden tener lugar en él. La materia orgánica favorece el desarrollo de la estructura del suelo. Algunas moléculas orgánicas producidas por los microorganismos favorecen la agregación al formar compuestos órgano-minerales con la arcilla. Las partículas húmicas poseen gran poder aglomerante por lo que van a favorecer la formación y estabilidad de la estructura lo que favorece una adecuada porosidad y actúa regulando la retención e infiltración de agua. Las moléculas orgánicas van a participar en el intercambio catiónico que se produce en el suelo mejorando el poder de retención de cationes. La materia orgánica puede reaccionar con los metales formando quelatos estables como pasa con el Pb y Zn, o puede adsorberlos estabilizándolos como es el caso del Cu, por tanto, de este modo disminuye la capacidad de transporte de éstos hacia otros sistemas ambientales.

Sin embargo, en ocasiones se pueden formar complejos organometálicos, aumentando así la solubilidad del metal y su disponibilidad. En este último caso la persistencia de los metales aumenta y con ello su toxicidad.

o Contenido en óxidos e hidróxidos: los óxidos e hidróxidos de Fe y Mn, son esenciales para la inmovilización de metales. Están muy distribuidos en el suelo, presentan baja cristalinidad y un pequeño tamaño de partícula, lo que les va a proporcionar una alta capacidad sorbitiva para los metales pesados. Los óxidos de Fe son capaces de participar en procesos de agregación y cementación.

Los óxidos e hidróxidos de aluminio por su parte juegan un importante papel en la acidificación del suelo, su papel es fundamental en suelos contaminados ya que son capaces de adsorber grandes cantidades de metales traza. Los óxidos de Fe y Al junto con la materia orgánica van a actuar como agentes floculantes en el suelo (Vásquez Polo et al 2014).

o Contenido en carbonatos: los suelos ricos en carbonatos van a ser suelos de pH moderadamente básicos, lo que favorece que precipiten los metales pesados. Tanto el carbonato cálcico como el carbonato magnésico garantizan una buena estructura del suelo ya que los cationes divalentes junto con la materia orgánica van a originar macroagregados muy estables.

o Contenido en sales: En presencia de sales neutras, algunos aniones pueden formar compuestos solubles con Pb, Zn, Cu, Cd y Hg aumentando su movilidad. Sin embargo, la presencia sales alcalinas como Na_2CO_3 va a proporcionar un pH alcalino al suelo por lo que la movilidad de los metales será menor (Galán Huertos y Romero Baena, 2008), no obstante, debido a la elevada energía de hidratación del Na^+ se favorece la dispersión de las partículas y agregados, empeorando así la estructura de los suelos arcillosos.

Una gran cantidad de sales en el suelo puede producir la formación de costras en el mismo provocando una disminución de la velocidad de infiltración, que puede provocar una disminución del transporte de contaminantes.

5.2.2 Propiedades de los contaminantes que influyen en su movilidad

- Movilidad de metales pesados en el suelo

Para poder conocer la peligrosidad real que puede tener un metal no solo debemos conocer su forma química sino también su forma física y cómo interacciona con el suelo. Los metales en el suelo los vamos a poder encontrar en formas diferentes: partículas contaminantes, partículas líquidas, contaminante adsorbido, contaminante absorbido, contaminante en fase líquida intersticial y contaminante como fase sólida en poros. Las diferentes formas en las que podemos encontrar los metales van a presentar también diferencias en cuanto a la movilidad y disponibilidad de los mismos. Los iones simples o complejos en disolución van a ser los que presenten mayor facilidad de movimiento y disponibilidad, seguidos de los cationes de cambio.

Los metales que se encuentran formando quelatos con compuestos orgánicos y los metales adsorbidos sobre partículas del suelo van a encontrarse menos disponibles. Los compuestos metálicos precipitados sobre las partículas del suelo van a encontrarse disponibles cuando el precipitado se disuelve. Si los metales se encuentran asociados o incorporados a una matriz biológica éstos pasarán a estar disponibles cuando la matriz se descomponga. En caso de que el metal esté asociado o formando parte de la estructura de un mineral se dispondrá de él cuando se meteorice o destruya el mineral en que se encuentra formando parte.

Por lo general la movilidad de los metales pesados es bastante baja, tendiendo a acumularse en los primeros centímetros del suelo. Es por ello que a pesar de que se produzca contaminación antrópica que libere grandes cantidades de estos metales al medio estos se transportan a capas inferiores en poca cantidad. Tal como hemos revisado las propiedades del suelo van a ser determinantes en la movilidad o retención de los metales pesados.

- Propiedades físico-químicas de los compuestos orgánicos que afectan a su movilidad

- *Solubilidad.* Es una característica importante de los compuestos orgánicos ya que va a determinar su distribución y movilidad. La solubilidad acuosa de un compuesto orgánico es la cantidad total de compuesto que se disuelve en agua pura en unas condiciones específicas de temperatura. No solo va a depender de la temperatura, sino que también influye el pH, la fuerza iónica y la presencia de otros compuestos orgánicos. Por lo general, los compuestos orgánicos van a ser más solubles a mayor temperatura, aunque pueden existir excepciones. Para compuestos orgánicos que presenten grupos ácidos en su estructura aumentará su solubilidad a pH alcalinos y viceversa. La existencia de otras sustancias orgánicas disueltas aumenta la solubilidad aparente de estos compuestos ya que puede producirse procesos de interacción. La solubilidad de los COPs no va a depender solo de estas características extrínsecas sino también de las propias

características del compuesto como su estructura química y el coeficiente de reparto octanol-agua. Según la estructura química del compuesto y sus radicales podremos encontrar grupos más apolares y por tanto menos solubles en agua como son los hidrocarburos aromáticos o compuestos más polares gracias a la presencia de radicales ionizables que permiten una mayor solubilidad en agua.

Otra forma de conocer la solubilidad de un compuesto orgánico es mediante la determinación del coeficiente de reparto octanol/agua (K_{ow}). El valor que nos aporta este coeficiente permite medir la tendencia de un compuesto a disolverse en compuestos apolares como es el octanol. Cuanto menor sea el valor de este coeficiente mayor será la solubilidad del compuesto orgánico en agua y por tanto presentará mayor movilidad en la solución del suelo (Galán Huertos et al, 2003).

- *Presión de vapor.* La capacidad que tengan los COPs de volatilizarse va a determinar su grado de transferencia del agua y el suelo a la atmósfera. La presión de vapor mide la volatilidad de una sustancia pura y depende de la temperatura. A menor presión de vapor más volátil será un compuesto. Una propiedad que caracteriza a los COPs es su semivolatilidad, pudiendo pasar a la atmósfera cantidades considerables de los mismos y transportarse hacia lugares diferentes de los de emisión. Los COPs se volatilizan más fácilmente en regiones cálidas, pasando a la atmósfera y transportándose en ella pero cuando llegan a regiones más frías se condensan pudiendo volver así al suelo o al agua. Los COPs van a ser más volátiles cuando presentan más halogenaciones, tienen un peso molecular de 200 u a 500 u y una presión de vapor inferior a 1000 Pa (Sánchez Gelabert, 2008).

- *Cociente de adsorción en carbono orgánico (K_{oc}).* Este parámetro permite medir la tendencia de un compuesto orgánico a quedar adsorbido en la materia orgánica del suelo. Por tanto, cuanto mayor sea el valor de K_{oc} mayor será la adsorción del compuesto por la materia orgánica del suelo y menor será su movilidad (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2020).

5.3 Mecanismos de transporte de contaminantes en el suelo

Los contaminantes orgánicos y los metales pesados que se encuentran en el suelo interactúan con él y sus componentes, siendo sometidos a diferentes mecanismos de transporte:

- *Volatilización:* es el paso de una sustancia en estado sólido o líquido a estado gaseoso. En los metales pesados puede tener lugar sobre todo cuando se incineran residuos que contienen estos metales, pasando así a la atmósfera. En el caso de los COPs, son compuestos semi-volátiles, por lo que su paso a la atmósfera se verá determinado por la presión de vapor, solubilidad, estructura, adsorción, concentración en el suelo, propiedades del suelo como la humedad, porosidad, densidad y contenido en materia orgánica, y factores medioambientales como la temperatura, humedad y velocidad del viento.

- *Advección*: consiste en el movimiento de la sustancia contaminante al ser arrastrada por el agua. Para que sea posible este tipo de transporte el contaminante debe estar disuelto en la solución del suelo. La advección se mide gracias a la Ley de Darcy que determinará el flujo de masa por unidad de sección y unidad de tiempo. A su vez dependerá de la porosidad del medio, la concentración del contaminante y la velocidad lineal media (San Román, 2012).

- *Difusión*: es un mecanismo mediante el cual las partículas de contaminantes disueltas en la solución del suelo se mueven de los puntos en que existe mayor concentración hacia los de menor concentración. Este mecanismo está regido por la Ley de Fick. El flujo de masa dependerá del gradiente de concentraciones, la porosidad del medio y el tiempo. La difusión es un mecanismo de transporte de contaminantes muy lento y que solamente es apreciable cuando es el único fenómeno que origina movimiento del soluto y durante un periodo de tiempo largo.

- *Dispersión*: se diferencian dos tipos: la dispersión mecánica y la dispersión hidráulica. La dispersión mecánica de los contaminantes es aquella que surge del movimiento del fluido en el que se encuentran disueltos a través del suelo. La dispersión puede tener un flujo longitudinal (en el sentido del flujo) y transversal. La dispersión va a originar el mezclado con agua no contaminada por lo que puede también considerarse como un mecanismo de dilución de contaminantes. El flujo de dispersión dependerá de la tortuosidad de los caminos que siga el flujo, retrasándose cuanto más tortuoso sea el mismo, la anchura del camino, avanzando más rápido cuanto más ancho sea, y las heterogeneidades del suelo que aumentarán la dispersión. Además, también puede originar desviaciones en la trayectoria de las líneas de flujo la diferencia de velocidad del agua entre los bordes del flujo y el centro del mismo. La dispersión hidrodinámica es la conjunción de la difusión y la dispersión mecánica, ya que estos dos fenómenos no se pueden considerar de forma aislada. Debido a la dispersión hidrodinámica un vertido de un contaminante se va a ir transformando en un penacho o pluma que va aumentando y difuminándose en el suelo a medida que es transportado por el flujo subterráneo (San Román, 2012).

- *Adsorción*: es la capacidad de los contaminantes para unirse a la superficie de las partículas del suelo. Este fenómeno puede tener lugar dependiendo de la naturaleza de los contaminantes. Los metales pesados son compuestos inorgánicos y por tanto las interacciones electrostáticas serán las principales responsables de este fenómeno. Los metales pesados son capaces de quedar adsorbidos sobre oxihidróxidos de hierro, materia orgánica o minerales de la arcilla (Bolt, 1976). Los COPs tienen carácter no polar y tienden a quedar adsorbidos sobre la materia orgánica del suelo. Esta tendencia de los COPs a quedar adsorbidos puede venir determinada por el cociente de adsorción en carbono orgánico (Koc)

- *Lixiviación*: consiste en el transporte producido por el movimiento de agua en el suelo de sustancias solubles o dispersables, por lo que este fenómeno será de gran importancia en climas húmedos. No solo es un proceso que puede hacer que disminuyan los nutrientes del suelo sino que además contribuye al transporte de fertilizantes y contaminantes solubles en agua hacia horizontes inferiores del suelo. La lixiviación va a aumentar la acidez del suelo y esto puede tener como consecuencias que los metales pesados queden menos adsorbidos

en el suelo y por tanto aumente su solubilidad y movimiento, además de una desestructuración de la matriz del suelo (Clothier & Green, 2005).

- *Degradación:* Los contaminantes presentes en el suelo pueden sufrir diferentes transformaciones de degradación bióticas y abióticas. Dentro de las transformaciones abióticas destacan la hidrólisis y la fotodegradación. La fotodegradación es el proceso por el cual se descomponen los contaminantes por la acción de la luz solar y por lo tanto este fenómeno será más intenso en las capas del suelo en la que la luz incida directamente, es decir, en las capas más superficiales. Otro mecanismo de degradación abiótico es la hidrólisis, fenómeno en el cual interviene el agua para la hidrolización de los diferentes componentes. Las transformaciones bióticas son aquellas en las que se producen reacciones de degradación en las que intervienen microorganismos, pudiendo estas reacciones tener lugar en presencia de oxígeno (condiciones aerobias) o en ausencia de oxígeno (condiciones anaerobias). Los COPs son compuestos orgánicos muy resistentes a cualquier tipo de degradación ya que están constituidos por enlaces cloro-carbono, los cuales son enlaces muy estables. Los metales pesados son compuestos bastante persistentes y por tanto su degradación va a ser mínima.

5.4 Actuación sobre el problema de los suelos contaminados

Desde la década de los años 60 se empezó a reconocer el problema de la degradación ambiental. Esta crisis ambiental inició el debate político sobre la irracionalidad ecológica de los actuales patrones predominantes de producción y consumo, comienza a incorporarse la variable ambiental a la hora de evaluar la viabilidad de nuevos proyectos y ya no sólo se basan en criterios técnicos, económicos y sociales. En los años 70 empieza a tenerse muy en cuenta la variable ambiental de los proyectos para poder garantizar un progreso sostenible. A pesar de ello no es hasta el año 1998 cuando se promulga la Ley 10/1998 de 21 de abril sobre Residuos. Anteriormente a esta fecha en España no se disponía de ningún instrumento legal que permitiese proteger al suelo de la contaminación, y en caso de los suelos ya contaminados identificarlos y caracterizarlos. Posteriormente la legislación sobre suelos contaminados se actualizó con la Ley 22/2011 de 28 de julio de Residuos y suelos contaminados, y el Real Decreto 9/2005 de 14 de enero que establece la relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados. Será el gobierno, aunque con una previa consulta a las comunidades autónomas, el que va a determinar los criterios y estándares para evaluar los posibles riesgos a la salud humana y medio ambiente teniendo en cuenta la naturaleza y uso de los suelos. Se incluirá una lista con actividades potencialmente contaminantes del suelo, así como obligaciones que tendrán los titulares de estas actividades y los propietarios de las fincas en las que se lleven o hayan llevado a cabo estas actividades. Se determinan los criterios y estándares que permitirán dilucidar si un suelo está contaminado, así como regularización de los niveles genéricos de referencia y criterios para calcular estos niveles (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2020).

El sector industrial es el segundo mayor generador de contaminantes que pueden afectar al suelo por detrás de los desechos municipales, pero es el principal generador de contaminantes como los metales pesados y compuestos orgánicos, por lo que las medidas de control y seguridad necesarias para evitar esta contaminación deberán ejecutarse a este nivel. Algunos de los focos de contaminación del suelo procedentes de la industria pueden ser:

almacenamiento de líquidos y sólidos viscosos, manipulación y transporte de líquidos, almacenamiento de sólidos, manipulación y transporte de sólidos, otras actividades como redes de saneamiento y talleres y mantenimiento, e instalaciones de proceso (Gobierno Vasco, 2008).

5.4.1 Medidas de control, seguimiento y vigilancia

Como se ha comentado previamente, la mayor parte de la contaminación de suelos por metales pesados y compuestos orgánicos tiene origen industrial. Las medidas preventivas que pueden llevarse a cabo a nivel industrial para evitar la contaminación y garantizar el correcto funcionamiento de las instalaciones las podemos diferenciar en 3:

- Técnicas preventivas de diseño que afectan al diseño de las instalaciones. Se incluyen características constructivas de las instalaciones, medidas de protección y contención, y localización de instalaciones.
- Técnicas preventivas de vigilancia y control. Dentro de esta clasificación se encuentran medidas como:
 - Programas de control y seguimiento tanto de aguas subterráneas como de vapores para identificar posibles afecciones de las instalaciones industriales
 - Sistemas de detección de fugas y alarmas en las diferentes instalaciones de almacenamiento en caso de pérdida de estanqueidad en las mismas.
 - Inspecciones y mantenimiento periódico de las instalaciones para una detección precoz de riesgos y defectos en las instalaciones.
 - Planes de emergencia.
- Técnicas preventivas operacionales y organizativas: incluyen programas de mantenimiento, control de procesos y formación de empleados.

Estos 3 tipos de técnicas son complementarias entre ellas, aunque en caso de que no se puedan llevar a cabo las 3 se priorizarán las técnicas de diseño, después las técnicas de vigilancia y control, y por último las técnicas operacionales. (Arana Jiménez et al, 2016)

Cuando se ha caracterizado un suelo como contaminado ha de llevarse a cabo un proyecto de descontaminación. Para poder determinar qué tecnología será la más adecuada para la descontaminación hay que tener en cuenta, como se ha comentado, el tipo de contaminantes, su estado y propiedades físico-químicas, el tipo de suelo, el volumen de suelo que es necesario tratar, y el tiempo que el suelo lleva estando contaminado. La decisión de llevar a cabo estos procesos debe garantizar la reducción del riesgo alcanzable al aplicar las diferentes técnicas, el beneficio a nivel ambiental debe ser mayor que la afección negativa que se puede producir en el medio, y los costes económicos deben ser viables.

La descontaminación se lleva a cabo mediante la aplicación de varias técnicas que se pueden clasificar en: ex situ (si se realiza una excavación del suelo contaminado) e in situ (no hay excavación del suelo). Si los residuos de los suelos contaminados se tratan en instalaciones diferentes al emplazamiento se denomina off-site, y si éstos residuos se tratan en el mismo emplazamiento se denomina on-site. Las tecnologías que se pueden aplicar para la recuperación de sitios contaminados se pueden clasificar en tres grupos:

- Tecnologías de transferencia de masas: hay una primera fase de movilización del contaminante desde el suelo que tiene lugar mediante procesos químicos o físicos. En una segunda fase estos contaminantes proceden a ser tratados o destruidos. Estas tecnologías pueden ser in situ o ex situ y se incluyen extracción mediante vacío, inyección de vapor, soil washing, electro-recuperación, desorción térmica a baja temperatura y extracción con solventes.
- Tecnología de transformación/destrucción: van a transformar los contaminantes en productos diferentes con la finalidad de que éstos sean inocuos o su transformación permita facilitar su tratamiento o eliminación. Se consigue mediante procesos químicos o biológicos como la biorremediación y la destrucción térmica.
- Tecnologías de estabilización/fijación: permiten la incorporación de contaminantes a una matriz sólida que los inmovilice al menos de forma parcial. Consiste en incorporar los compuestos contaminantes en estructuras monolíticas por métodos físicos, químicos o una mezcla de ambos. Se incluyen tecnologías como la inertización con cemento o cal, vitrificación y técnicas de macro y microencapsulación (Bellinfante & Jordán, 2007)

5.4.2 Evaluación del impacto ambiental

La evaluación ambiental es el proceso por el cual diferentes estudios, informes técnicos y consultas estiman las repercusiones que un proyecto, instalación o actividad puede producir en el medio ambiente y así proteger la salud humana, mejorar la calidad de vida, velar por la diversidad de especies y conservar la capacidad de reproducción del ecosistema. (Gobierno de la Rioja, 2016).

El proceso de evaluación ambiental entra dentro de los principios de cautela en los que se basa la política de la Unión Europea en el ámbito del medio ambiente, junto con el principio de corrección de los atentados al medio ambiente y el principio de quien contamina es el responsable. Es por ello que para obtener una autorización de proyectos tanto públicos como privados que puedan tener repercusiones en el medio ambiente, estos proyectos deben someterse a una evaluación de los efectos que pueden producirse en el medio. Es el promotor el que facilitará a información apropiada y se completará por la autoridades y el público al que interese el proyecto. La información a proporcionar por el promotor incluye: descripción del proyecto (emplazamiento, diseño, tamaño), descripción de las medidas previstas para evitar, reducir o compensar los efectos adversos significativos, datos para identificar y evaluar los principales efectos sobre el medio ambiente que pueda causar el proyecto, exposición de alternativas estudiadas por el promotor y principales razones de su elección teniendo en cuenta los efectos medioambientales. El público interesado podrá expresar sus opiniones e inquietudes, pudiéndose tener en cuenta por las autoridades, favoreciendo así la responsabilidad y transparencia de la toma de decisiones y fomentando la implicación ciudadana en temas ambientales.

Para facilitar la evaluación, los estados miembros pueden establecer unos umbrales o criterios para evaluar los proyectos, no teniendo la obligación los estados miembros de estudiar caso por caso los proyectos que no sobrepasen esos umbrales fijados o ajenos a ese criterio. Aquellos proyectos que vayan a ser sometidos a evaluación deberán aportar informaciones mínimas relativas al proyecto y sus repercusiones (Directiva 2014/52, de 16 de abril), (Directiva 2011/92/UE, de 13 de diciembre).

6. Conclusiones

- La contaminación del suelo es un problema actual que va adquiriendo cada vez más importancia pero sobre el que todavía no hay demasiado consenso a nivel nacional e internacional, principalmente debido a la heterogeneidad del medio y los contaminantes presentes en él.
- Los principales contaminantes que se encuentran en el suelo son metales pesados y compuestos orgánicos, que proceden en mayor medida de instalaciones industriales y residuos agrícolas y urbanos.
- El origen de la contaminación por metales pesados puede ser natural o antropogénica y pasa a ser peligrosa cuando los contaminantes superan los niveles genéricos de referencia.
- El transporte de los contaminantes en el suelo va a depender de las propiedades del suelo como el pH, condiciones redox, textura, materia orgánica, contenido en óxidos e hidróxidos, contenido en carbonatos y contenido en sales; y dependerá también de las propiedades de los contaminantes. En el caso de los metales pesados influye su forma física y su forma química pero tienden a tener muy baja movilidad, y en el caso de los compuestos orgánicos afectará la solubilidad, el coeficiente de reparto octanol/agua, la presión de vapor y el cociente de adsorción en carbono orgánico.
- Los contaminantes que se encuentran en el suelo pueden eliminarse por volatilización hacia la atmósfera y por lixiviación hacia las aguas, mientras que los procesos de degradación suponen una eliminación eficaz. La adsorción y la precipitación aumentan la permanencia de los contaminantes en el suelo.
- El sector industrial es el principal generador de metales pesados y compuestos orgánicos y por tanto las medidas de control y vigilancia para evitar la contaminación se deben tomar en este nivel.
- Para evitar la contaminación de los suelos se deben emplear medidas preventivas de diseño, medidas preventivas de vigilancia y control, y medidas preventivas operacionales y organizativas.
- La evaluación ambiental es determinante para garantizar la protección del medio ambiente y la salud de los seres humanos y los ecosistemas, por tanto, constituye una herramienta eficaz, ya que incorpora la variable ambiental a los proyectos y garantiza el progreso sostenible.

7. Bibliografía

Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA). 1995. Informe Dobris sobre la situación del medio ambiente en Europa. Punto 7: El suelo.

Arana Jiménez, E., Torá Mouvet I., Luiten P., Boshoven D., Cortés Cabrera E. 2016. Guía Técnica de Prevención de la Contaminación del Suelo en Instalaciones Industriales. Dirección General de Medio Ambiente. Comunidad de Madrid.

Base de Datos Corine Land Cover, 2000. Disponible en:
<http://terrestrial.eionet.eu.int/CLC2000/docs/publications/corinescreen.pdf>.

Bolt, G.H, Bruggenwert, M.G.M (1976). Soil Chemistry: A. Basic Elements. Volumen 5, Parte A, 1-281.

Clothier, B.E, Green, S. 2005. Encyclopedia of Soils in the Environment, 336-343.

Comisión de las Comunidades Europeas. 2006. Estrategia temática para la protección del suelo. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:52006DC0231>

Comunidades Europeas. 2009. Agricultura sostenible y conservación de los suelos.
<https://esdac.jrc.ec.europa.eu/projects/SOCO/FactSheets/ES%20Fact%20Sheet.pdf>

Conde G. 2015. Módulo: Contaminación de los suelos y aguas subterráneas. Materia: Introducción al problema. Máster en Ingeniería y Gestión Medioambiental

Copper Alliance. 2019. About Copper - Copper Alliance. Disponible en:
<https://copperalliance.org/about-copper/>

del Cerro Martín, G., Diamantopoulos Fernández, J. and Morell Rodríguez, I. 2012. Introducción al conocimiento y prevención de los Contaminantes Orgánicos Persistentes. Secretaría General Técnica, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

Directiva 2011/92/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 13 de diciembre de 2011 relativa a la evaluación de las repercusiones de determinados proyectos públicos y privados sobre el medio ambiente.

Directiva 2014/52/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 16 de abril de 2014 por la que se modifica la Directiva 2011/92/UE, relativa a la evaluación de las repercusiones de determinados proyectos públicos y privados sobre el medio ambiente.

Espejo Serrano, R. 2016. La Agricultura de Conservación, herramienta para potenciar el papel del suelo como sumidero de CO₂ atmosférico y defender a los suelos agrícolas de la erosión. Agricultura de Conservación, 33: 90-98

Eurostat. 2014. Focus on Land Cover and Land Use. Disponible en: <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/3217494/5786453/KS-HA-14-001-13-EN.PDF/816f54d5-f56a-4bf4-a6ba-a33fd017c2af>

FAO. 2019: Global Soil Partnership (GSP) Special announcement No. 20, 2 December 2019. <http://www.fao.org/world-soil-day/campaign-materials/en/#c709880>

Galán Huertos, E. and Romero Baena, A. 2008. Contaminación del suelo por metales pesados.

Galán Huertos, E., Gómez Ariza, J., Bellinfante Crocci, N. and Aparicio Fernández, P. 2003. Contaminación de suelos por compuestos orgánicos.

Gobierno de la Rioja. 2016. Evaluación del Impacto Ambiental. Disponible en: <https://www.larioja.org/medio-ambiente/es/prevencion-control-ambiental/evaluacion-impacto-ambiental>

Gopal, R., Neelam, C. and Tapan, A. 2014. Nickel as a Pollutant and its Management. International Research Journal of Environment Sciences Vol. 3 (10), 94-98, October (2014).

Guía Técnica de Identificación de Medidas Preventivas contra la Contaminación del Suelo. 2008. Gobierno Vasco.

Health and Environment Alliance. 2020. Mercury pollution. Disponible en: http://www.env-health.org/IMG/pdf/mercury_chapter2.pdf

Herrera Marcano, T. 2011. La contaminación con cadmio en suelos agrícolas.

Ibáñez, J. 2019. El Potencial Redox de los Suelos: Un Universo invisible bajo nuestros pies. <https://www.madrimasd.org/blogs/universo/2008/01/28/83434>

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Gobierno de México. 2020. Características físico-químicas de los plaguicidas y su transporte en el ambiente. http://www2.inecc.gob.mx/sistemas/plaguicidas/descargas/caracteristicas_fyg_plaguicidas.pdf

Jordán López, A. 2005. Manual de edafología. Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola de la Universidad de Sevilla.

Kabir, E., Ray, S., Kim, K., Yoon, H., Jeon, E., Kim, Y., Cho, Y., Yun, S. and Brown, R. 2012. Current Status of Trace Metal Pollution in Soils Affected by Industrial Activities. The Scientific World Journal, 2012, pp.1-18.

Klaassen C. D., Casarett and Doull's Toxicology. 2008. The basic science of poisons. 7.ª edición. McGraw-Hill. Pg. 942-943

Lenoir, C. y Tornari, G. 2004. Contaminación y Tratamiento del suelo. Disponible en: http://www.sustentabilidad.uai.edu.ar/pdf/ing/cont_y_tratam_suelos.pdf

Maycotte Morales, C., Pereira Morales, C., Restrepo, B E., Mauro, F., Calle Montes, A., Esther Velarde, MJ., Marín Serna GL., Álvarez Mejía, ML., Portela Guarín, H. 2011. Edafología 1. 1º Edición.

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Gobierno de España. 2019. Metales pesados. Disponible en: https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/prob-amb/metales_pesados.aspx

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Gobierno de España. 2020. Suelos Contaminados. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/suelos-contaminados/>

N. Bellinfante & A. Jordán. 2007. Potencial tecnológico de aplicación de los tratamientos de suelos contaminados: situación europea y sugerencias para su adaptación al Estado Español. Tendencias Actuales de la Ciencia del Suelo; Sevilla, 163-165 .

Noulas, C., Tziouvalekas, M. and Karyotis, T. 2018. Zinc in soils, water and food crops. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 49, pp.252-260.

Panagos, P., Van Liedekerke, M., Yigini, Y. and Montanarella, L. 2013. Contaminated Sites in Europe: Review of the Current Situation Based on Data Collected through a European Network. Journal of Environmental and Public Health, pp.1-11.

San Román, J. 2012. Transporte de contaminantes. Departamento de Geología de la Universidad de Salamanca.

Sánchez Gelabert, J. 2008. Compuestos orgánicos persistentes en la Región de Murcia. Dirección General de Calidad Ambiental.

Shadreck, M. 2013. Speciation Of Chromium In Soils, Plants And Waste Water At A FerrochromeSlag Dump In Gweru. International Organization of Scientific Research (IOSR) Journal Of Environmental Science, Toxicology And Food Technology, 7(4), pp.43-49

Stoeppler M., Vahter M. (1994). Techniques and Instrumentation in Analytical Chemistry. Volume 15, Chapter 14: Arsenic. 291 - 320

U.S. Environmental Protection Agency. 2020. Sources of Lead in Soil: A Literature Review.

Vásquez Polo, J., Macías Vázquez, F. and Menjivar Flores, J. 2014. Formas de hierro y aluminio en suelos con diferentes usos en la zona norte del departamento del Magdalena, Colombia.