



**FACULTAD DE FARMACIA
UNIVERSIDAD COMPLUTENSE**

TRABAJO FIN DE GRADO

TÍTULO:

**Contaminación por deposición de Pb en suelos de
áreas periurbanas**

Autor: Ricardo Jaén Martínez-Algora

Fecha: Junio-2020

Tutor: Antonio L. López Lafuente

| | |
|---|----|
| RESUMEN..... | 3 |
| INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES..... | 3 |
| OBJETIVOS..... | 4 |
| RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 4 |
| A. El suelo..... | 4 |
| a) Generalidades..... | 4 |
| b) Propiedades del suelo y su interacción con los contaminantes..... | 5 |
| B. El plomo..... | 8 |
| a) Características del plomo..... | 8 |
| b) Minerales y formas del plomo en la naturaleza..... | 8 |
| c) Ciclo natural del plomo..... | 9 |
| d) Compuestos del plomo y sus usos..... | 9 |
| C. Contaminación por plomo en áreas periurbanas y sus principales consecuencias..... | 10 |
| a) Fuentes de contaminación por plomo..... | 10 |
| b) Distribución del plomo en áreas periurbanas..... | 11 |
| c) Principales consecuencias en la ecología de áreas periurbanas por la contaminación por plomo..... | 13 |
| d) Principales consecuencias sobre la salud humana de la exposición a altas concentraciones de plomo..... | 13 |
| CONCLUSIONES..... | 17 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 18 |

RESUMEN

El plomo es un metal pesado contaminante, no biodegradable y por lo tanto persistente en el medio ambiente. El plomo está presente en los suelos de manera natural, siendo el suelo el principal depósito de este metal pesado, convirtiéndose en un elemento clave para los ecosistemas. El aumento de la industria manufacturera en nuestras sociedades, ha incrementado la concentración del plomo en la naturaleza. Especialmente en áreas próximas a núcleos urbanos, debido en gran medida al aumento de la presencia industrial que rodea las grandes urbes y en consecuencia a las demandas que conlleva la concentración de población. Con este trabajo se pretende estudiar la relación entre el plomo y el suelo, así como la contaminación en áreas periurbanas y sus consecuencias ambientales y sobre la salud humana. *Palabras clave: contaminación de suelos por plomo, metales pesados en áreas periurbanas, toxicidad del plomo, riesgo ecológico, metales pesados. Key words: lead-contaminated soils, heavy metals in peri-urban area, lead toxicity, ecological risk, heavy metals.*

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

Actualmente la contaminación medioambiental se ha convertido en un problema de primer orden. Si bien existe en la población una concienciación generalizada con respecto a la relación que existe en la contaminación del aire y del agua y el impacto negativo sobre los ecosistemas y nuestra propia salud, no sucede lo mismo en el caso del suelo (1). Es clave comprender que el suelo constituye un elemento fundamental para el correcto desarrollo y supervivencia de los ecosistemas, así como un elemento imprescindible para el correcto desarrollo y supervivencia de los organismos vivos, entre ellos el ser humano. El suelo es un recurso no renovable a corto plazo y por lo tanto su protección debe estar al mismo nivel que el agua o el aire (1).

Los usos del plomo (Pb) y los compuestos derivados del mismo fueron descubiertos en épocas prehistóricas. El empleo del mismo se remonta a 4000 años a.C. Ha sido utilizado en sistemas de tuberías y vajilla desde tiempos del Imperio Romano. Hubo un crecimiento paulatino durante la Industrialización, creciendo de manera exponencial con la expansión del uso del automóvil en el siglo XX (2). Sus características físico-químicas (metal blando, maleable, dúctil, baja conductividad, de elevada densidad y resistencia a la corrosión) (3) lo hacen único. Es por ello que, en el siglo XXI, a pesar del amplio conocimiento adquirido sobre el riesgo que supone para el medio ambiente y la salud humana, sigue siendo un metal de elección por su elevada capacidad de aplicación y formas de uso. No fue hasta mediados de los años ochenta que se estableciera una forma oficial por parte de diversos organismos internacionales, una relación entre el suelo y los riesgos de contaminación y afección de la salud. (1)

Muchos núcleos urbanos están expandiendo su territorio hacia sus zonas más próximas (periurbanas). Estas zonas suelen estar ya contaminadas por metales pesados debido a su previo uso como suelo industrial. Reubicando a la población en áreas donde la alta contaminación por metales pesados puede llegar a generar un problema de toxicidad. (4) Se ha observado que las principales fuentes de contaminación por plomo son fábricas, fábricas de gas, depósitos de residuos y aplicaciones de compost, además de vertidos de aguas residuales que provienen de las ciudades. En menor medida o de manera más difusa, la contaminación debida al tráfico, las emisiones industriales, el polvo en suspensión de las calles y la quema de combustibles fósiles. (4)

OBJETIVOS

Mediante este trabajo se pretende realizar una revisión bibliográfica, a través de bases de datos de publicaciones científicas. Mediante artículos relevantes y libros de texto que relacionen el plomo y su interacción con el suelo, la consecuente contaminación que conlleva el uso del plomo a través de actividades humanas, especialmente en áreas periurbanas, y sus consecuencias para el medio ambiente y la salud humana. A saber:

- Conocer el suelo y sus propiedades
- Conocer las características del plomo
- Conocer la interacción entre el plomo y el suelo en zonas periurbanas y sus consecuencias ecológicas y sobre la salud

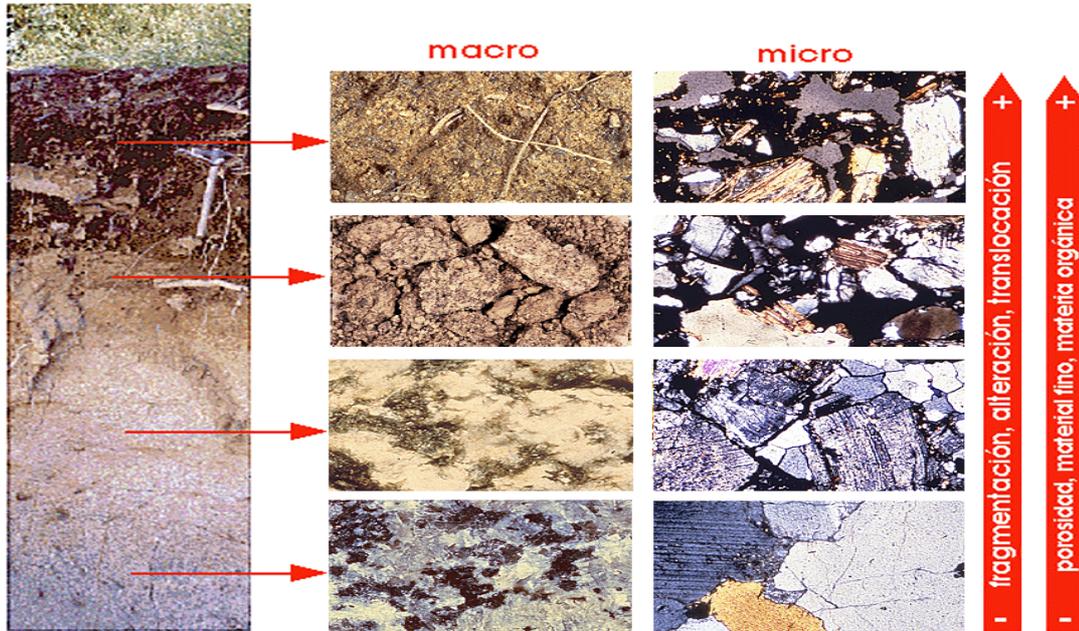
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. El suelo

a) Generalidades

- i. Definido por el RD 9/2005 como: *la capa superior de la corteza terrestre, situada entre el lecho rocoso y la superficie, compuesto por partículas minerales, materia orgánica, agua, aire y organismos vivos y que constituye la interfaz entre la tierra, el aire y el agua, lo que le confiere capacidad de desempeñar tanto funciones naturales como de uso* (5), el suelo se trata de una estructura natural y dinámica, organizada e independiente, con unos componentes, propiedades y génesis específicos y únicos (6). Dicha capa puede ir de centímetros a metros (6). Se trata de un sistema abierto y dinámico, siendo capaz de evolucionar hacia estados más complejos o menos diferenciados, realizando un intercambio de energía y materiales de su entorno. Esta formado por 3 fases: sólida (compuestos orgánicos e inorgánicos), fase líquida (el componente mayoritario es el agua) y fase gaseosa (se localiza en los espacios de la fase sólida pudiendo incorporar iones y sustancias en solución o suspensión al igual que la fase líquida). Además presenta organismos vivos (hongos, bacterias de tamaño micorscópico hasta organismos macroscópicos como insectos, lombrices, etc.) (7) El suelo representa un elemento fundamental en todo tipo de ecosistemas, así como imprescindible y vital para el desarrollo de todo tipo de organismos vivos, entre ellos el ser humano. El suelo es un recurso natural, limitado y no renovable al menos en una escala de tiempo humano (9) lo que implica que su pérdida y degradación no son reversibles en el curso de una vida humana. La formación del suelo es un proceso muy lento: se precisan cientos de años para que el suelo alcance un espesor mínimo de 1 cm. De forma natural el suelo tiende a un estado de equilibrio tras el denominado proceso de edafogénesis para lograr así una calidad adecuada y poder realizar sus funciones de manera correcta (8). Sin embargo, este equilibrio puede verse desestabilizado por numerosas acciones, entre ellas las antrópicas.

- ii. La edafogénesis, por su parte, se define como el proceso de formación y desarrollo de los suelos. Consta de una etapa inicial denominada meteorización donde se engloban procesos físicos y biogeoquímicos que inciden sobre el material originario o roca madre mediante la acción de agentes atmosféricos y la acción del agua dando lugar al material precursor del suelo. Con el paso del tiempo el suelo irá adquiriendo unos componentes, características y propiedades específicas definidas por los factores formadores del suelo (roca, clima, organismos, relieve y tiempo).



Suelo sobre granito en la Sierra de Francia (Salamanca)

Figura 1: Secuencia de transformación de la roca a suelo (Tomado de: Dorronsoro C. Introducción a la Edafología, 2008) (6)

sobre los cuales actuarán los denominados procesos formadores del suelo (adición, pérdida, transformación y translocación) (6,7,8).

- iii. A diferencia del agua o el aire es mucho más complejo definir la calidad del suelo. Su heterogeneidad en composición y funciones impide establecer unos estándares globales que definan un estado ideal. Para definir “calidad del suelo” se debe tener en cuenta diversos factores: su capacidad de ser un elemento fundamental de los ecosistemas, ser medio para el desarrollo de plantas y animales, mantener y aumentar la calidad de aire y agua, y su fundamental contribución a la salud humana (10).
- iv. En el año 2005 se hace público en España conjuntamente por los Ministerios de Medio Ambiente y de Sanidad el RD 9/2005, de 14 de enero, por el que se define suelo contaminado como: *la alteración negativa de las características del suelo por la presencia de compuestos químicos de carácter peligroso de origen humano en concentración tal que comporte un riesgo inaceptable para la salud humana o el medio ambiente* (5).

b) Propiedades del suelo y su interacción con los contaminantes

- i. Poder depurador. Los procesos de autorregulación, la actividad biológica (cerca de 10^{10} bacterias y hongos/g de suelo), química y de filtración que tienen lugar en el suelo son determinantes en la degradación de los contaminantes (11). Parece ser que el suelo es

un reservorio de compuestos tóxicos y que son tanto más peligrosos cuanto mayor sea su persistencia y biodisponibilidad (13). El suelo es capaz de actuar como barrera protectora de otros medios más sensibles (hidrológico, biológico), filtrando, descomponiendo, neutralizando o almacenando contaminantes y disminuyendo en gran parte su biodisponibilidad. Esta capacidad depuradora depende de los parámetros edáficos (desarrollados más detalladamente a continuación) y la actividad biológica que se desarrolla en el mismo. Por ello cada suelo poseerá un límite que en caso de ser rebasado pasará a ser considerado suelo contaminado. El poder amortiguador de un suelo representa la capacidad que tiene para controlar los efectos negativos de los contaminantes y volverlos inocuos o inactivos. Se produce mediante procesos de neutralización, degradación biótica o abiótica, precipitación-disolución, oxidación-reducción, formación de complejos orgánicos o insolubilización. La carga crítica se define como la cantidad máxima admisible de un contaminante, a partir de la que el contaminante está biodisponible en cantidades que pueden ser tóxicas. Esto marca el umbral de toxicidad. Para el plomo la "Capacidad de Carga para Metales Pesado" (LCASHM: Load Capacity of Agricultural Soils for Heavy Metals) se encuentra entre 6750-10125 g/ha/a (12).

- ii. Parámetros edáficos y movilidad de contaminantes. La especiación química y los parámetros edáficos determinan la movilidad y disponibilidad de un metal y, por consiguiente, la sensibilidad de un suelo a la acción de los contaminantes. Si nos fijamos más detenidamente en el perfil de un suelo contaminado comprobaremos cómo, conforme profundizamos, las concentraciones del contaminante decrecen drásticamente. Esto es debido a que en general la movilidad de los metales es muy baja, existiendo un acúmulo más marcado en los primeros centímetros del suelo mientras que la lixiviación a horizontes inferiores se da en muy pequeñas cantidades. Entre los parámetros edáficos encontramos:
- Ph. En general a pH ácido se produce una menor adsorción y aumenta así la disponibilidad de los metales.
 - Textura. Indica el contenido relativo de partículas de diferente tamaño, como la arena, el limo y la arcilla en el suelo. La textura tiene que ver con la facilidad con que se puede trabajar el suelo, la cantidad de agua y aire que retiene y la velocidad con que el agua penetra en el suelo y lo atraviesa (24). Mientras que los suelos arcillosos retienen más metales por adsorción o en el complejo de cambio de los minerales de la arcilla, los suelos arenosos carecen de capacidad de fijación existiendo riesgo de contaminación del nivel freático.
 - Mineralogía de arcillas. Según el mineral de la arcilla existen diferentes valores de superficie específica (cuanto mayor, mayor posibilidad de adsorción) y de descompensación eléctrica.
 - Materia orgánica. Junto a los oxihidróxidos de hierro son componentes más competitivos que los minerales de arcilla. Forma complejos de cambio o quelatos con los metales. En el caso del Pb pueden llegar a formar quelatos muy estables. En muchos casos se forman complejos organometálicos lo que facilita la solubilidad del metal, la disponibilidad y dispersión porque pueden degradarse por los organismos del suelo. Esto conduce a una persistencia.
 - Capacidad de intercambio catiónico. Depende del tipo de minerales de la arcilla (de menor a mayor capacidad de retención: caolín, ilitas, esmectitas, vermiculitas), de la

materia orgánica, de la valencia y del radio iónico hidratado del metal. A mayor tamaño y menor valencia, menos frecuentemente quedan retenidos.

- Condiciones redox. El potencial de oxidación-reducción (Eh) es responsable de que el metal se encuentre en estado oxidado o reducido. Este poder de adsorción será máximo en el punto de carga cero superficial, cuando su competencia con los H⁺ es mínima.

- Carbonatos. Mantienen los niveles de pH elevados provocando la precipitación de los metales pesados.

- Óxidos e hidróxidos de Fe y Mn. Juegan un importante papel en la retención de metales pesados y en su inmovilización. Se encuentran finamente diseminados en la masa de suelo por lo que son muy activos. Por su baja cristalinidad y pequeño tamaño de partícula, tienen una alta capacidad sorcitiva para metales divalentes, especialmente Cu²⁺ y Pb²⁺.

- Salinidad. El aumento de la salinidad en un primer momento incrementa la movilización de metales: los cationes Na⁺ y K⁺ pueden reemplazar a metales pesados en lugares de intercambio catiónico. Sin embargo, en una segunda fase aumenta la retención de los mismos: los aniones Cl⁻ y sulfato pueden formar compuestos más estables con metales tales como Pb²⁺.

iii. Formas de presentarse un contaminante en el suelo y su disponibilidad relativa (12).

De manera general los contaminantes en el suelo se pueden hallar como partículas, películas líquidas, adsorbidos, absorbidos, disueltos en el agua intersticial de los poros, o como fases sólidas en los poros. Cada contaminante posee un comportamiento diferente en cada caso. Por ello es clave no sólo realizar un análisis químico (medida orientativa sobre la peligrosidad potencial), sino también cómo se encuentra el elemento (forma física y química) y sus fracciones asimilables (medida directa de la peligrosidad real). Según se encuentre el metal retenido en el suelo, si este está libre en solución intersticial o fase sólida, y su unión a las partículas del suelo y forma química (especiación) definirán su acceso a la cadena trófica.

iv. Dinámica de los contaminantes en el suelo (11). Tres son los procesos que se dan en el

suelo: transporte (difusión iónica o molecular, dispersión hidrodinámica y volatilización), retención (adsorción, intercambio iónico o precipitación química) y transformación (mineralización, humificación, cementación, argilización, iluviación, etc). El suelo no es selectivo con los contaminantes y puede actuar sobre materia orgánica e inorgánica, aniones y cationes, ácidos y bases, oxidantes y reductores, metales, sales, coloides, microorganismos, etc. El movimiento y destino de los compuestos a lo largo del perfil viene condicionado por numerosos y complejos procesos físicos, químicos y biológicos. Los contaminantes que llegan al suelo pueden encontrarse en la superficie del suelo procedentes de deposiciones naturales, vertidos antrópicos, deposición aérea, lluvia, deposición fluvial, o en el interior del perfil procedentes de infiltrados, transformación in situ o ascenso capilar de capas freáticas más profundas. Una vez depositados en superficie pueden volatilizarse o infiltrarse (atravesando sustrato sin reaccionar con los constituyentes del suelo o interactuar con ellos sufriendo procesos de neutralización, degradación, adsorción, complejación o precipitación), biodegradarse o trasladarse a otras zonas por acción de organismos o escorrentías. Finalmente serán retenidos o movilizado.

B. El plomo

El plomo es un metal pesado de amplia distribución geográfica, abundante en la corteza terrestre (13 ppm), muy homogéneo lo que genera que sea un metal de alta biodisponibilidad (14). Debido a su naturaleza no biodegradable y su capacidad de persistencia en el medio (agua, suelo, polvo, atmósfera) provoca que tenga una gran bioacumulación y biomagnificación en la cadena trófica, acumulándose principalmente en cultivos, la contaminación de agua superficial y subterránea, y por lo tanto afecta a la salud humana de manera directa.

a) Características del plomo (15)

| | |
|---|--------------|
| <i>Metal pesado</i> | Pb |
| <i>Grupo</i> | IV |
| <i>Periodo</i> | 6 |
| <i>Nº atómico</i> | 82 |
| <i>Masa atómica</i> | 207,2 |
| <i>Densidad (g/cm)</i> | 11,4 |
| <i>Punto de fusión y ebullición (°C.)</i> | 327,4 / 1725 |
| <i>Coloración</i> | Gris azulado |

Presenta unas características físico-químicas tales como; metal pesado blando, maleable, dúctil, de baja conductibilidad, elevada densidad y resistencia a la corrosión (3).

b) Minerales y formas del plomo en la naturaleza

Dado su amplia distribución es muy común la presencia de compuestos de plomo en las rocas. Las formas predominantes de Pb insoluble es en forma de fosfatos, carbonatos, (hidro)óxidos y sobre todo la forma sólida más estable es el sulfato de plomo (PbS). Cuando la concentración del sulfato es elevada y existen condiciones anaeróbicas, se produce un compuesto volátil, el plomo tetrametilo debido a la alquilación microbiana (15).

La forma predominante de galena cuando es expuesta a unas condiciones oxidantes, ya sean atmosféricas o por oxígeno disuelto en agua, hace que se transforme a cerusita (PbCO₃), anglesita (PbCO₄) y piromorfita (haluro o hidróxido de fosfato de plomo, siendo la forma más estable de todas) debido a la oxidación del sulfuro a sulfato de plomo (16)

c) Ciclo natural del plomo

El plomo en su ciclo natural puede generarse a partir de fuentes geogénicas o antropogénicas, llegando con facilidad a alcanzar distintos niveles de la litosfera, atmósfera e hidrosfera. Desde la atmósfera puede depositarse en la litosfera en forma de partículas sólidas o por precipitación de las partículas gaseosas a través de una vía seca, o transportado por las precipitaciones a través de vía húmeda. En este último caso se puede incorporar a la hidrosfera entrando el plomo en el propio ciclo del agua. En todos los casos el plomo puede ser incorporado a la cadena trófica por inhalación, absorción directa (alotriofagia, a través de la piel, raíces en el caso de plantas, etc.). El plomo depositado puede volatilizarse y de nuevo pasar a la atmósfera, puede ser adsorbido por arcillas y materia orgánica del suelo, formar complejos con otros compuestos orgánicos o aniones, precipitar formando sales, minerales u otros compuestos, coprecipitar con otros compuestos, o movilizarse pasando a otros nivel freáticos (3, 14).

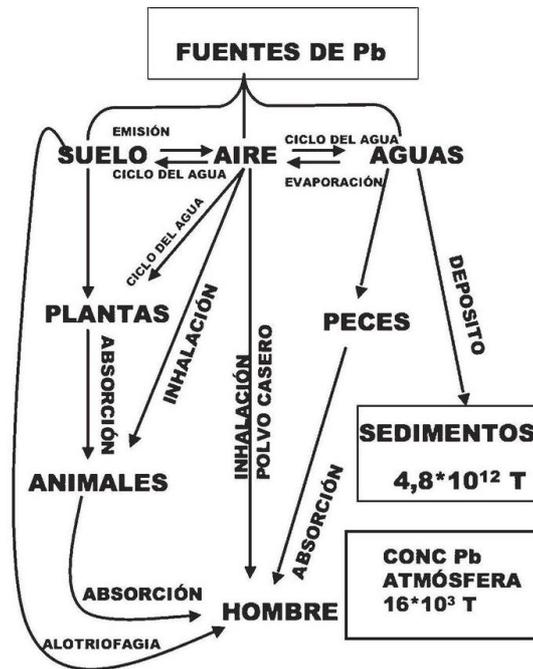


Figura 2: Ciclo natural del plomo (Tomado de: Doadrio Villarejo, Antonio L. *Ecotoxicología y toxicología del plomo*, 2006) (14)

d) Compuestos del plomo y sus usos (14, 15)

El plomo como elemento químico puede estar presente de dos maneras diferentes, formando parte de compuestos inorgánicos y orgánicos.

i. Compuestos inorgánico

Pb (II) y Pb (IV)

- Pb (II): Predominan formas iónicas.
- Pb (IV): Predominan formas covalentes.

Óxidos de Pb

- PbO: Compuesto estable usado en pigmentos, esmaltes vítreos y vidrios cerámicos.
- PbO₂: Compuesto oxidante y estable usado en síntesis orgánica, tinción y pirotecnia.
- Pb₃O₄ (Minio): Compuesto soluble a excepción de los anteriores usado como pigmento.

Haluros de Pb

- PbCl₂: En general todos los haluros son poco solubles, en este caso es usado como pigmento y también como soldador o fundente.

Oxosales

- Pb(NO₃)₂: Compuesto soluble en agua usado en técnicas de grabado, como mordiente y en fabricación de explosivos.

- PbSO_4 : Compuesto insoluble usado en forma de sulfato tribásico en la estabilización del PVC.
- $2\text{PbCO}_3 \cdot \text{Pb}(\text{OH})_2$: Compuesto insoluble usado en pigmentos y pinturas (blanco de plomo).
- PbCrO_4 : Compuesto insoluble usado en pinturas y plásticos.

ii. Compuestos orgánicos

Derivados alquílicos de Pb (IV): Estos compuestos presentan un carácter liposoluble, son volátiles y su descomposición es lenta dejando Pb inorgánico libre en el proceso. Los de mayor importancia son tetrametilo, dimetilo, tetraetilo y dietilo, usados como antidetonantes de gasolinas. Este uso tradicional de estos compuestos va en detrimento por la imposición de las gasolinas sin plomo en el mercado.

C. Contaminación por plomo en áreas periurbanas y sus principales consecuencias

a) Fuentes de contaminación por plomo

El plomo puede proceder de dos fuentes bien diferenciadas, sería una primera fuente natural, que son fuentes geogénicas generadas a partir de sucesos naturales y procesos ecológicos. Este tipo de fuentes en proporción es insignificante en comparación al segundo tipo que son las fuentes antropogénicas, principales causantes de la contaminación por plomo (12).

i. Fuentes geogénicas

Las principales fuentes de plomo procedentes de fuentes geogénicas son erupciones volcánicas, incendios naturales, productos de reacciones químicas y/o biológicas, etc. (11). Los metales como el plomo, deben estar geodisponibles (proceso de liberación a la superficie o biosfera de un elemento o compuesto de un determinado material terrestre previamente expuesto por un proceso físico, químico o biológico). Esta geodisponibilidad del plomo es el paso de la roca madre a los suelos a través de una liberación por meteorización o emisión (procedente de erupciones volcánicas o lixiviados de mineralizaciones). Este tipo de liberaciones depende en gran medida de la estructura y estabilidad termodinámica de los minerales de la roca madre. El papel de los microorganismos para la liberación es clave, ya que participan activamente en los ciclos biogeoquímicos. El plomo liberado a partir de fuentes geogénicas no suele rebasar los niveles umbral de toxicidad, debido a que se suele encontrar en formas estables y por lo tanto poco disponibles (12).

ii. Fuentes antropogénicas

Las fuentes antropogénicas de plomo están diferenciadas en función del tipo de actividad del que procede la emisión del plomo, con un factor en común que sería la manufacturación o intervención del ser humano en ese proceso (agrícola, industrial, etc.) (11).

- Actividades agrícolas: uso del plomo en fungicida, pesticidas y herbicidas (14).
- Actividades industriales:
 - Industria de productos químicos y fábricas: uso del plomo en pinturas, barnices, pigmentos, etc. (14).

- Fábricas de baterías de plomo-ácido: usado como antidetonante de combustibles, actualmente está en desuso en casi todos los países del mundo.
- Antiguas áreas de industria ligada al plomo: zonas donde la actividad ha cesado pero suponen un punto de riesgo de contaminación (4).
- Centrales térmicas: usadas para generar energía eléctrica pueden generar vértidos de plomo (12).
- Actividades laborales: profesiones como pintores, mineros, operarios en industria relacionada con el plomo pueden ser factores de riesgo y fuentes de contaminación por plomo. Todo ello debido al transporte a través de la indumentaria y herramientas pudiendo generar contaminación en sus ámbitos domésticos.
- Actividades domésticas:
 - Pinturas y barnices: el desgaste y la consiguiente emisión de partículas de pinturas, revestimientos y barnices en el ámbito doméstico puede suponer una fuente de contaminación por plomo.
 - Alimentos: la presencia del plomo en alimentos vegetales dependerá del propio suelo del que proceden y la concentración en el mismo. Alimentos en conserva con soldaduras de plomo pueden generar liberación de plomo sobre el alimento, especialmente alimentos y bebidas con carácter ácido. Así mismo la migración puede proceder de vajillas de cerámica o cerámica vidriada con plomo. El consumo de tabaco aumenta también la exposición al plomo.
 - Agua de consumo: el plomo presente en aguas de consumo rara vez procede de fuentes naturales. Lo habitual de una contaminación por plomo de aguas sea debido al contacto con cañerías y tuberías que presentan plomo en sus estructuras. Del mismo modo, aguas blandas y ácidas disuelven la mayor parte del plomo (17).
- Residuos: aproximadamente el 10% de la basura está compuesta por metales pesados, éstos suelen proceder de basura electrónica, vertidos y desechos. Este tipo de residuos pueden generar un problema sobre aguas subterráneas ya que suelen ser enterrados (12).
- Otros

b) Distribución del plomo en áreas periurbanas

- La mayoría de las grandes ciudades están en continua expansión a través de sus propias áreas periurbanas, albergando en cada expansión más y más capacidad de población. Este suelo de áreas periurbanas, en muchos de los casos, presenta una potencial contaminación por metales pesados y su consecuente efecto tóxico sobre la ecología y la salud debido a las actividades realizadas previamente en dicho suelo. Principalmente son vertidos, contaminación y en algunos casos, uso de abonos y fertilizantes en agricultura (4).

A pesar de que el plomo está presente en áreas periurbanas, no suele exceder los límites de concentración legales establecidos por los distintos organismos internacionales y no existe en la actualidad un riesgo para la salud humana, pero la propia contaminación puede resultar un riesgo potencial en el futuro (18, 20).

- La tendencia del plomo en cuanto a su distribución en áreas periurbanas es decreciente a medida que nos alejamos del centro de la zona urbana. Este aumento de la concentración está inversamente relacionado a medida que aumentamos la distancia del centro de las ciudades donde está la mayor densidad de tráfico, principal generador de deposición de

plomo (4, 18). La tendencia es decreciente hacia zonas periurbanas desde el centro de la ciudad porque existe menor actividad de tráfico rodado, sin embargo en estas zonas la presencia de plomo se debe a actividades industriales y agrícolas (vertidos industriales y urbanos no tratados y el uso de fertilizantes fosfatados en la agricultura) cuya implicación es menor cuantitativamente en la deposición de plomo que el tráfico rodado del centro de las ciudades. Estas son las principales fuentes de plomo en áreas urbanas y periurbanas (18). Esta misma tendencia de concentración decreciente a medida que nos alejamos del centro de las ciudades también se ve reflejado en el área urbana propiamente dicha, y está íntimamente relacionado con el intenso aumento de las actividades antropogénicas en estas zonas urbanas, siendo las fuentes geogénicas prácticamente inexistentes en la influencia de la presencia de plomo en áreas urbanas y periurbanas (19). También se relaciona la concentración de plomo en áreas periurbanas con el transporte y deposición de partículas a través del aire que se producen en la zona urbana por la presencia de tráfico rodado. Estas partículas se acumulan en zonas de carretera y su transporte a través del aire se limita en gran medida a estas zonas próximas (4). Otro factor antropogénico de acumulación de plomo en áreas periurbanas que cabe destacar, es la quema de residuos agrícolas en la época de verano (20).

- Dependiendo los diferentes usos del suelo, se ha observado que existe una concentración decreciente de plomo biodisponible: praderas, tierras baldías y tierras cultivables respectivamente. Esto es debido a la modificación de la estructura del suelo y la capacidad de unión del metal. Se han observado una correlación positiva pero no concluyente, entre el contenido de las fracciones granulométrica (arena, limo y arcilla) de estos suelos y la concentración de plomo, así mismo de la cantidad de materia orgánica disponible. Estos resultados no otorgan conclusiones claras de correlación entre las propiedades de estos usos del suelo, con la concentración de plomo (22).
- Las características del suelo son un factor importante en cuanto a cómo se concentra el plomo en el mismo. Dado que presenta una mayor tendencia de acumulación en zonas de fracción fina, que en zonas de mayor erosión y pedregosidad. Esto es debido a que los metales tienden a adsorberse sobre arcillas de la fracción fina. Existe evidencia de que no solo se encuentra formando complejos, sino en forma de precipitados (20). Por ello las diferencias en la litología provoca una notable variabilidad en los resultados de los estudios de distribución del plomo (4).
- Se ha observado que la distribución del perfil de plomo muestra una disminución con la profundidad, presentando un gradiente vertical decreciente en cuanto a concentración de plomo en el suelo (22).

El plomo en definitiva es un metal que tiende a acumularse en áreas propiamente urbanas, siendo menor su concentración en áreas periurbanas (19, 20), siguiendo una tendencia lineal decreciente a medida que nos alejamos distancialmente del núcleo urbano (4, 19).

c) Principales consecuencias en la ecología de áreas periurbanas por la contaminación por plomo

El plomo en áreas periurbanas no suele exceder los límites de los niveles de concentración establecidos por los organismos internacionales (4, 18, 20). A pesar de ello, existe un riesgo potencial en las áreas periurbanas industriales que han sido recalificadas a suelo urbanizable y por lo tanto de uso residencial. Principalmente se han encontrado elevadas concentraciones de plomo en suelos adyacentes a industrias de fundición de metales no ferrosos, fabricación de baterías de plomo-ácido, minería y fundiciones (21).

El factor de riesgo ecológico más importante es la capacidad de movilidad del plomo y por lo tanto su biodisponibilidad, ya que es el plomo que puede introducirse en la cadena trófica. Los principales mecanismos de movilidad y biodisponibilidad del plomo son la formación de complejos de superficie, el intercambio iónico y la adsorción a la fase sólida del suelo. El comportamiento, y por lo tanto la evaluación del riesgo ecológico del suelo, que ejerce sobre el medio ambiente, puede ser observado teniendo en cuenta las propiedades que presenta el suelo (pH, potencial redox, contenido de materia orgánica, óxidos de Fe y Mn, y presencia de carbonato cálcico), ya que son factores condicionantes para su capacidad de movilidad y biodisponibilidad (22).

El carbonato cálcico proporciona un efecto alcalino sobre el suelo, esto favorece la unión de metales como el plomo a minerales estables de carbonato. También la presencia de materia mineral y orgánica proporciona una unión estable con el plomo, disminuyendo el riesgo ecológico ya que lo hace menos biodisponible. El pH del suelo es un factor muy importante para la movilidad de los metales. Cuando encontramos un pH bajo en el suelo (como pueden encontrarse en bosques de coníferas) la movilidad del plomo aumenta, mientras que disminuye a medida que aumenta el pH (22).

La textura y la conformación del suelo son factores que también influyen en el grado de impacto ecológico de la contaminación por plomo en áreas periurbanas. Los suelos con mayor pedregosidad y erosión tiende a presentar menor concentración de metales que los que poseen una alta presencia de arcillas, que permite la adsorción en superficie, y por tanto una menor biodisponibilidad del plomo y un menor riesgo ecológico (4).

En definitiva, para realizar un estudio de contaminación por plomo y su impacto sobre la ecología de los suelos de áreas periurbanas es necesario un estudio de manera singular para cada tipo de suelo y el uso que se está dando. Ya que se ha observado que existe una gran variabilidad, dependiendo en gran medida del pH, la presencia de materia orgánica y carbonatos del suelo (22), al igual que de la textura y la conformación del suelo (erosión, relieve y pedregosidad) (4).

d) Principales consecuencias sobre la salud humana de la exposición a altas concentraciones de plomo

i. Toxicocinética:

Existen diferentes vías por las que el plomo puede absorberse en nuestro organismo. Las principales vías de entrada son la vía gastrointestinal, respiratoria y dérmica (14). La

absorción a través de la vía gastrointestinal, el plomo formando compuestos orgánicos es prácticamente el total del ingerido, mientras que formando compuestos inorgánicos es de alrededor del 20% dependiendo en gran medida de la presencia o no de iones de calcio y hierro ya que usan el mismo transportador intestinal. Cuando existe déficit de hierro, se ha observado en modelos con ratas, que la absorción de plomo será mayor debido a la afinidad del plomo con las proteínas de unión al hierro. La absorción por vía respiratoria dependerá del tamaño de partícula que se introducen en el sistema respiratorio, la partícula de mayor tamaño (menores de $2,5 \mu\text{m}$) se tienden a depositar en las vías respiratorias ciliadas pudiendo ser transportadas hacia el esófago y allí ingeridas, mientras que las de menor tamaño (mayores de $1 \mu\text{m}$) se depositan en los alveólos y son absorbidas por células fagocíticas. A través de esta vía se absorbe alrededor del 95% del plomo inhalado (23). Las únicas formas del plomo que se puede absorber a través de la vía dérmica son los compuestos orgánicos liposolubles (14).

El plomo una vez ingresa en el torrente sanguíneo se va a introducir en los glóbulos rojos por diversos mecanismos de entrada, principalmente a través de proteínas de intercambio iónico dependientes de bicarbonato (90% del plomo total). El plomo presenta una alta unión a proteínas plasmáticas (99%) como la albúmina. Existe una baja proporción del plomo que permanece en el torrente sanguíneo ya que tiene tendencia a acumularse en tejidos mineralizados (huesos y dientes), la distribución hacia tejidos blandos (no mineralizados) como son el cerebro, los riñones y las gónadas es inferior al 5% del total y el plomo remanente se dirige hacia su metabolismo y eliminación. Presenta una vida media en adultos de entre 28 y 36 días (23).

El plomo tiende a eliminarse inalterado a través de la orina y de las heces. Las formas inorgánicas pasan directamente a orina, siendo nulo su metabolismo en el hígado, mientras que las formas orgánicas se metabolizan en el hígado y son eliminadas a través de heces por formación de complejos con la bilis. Presenta un aclaramiento renal aproximado de entre 20 y 30 ml/minuto en adultos. Este aclaramiento del plomo en sangre curiosamente puede verse alterado si la concentración plasmática del plomo es superior a $25 \mu\text{g/ml}$. Este proceso puede ser debido a varias razones como que el plomo forma complejos de bajo peso molecular con proteínas y cambia su tasa filtración glomerular, una reabsorción saturable de plomo en el glomérulo que conduce a una menor filtración de plomo, o tal vez por una nefrotoxicidad inducida que reduce su eliminación. La excreción del plomo en heces está menos caracterizada, se sabe que proviene del plomo de bilis, líquido gástrico y saliva (23).

ii. Mecanismo de acción (23):

El plomo presenta actividad en muchos niveles celulares, imitando en muchos casos la acción del calcio y del hierro alterando procesos homeostáticos de la célula. Muchos de estos procesos tóxicos comparten mecanismo, los principales son:

- La proteína quinasa C reactiva (PKC) se encarga de procesos de señalización celular a través de receptores y es dependiente de calcio y diacilglicerol. En el caso de las proteínas dependientes de calcio presentan un dominio de unión al calcio que es aprovechado por el plomo para unirse y condicionar la actividad de la proteína. A bajas concentraciones de

plomo activan la proteína, mientras que a altas concentraciones de plomo antagonizan el calcio y se une a un sitio diferente que produce la inhibición de la actividad.

- El plomo puede desplazar los metales de las metaloproteínas alterando su actividad.
- Inhibe los factores de transcripción de los “dedos de zinc” Cys2/Hys2 TFIIIA y Sp1 in vitro compitiendo por los sitios de unión al zinc.
- El plomo es un potente inductor del estrés oxidativo que daña los lípidos y el ADN. Disminuye la actividad de ciertas enzimas antioxidantes provocando un ambiente oxidante en las células. Inhibiendo enzimas como la Cu/Zn Superóxido dismutasa (SOD), MnSOD y Glutathion peroxidasa. La inhibición se debe a la sustitución del plomo por los metales divalentes contenidos en la enzima. Por último el plomo ingresa en las mitocondrias utilizando el transportador de calcio. Este proceso desregula los niveles de calcio intracelulares y genera especies reactivas de oxígeno provocando el daño mitocondrial y por lo tanto celular.

iii. Toxicología y efectos sobre la salud humana (14)

El plomo es capaz de dirigirse a diversos órganos, en este apartado voy a explicar la toxicología y su consecuente daño multiorgánico:

- **Neurotoxicidad:** El plomo ingresa en el cerebro a través del líquido cefalorraquídeo y la barrera hematoencefálica, las vuelve permeables generando una inflamación cerebral, hernia, compresión ventricular, hemorragias cerebrales y patequiales, trombosis y arterioesclerosis. Altera la correcta homeostasis, así como la señalización celular. En el cerebro adulto la exposición a altos niveles de plomo presenta como principal efecto el desarrollo de encefalopatía. Esta patología cursa con muy diversos síntomas: Desde letargo, irritabilidad, dolor de cabeza, temblor muscular, hasta delirio, convulsiones, parálisis, coma y muerte. En el caso de un cerebro en desarrollo como el de los niños es más susceptible de provocar daños más severos e irreparables, dependiendo de la cantidad y el tiempo de exposición al plomo. Al igual que en adultos desarrollan encefalopatía con síntomas como hiperirritabilidad, ataxia, convulsiones, coma y muerte. La exposición a menores niveles de concentración de plomo durante el desarrollo también ha sido asociado con comportamientos delincuentes y disminución del coeficiente intelectual. A nivel del sistema nervioso periférico el plomo provoca desórdenes motores que provocan tensión muscular en muñecas y tobillos, provocando a los afectados andar de puntillas o con la mano flexionada hacia abajo. Otros síntomas pueden incluir debilidad extensora de las extremidades superiores distales y debilidad en la flexión dorsal del pie. Todo ello está relacionado con la alteración de la velocidad de la conducción nerviosa interneuronal que se ve afectada por la toxicidad del plomo.
- **Inmuno- y hematoxicidad:** El plomo es capaz de ingresar en los eritrocitos de manera eficaz. Se encuentra principalmente unido a la enzima ALAD, esta enzima participa en la síntesis de porfirina y del grupo hemo usando zinc en su centro catalítico. Este zinc es sustituido por el plomo inhibe su actividad. También inactiva enzimas antioxidantes generando un mayor estrés oxidativo a nivel sanguíneo. Uno de los signos por intoxicación por plomo es la anemia. Esta anemia se debe a la inhibición de la enzima ALAD y el aumento de porfirinas urunarias, coproporfirina y ALA (precursor del grupo hemo en su síntesis). La anemia por altos niveles de exposición al

plomo es hemolítica, mientras que a bajos niveles de exposición se caracteriza por una anemia hipocrómica, normocítica o microcítica con reticulocitosis.

El plomo se ha demostrado que actúa como inmunosupresor, disminuye la producción de anticuerpos y células inmunes. En humanos no se ha descrito el tipo de anticuerpos que se ven disminuidos, ya que afecta a Ig G, Ig A e Ig M. En el caso de las células inmunes se ha observado que altera el número y función de las mismas. Pudiendo ser aumentadas como en algunos casos observados sobre linfocitos B, disminución de linfocitos T o alteración de macrófagos produciendo quimiotaxis deteriorada. Todos estos resultados son bastante erráticos, dependiendo del estudio presentan aumento, disminución o no alteración de los tipos de células inmunes.

- **Nefrotoxicidad:** el plomo produce disfunción renal tras una exposición aguda o crónica. La nefropatía aguda se caracteriza por producir síndrome de Fanconi, un déficit generalizado del transporte tubular que permite el transporte de glucosa, aminoácidos, ácido úrico, fosfato y bicarbonato en la orina en lugar de ser reabsorbidos. La pérdida de bicarbonato puede provocar acidosis tubular renal y la pérdida de fosfato generar osteomalacia. El daño renal se debe a distintos factores como la formación de agregados de proteínas intracelulares de complejos de plomo, la disfunción mitocondrial impidiendo el transporte activo de iones, el estrés oxidativo con producción de ROS y apoptosis celular por el estrés oxidativo y la disfunción mitocondrial. Existe una correlación entre la exposición al plomo y el aumento de la presión arterial. Esto es debido a que la actividad del sistema nervioso simpático está aumentada, provocando una mayor actividad del sistema renina-angiotensina-aldosterona, aumentando la cantidad de renina, y por lo tanto de aldosterona que genera retención de agua, unido a la disminución de óxido nítrico (vasodilatador) que provocan un aumento de la presión arterial.
- **Toxicidad reproductiva:** el plomo se ha descrito como una sustancia altamente abortiva en mujeres, produciendo alta genotoxicidad en el feto en desarrollo debido a la capacidad del plomo de causar aberraciones cromosómicas y roturas de cromátidas en el feto. Produce también partos prematuros y niños que nacen con bajo peso. En el caso de los hombres tiene alta actividad espermicida. El plomo está asociado con baja libido, bajo volumen de semen y recuento de espermatozoides, aumento de la morfología anormal de espermatozoides y disminución de la motilidad de espermatozoides.
- **Osteotoxicidad:** el hueso es el principal distribuidor de plomo en el organismo ya que es donde se almacena mayoritariamente. En la formación del hueso el plomo sustituye al calcio en la formación sales de fosfato que lo constituyen. Durante la remodelación ósea es cuando el plomo almacenado en el hueso puede ser liberado al organismo. Las personas expuestas al plomo presentan debilidad muscular, dolor, calambres y dolor en las articulaciones lo que sugiere que el plomo actúa sobre el sistema esquelético. El plomo se ha correlacionado con una disminución del crecimiento esquelético con disminución de altura, peso y circunferencia del tórax. En adulto provoca osteoporosis, alteración de la cicatrización de fracturas y osteoartritis. Todo ello con disminución de la densidad ósea y del contenido de calcio.

CONCLUSIONES

Podemos concluir que el plomo es un metal pesado presente en la naturaleza e involucrado activamente en los ciclos biogeoquímicos y en la formación y estructuración del suelo a pesar de que se encuentre en baja proporción. La presencia de plomo en el suelo está íntimamente ligada a actividades antrópicas y por ello, el ser humano es el principal causante de la contaminación por plomo en áreas periurbanas. En los estudios observados sobre áreas periurbanas cabe destacar que ninguno de los autores hace referencia a que exista en estas zonas una elevada concentración y contaminación por plomo según los criterios preestablecidos por los diversos organismos encargados, pero puede convertirse a futuro en un serio problema ecológico y para la salud de los seres vivos si se incorpora a la cadena trófica y no se controlan sus niveles en la naturaleza. Debido a su capacidad para alterar la homeostasis celular a distintos niveles, genera un estrés oxidativo y daño celular, en muchos casos irreparable. Este daño multiorgánico conlleva desde encefalopatía y déficit de desarrollo cognitivo a nivel del sistema nervioso central, desórdenes motores por la afectación del sistema nervioso periférico, anemia e inmunodeficiencia, nefropatía, disfunción reproductiva, capacidad abortiva y daños en el feto en desarrollo, osteoporosis y alteración en la movilidad muscular y articular. La exposición a altas concentraciones de plomo produce un daño multiorgánico severo con diversos problemas en la salud humana, pudiendo llegar a convertirse en un factor de mortalidad sobre la población.

BIBLIOGRAFÍA

1. López Lafuente, Antonio L. Suelo y salud Rev.salud ambient. 2015;15(1)74-75. ojs.diffundit.com/index.php/rsa/article/download/727/667
2. World Health Organization International Agency for Research on Cancer, 2006. Inorganic and organic lead compounds. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 87,p.529 <http://library.wur.nl/WebQuery/clc/1833577>
3. Wani A.L., Ara A., Usmani J.A. Lead toxicity: A review. Interdisciplinary Toxicology. 2015;8(2):55-64. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4961898/>
4. Vázquez de la Cueva, A., Marchant, B.P., Quintana, J.R. et al. Spatial variation of trace elements in the peri-urban soil of Madrid. J Soils Sediments 14, 78–88 (2014). <https://doi.org/10.1007/s11368-013-0772-5>
5. BOE núm. 15, de 18 de enero de 2005. Real Decreto 9/2005, de 14 de enero, por el que se establece la Relación de Actividades Potencialmente Contaminantes del Suelo y los Criterios y Estándares para la Declaración de Suelos Contaminados. Disponible en: <https://www.boe.es/boe/dias/2005/01/18/pdfs/A01833-01843.pdf>
6. Dorronsoro C., 2008. Introducción a la Edafología. Libro on-line: <http://edafologia.ugr.es/>
7. Porta J.; López-Acevedo, M.; Poch R.M., 2008. Introducción a la Edafología. Uso y protección del suelo. Ediciones Mundi-Prensa
8. Porta, J.; López-Acevedo, M. y Roquero, C. 1999. Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente segunda edición. Ediciones MundiPrensa
9. Pan Ming Huang, Yuncong Li, Malcolm E. Sumner, Handbook of soil science. 1st Ed., 2000
10. Karlen, D. L., Mausbach, M.J., Doran, J. W., Cline, R.G., Harris, R. F., Schuman, G.E. (1997): Soil quality: A concept, definition and framework for evaluation. Soil Sci. Soc. Am. J. 61: 4-10. Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/a0f7/fd8e56f86acdc596aa86364b49610deb2550.pdf>
11. López Lafuente, A., Biorremediación y Fitorremediación en suelos contaminados, An. R. Acad. Nac. Farm; Monografía XXII. Contaminación y Salud (2009) Pag. 69-101. Disponible en: <http://www.analesranf.com/index.php/mono/article/viewFile/598/615>
12. Galán Huertos, Emilio, Romero Baena, Antonio J. Contaminación de Suelos Por Metales Pesados. Macla. 2008. Núm. 10. Pag. 48-60. Disponible en: http://www.ehu.eus/sem/macla_pdf/macla10/Macla10_48.pdf
13. Hernando Costa, J., López Lafuente, A., Degradación de suelo por contaminación y su repercusión en la salud humana. An. R. Acad. Nac. Farm; Monografía XXII. Contaminación y Salud (2009) Pag. 47-68 Disponible en: <https://www.analesranf.com/index.php/mono/article/download/597/614>
14. Doadrio Villarejo, Antonio L., Ecotoxicología y acción toxicológica del plomo, An. R. Acad. Nac. Farm; 72(3): 409-422, jul. 2006 Disponible en: <https://docplayer.es/amp/19313096-Ecotoxicologia-y-accion-toxicologica-del-plomo-recibido-el-18-de-septiembre-de-2006-antonio-l-doadrio-villarejo-1-academico-de-numero-de-la-ranf.html>
15. Raymond A. Wuana and Felix E. Okieimen, Heavy Metals in Contaminated Soils: A Review of Sources, Chemistry, Risks and Best Available Strategies for Remediation, ISRN Ecology, vol. 2011, Article ID 402647, 20 pages, 2011. doi:10.5402/2011/402647. Disponible en: <https://www.hindawi.com/journals/isrn/2011/402647/>

16. Hettiarachchi, G. M. and Pierzynski, G. M. (2004), Soil lead bioavailability and in situ remediation of lead-contaminated soils: A review. *Environmental Progress & Sustainable Energy* 23(1), 78-93, 2004. 136, 2004. Disponible en: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ep.10004/full>
17. World Health Organization, 2010. Exposure to Lead: A major public health concern. Disponible en: <http://www.who.int/ipcs/features/lead..pdf>
18. Yousaf, B., Amina, Liu, G., Wang, R., Imtiaz, M., Rizwan, M. S., ... Si, Y. (2016). The importance of evaluating metal exposure and predicting human health risks in urban–periurban environments influenced by emerging industry. *Chemosphere*, 150, 79–89. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653516301588?via%3Dihub>
19. Xia, X., Chen, X., Liu, R., & Liu, H. (2011). Heavy metals in urban soils with various types of land use in Beijing, China. *Journal of Hazardous Materials*, 186(2-3), 2043–2050. doi:10.1016/j.jhazmat.2010.12.104 Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389410016845?via%3Dihub>
20. Moreno AM, Quintana JR, Pérez L, Parra JG (2006). Factors influencing lead sorption-desorption at variable added metal concentrations in Rhodoxeralfs. *Chemosphere*. Jul;64(5):758-63 Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653505012890?via%3Dihub>
21. Chen, Y., Jiang, X., Wang, Y., & Zhuang, D. (2018). Spatial characteristics of heavy metal pollution and the potential ecological risk of a typical mining area: A case study in China. *Process Safety and Environmental Protection*, 113, 204–219 Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957582017303439?via%3Dihub>
22. Wieczorek J, Baran A, Urbański K, Mazurek R, Klimowicz-Pawlas A. Assessment of the pollution and ecological risk of lead and cadmium in soils. *Environ Geochem Health*. 2018 Dec;40(6):2325-2342. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6280874/>
23. Caito S, Lopes ACBA, Paoliello MMB, Aschner M. Toxicology of Lead and Its Damage to Mammalian Organs. *Met Ions Life Sci*. 2017 Apr 10;17 doi: 10.1515/9783110434330-016.
24. FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). Soils portal. 2017. Disponible en: <http://www.fao.org/soils-portal/es/>