



FACULTAD DE FARMACIA

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE

Trabajo Fin de Grado. Departamento de Edafología.

**LA CONTAMINACIÓN DEL SUELO POR
PLOMO Y SUS CONSECUENCIAS SOBRE LA
SALUD HUMANA**

Autor: Marta Moreno Fernández

Tutor: Antonio L. López Lafuente

Convocatoria: febrero 2018

RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES.....	1
OBJETIVOS	2
METODOLOGÍA	2
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	2
A. El suelo.....	2
a) Conceptos generales	2
b) Propiedades del suelo y su interacción con los contaminantes	4
B. El plomo	7
a) Características del plomo.....	7
b) Minerales de plomo en la naturaleza	8
c) Ciclo natural del plomo.....	8
d) Principales compuestos de plomo y sus usos	9
e) El origen del plomo en el suelo: Fuentes de exposición.....	9
C. Las consecuencias del plomo sobre la salud humana	12
a) Toxicocinética	12
b) Mecanismo de acción	13
c) Clínica.....	13
d) Órganos afectados.....	13
e) Carcinogénesis.....	15
f) Estrés oxidativo	15
g) Población vulnerable	16
CONCLUSIONES.....	16
BIBLIOGRAFÍA	17

RESUMEN

El plomo es un metal pesado contaminante, no biodegradable y persistente en el medio ambiente. Su elevada biodisponibilidad supone un riesgo para todo organismo vivo. Es capaz de afectar a casi la totalidad de los órganos y sistemas del cuerpo humano. A pesar de ello, sus características fisicoquímicas únicas lo convierten en un metal pesado de elevada aplicación y uso. El suelo es un elemento clave para los ecosistemas y es uno de los principales receptores de este metal pesado. Con este trabajo se pretende estudiar la relación entre el plomo y el suelo, así como del plomo y el ser humano para obtener una visión más detallada sobre los riesgos que suponen para el medio ambiente y las personas. *Palabras clave: contaminación de suelos por plomo, toxicidad del plomo, riesgos en salud ambiental y salud pública, metales pesados. Key words: Lead-contaminated soils, lead toxicity, environmental health - public health risks, heavy metals.*

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

Hoy en día la contaminación medioambiental ha pasado a ser un problema de primer orden. Si bien existe en la población una concienciación generalizada con respecto a la relación entre contaminación del aire y agua y el impacto negativo sobre nuestra salud, no sucede lo mismo en el caso del suelo¹. Es clave comprender que el suelo constituye un componente fundamental para 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 tanto su protección debe estar al mismo nivel que la del agua o el aire¹.

La utilidad del plomo (Pb) y los compuestos del plomo fue descubierta en épocas prehistóricas. El empleo del mismo se remonta a 4000 años a.C. Ha sido utilizado en sistemas de tubería y vajilla desde tiempos del Imperio Romano. Experimentó un crecimiento progresivo durante la Industrialización, creciendo de forma considerable con la difusión del uso del automóvil en el siglo XX². Sus características físico-químicas (metal blando, maleable, dúctil, baja conductibilidad, 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 entorno al grave riesgo que supone para el medio ambiente y la salud humana, sigue siendo un metal pesado de elevada aplicación y uso. Hasta mediados de los años ochenta no se estableció

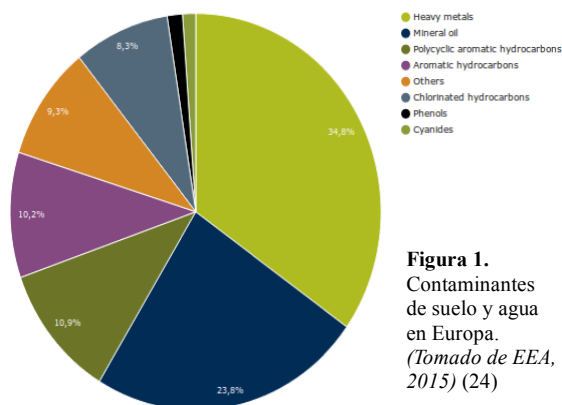


Figura 1. Contaminantes de suelo y agua en Europa. (Tomado de EEA, 2015) (24)

de forma oficial por parte de diversos organismos internacionales una relación entre el suelo y los riesgos de contaminación y afección de la salud¹.

La exposición al mismo ha disminuido sustancialmente en aquellos países donde las medidas de control fueron implementadas en los últimos diez a treinta años². Sin embargo, el plomo es un metal altamente persistente en el medio ambiente – agua, aire, suelo – debido a su naturaleza no biodegradable. Posee una elevada biodisponibilidad y susceptibilidad de ser incorporado a la cadena trófica suponiendo un riesgo para todo organismo vivo. Además, a diferencia de otros metales pesados, es un elemento no esencial para plantas, animales y ser humano. Afecta a prácticamente todos los tejidos y órganos de nuestro cuerpo. Sus efectos tóxicos abarcan desde afección a nivel neurológico, renal, cardiovascular y circulatorio, óseo, reproductor, gastrointestinal, inmunológico, entre otros.

OBJETIVOS

Mediante este trabajo se pretende realizar una revisión bibliográfica de aquellos artículos que refieran una relación entre el plomo y el suelo, así como del plomo y el ser humano para obtener una visión general sobre los riesgos que suponen para el medio ambiente y las personas. Se busca:

- Conocer más detalladamente el suelo y sus propiedades.
- Conocer las características del plomo como metal pesado.
- Entender la interacción plomo-suelo y cómo es capaz de alcanzar al ser humano.
- Comprender la interacción plomo-ser humano y los efectos de su toxicidad.

METODOLOGÍA

Se llevó a cabo una revisión bibliográfica en las principales bases de datos de publicaciones científicas como PubMed, Google Scholar, ScienceDirect, International Scholarly Research Network (ISRN), Wiley InterScience, en organismos internacionales y nacionales como WHO, FAO, Soil Science Society of America, EFSA, EEA, RANF. Asimismo, se han consultado libros de texto de edafología y toxicología disponibles en formato papel y/o online. Las palabras clave empleadas son: *Lead-contaminated soils, lead toxicity, soil contamination, heavy metals*. Se seleccionaron aquellas revisiones bibliográficas de mayor relevancia y relación con los puntos desarrollados en el trabajo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. El suelo

a) Conceptos generales

Para comprender la interacción del plomo con el suelo y cómo puede llegar a suponer un grave riesgo para la salud humana es clave entender previamente una serie de conceptos.

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*⁴, el suelo es un ente natural organizado e independiente, con unos constituyentes, propiedades y génesis específicos y únicos⁵. Dicha capa puede ir de centímetros a metros⁶. Se considera un sistema abierto, dinámico, susceptible de evolucionar hacia estados más complejos o menos diferenciados recibiendo y perdiendo materiales y energía de su entorno. Está constituido por tres fases: sólida (componentes inorgánicos y orgánicos) y fase líquida y gaseosa (localizada en los espacios de la fase sólida pudiendo llevar iones y sustancias en solución o suspensión) además de organismos vivos (lombrices, insectos, bacterias, hongos, etc.)⁷. Constituye un componente fundamental para 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 natural, limitado y no renovable al menos en una escala de tiempo humano⁸ 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 correcta⁷. 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,

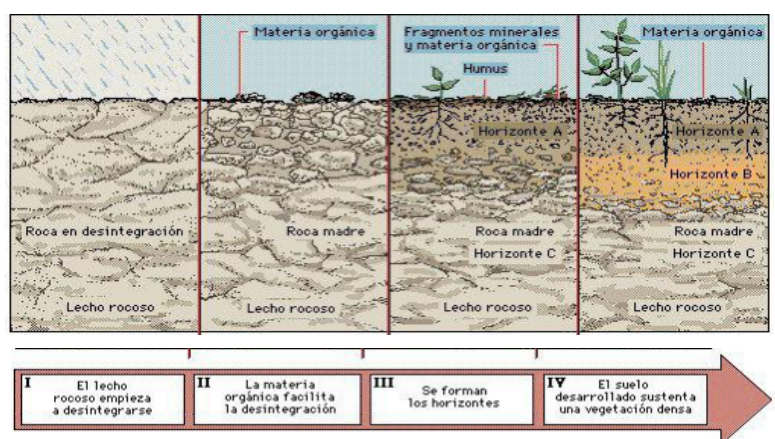


Figura 2. Etapas de la edafogénesis.

características y propiedades específicas definidas por los factores formadores del suelo (roca, clima, organismos, relieve y tiempo) sobre los cuales actuarán los denominados procesos formadores del suelo (adición, pérdida, transformación y translocación)^{5, 6, 7}.

- iii. Pero, ¿qué entendemos por calidad del suelo? 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 humana⁹.
- iv. ¿Cuándo se dice que un suelo está contaminado? 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*⁴.

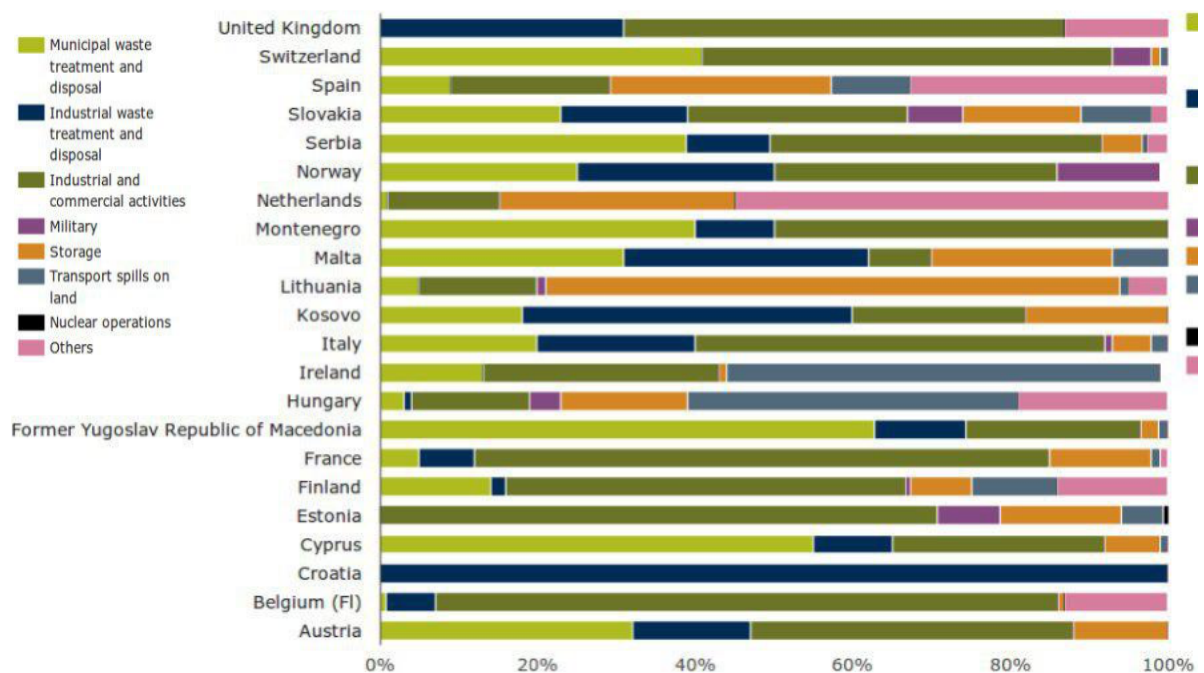


Figura 3. Actividades causantes de la contaminación del suelo por países. (Tomado de EEA, 2015) (24)

b) Propiedades del suelo y su interacción con los contaminantes

Una vez expuestos los conceptos básicos pasaremos directamente a reflejar las 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 contaminantes¹⁰. Parece ser que el suelo es un reservorio de compuestos tóxicos y que son tanto más peligrosos cuanto mayor sea su persistencia y biodisponibilidad¹⁸. 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 LCASHM se encuentra entre 6750-10125 g/ha/a¹¹.

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 atraviesa¹². 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 Cu y Pb.
 - 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 Pb.
- iii. Formas de presentarse un contaminante en el suelo y su disponibilidad relativa¹¹. 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 suelo¹⁰. 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.

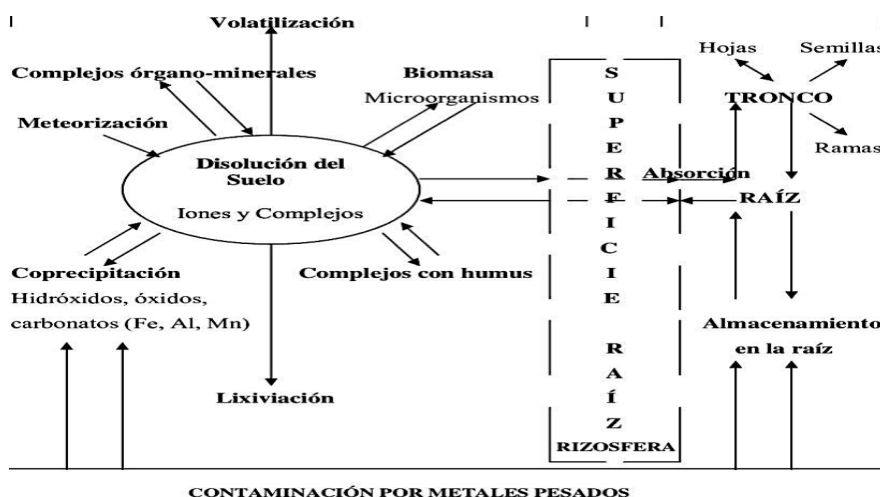


Figura 4. Dinámica de los metales pesados en el suelo.

B. El plomo

Su abundante presencia la corteza terrestre, amplia distribución geográfica (es capaz de viajar grandes distancias por la acción del viento depositándose en regiones lejanas a su foco de contaminación)¹³ y homogeneidad, así como un uso extendido¹⁴ que junto a su naturaleza no biodegradable y altamente persistente (agua, suelo, polvo, atmósfera) le dotan de una alta capacidad de bioacumulación y biomagnificación en la cadena alimenticia poniendo en riesgo la producción de cultivos, la contaminación de agua superficial y subterránea y la salud humana¹⁵.

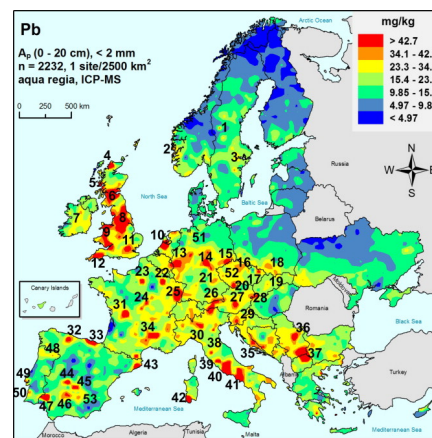


Figura 5. Concentración de plomo en suelo (Europa) (Tomado de: Reimann C., et al. *Lead and lead isotopes in agricultural soils of Europe*, 2012) (26)

a) Características del plomo¹⁵

Tabla 1. Características del plomo.

Metal pesado	Grupo	Período	N.º Atómico	Masa atómica	Densidad (g/cm)	Punto de fusión y ebullición (°C)	Coloración
Pb	IV	6	82	207,2	11,4	327,4 1725	Gris azulado

Con respecto a sus propiedades físico-químicas se considera un metal pesado blando, maleable, dúctil, de baja conductibilidad, elevada densidad y resistente a la corrosión³.

Se obtiene por fundición o refinamiento de las minas o secundariamente mediante el reciclaje de materiales de desecho con plomo.

b) Minerales de plomo en la naturaleza

Los minerales más comunes del plomo son los óxidos, carbonatos y sulfatos. En general se encuentra en todas las rocas de la corteza terrestre¹⁶. El mineral de plomo más abundante es la galena (PbS) con un contenido en plomo por peso del 87%. Es el único mineral que contiene suficiente plomo para suponer una fuente natural y económica del mismo. En sistemas de reducción con sulfuro presente la forma sólida más estable es PbS. Es el sólido más estable que podemos encontrar en la matriz del suelo es el PbS el cual se forma cuando se dan condiciones de reducción junto a un aumento en la concentración de sulfuro en el medio¹⁵. A continuación se muestra la reacción de biomovilización del plomo a partir de galena: $PbS \text{ (mineral)} + O_2 \text{ (atmosférico)} \Rightarrow PbSO_4 + CO_2 \text{ (atmosférico)} \Rightarrow Pb(HCO_3)_2 \Rightarrow$ disolución aguas continentales (Pb^{2+}) \Rightarrow incorporación a la cadena trófica¹³. En una atmósfera oxidante (por exposición atmosférica o agua rica en oxígeno) la galena es rápidamente transformada a otras formas como la anglesita ($PbSO_4$), cerusita ($PbCO_3$), y piromorfita ($Pb_5(PO_4)_3X$; $X = Cl^-, F^-, OH^-$) (siendo ésta última la forma más estable del plomo en un amplio rango de condiciones del medio) ante la oxidación del sulfuro a sulfato¹⁷.

c) Ciclo natural del plomo^{3, 13, 18}

El plomo procedente de diversas fuentes, ya sean antropogénicas o geogénicas, alcanza fácilmente tanto la hidrosfera como la litosfera o atmósfera. Una vez emitido a la atmósfera, desde esta pueda alcanzar por deposición seca o húmeda a través de las precipitaciones la hidrosfera (e incorporarse al ciclo del agua) y litosfera o directamente llegar a los organismos vivos mediante inhalación (animales, entre ellos el ser humano) con posterior absorción e incorporación al organismo. Desde la hidrosfera puede ser absorbido por peces e incorporarse a la cadena trófica, a través de la piel (compuestos orgánicos), depositarse en el suelo o evaporarse a la atmósfera. Desde el suelo puede pasar directamente al ser humano (por el polvo contaminado, alotriofagia) o a las plantas y animales e incorporarse así a la cadena trófica. El plomo en el suelo puede experimentar procesos de volatilización pasando a la

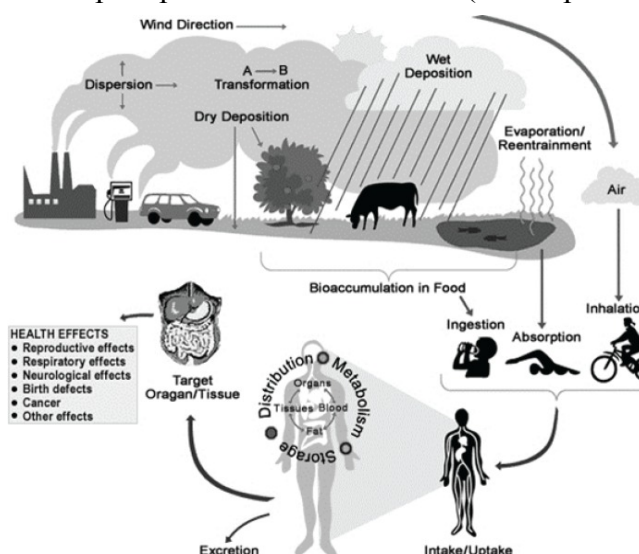


Figura 6. Ciclo natural del plomo (Tomado de: Wani A.L., et al. *Lead toxicity: a review*, 2015) (3)

atmósfera, adsorción sobre materia orgánica o arcillas, precipitación formando sales, minerales, transformación en otro compuesto, complejación con ligandos orgánicos, aniones, coprecipitación con otros elementos, o movilización pasando a niveles freáticos.

d) Principales compuestos de plomo y sus usos ^{13, 15}

Formas inorgánicas

Tabla 2. Formas inorgánicas del plomo.

Pb (II) y Pb (IV)			
- <u>Compuestos de Pb (II)</u> : predominan las formas iónicas (p. ej., Pb^{2+} SO_4^{2-})			
- <u>Compuestos de Pb (IV)</u> : predominan los covalentes (p. ej., Tetraetilo de plomo, $Pb(C_2H_5)_4$)			
Óxidos de Pb			
- <u>Óxido de Pb(II)</u> : PbO . Estable. Usos: pigmentos, esmaltes vítreos y vidrios cerámicos.			
- <u>Óxido de Pb(IV)</u> : PbO_2 . Estable y oxidante. Usos: síntesis orgánica, tinción y pirotecnia.			
- <u>Óxido mixto</u> : Pb_3O_4 (minio). Mayor solubilidad.			
Haluros de Pb (p.ej., $PbCl_2$)			
Baja solubilidad. Usos: pigmento o soldador y fundente			
Oxosales con riesgo tóxico			
<u>Oxosal</u>	<u>Fórmula</u>	<u>Solubilidad</u>	<u>Usos</u>
Nitrato	$Pb(NO_3)_2$	soluble en agua	mordiente, técnicas de grabado, explosivos
Sulfato	$PbSO_4$ (en forma de sulfato tribásico $3PbO.PbSO_4.H_2O$)	Insoluble	Estabilizante del PVC
Carbonato	carbonato básico de plomo $2PbCO_3.Pb(OH)_2$	Insoluble	Pigmentos blancos, utilizados en pinturas y plásticos (blanco de plomo)
Cromato	$PbCrO_4$	Insoluble	Pinturas y plásticos

- i. Formas orgánicas. De entre los más de mil compuestos orgánicos derivados del plomo que han sido sintetizados, aquellos que poseen un mayor interés desde el punto de vista comercial y toxicológico son las especies alquiladas (metilo y etilo) y sus sales (p. ej., dimetildietilplomo, cloruro de trimetilplomo y dicloruro de dietilplomo). De forma natural mediante procesos de alquilación microbiana ante condiciones anaerobias se forma el tetrametilo de plomo, un compuesto volátil. Son liposolubles y volátiles, descomponiéndose de forma lenta con formación de Pb. Se emplean como antidetonantes de gasolina¹³.e) El origen del plomo en el suelo: Fuentes de exposición

Las fuentes de Pb se pueden clasificar en función de su origen: geogénicas o antropogénicas.

i. Las fuentes geogénicas proceden de erupciones volcánicas, incendios naturales, deposiciones, productos de reacciones químicas y/o biológicas, etc¹⁰. Depende en gran medida de la geodisponibilidad (aquella porción del contenido total de un elemento o compuesto químico de un material terrestre que puede liberarse a la superficie o cerca de la misma (o biosfera) por procesos mecánicos, químicos o biológicos). Por tanto, los metales pesados geodisponibles son los que pasan de la roca madre a los suelos tras ser liberados por meteorización, y constituyen, junto a otros procedentes de emisiones volcánicas y lixiviados de mineralizaciones, los denominados como geogénicos. La liberación de los elementos depende de la estructura y estabilidad termodinámica de los minerales de la roca. Las estructuras altamente polimerizadas son más estables y resistentes a la destrucción. La liberación de cationes de una roca por meteorización depende de muchos parámetros como antes se indicó, clima, topografía, capacidad de drenaje de la roca (permeabilidad), tiempo, y particularmente la actividad biológica. El papel de los microorganismos en la transformación y degradación de los minerales es muy importante. Participan en los ciclos geoquímicos de los principales nutrientes y de muchos elementos traza. En general no llegan a rebasar los umbrales de toxicidad, y aunque así fuera, estos metales se encuentran en formas estables y por tanto poco disponibles. Se podría decir que la aportación de este tipo de fuentes al suelo es insignificante en relación con las procedentes de la acción antropogénica¹¹.

ii. Las fuentes antropogénicas derivadas de actuaciones del ser humano en cualquiera de sus actividades (agrícola, industrial, urbana, etc)¹⁰. Entre los usos en la actualidad cabe mencionar:

- Actividades agrícolas Como el empleo de fungicidas, herbicidas o pesticidas con plomo (P.ej., $Pb_3(AsO_4)_2$)¹³.

- Procesos industriales

Fabricación de baterías de plomo-ácido. Se emplean las formas orgánicas del plomo como tetraetilo y tetrametilo de plomo como agentes antidetonantes y lubricantes del petróleo siendo emitido por los vehículos como partículas inorgánicas. Pocos son los lugares en los que este tipo de combustible sigue en uso.

Antiguas áreas con actividad industrial ligada al plomo. Siguen representando puntos de alto riesgo de contaminación.

Industria de productos químicos y fábricas. Como las de vidrio, pinturas y barnices, imprentas, etc¹³.

Generación de energía eléctrica. Como centrales térmicas que usan petróleo pueden ser fuente de Pb¹¹.

- Actividades laborales en contacto con el metal pesado afecta a pintores, trabajadores de fundición, minería, fábricas de baterías, mecánicos, gasolineras, guardia urbano, etc. Se debe prestar especial atención a la presencia del contaminante en la ropa de los trabajadores ya que puede afectar al entorno familiar.

- Origen doméstico

Pigmentos para pinturas y barnices. El desgaste, pelado y astillado de este tipo de pintura es la principal fuente de exposición y toxicidad en niños. A pesar de las prohibiciones experimentadas con respecto a este tipo de productos en los últimos años en países desarrollados y su notable decrecimiento, se sigue encontrando en las paredes de casas antiguas yendo a parar directamente al polvo y suelo del hogar¹⁴.

Alimento. Para la población no fumadora el mayor contribuyente a la ingesta diaria de plomo deriva de la ingesta de alimento, polvo y suciedad contaminado. La cantidad de plomo en plantas alimenticias dependerá de la concentración del mismo en el suelo siendo superior en los alrededores de minas e industria de fundición. El empleo de alimentos y bebidas almacenados en latas de

conservas (soldaduras de plomo) aumentaría considerablemente el contenido en plomo especialmente en los casos de bebidas y alimentos ácidos. Puesto que las bebidas ácidas el empleo de este tipo de envases en su producción, distribución y almacén aumentaría los niveles de

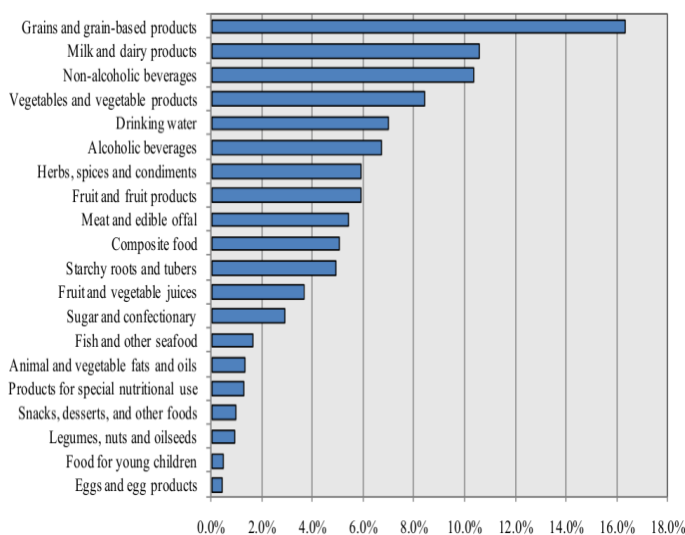


Figura 7. El aporte relativo de distintas categorías de alimento a la exposición al plomo de la población europea (Tomado de: EFSA. Lead dietary exposure in the European population, 2012) (25)

plomo. La migración de plomo de cerámica vidriada con plomo o vajilla de cerámica son también una fuente de exposición. El tabaco aumenta la exposición al plomo.

Agua de bebida. El plomo presente en agua de bebida raramente procede de su disolución a partir de fuentes naturales. La principal fuente de contaminación procede de la red doméstica de cañerías que contengan plomo en su composición. El agua que está en contacto durante un periodo largo con el mismo (p.ej., durante la noche) poseerá una mayor concentración. Aguas blandas y ácidas disuelven la mayor parte del plomo²⁰.

- Residuos Sólidos Urbanos (RSU). Como el reciclado de basura electrónica, vertidos y desechos. Aproximadamente el 10% de la basura está compuesta por metales. Su enterramiento puede

contaminar las aguas subterráneas mientras que la incineración puede contaminar la atmósfera al liberar las formas volátiles y así contaminar los suelos. Por otra parte, las basuras no controladas son una importante fuente de contaminación para el suelo y las aguas superficiales¹¹.

- Otros: aleaciones, revestimiento de cables, munición, medicina tradicional folclórica, cosmética, antiguos juguetes, etc.

C. Las consecuencias del plomo sobre la salud humana

a) Toxicocinética^{13, 14, 21}

Entre las posibles vías de absorción del plomo encontramos la vía respiratoria mediante inhalación (con una absorción media de hasta el 50%), la vía digestiva mediante ingesta (con una absorción media del 10% en el adulto y de 30-50% en niños) y la vía dérmica por contacto directo. Entre los factores que determinan una mayor susceptibilidad para alcanzar el sistema circulatorio se incluyen la edad, el estado nutricional del individuo (niveles bajos de hierro, calcio, magnesio y/o fosfato, alcohol, dieta rica en grasa, baja ingesta calórica total o ayuno, tránsito gastrointestinal, etc), tamaño de partícula, solubilidad y forma del tóxico.

Una vez en el torrente circulatorio del 95 hasta el 99% se encuentra unido a eritrocitos. Allí permanecerá ± 35 días. Sólo del 1-5% se encuentra en plasma y suero. A continuación, se distribuye a los tejidos blandos como hígado, riñón, médula ósea, sistema nervioso, etc. A los 2 meses

difundirá a tejido óseo donde es inerte y no tóxico pudiendo permanecer ± 20-30 años. A pesar de ello el tejido óseo es considerado una fuente endógena de plomo en determinadas situaciones fisiopatológicas. En adultos el 80-95% es retenido en hueso mientras que en niños es el 70%, quedando un mayor porcentaje en tejido blando.

Con respecto al metabolismo hepático, el plomo inorgánico no es metabolizado siendo excretado de forma inalterada en un primer momento a través de la orina. Por su parte el plomo orgánico (tetraetilo y tetrametilo de plomo) experimenta la vía oxidativa de dealquilación dando lugar a metabolitos de mayor neurotoxicidad (trietilo y trimetilo de plomo). En el hígado la reacción es catalizada por el sistema de la monooxigenasa dependiente del citocromo p450.

La excreción se da a través de la orina, bilis, fluido gástrico, piel, sudor, uñas, pelo y leche materna.

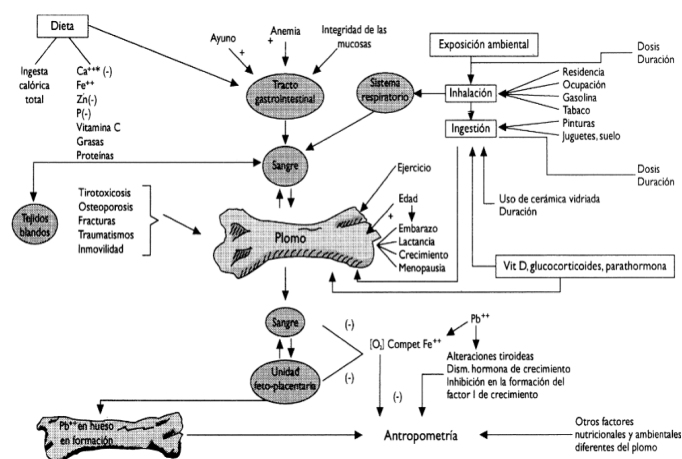


Figura 8. Modelo biológico del plomo. (Tomado de: Sanín L.H., y col. Acumulación de plomo en hueso y sus efectos en la salud, 1998) (23)

b) Mecanismo de acción

La patogénesis de la toxicidad del plomo es considerada multifactorial puesto que: posee alta afinidad por los grupos sulfhidrilos (en especial por las enzimas dependientes de zinc), interrumpe de forma directa la activación enzimática, inhibe de forma competitiva la absorción de minerales traza, altera la homeostasis del calcio interfiriendo en las vías metabólicas calcio dependientes, afecta la síntesis del grupo hemo, del DNA y disminuye las reservas disponibles de antioxidantes sulfhidrilo en el organismo siendo capaz de generar especies reactivas de oxígeno (ROS)²². La interferencia del plomo con el metabolismo del calcio es una de las causas principales de los efectos del plomo a nivel neurológico y tono vascular. Reemplaza el calcio, lo sustituye y altera su distribución en la célula comportándose como un segundo mensajero intracelular, activa la proteínkinasa, se une a la calmodulina e inhibe la bomba de Na-K-ATPasa²¹.

c) Clínica¹⁹

La manifestación de signos y síntomas debidos a la intoxicación por plomo dependerá no sólo de las características del individuo sino también del tiempo y concentración de exposición al mismo. Existen dos situaciones clínicas completamente diferentes si consideramos signos y síntomas:

- i. Intoxicación aguda, hoy en día menos frecuente ya que requiere un aumento brusco de la exposición, a dosis elevadas y en tiempos cortos. Los grupos etarios más susceptibles a sufrir este tipo de exposición son los niños y el trabajador expuesto.
- ii. Intoxicación crónica que surge de la exposición prolongada a bajas dosis como puede ser la ambiental o la laboral. La ausencia de síntomas específicos es la norma, tratándose de un cuadro pobre desde el punto de vista clínico.

(La clínica quedará referida en el desarrollo de cada órgano afectado).

d) Órganos afectados

Tabla 3. Órganos afectados.

<p>Sistema Nervioso^{14, 19}</p>	<p>Los efectos del plomo sobre el SN son los más significativos en términos de salud humana. A nivel del SNC el plomo tiende a concentrarse en la materia gris. Las concentraciones mayores se encuentran en el hipocampo, cerebelo, corteza cerebral y médula.</p> <p><u>Población infantil.</u> Predominio de afección a nivel del SNC.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Exposición aguda: cefaleas, estupor, coma, convulsiones con riesgo de muerte. - Exposición crónica: afecta a los procesos de desarrollo neuronal (sinaptogénesis, migración celular, crecimiento de células gliales) con alteración permanente de la función cerebral. Trastornos de conducta y aprendizaje, del comportamiento y rendimiento intelectual y físico. Edema, aumento de la presión intracraneal, encefalopatía. <p>- <u>Población adulta.</u> Predominio de afección a nivel del SNP. Polineuropatía periférica con predominio motor afectando a los músculos extensores. Cefalea, pérdida de memoria y fatiga general.</p>
---	--

<p>Sistema Renal^{14, 19, 21}</p>	<ul style="list-style-type: none"> - <u>Nefropatía aguda</u>. Disfunción de las células del túbulo proximal. Reversible si cesa exposición. - <u>Nefropatía crónica</u>. Lesiones a nivel intersticial, inclusiones intranucleares (complejos de plomo-proteínas) en los túbulos renales derivando en tubulopatías sin compromiso glomerular (con proteinuria selectiva), haciéndose irreversible una vez instalada la fibrosis. <p>Inhibe activación vitamina D.</p> <p>Entre los signos se incluye proteinuria, disminución del transporte de glucosa y aniones orgánicos y de la Tasa de Filtración Glomerular (TFG).</p>
<p>Sistema CV y hematológico^{3, 14, 19}</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Una exposición prolongada al plomo se asocia a un aumento de la presión sanguínea pudiendo existir riesgo de sufrir procesos patológicos circulatorio, enfermedades cardiovascular y cerebrovascular y muerte por ACV. - Afección de la vía de síntesis del grupo hemo. Inhibición de delta-ALAD, ferroquelatasa, pirimidin 5-nucleotidasa. Disminuyen los niveles de hemoglobina, afección de la respiración celular. Aumento de fatiga y anemia. - A nivel de laboratorio se observará anemia microcítica e hipocrómica, un aumento de la porfirina urinaria, coproporfirina, deltaaminolevulínico y la Zn-protoporfirina. También se observa punteado basófilo y hemólisis prematura de glóbulos rojos.
<p>Tejido Óseo^{19, 23}</p>	<p>El plomo interfiere en la homeostasis de la hormona paratiroidea, la calcitonina, la vitamina D y el metabolismo del calcio existiendo riesgo de osteoporosis, mialgia, artralgia, gota y afección del desarrollo.</p> <ul style="list-style-type: none"> - <u>El hueso como biomarcador</u>. Constituye una alternativa como biomarcador para efectos crónicos y para situaciones de controversia al utilizar otro tipo de biomarcadores; además. Es un complemento del uso del plomo en sangre completa el cual es más útil para vigilancia epidemiológica laboral. Sin embargo, se restringe su uso para fines de investigación. - <u>Fuente endógena</u> Alto riesgo de movilización de plomo (gestación, lactancia, menopausia, inmovilidad, senectud) con efectos adversos en otros tejidos y capacidad de atravesar la barrera placentaria con graves consecuencias sobre el feto. - <u>Blanco</u>. Perturbación del desarrollo óseo y fetal y de la formación y resorción óseas.
<p>Sistema Reproductor^{3, 20}</p>	<ul style="list-style-type: none"> - <u>Hombre</u>. Alteración en el recuento, movilidad y morfología general de los espermatozoides, disminución fertilidad, aumento en las tasas de teratospermia, disminución libido. - <u>Mujer gestante</u>. Aborto espontáneo, mortinato, nacimiento prematuro, peso bajo al nacer, malformaciones, problemas en el desarrollo infantil.
<p>Otros^{14, 19}</p>	<ul style="list-style-type: none"> - <u>Ocular</u>. Un aumento en la relación Pb/Zn se liga a una disminución de la transparencia del cristalino. - <u>Sistema auditivo</u>. Niños expuestos en período prenatal pueden experimentar alteraciones de hipoacusia e incluso acusia total. - <u>Sistema inmunitario</u>. Se considera que el plomo puede actuar como inmunomodulador y aumentar la susceptibilidad del individuo a infecciones virales, riesgo de desencadenar alergias y enfermedades autoinmunes. - <u>Sistema digestivo</u>. Afección de las fibras del músculo liso intestinal provocando anorexia, estreñimiento, dolor de tipo cólico (“cólico saturnino”) acompañado de náuseas y vómitos. - <u>Formación del Ribete de Burton</u>. Línea de sulfuro con borde gingival de coloración oscura debido a que el sulfuro liberado por las bacterias se une al plomo formando sulfuro de plomo²¹. Poco frecuente hoy en día. - <u>Sistema endocrino</u>.

e) Carcinogénesis^{2, 20}

La OMS advierte “existen evidencias de que la exposición a largo plazo de tipo laboral contribuye al desarrollo de cáncer”. Según refiere la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) el plomo es un metal tóxico y una expresión de esta propiedad es la genotoxicidad. Hay, sin embargo, pequeñas evidencias de su interacción directa con el DNA ante valores usuales de plomo en sangre. La genotoxicidad del plomo parece estar mediada en parte por un aumento y modulación de ROS. Asimismo, el metal interacciona con proteínas, incluyendo aquellas involucradas en la reparación del material genético. Este último mecanismo podría ser responsable de la intensificación de la genotoxicidad de otros agentes. Todo ello podría resultar en mutación, cambios en la expresión genética y en la proliferación celular contribuyendo a un proceso carcinogénico si la exposición es sustancial. La IARC ha clasificado los compuestos de plomo inorgánicos como probablemente carcinógeno para el ser humano (Grupo 2A) lo cual significa que hay pruebas suficientes de que puede causar cáncer a los humanos, aunque actualmente no son concluyentes, mientras que los compuestos de plomo orgánicos han sido incluidos en el Grupo 3 “no puede ser clasificado respecto a su carcinogenicidad para el ser humano”. Actualmente no hay ninguna prueba de que cause cáncer a los humanos.

f) Estrés oxidativo²²

La propensión del plomo a catalizar reacciones oxidativas y generar especies reactivas de oxígeno (ROS) (hidroperóxidos, oxígeno atómico, peróxido de hidrógeno) y como consecuencia la deplección de las reservas de antioxidantes ha sido demostrado en múltiples estudios. Además, este estrés oxidativo ha sido identificado como el principal agente en contribuir a la patogénesis ante una intoxicación por plomo. Las ROS inhiben la producción de antioxidantes sulfhidrilos, inhiben las reacciones enzimáticas alterando la producción del grupo hemo, causa inflamación en el endotelio vascular, dañan los ácidos nucleicos, inhiben la reparación del DNA alterando la genética celular y son capaces de iniciar los procesos de peroxidación de los lípidos de membrana celular alterando su estructura y función. Entre las vías más afectadas encontramos: el metabolismo del glutatión, aquellas enzimas con grupo funcional sulfhidrilo haciéndolas afuncionales (delta-ALAD, Glutathion reductasa), alteración de la membrana celular, alteración a nivel sanguíneo de las enzimas antioxidantes: superóxido dismutasa (SOD), catalasa y glutathion peroxidasa (Gpx), variaciones a nivel de neurotransmisores, inactivación del óxido nítrico con oxidación a nivel del endotelio vascular generando peroxinitrito (ONOO⁻) (ROS altamente activo capaz de producir daño sobre DNA y lípidos), etc. Todo ello podría verse mitigado al aumentar la disponibilidad de la célula de antioxidantes. Diversos estudios animales han demostrado la capacidad de antioxidantes como N-acetilcisteína, zinc, vitamina B6, C y E, selenio, taurina y ácido alfa-lipoico de interrumpir o

minimizar los efectos dañinos del plomo y mejorar los efectos de agentes quelantes cuando se administran solos o conjuntamente.

g) Población vulnerable¹⁴

Mujeres gestantes y población infantil son los grupos poblacionales más vulnerables a la toxicidad del plomo. Los trabajadores con exposición laboral al plomo son considerados grupo de riesgo.

Lactantes y niños pequeños (especialmente de edades inferiores a cinco años) pueden llegar a absorber valores de plomo de cuatro a cinco veces superiores a los de un adulto. La posibilidad de padecer efectos adversos por exposición al plomo es superior en niños porque: los niños absorben mayores cantidades de plomo por unidad de masa corporal, ante el comportamiento mano-boca y talla inferior existe una mayor probabilidad de ingesta de polvo o suelo contaminado, la absorción a nivel gastrointestinal de fracción de plomo biodisponible es mayor, poseen un desarrollo general inferior: la barrera hematoencefálica está menos desarrollada, el sistema de diferenciación y crecimiento celular está en pleno desarrollo siendo más vulnerables a procesos de inhibición y daño celular. Además, en la población infantil los efectos a nivel neurológico ocurren a concentraciones inferiores.

CONCLUSIONES

- El suelo es un elemento imprescindible para el correcto desarrollo y supervivencia de los organismos vivos. Es un recurso natural, limitado y no renovable. Su protección debe estar al mismo nivel que la del agua o el aire.
- El ser humano sufre graves consecuencias de la contaminación del medio por plomo. Las mujeres gestantes, población infantil y trabajadores expuestos al mismo son considerados población de riesgo.
- El conocimiento básico en química, medio ambiente y los posibles efectos sobre la salud asociados al plomo es imprescindible para comprender la especiación, biodisponibilidad y opciones de remediación del plomo.
- Es necesario un esfuerzo mayor en la reducción del uso y liberación del plomo y de los contaminantes en general para así abordar retos presentes y futuros en la lucha contra la contaminación medioambiental y alcanzar una mayor calidad de vida.

BIBLIOGRAFÍA

1. López Lafuente, Antonio L. Suelo y salud Rev. salud ambient. 2015;15(1):74-75. Disponible en: 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. Disponible en: <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. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4961898/>
4. 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>
5. Dorronsoro C., 2008. Introducción a la Edafología. Libro on-line: <http://edafologia.ugr.es/>
6. Porta J.; López-Acevedo, M.; Poch R.M., 2008. Introducción a la Edafología. Uso y protección del suelo. Ediciones Mundi-Prensa.
7. Porta, J.; López-Acevedo, M. y Roquero, C. 1999. Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente segunda edición. Ediciones Mundi-Prensa.
8. Pan Ming Huang, Yuncong Li, Malcolm E. Sumner, Handbook of soil science. 1st Ed., 2000.
9. 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>
10. 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>
11. 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.es/sem/macla_pdf/macla10/Macla10_48.pdf
12. FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). Soils portal. 2017. Disponible en: <http://www.fao.org/soils-portal/es/>
13. Doadrio Villarejo, Antonio L., Ecotoxicología y acción toxicológica del plomo, An. R. Acad. Nac. Farm; 72(3): 409-422, jul. 2006 Disponible en: <http://www.analesranf.com/index.php/aranf/article/view/163>
14. Patrick L. Lead toxicity, a review of the literature. Part 1: Exposure, evaluation, and treatment. Altern Med Rev. 2006;11(1):2-22. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16597190>
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. Criterios de calidad de suelos y de aguas o efluentes tratados para uso en riego. Plomo. Informe final. Marzo 2005. División de recursos hídricos y medio ambiente. Departamento de ingeniería civil. Universidad de Chile. SAG. Disponible en: http://biblioteca-digital.sag.gob.cl/documentos/medio_ambiente/criterios_calidad_suelos_aguas_agricolas/pdf_aguas/informe_final.pdf
17. 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>
18. 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>
19. Burger, M. y Pose Román, D. (2010). Plomo, Salud y Ambiente. Experiencia en Uruguay. Montevideo: Universidad de la República. Disponible en: http://www.paho.org/uru/index.php?option=com_docman&view=download&category_slug=publicaciones-salud-y-ambiente&alias=31-plomo-salud-y-ambiente-experiencia-en-uruguay&Itemid=307
20. World Health Organization, 2010. Exposure to Lead: A major public health concern. Disponible en: <http://www.who.int/ipcs/features/lead.pdf>
21. Valdivia Infantas, Melinda M., Intoxicación por plomo Lead poisoning, Rev. Soc. Per. Med. Inter. 2005; 18(1): 22-7. Disponible en: http://medicinainterna.org.pe/revista/revista_18_1_2005/Intoxicacion.pdf
22. Patrick L. Lead toxicity part II: the role of free radical damage and the use of antioxidants in the pathology and treatment of lead toxicity. Altern Med Rev. 2006;11(2):114-27. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16813461>
23. Sanín LH, González-Cossío T, Romieu I, Hernández-Avila M. Acumulación de plomo en hueso y sus efectos en la salud. Salud Publica Mex 1998; 40:359-368 Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=10640409>
24. European Environment Agency (EEA), 2015, Progress in management of contaminated sites. Disponible en: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/progress-in-management-of-contaminated-sites-3/assessment>

25. European Food Safety Authority (EFSA). Lead dietary exposure in the European population 2012;10(7):2831. Disponible en: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2903/j.efsa.2012.2831/epdf>
26. Reimann C., Flem B., Fabian K., Birke M., Ladenberger A., Négrel P., Demetriades A., Hoogewerff J., Lead and lead isotopes in agricultural soils of Europe – The continental perspective, Applied Geochemistry, Volume 27, Issue 3, 2012, Pages 532-542, Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S088329271100494X>
27. BOE núm. 262, de 1 de noviembre de 1990. Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre, por el que se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario. Disponible en: <https://www.boe.es/boe/dias/1990/11/01/pdfs/A32339-32340.pdf>