



**FACULTAD DE FARMACIA
UNIVERSIDAD COMPLUTENSE**

TRABAJO FIN DE GRADO

**Ecotoxicología del cadmio, riesgo para la salud
por la utilización de suelos ricos en cadmio**

Autor: Daniel del Olmo Rodrigo

Tutor: Miguel Ángel Casermeiro Martínez

Convocatoria: Febrero 2017

Índice

Resumen.....	3
1. Introducción.....	3
2. Objetivos.....	5
3. Materiales y métodos.....	5
4. Resultados y discusión.....	5
4.1. Aspectos generales del cadmio.....	5
4.2. Exposición en especies bioindicadoras y bioacumulación.....	8
4.2.1. Microorganismos.....	9
4.2.2. Invertebrados.....	9
4.2.3. Aves.....	12
4.2.4. Mamíferos.....	13
4.2.5. Humanos.....	15
4.3. Métodos de prevención y eliminación del cadmio en el ecosistema.....	16
4.3.1. Prevención de la absorción y paso a la cadena alimentaria, caso del arroz.....	16
4.3.2. Fitorremediación.....	18
5. Conclusiones.....	19
6. Referencias bibliográficas.....	19

Resumen

El cadmio es un elemento metálico de transición, con una alta densidad que permite clasificarlo como metal pesado. Se encuentra presente en pequeñas concentraciones en el suelo, proveniente de actividad minera e industrial principalmente. El problema ocurre cuando estas actividades hacen aumentar su concentración en el medio ambiente, llevando a que se produzcan daños en los seres vivos que se exponen a este metal. El grado de contaminación por cadmio depende de la posición en la cadena trófica, de modo que los microorganismos y el plancton acumulan menores concentraciones, pero en organismos superiores como depredadores o los humanos se produce bioacumulación y bioconcentración. Actualmente se está investigando para encontrar métodos menos dañinos y costosos que los métodos clásicos de eliminación de los contaminantes del suelo. Algunas especies de plantas han logrado desarrollar una tolerancia mayor hacia los metales, de modo que pueden disuadir a sus depredadores capaces de notar cambios en el sabor, además de servir como herramienta ecológica para retirar el cadmio de los suelos contaminados sin afectar al ecosistema microbiano que los habita. También se estudian otros métodos para evitar la movilidad de este metal, por unión a diversas sustancias que lo fijan en su superficie o favorecen que se encuentre mayoritariamente en una forma inactiva.

Palabras clave: cadmio, suelos, medio ambiente, contaminación, metales pesados, bioindicadores, bioacumulación, bioconcentración, fitorremediación.

1. Introducción

El cadmio (en latín cadmia y en griego kadmeia, que significa "calamina", nombre que recibía antiguamente el carbonato de zinc) es un elemento químico, de número atómico 48, un peso de 112,41 y una densidad de 8,642 g/cm³ a 20 °C, situado en el grupo 12 de la tabla periódica de los elementos. Su símbolo es Cd. Es fácilmente soluble en ácido nítrico, poco soluble en ácido clorhídrico y muy poco soluble (0,005% en peso) en agua (1, 2).

Es un metal pesado, blando, blanco azulado, relativamente poco abundante, algo más maleable, dúctil, flexible y pesado que el zinc. Está presente en la corteza terrestre en una concentración aproximada de 0,1 mg/Kg (3). Es un elemento no esencial con una vida media de 10 a 30 años, ya que se acumula en los tejidos de los seres vivos y su eliminación es muy lenta. Se trata de uno de los metales más tóxicos y así está considerado desde el fatídico suceso de Itai-Itai en Japón (1, 4, 5). No está presente como metal puro en la naturaleza, sino

que normalmente se encuentra formando óxidos, sulfatos y carbonatos, menas de zinc, plomo o cobre y se emplea en la fabricación industrial de pilas, junto con el níquel (abreviado como pilas Ni-Cd).

Fue descubierto en Alemania en 1817 por Friedrich Strohmeyer. Lo encontró como impureza de algunas muestras de carbonato de zinc. Strohmeyer observó que esas muestras, en particular, cambiaban de color al calentarlas, lo cual no le ocurría al carbonato de zinc puro. Strohmeyer fue lo suficientemente persistente para continuar la observación consiguiendo aislar el elemento mediante el tueste y posterior reducción del sulfuro (6).

El cadmio es tóxico a niveles de exposición muy bajos, presentando efectos agudos y crónicos tanto en la salud de los seres vivos como en la del medio ambiente. No se puede degradar en la naturaleza de modo que, una vez es liberado, permanece inalterado en circulación, pudiendo acceder a la cadena alimenticia. El cadmio y sus compuestos son relativamente solubles en agua en comparación con otros metales pesados, lo cual lo implica que al ser más móvil es más fácil que esté biodisponible y se produzca el fenómeno de bioacumulación.

El cadmio es liberado al suelo, al agua y al aire durante la extracción y refinación de metales no ferrosos, la manufactura y aplicación de abonos de fosfato, la combustión de combustibles fósiles y la disposición e incineración de basura.

El cadmio puede acumularse en organismos acuáticos y en cosechas agrícolas (7).

- **Aire:** el cadmio (como óxido, cloruro o sulfato) se encuentra en el aire en forma de partículas o vapores (proveniente de procesos de alta temperatura). Puede ser transportado largas distancias en la atmósfera para ser depositado (húmedo o seco) sobre la superficie del suelo o del agua.
- **Suelo:** el cadmio y sus compuestos pueden moverse, dependiendo de varios factores tales como el pH y la fracción coloidal, que varían según el ambiente local. Generalmente, se adhiere fuertemente a la materia orgánica en la cual permanece inmóvil y puede ser incorporado por plantas, entrando así a la cadena alimentaria.
- **Agua:** el cadmio existe en forma de ión hidratado o como complejo iónico asociado a otras sustancias inorgánicas u orgánicas. Las formas solubles se movilizan en el agua. Las formas insolubles son inmóviles y se depositarán en el sedimento donde serán adsorbidas.

2. Objetivos

Los objetivos del siguiente trabajo, haciendo un repaso de la literatura actual sobre la ecotoxicología del cadmio, son los siguientes: (i) estudiar los aspectos generales de su distribución y disponibilidad en los ecosistemas terrestres y marinos, (ii) identificar los posibles riesgos de la acumulación de cadmio en el medio ambiente y en diferentes especies bioindicadoras, su bioconcentración hasta llegar a la especie humana y (iii) estudiar una “técnica verde” como es la fitorremediación, determinando cuales pueden ser las especies metalófitas idóneas.

3. Materiales y métodos

Para la realización de este trabajo se ha hecho una recopilación y análisis de artículos científicos gracias a la búsqueda bibliográfica en distintas bases de datos. De todos los artículos científicos, únicamente la información más relevante es la que se ha incluido en este trabajo.

Entre las bases de datos consultadas destacan: Web of Science, ScienceDirect, Springer, ResearchGate, EBSCO, Frontiers y PubMed. Así como la consulta de blogs y libros sobre edafología escritos por investigadores del CSIC, revistas científicas como ELSEVIER, páginas webs de organismos oficiales como la ATSDR, la Extranet del BOE de la Real Farmacopea Española (RFE), etc.

4. Resultados y discusión

4.1. Aspectos generales del cadmio

Según Zúkal et al. (8), no hay una clara definición para el término metal pesado, por lo que se suele utilizar la densidad. Por tanto, los metales pesados son aquellos elementos con una densidad específica de al menos 5 g/cm^3 .

La biodisponibilidad viene determinada por la fracción intercambiable del cadmio presente en el sedimento. En el caso de la movilidad del cadmio en el suelo, esta depende de diversos factores, como el pH del suelo, el potencial redox o Eh, la cantidad de materia orgánica, el tamaño de partícula del sedimento. También es importante la relación entre el cadmio adsorbido en el sedimento y su forma disuelta en las aguas. En el último caso, el

cadmio puede ser adquirido directamente del agua en forma de iones libres, de modo que la concentración de estos iones determinará el grado de toxicidad posible.

Cuando está presente en bajas concentraciones en el ecosistema marino, puede no causar toxicidad directamente sobre los organismos. El problema viene cuando va ascendiendo a lo largo de la cadena trófica, de modo que se acumula en los organismos. Al no poder eliminarse, cuanto más alto en la cadena esté un determinado organismo, estará recibiendo más cadmio, en las dosis que contenía cada uno de los organismos por debajo de este en la cadena. Esto es lo que se conoce como el fenómeno de la bioacumulación y de la bioconcentración (*Fig. 3 y 4*), pudiendo llegar a afectar a la salud humana en última instancia. En el agua el cadmio puede ser directamente absorbido por los peces, a través de las branquias.

Elemento	Máxima concentración (mg/Kg)
Cadmio (Cd)	1-3
Cobre (Cu)	50-140*
Mercurio (Hg)	1-1,5
Níquel (Ni)	30-75*
Plomo (Pb)	50-300
Zinc (Zn)	150-300*

*Límite a ser incrementado en un 50% en suelos con pH por encima de 7.

Tabla 2. Máximas concentraciones en suelos de algunos metales pesados propuestas para la Unión Europea (UE). Adaptación de EC (2004b). (9)

El cadmio es también denominado el “asesino silencioso”. Está entre los veinte contaminantes químicos más tóxicos. Su efecto dañino lo produce al competir con elementos esenciales por centros activos de enzimas, además de su alta afinidad por los grupos tiol, como en el caso de las metalotioneínas. El cadmio presenta una alta movilidad en sistemas de planta y suelo, cuando es incorporado a través de las raíces. Hay una serie de factores que propician esta adsorción y distribución, como son el pH del suelo (*Fig 1.*), el contenido en arcilla de dicho suelo, el tipo de suelo, la cantidad de materia orgánica soluble que posee, así como la presencia de ligandos tanto orgánicos como inorgánicos, el contenido en óxidos metálicos hidratados y la existencia de otros iones metálicos en el suelo (*Fig 2.*). Los humanos están expuestos al Cd por inhalación de aire contaminado, de humo de tabaco o a través de comida contaminada.

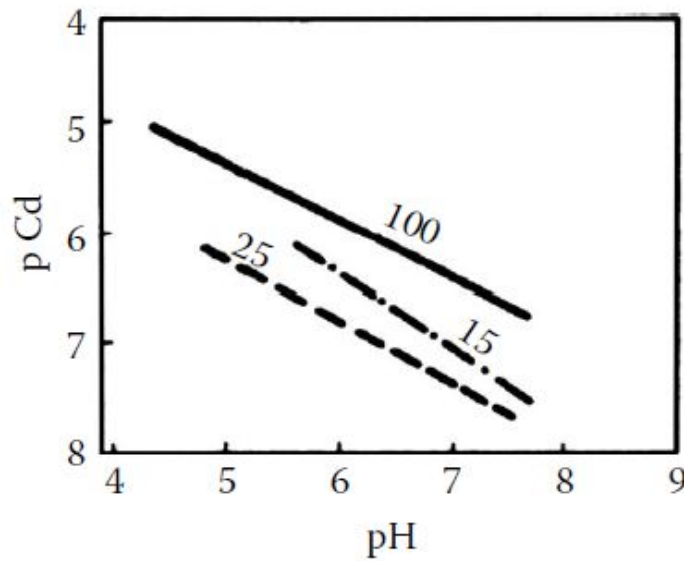


Fig 1. Solubilidad del Cd^{2+} en suelos en función del pH. Equilibrio a concentraciones de 15, 25 y 100 mg Cd por cada 2 g de suelo. (3)

No se conocen funciones del cadmio en el organismo como elemento esencial. Se ha visto que puede actuar utilizando transportadores de otros elementos, compitiendo por ellos. Incluso a concentraciones elementales, puede inducir estrés oxidativo debido a la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS) que afectan al metabolismo celular. El cadmio tiene especial afinidad por los grupos que contienen sulfidrilo y oxígeno, siendo capaz de bloquear grupos funcionales esenciales para las biomoléculas, pudiendo ocasionar un mal funcionamiento del sistema de transporte de nutrientes por inhibición de este (10).

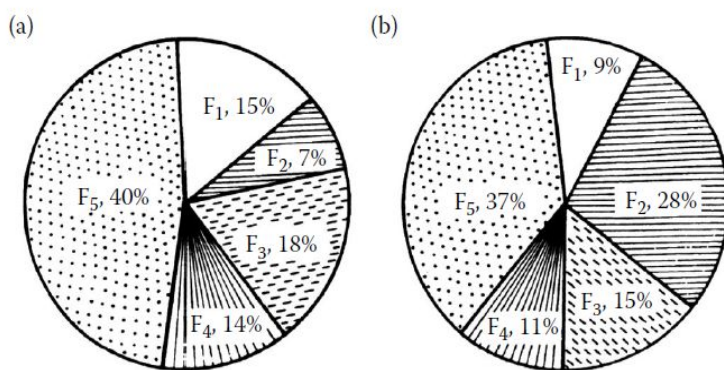


Fig 2. Especies de Cd en suelos lodados: (a) suelo no lodado, (b) suelo lodado. Especies: (F1) fácilmente soluble; (F2) intercambiable; (F3) asociado a óxidos hidratados; (F4) unido a materia orgánica; y (F5) residual. (3)

Haciendo una breve mención de las series liotrópicas, estas muestran la preferencia con la que unos cationes pueden desplazar a otros en el suelo, por distintos grados de selectividad. Los factores más importantes que pueden influir son la carga del catión, el radio del ión hidratado y el complejo de superficie producido. Para cationes con la misma carga, el poder

de reemplazo en el intercambio en los metales del grupo 12 (antes IIB) da este orden de preferencia, teniendo en cuenta el tipo de complejo de superficie: $Hg^{2+} > Cd^{2+} > Zn^{2+}$ (11).

En (11) también se establecen unos niveles de contaminación por cadmio. El contenido en la litosfera es de 0,2 mg/Kg, siendo común en suelo un intervalo de 0,01-0,70 mg/Kg, con un promedio de 0,06 mg/Kg en suelo.

4.2. Exposición en especies bioindicadoras y bioacumulación

Conviene antes de describir las distintas especies bioindicadoras hacer ciertas definiciones. La primera de ellas es la carga crítica contaminante, que se define como la cantidad máxima que puede recibir un suelo o un ecosistema para que a largo plazo no se presenten efectos nocivos sobre su estructura y funciones (11).

No es lo mismo hablar de bioacumulación que de bioconcentración. El primer término hace referencia al depósito gradual y durante un determinado periodo de tiempo, de una sustancia química en el organismo de un ser vivo, ya sea porque el producto es absorbido más rápidamente de lo que puede ser utilizado o porque no puede ser metabolizado; mientras que la bioconcentración se produce cuando dicha sustancia química va avanzando en los distintos niveles de la cadena alimentaria, de modo que en los niveles bajos no es suficiente para causar daños graves, pero en el último eslabón (en muchas ocasiones el ser humano) se va sumando y puede llegar a ocasionar daños graves (12).

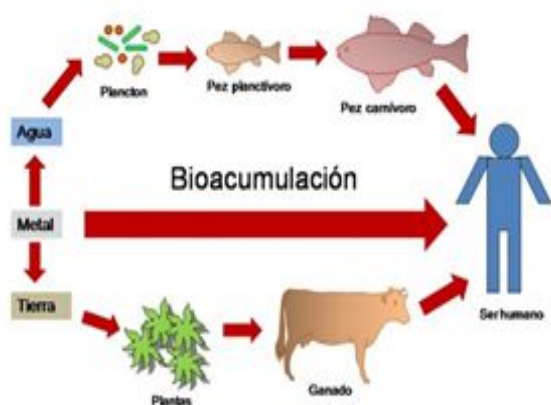


Fig 3. Esquema de bioacumulación a través de la cadena alimentaria. (12)

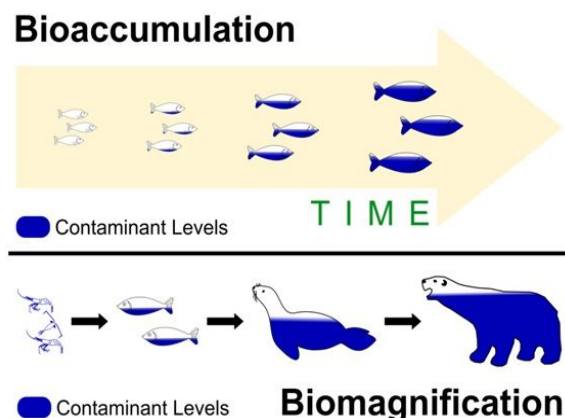


Fig 4. Diferencia entre bioacumulación y bioconcentración. (12)

Actualmente, el uso de organismos biológicos como indicadores para establecer las zonas contaminadas por metales es muy interesante, porque no solo son capaces de concentrar los metales que obtienen del agua y del sedimento hasta concentraciones mayores que las del

ecosistema, si no que estos organismos también pueden ofrecer información útil sobre los valores medios de contaminantes para conocer la biodisponibilidad relativa de los metales estudiados en un determinado lugar (13).

4.2.1. *Microorganismos*

Los microorganismos son muy sensibles a los cambios en el ecosistema, pudiendo ocasionar un serio impacto al conjunto de especies que conforma dicho ecosistema. En el caso de los metales, se pueden unir a la membrana plasmática o bien ser introducidos e interferir con el metabolismo tanto de microorganismos individuales como del conjunto de la microbiota (10). En general, los metales pesados (como Al, As, Cd, Hg, Pb, etc) disminuyen la cantidad de biomasa microbiana (SMB) y las actividades de determinados enzimas, por sustitución de metales esenciales que participan en la función y regulación de estos enzimas en condiciones normales. En consecuencia, se produce una pérdida de la diversidad del ecosistema y cambios en la estructura microbiana (14).

4.2.2. *Invertebrados*

En diversos estudios se trata el tema de la bioacumulación de metales pesados, entre ellos el cadmio, en plancton, parásitos helmínticos de especies marinas, insectos, erizo de mar, peces y arañas (10, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19).

Ya que el zooplancton es uno de los pilares fundamentales de la cadena trófica en el ecosistema marino, los cambios en los perfiles de ácidos grasos producidos por contaminantes deben ser notificados para comprender su impacto y evitar el paso de dichos contaminantes a eslabones superiores de la cadena (10).

El parásito *Gyrocotyle plana* (*Proleptus obtusus* no dio resultados significativos) y las especies de tiburones, *Callorhincus capensis*, *Rhinobatos annulatus* and *R. blochii* demostraron su capacidad para concentrar metales en sus tejidos, haciendo ver que es necesario llevar a cabo una monitorización a largo plazo del ecosistema marino (13).

La mayoría de los organismos de vida libre establecidos como organismos centinela son algas, plantas macrófitas e invertebrados bentónicos (bivalvos, anélidos, crustáceos), mientras que solo unas cuantas especies pelágicas (como peces) son útiles como bioindicadores. El

problema de la utilización principal de organismos sésiles como los bentónicos es que solo una pequeña porción del ecosistema puede ser estudiada (15).

Este review propone el uso de parásitos, en combinación con sus hospedadores en ambientes marinos, como bioindicadores de acumulación de contaminantes, ya que están presentes en muchos escalones a lo largo de la cadena alimentaria, de modo que pueden ser útiles como método alternativo junto con las mediciones convencionales de los niveles de contaminación, pudiendo evaluar además el grado de bioconcentración de un modo más eficaz. Teniendo en cuenta las concentraciones de los hospedadores (medida principalmente en músculo), se puede calcular la relación entre esta y la concentración en los parásitos, obteniendo más información sobre la duración de la exposición, ya que la acumulación se produce más rápido en el parásito. De este modo, niveles elevados de metal en el músculo del organismo hospedador y el correspondiente factor de bioconcentración menor indican un tiempo de exposición mayor.

Nachev et al. (15) añaden que es más importante es la interacción entre el parasitismo y la contaminación, ya que algunos parásitos helmínticos han demostrado reducir los niveles de metales de sus huéspedes. Esto supone una ventaja, pues se aumenta la tolerancia a determinados metales. Por otra parte, si no se considera este factor al elegir los organismos centinela, se obtendrán niveles de contaminación poco significativos. Hace ver que es necesario considerar el parasitismo en futuros estudios, pues es una herramienta adicional para obtener información sobre los ecosistemas marinos.

Najm et al. (16) concluye que los parásitos helmínticos pueden tener efectos beneficiosos tanto para los animales como para los humanos, en particular los acantocéfalos. Podrían tener utilidad en biorremediación, para eliminar los metales contaminantes del ecosistema (ya sean ríos, mares u océanos). De este modo, se confirma que los parásitos no deberían ser considerados como una amenaza. También recomienda la realización de nuevos estudios sobre parásitos helmínticos en diferentes hospedadores, como el león marino, otras especies de peces y en pájaros como el martín pescador, así como en algunos hospedadores intermedios como la artemia.

Algunos autores del estudio realizado por Gall JE et al. (14), mencionan que los invertebrados pueden adquirir metales no solo por ingestión de estos, sino que estos pueden ser absorbidos a través de sus exoesqueletos. Este es el caso de algunos moluscos, las lombrices de tierra o algunos insectos como el saltamontes o el grillo. Dependiendo de la

familia, el grado de acumulación de cadmio es variable. En el caso de este metal, los valores más altos fueron hallados en las familias de los formícidos y de los lumbrícidos.

Otro resultado de este estudio es que ciertas especies de insectos herbívoros desarrollaban aversión hacia la planta de la cual se alimentan habitualmente, incluso a pesar de que la variación en la concentración de metal presente en la planta fuera leve. Dependiendo de la especie, la aversión se produce a partir de cierta concentración. El heno blanco (*Holcus lanata*), al ser tratado con cadmio, disuadió a las polillas (14).

Tanto en los caso de los microorganismos y el plancton tratados anteriormente, como en la exposición de invertebrados como moluscos, cefalópodos o peces se debe estudiar más los posibles cambios en los perfiles de ácidos grasos, ocasionados por metales o cualquier otro contaminante (10). De lo contrario, además de contener menos nutrientes, en este caso ácidos grasos esenciales, el riesgo de exposición a metales pesados puede aumentar, por los ya mencionados procesos de bioacumulación y bioconcentración (3).

Un caso importante y a la vez curioso es el proceso de autofagia en embriones de erizo de mar (17). La autofagia permite la renovación de los componentes celulares, manteniendo así la homeostasis en los tejidos adultos. Es llevada a cabo en los lisosomas, de un modo natural o como respuesta a situaciones de estrés, pudiendo actuar incluso con el proceso apoptótico.

El erizo de mar normalmente debe sobrevivir a pesar de la acidificación de los océanos y del aumento de la temperatura del agua. Se ha demostrado que estos acontecimientos pueden producir efectos adversos en especies como el erizo de mar, como pueden ser una menor fertilización, menores tasas de desarrollo de larvas y tasas de supervivencia, además de alteraciones en el tamaño de su cuerpo. De este modo, se deduce que la autofagia pueda ser de gran ayuda en etapas tempranas, cuando este daño no está muy extendido o llevando a la muerte celular si el estrés es persistente o irreversible.

Los resultados del análisis transcriptómico llevado a cabo en diversas especies de erizo de mar podría dar información acerca de la expresión de genes relacionados con la autofagia, ya que el genoma es muy complejo y muestra diferentes patrones de expresión.

Cambiando de especie, los peces de agua salada son un ejemplo de posibles bioindicadores del ecosistema marino. Se ha documentado importante acumulación de metales pesados en sus órganos. Cabe destacar que aún son necesarios más estudios sobre el efecto que tiene la exposición a diferentes contaminantes al mismo tiempo, ya que en

condiciones normales los peces no se ven expuestos a un solo contaminante. Por otra parte, algunos metales se unen rápidamente a sustancias orgánicas y no pueden ser detectadas en el agua y pueden estar más disponibles para ser ingeridos o incluso algunos pueden acumularse en las branquias directamente desde el agua (18).

Los efectos de los metales sobre las arañas se deben a una combinación de factores, que pueden variar entre la misma o entre distintas especies, como el metal de que se trate, la vía de exposición, la respuesta fisiológica de los organismos, entre otros. Los metales pesados se acumulan en los tejidos de las arañas y son una muestra de bioconcentración, pudiendo tener un efecto inhibitorio en su desarrollo reproductivo. De todos modos, los mecanismos de detoxificación y tolerancia que desarrollan las arañas aún no está claro. Pueden ser útiles como bioindicadores, pero aún hay que aclarar las diferencias intra e interespecíficas que muestran (19).

4.2.3. Aves

Khademi et al. llevaron a cabo un estudio en el Golfo Pérsico (Irán), un lugar de gran importancia ecológica por sus especies marinas que, por otra parte, alberga algunas de las mayores plantas petroquímicas, tanto minería de gas como de petróleo, tierras dedicadas a la agricultura y diversas instalaciones industriales (20). Es una zona importante a la cual llegan en invierno muchas aves migratorias para alimentarse y vivir allí hasta la primavera. El estudio se centra en la concentración de cadmio en huevos de diferentes especies de pájaros, en su contenido interno y en la cáscara, en dos localizaciones distintas del golfo. Este cadmio ingresa a través de la dieta.

Se utilizan los huevos en lugar de las crías o los adultos debido a que estos pueden ser recogidos sin demasiadas consecuencias negativas, ni los problemas éticos de capturar a crías o adultos y permiten un mayor control sobre la zona de estudio. Tomar un solo huevo de un nido no ocasionará grandes desajustes en las poblaciones.

Las especies de estudio en (20) son el dromas (*Dromas ardeola*), la garceta costera occidental (*Egretta gularis*), el charrán embridado (*Onychoprion anaethetus*, anteriormente *Sterna anaethetus*) y el charrán bengalí (*Thalasseus bengalensis*, syn. *Sterna bengalensis*). Concluye que los huevos de charrán son mejores indicadores en zonas de cría expuestas a la contaminación, a pesar de que tanto el dromas como los charranes pasan varias semanas en los criaderos antes de la puesta, los charranes están en un nivel más alto de la cadena trófica,

por lo cual la acumulación de cadmio es mayor. Por otra parte, estudios de varios años y varias localizaciones han mostrado que los resultados pueden fluctuar dado que el tamaño de las muestras es pequeño. Los niveles de metales obtenidos en este estudio, entre ellos el cadmio, fueron varias veces menores que los niveles asociados a efectos adversos en pájaros. Nuevos estudios son aún necesarios, que investiguen los niveles de contaminación en el plumaje y en tejidos internos y sobre la transferencia de los contaminantes a los huevos y a las crías así como estudios en charranes sobre los efectos potenciales.

En el estudio de Binkowski et al. (21) se compara entre dos especies de patos, el ánade real (*Anas platyrhynchos* L.) y la focha común (*Fulica atra* L.). La conclusión es que, por ingesta de cadmio a través de la dieta, se alcanzan elevadas concentraciones en los riñones de los ánades. En comparación con patos en ambientes menos contaminados, las concentraciones halladas en este estudio son bastante altas. Lo que más influyó dichas concentraciones fue la edad, ya que significa un mayor tiempo siendo expuestos al cadmio, mientras que las diferencias entre especies fueron mucho menores y entre un sexo u otro ni siquiera fueron significativas. Para ambas especies, las mayores concentraciones se dieron en hígado y riñón, ya que son tejidos blandos en los cuales se produce un paso importante de sustancias tóxicas. Otras muestras que teóricamente se podrían usar como biomarcadores in vivo (sangre, plumas y excrementos) no mostraron concentraciones significativas de manera que no es posible su uso como bioindicadores en las condiciones descritas en este estudio.

4.2.4. Mamíferos

Filimonova et al. (10) continúa su avance llegando hasta revisar la literatura sobre mamíferos marinos y encuentra que se producen cambios en los perfiles de ácidos grasos a consecuencia de una exposición a diferentes tipos de contaminantes. Estos cambios fueron observados en cerebelo, melón, pulmón, hígado, riñones, músculo y en tejido adiposo.

En concreto, los más afectados fueron los ácidos grasos poliinsaturados (PUFA, por sus siglas en inglés), entre los cuales se encuentran dos ejemplos muy importantes de ácidos grasos esenciales, el ácido eicosapentaenoico y docosahexaenoico (EPA y DHA, respectivamente). Los metales pueden inducir la formación de especies reactivas de oxígeno (ROS), que conducen a la peroxidación lipídica, que afecta a los PUFA en mayor medida.

En el estudio que realizaron Gall et al. (14), en primer lugar se habla de pequeños mamíferos, como diferentes especies de roedores, los cuales pueden exponerse a

contaminación por metales a través de mecanismos ya comentados como ingestión, en algunos casos incluso por inhalación, a lo que se le añade el paso a través de la barrera placentaria o por hábitos de aseo, pueden ingerir metales si estos estaban adheridos a su piel. Hay casos en los que la edad o el sexo pueden afectar a las concentraciones, pero suelen ser específicos de una determinada especie o un determinado metal.

Zukal et al. (8) documentan exposición de murciélagos a nivel mundial a metales pesados por contaminación de sus hábitats para comprobar si son un modelo adecuado de bioindicadores del ambiente, pero no se ha confirmado salvo en algunos casos que esta exposición produzca directamente efectos adversos o aumente su mortalidad. Añade que, a pesar de haber encontrado casos de mayor tolerancia a la contaminación por metales, se producen efectos adversos similares a los que tienen lugar en otras especies de mamíferos, como son toxicidad hepática, renal, del sistema inmunitario, nervioso y en la reproducción.

Los datos muestran que los murciélagos pueden estar expuestos a varios contaminantes al mismo tiempo. Un escenario con diversos agentes causantes de estrés sería realista, pero una exposición a contaminantes en pequeñas concentraciones mezclados y los efectos subletales que producen son menos reconocidos y tienen una causalidad menor, lo que dificulta su documentación. Si se estudia a largo plazo, aparecerán efectos crónicos e indirectos, los cuales se ha visto que resultan más peligrosos. Los metales pueden aumentar la morbimortalidad de manera indirecta, favoreciendo la aparición de infecciones, por ejemplo, al modular respuestas fisiológicas.

Una medida que utiliza este estudio es la parte externa del cuerpo, pero lo ideal sería disponer de más medidas que no obligaran a sacrificar al animal en cuestión. Conociendo los hábitos de alimentación y las presas de los murciélagos, el análisis del guano puede dar mucha información útil. Esta puede ser un área que dé buenos resultados en futuras investigaciones (8).

Siguiendo un esquema en el cual se avanza de especies más pequeñas hacia otras de mayor tamaño y complejidad, es el turno de mamíferos más grandes, la literatura se centra más en las especies que pueden formar parte de la alimentación humana, como reses y ovejas, pero también animales salvajes como el ciervo o el jabalí. Una vez más, la concentración ingerida depende de la región y de la extensión que tenga la vegetación, así como lo rápido que pase el metal por el tracto digestivo. En el caso de estos mamíferos, la acumulación puede ser muy elevada, ya que pueden alimentarse de grandes cantidades de vegetación y esta puede ser más variada que en el caso de los mamíferos pequeños (14).

Lane et al. (4) ponen el acento en la preocupación sobre el cadmio y su relación con la salud humana, también en la acumulación en suelo agrícola y su posible paso a productos de consumo. En rumiantes, la exposición puede deberse a distintas actividades, como industria, minería y algunas prácticas agrícolas, aunque también puede que se trate de una región cuyo suelo es más rico en cadmio. Los signos clínicos de una intoxicación por cadmio no se suelen producir con una ingesta diaria por debajo de 5 mg/kg, superando de 5 a 10 veces el máximo permitido por la UE. Los niveles de Cd en los tejidos del ganado son principalmente dependientes del contenido de este en la dieta, pero también depende de su disponibilidad en el suelo. En diversos estudios experimentales se ha puesto de manifiesto la capacidad del cadmio para alterar el estado de otros oligoelementos, alterando así su disponibilidad; o bien alterando el efecto protector de los minerales.

4.2.5. Humanos

Llegando a una rama final de la cadena alimentaria se encuentra el ser humano, uno de los seres vivos con mayor riesgo de intoxicación dada la diversidad de fuentes a través de las cuales se expone al cadmio y por los mecanismos descritos hasta el momento. El principal órgano afectado es el riñón, siendo bien conocido el caso de Itai-Itai acaecido en Japón a lo largo del siglo XX (1, 4, 5). En cuanto a la agricultura, las aguas de riego pueden ser una fuente de metales pesados. También suelen estar presentes algunos metales en fertilizantes con fosfato, los cuales son purificados en menor grado para abaratar costes (1, 4, 5, 14, 22).

El cadmio puede atravesar la barrera placentaria. Esto puede ocasionar daños neurológicos, en el desarrollo y endocrinos, ya que el feto es muy vulnerable al no haber desarrollado completamente los sistemas de detoxificación (14). Algunos de los síntomas de la intoxicación por cadmio son cardiomiopatía, daño renal y hepático, gastroenteritis, neumonitis, osteomalacia y cáncer (23). Se ha realizado un promedio de las concentraciones comunes en tejidos humanos, con una concentración de referencia de 0,71 mg/Kg. En riñón e hígado las concentraciones son 1,5 y 0,8 mg/Kg, respectivamente. En el tejido cerebral, se ha encontrado en sujetos sanos una concentración de 0,19 mg/Kg de cadmio en la sustancia nigra y de 0,42 en el putamen. A su vez, en plasma es de 0,1 µg/L, ya que por la sangre solo circula hasta llegar a tejidos diana, en los cuales se acumula. El problema surge en las mujeres, ya que puede concentrarse en la leche materna hasta alcanzar 1 µg/L, que podría tener graves consecuencias para en el desarrollo del lactante. Esta concentración de media es menor en Canadá (0,08 µg/L) y en primer lugar se encuentra Alemania (24,6 µg/L).

También hay que destacar la acumulación de cadmio por inhalación en fumadores, la siguiente tabla hace una comparación:

Fumadores con cáncer de pulmón	No fumadores con cáncer de pulmón	Fumadores grupo control	No fumadores grupo control
0,733 mg/Kg	0,370 mg/Kg	0,318 mg/Kg	0,404 mg/Kg

*Adaptada de (23).

Otros autores (24) dejan claro que se necesitan llevar a cabo medidas más efectivas para prevenir la intoxicación por exposición profesional, así como análisis de rutina más frecuentes en fábricas y zonas adyacentes. Se deben hacer mediciones tanto de aire, como de suelos y aguas. En el caso de la afectación del sentido de la vista, se debe promover una campaña de sensibilización, a granjeros y a trabajadores de fábricas en primer lugar. Entre estas medidas de protección no deben faltar gafas, mascarillas y guantes, además de análisis de sangre y exámenes oftalmológicos para los trabajadores de fábricas. A pesar de que la exposición al cadmio y al plomo no son las más comunes, es muy frecuente que se produzcan en regiones industriales.

4.3. Métodos de prevención y eliminación del cadmio en el ecosistema

4.3.1. Prevención de la absorción y paso a la cadena alimentaria, caso del arroz

Los cultivos inundados de arroz disminuyen la absorción de cadmio pero aumentan la de arsénico. Se han estudiado variedades mutantes que absorben muy poca cantidad de Cd y se han llevado a cabo cultivos en Japón con este propósito. Si se combina con cultivos aeróbicos podría disminuirse al mismo tiempo la captación de As (5).

Este estudio también habla del uso de óxidos de hierro y manganeso en cultivos inundados, ya que estos consiguen que el As(III), especie de arsénico predominante en los cultivos inundados, se adsorba a su superficie. Los óxidos de Mn concretamente, contribuyen a la oxidación del As para formar As(V) y que así se adsorba a los óxidos de Fe.

El silicio es capaz de mitigar la contaminación por metales pesados en los organismos vegetales, pues puede reducir su captación en diversas especies al tiempo que mejora su crecimiento y aumenta su biomasa. Esto se basa en disminuir la cantidad de iones de metales disponibles, estimulando procesos de quelación, complejación y coprecipitación de metales

junto con el Si, así como sistemas antioxidantes en las plantas, compartimentación y otras alteraciones estructurales que inmovilicen los metales impidiendo su paso a los tejidos vegetales, haciéndolos así susceptibles de pasar a la cadena trófica (25).

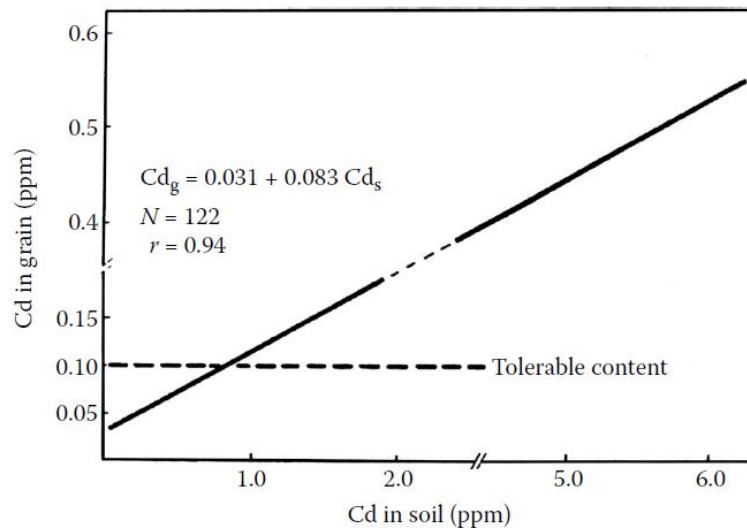


Fig 5. Relación entre el contenido en Cd del grano de trigo (Cd_g) y el contenido total en el suelo (Cd_s). (3)

En la mayoría de experimentos con Si solo se ha estudiado la contaminación por un metal en condiciones controladas, pero la realidad es que se pueden producir casos en que haya plantas expuestas a varios metales o a un metal y otro tipo de contaminante (por ejemplo, pesticidas), además de que las condiciones pueden ser muy variables. Otro punto a tener en cuenta es que la mayoría de los estudios se centran en una exposición a corto plazo, de manera que poco se sabe de otros posibles efectos a largo plazo. Se piensa que, por un proceso de envejecimiento, la capacidad de los silicatos para secuestrar metales va disminuyendo.

En el estudio llevado a cabo por Slamet-Loedin et al. se busca la biofortificación del arroz en Fe y Zn, para así minimizar la cantidad de Cd y con ello sus efectos adversos. En campos inundados, la absorción de cadmio es baja, pero los arrozales tienden a volverse aeróbicos debido a escasez de agua, haciendo que aumente el riesgo de absorción de cadmio. Disminuyendo la expresión de determinados genes que intervienen en la absorción del cadmio se podría mitigar este problema. Se ha descubierto que mediante la silenciación del gen OsNRAMP5 (proteína del macrófago asociada a resistencia natural 5) o por su inactivación con plantas knock-out, se produce una disminución significativa de la absorción de cadmio a través de la raíz y el contenido en paja y grano, sin afectar a los niveles de hierro (22). Su

presencia queda restringida a la raíz y al tejido alrededor del xilema. Se han logrado reducir la concentración de cadmio a niveles despreciables, incluso en plantas que han crecido en suelos con alta contaminación.

4.3.2. Fitorremediación

Para un desarrollo sostenible, es necesario un mayor uso de “tecnologías verdes”, como la fitorremediación (1). Los métodos tradicionales se basan en retirar suelos contaminados e incinerarlos o tratarlos con productos químicos, de modo que destruyen o merman seriamente las comunidades microbianas que los habitan. Además de para la fitoextracción de metales o la reforestación, las plantas metalófitas pueden ser útiles en el control de la erosión (1, 14).

A pesar de los efectos negativos de los metales sobre la salud de los ecosistemas, su presencia ha llevado a la evolución de ciertas plantas con la capacidad de tolerar suelos con alta concentración de metales (14). A estas especies se las denomina metalófitas y pueden ser utilizadas para reforestación o para eliminación de contaminantes en el suelo, actuando junto a las comunidades de microorganismos simbiotes que residen en sus raíces.

En el estudio de Sharma et al. (1) comienzan con algas como *Micrasterias denticulata*, *Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus quadricauda* o *Spirogyra hyalina*, en las cuales el cadmio se une a metalotioneínas y fitoquelatinas, puede competir con transportadores de zinc, hierro o calcio. Después, en musgos la hiperacumulación se produce por inducción de la síntesis de glutatión o por la presencia de una proteína de choque térmico (HSP70). Esto se ha observado en *Bryum capillare*, *Ceratodon purpureus* o *Leptodictyum riparium*. En helechos, se consigue una alta absorción tras un tratamiento con sal, en especies del género *Pteris*. Por último, se revisan algunas especies de angiospermas como *Thlaspi caerulescens*, capaz de producir una gran cantidad de biomasa y en plantas ornamentales como *Impatiens balsamina*, *Calendula officinalis* o *Althea rosea*. En *C. officinalis*, la concentración de Cd encontrada en los brotes fue menor que en las raíces, lo que lleva a pensar que presente la capacidad de limitar la transferencia del cadmio de la raíz a los brotes.

Por otra parte, se indica la necesidad de seguir investigando para encontrar nuevas especies metalófitas y estudiando las comunidades microbianas simbiotes. Sería idóneo que fuesen especies adaptadas a la zona contaminada.

5. Conclusiones

1. El cadmio puede ser accesible y entrar a la cadena alimentaria dependiendo de su disponibilidad. Esta depende el pH, la solubilidad, la presencia de otros componentes en el suelo que faciliten o impidan su movilización, ya sea por quelación, complejación, coprecipitación con otros metales o adsorción a ciertos óxidos.

2. Los riesgos asociados al cadmio son numerosos, pueden afectar a la práctica totalidad de órganos y tejidos, aunque presenta mayor afinidad por el hígado y los riñones, según el consenso encontrado en la literatura actual. Además, dependiendo del nivel en la cadena trófica, la concentración alcanzada puede ser superior en varios órdenes de magnitud.

3. Existen numerosos métodos de eliminación de los contaminantes metálicos, pero conllevan una destrucción del ecosistema microbiano que habita en los suelos y sus costes son demasiado elevados. Por ello es recomendable fomentar el uso de técnicas verdes como la fitorremediación, haciendo uso de plantas metalófitas capaces de hiperacumular metales.

Es necesario que no se detenga aquí la investigación, ya que conociendo los factores que favorecen la disponibilidad del cadmio se puede reforzar su inmovilización, aumentando la concentración de sus formas inactivas, o quelando o promoviendo su adsorción a otras sustancias, que no resulten deletéreas para el medio ambiente. Si no es posible esto o resulta difícil, también hay que seguir investigando especies vegetales metalófitas, para que retiren la mayor cantidad posible de esos metales tóxicos.

6. Referencias bibliográficas

1. Sharma A, Sachdeva S. Cadmium toxicity and its phytoremediation: A review. ResearchGate. IJSER. 2015;6(9):395-405.
2. Real Farmacopea Española (RFE) en internet, 5ª Edición. Extranet del Boletín Oficial del Estado (BOE). <https://extranet.boe.es/farmacopea/doc.php?id=10000>
3. Kabata-Pendias A. Trace Elements in Soils and Plants: CRC Press; 2010. https://books.google.es/books?id=YQfMBQAAQBAJ&dq=trace+elements+in+soils+and+plants&hl=es&source=gbs_navlinks_s
4. Lane E, Canty M, More SJ. DOI: 10.1016/j.rvsc.2015.06.004
5. Suda A, Makino T. DOI: 10.1016/j.geoderma.2015.12.017.
6. QuímicaWEB (20 de diciembre de 2016). <http://www.quimicaweb.net/tablapperiodica/paginas/cadmio.htm>
7. Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR). Resúmenes de Salud Pública - Cadmio (Cadmium) (20 de diciembre de 2016). https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs5.html

8. Zukal J, Pikula J, Bandouchova H. DOI: 10.1016/j.mambio.2015.01.001.
9. Rosa D. Evaluación agro-ecológica de suelos para un desarrollo rural sostenible: Mundi-Prensa; 2008.
https://books.google.es/books?id=M-ED1W3t2BEC&dq=evaluacion+agro-ecologica+de+suelos+diego+de+la+rosa&hl=es&source=gbs_navlinks_s
10. Filimonova V, Gonçalves F, Marques JC, De Troch M, Gonçalves AM. DOI: 10.1016/j.ecolind.2016.03.044.
11. Porta J, López-Acevedo M, Poch RM. Edafología: uso y protección de suelos: CSIC. Mundi-Prensa; 2014.
https://books.google.es/books/about/Edafolog%C3%ADa_uso_y_protecci%C3%B3n_de_suelos.html?id=7x1fAwAAQBAJ&redir_esc=y
12. Ecoticias.com. Reciclaje de Residuos. ¿Qué es la bioacumulación de tóxicos? (18 de enero de 2017). <http://www.ecoticias.com/residuos-reciclaje/115317/bioacumulacion-toxicos>
13. Morris T, Avenant-Oldewage A, Lamberth S, Reed C. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2016.01.027.
14. Gall JE, Boyd RS, Rajakaruna N. DOI: 10.1007/s10661-015-4436-3.
15. Nachev M, Sures B. DOI: 10.1016/j.seares.2015.06.005.
16. Najm M, Fakhar M. DOI: 10.18869/acadpub.mlj.9.4.26.
17. Chiarelli R, Martino C, Agnello M, Bosco L, Roccheri MC. DOI: 10.1007/s12192-015-0639-3.
18. Awheda I, Ahmed AY, Fahej MA, Elwahaishi SS, Smida FA. Fish as bioindicators of heavy metals pollution in marine environments: a review. Indian Journal of Applied Research. 2016;5(8).
19. Yang H, Peng Y, Tian J, Wang J, Hu J, Wang Z. DOI: 10.1007/s12665-016-5828-6.
20. Khademi N, Riyahi-Bakhtiari A, Sobhanardakani S, Rezaie-Atagholipour M, Burger J. DOI: 10.1007/s00244-014-0084-9.
21. Binkowski ŁJ, Sawicka-Kapusta K. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2014.07.059.
22. Slamet-Loedin IH, Johnson-Beebout SE, Impa S, Tsakirpaloglou N. DOI: 10.3389/fpls.2015.00121.
23. Kabata-Pendias A, Mukherjee AB. Trace Elements from Soil to Human: Springer; 2007.
https://books.google.es/books/about/Trace_Elements_from_Soil_to_Human.html?id=JYAq9X9phnYC&source=kp_cover&redir_esc=y
24. Nelke KH, Mulak M, Luczak K, Pawlak W, Nienartowicz J, Szumny D, et al. DOI: 10.15244/pjoes/39551.
25. Adrees M, Ali S, Rizwan M, Zia-ur-Rehman M, Ibrahim M, Abbas F, et al. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2015.05.011.