

# Capítulo 7

## Fitorremediación

Cristina Garcidueñas Piña

*Departamento de Fisiología y Farmacología del Centro de Ciencias Básicas  
Universidad Autónoma de Aguascalientes*

### Resumen

La contaminación que perturba medios acuáticos, aéreos y terrestres ha ocasionado problemas de salud humana, trastornos en la vida de diversas especies y en la subsistencia de los ecosistemas. Los metales pesados son elementos que al ser expuestos a los seres vivos afectan diversos procesos biológicos y que, debido a actividades como la agricultura, la minería, la quema de combustible fósil, han incrementado su concentración en capas superficiales del suelo. Considerando esto, se han desarrollado estrategias que posibilitan la recuperación de espacios contaminados. Algunas plantas tienen la capacidad de absorber cantidades elevadas de metales acumulándolos, sus acciones tóxicas, eliminándolos del sitio en que se desarrollan. Esta propiedad es la que ha sido aprovechada para la

fitorremediación, técnica que ha sido utilizada con éxito en la eliminación de diferentes contaminantes, en especial de metales pesados. Diversas especies de plantas han sido evaluadas en su capacidad de fitorremediación, entre las que se cuentan las leguminosas. Las leguminosas forman asociaciones simbióticas con bacterias del suelo del género *Rhizobium*, que no solo favorecen ciertos aspectos vitales de la planta, sino que también parecen contribuir en el proceso de fitorremediación.

## Introducción

La contaminación de agua, aire y suelo ha ido en incremento con las actividades humanas y con el aumento desmedido de la población. Los contaminantes ambientales pueden entrar a la cadena trófica al ser absorbidos por las plantas, provocando efectos adversos en la salud humana que van desde moderados hasta mortales. Además, pueden provocar la pérdida de especies, de hábitats y de ecosistemas completos. Aunque el principal objetivo que debería considerarse sería buscar alternativas para evitar contaminar más, lo cierto es que existen una gran cantidad de zonas contaminadas que requieren atención urgente. La investigación de técnicas que permitan corregir estos sitios ha llevado a evaluar diferentes estrategias, entre las que se cuenta la fitorremediación. Muchos estudios han demostrado la eficacia de diferentes plantas para la eliminación de metales pesados y otros contaminantes de diversos sitios. En este capítulo exponemos las principales características de la fitorremediación, algunos estudios que han sido exitosos para eliminar metales pesados de suelo, cómo se pueden mejorar las cualidades de la planta para favorecer este proceso, y algunos resultados de nuestro trabajo realizado con mezquite.

## Contaminación por metales pesados

Los metales pesados son elementos que por su peso molecular tienden estar en capas profundas de la corteza terrestre, pero que debido a procesos naturales y antropogénicos se pueden encontrar en la superficie, incluyendo áreas agrícolas. En la actualidad se pueden encontrar suelos con altas concentraciones de metales y metaloides, que han sido contaminados por el uso de fertilizantes, la

minería, la metalurgia, el uso de combustible fósil y las actividades militares. Los metales esenciales como el cobre (Cu), hierro (Fe), níquel (Ni), cobalto (Co), manganeso (Mn) y zinc (Zn), son requeridos por los organismos en pequeñas cantidades para el desarrollo de los procesos biológicos, aunque a concentraciones elevadas resultan tóxicos, siendo capaces de inducir alteraciones a nivel de ADN, membrana celular, respiración, fotosíntesis y actividades enzimáticas. Por su parte, los metales no esenciales como cadmio (Cd), mercurio (Hg) o plomo (Pb), no poseen función biológica conocida, pero pueden ingresar a los organismos utilizando los mismos sistemas de transporte que los esenciales, y su presencia, aún en concentraciones muy bajas, causan efectos adversos. La contaminación de suelos con metales pesados representa un riesgo tanto a la salud humana como a la de los ecosistemas, microorganismos, animales y plantas.

## Plantas y metales pesados

Las plantas cuentan con sistemas de transporte para absorber los metales esenciales del suelo, ya que la carencia de estos puede traer consecuencias negativas en su desarrollo. El Cu ingresa a las células de las plantas por canales iónicos especiales para  $\text{Cu}^{2+}$ , pero si en el suelo se encuentra como  $\text{Cu}^{1+}$ , la planta modifica sus canales para facilitar la captación de este metal. Esta estrategia asegura el suministro de este importante metal. La concentración del metal en el interior de la célula tiende a equilibrarse con la que hay en el suelo, por lo que en suelos altamente contaminados la planta absorbe grandes cantidades. Las plantas no cuentan con sistemas de transporte específicos para los metales no esenciales, sin embargo, estos utilizan los de los esenciales para llegar al interior de las células vegetales. Las plantas han desarrollado sistemas de control de ingreso, almacenaje y eliminación, para protegerse de los metales pesados y al mismo tiempo abastecerse de los metales esenciales. Las principales estrategias que utilizan las plantas para tolerar el exceso de metales pesados son: (1) la exclusión, limitando la asimilación de los metales, y (2) la acumulación de los metales en compartimientos donde no provoquen daño celular.

Además, las plantas responden a las condiciones estresantes que les aportan los metales pesados mediante una serie de cambios bioquímicos que les permiten eliminarlos o disminuir los efectos adversos. La presencia de metales

pesados induce la producción de hormonas como etileno, ácido jasmónico y ácido abscísico; así como de compuestos quelantes tales como fitoquelatinas y metaloproteínas, que ayudan a la planta a tolerar el daño. Si las estrategias mencionadas son insuficientes, la célula aumenta la producción de especies reactivas de oxígeno (EROs) que producen una inhibición de diversos procesos celulares por estrés oxidativo, con lo que se desencadenan en la célula varios mecanismos para contrarrestarlos como son la producción de compuestos como el glutatión, flavonoides, carotenoides y de enzimas antioxidantes como superóxido dismutasas, catalasas y peroxidasas.

## **Estrategias de remediación**

La necesidad de corregir sitios contaminados con metales pesados ha llevado a desarrollar estrategias que incluyen técnicas fisicoquímicas y biológicas. Entre las fisicoquímicas están el lavado de suelos o aplicación de campo eléctrico, la excavación y el tratamiento térmico que, aunque son rápidos, también son costosos, contaminan agua, y el suelo y sus ecosistemas pueden quedar destruidos. La biorremediación es una técnica biológica que permite la eliminación de contaminantes de un sitio y que pueden ser llevada a cabo por microorganismos (bacterias y hongos) y sus enzimas, y por plantas (Fitorremediación).

## **Fitorremediación**

La fitorremediación utiliza plantas y su rizósfera para remover los contaminantes, disminuir su biodisponibilidad o convertirlos a formas menos tóxicas, con la consecuente regeneración del sitio. Esta técnica hace uso de la capacidad que tienen algunas especies vegetales de crecer y desarrollarse en suelos contaminados, con ventajas técnicas y económicas en relación con los sistemas fisicoquímicos. Sin embargo, es una tecnología que ha presentado algunos inconvenientes como los siguientes: (1) se ve afectado por el clima y las condiciones estacionales, (2) requiere de largos periodos de tiempo, (3) funciona sólo para cierto tipo de contaminantes, (4) depende de la profundidad de las raíces y de la biodisponibilidad de los contaminantes, (5) los contaminantes pueden entrar a la cadena trófica, y (6) debe encontrarse un destino a la bio-

masa de la planta que queda contaminada. En este último punto, para plantas del género *Brassica* y *Helianthus tuberosus* L. empleadas en la fitorremediación se ha hallado una solución, la biomasa contaminada puede ser reutilizada para la producción de biodiésel.

La fitorremediación es llevada a cabo mediante diversas estrategias que en conjunto son responsables de la recuperación del suelo: fitoextracción, fitodegradación, fitovolatilización y rizorremediación (Fig. 7.1).

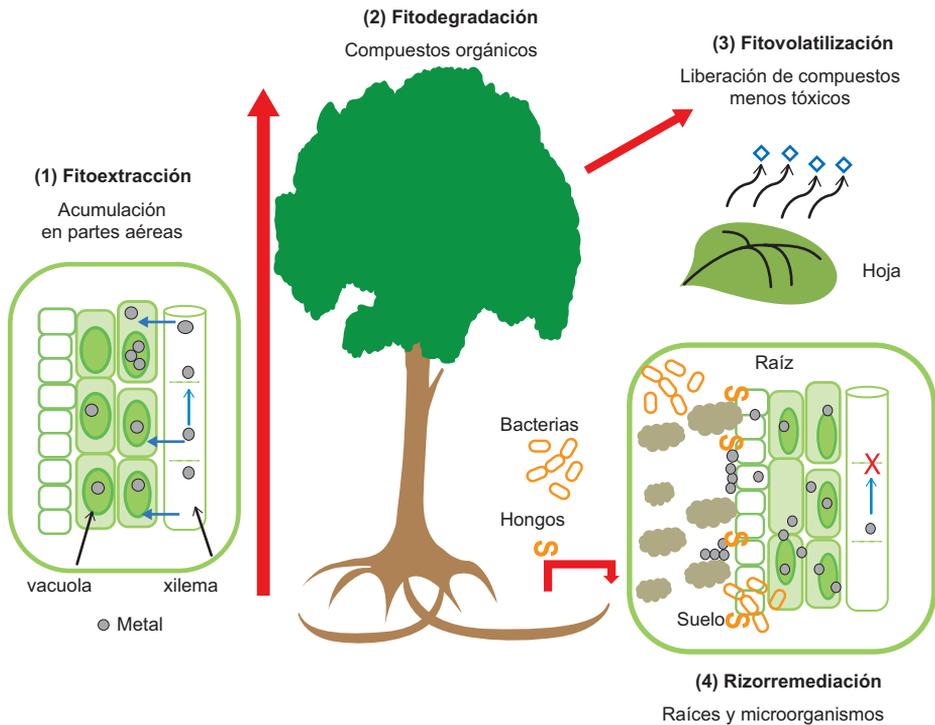


Figura 7.1. Estrategias de fitorremediación. (1) Fitoextracción: acumulación de metales en partes aéreas de la planta, traslocados a través del xilema y almacenados en vacuolas; (2) fitodegradación: biotransformación de compuestos orgánicos; (3) fitovolatilización: los compuestos volátiles salen de la planta a través de las hojas; y (4) rizorremediación: llevada a cabo en la rizósfera donde los microorganismos modulan el crecimiento de las plantas y facilitan la eliminación de contaminantes del suelo (Imagen modificada de DalCorso *et al.*, 2019).

## Fitoextracción

En la fitoextracción, los metales del suelo son absorbidos por las raíces de las plantas, son conducidos por el xilema hasta las partes aéreas y almacenados y concentrados en compartimentos celulares (vacuolas) o extracelulares de hojas y tallos (Fig. 7.1). Las plantas tienen la habilidad de fitoextraer metales esenciales, no esenciales y metaloides (Se, As). Las plantas utilizadas en la fitoextracción (Figura 7.2) de metales pesados tienen que cumplir con ciertos requisitos: (1) ser hiperacumuladoras, es decir, tener la habilidad de acumular y tolerar altos niveles de metales; (2) llevar el metal de la raíz a las partes aéreas; (3) desarrollar gran cantidad de hojas y tallos; (4) tener raíces profundas. Se consideran hiperacumuladoras a las plantas que concentran más de 10,000 mg/kg peso seco de Zn o Mn, o más de 1000 mg/kg peso seco de Ni, Cu, o Pb, o más de 100 mg/kg peso seco de Cd. La planta debe contar con algún proceso que le permita hiperacumular el metal sin que le cause daño. Entre estos procesos se cuentan la compartimentalización, la complejación y la síntesis de proteínas que se unen al metal o que quelan a los iones metálicos, así como sustancias de respuesta al estrés. La estrategia de fitoextracción es la más efectiva en la descontaminación de suelos, y ya varias familias de plantas como las Lamiaceae, Fabaceae, Scrophulariaceae, Asteraceae, Euphorbiaceae, y Brassicaceae han sido empleadas por su capacidad de hiperacumular metales pesados. Plantas como *Populus* spp (álamos) y *Salix* spp (sauces) son plantas hiperacumuladoras y han sido utilizadas para eliminar Cd y Zn de sitios contaminados. Estos árboles producen una gran cantidad de biomasa en poco tiempo, y acumulan el metal en las hojas más que en el tronco, por lo que pueden ser removidas continuamente.

## Fitodegradación

La fitodegradación es el metabolismo o biotransformación del contaminante que ocurre dentro de la planta. Algunas plantas tienen la capacidad de biotransformar compuestos orgánicos mediante reacciones enzimáticas, pasando por tres fases. En la fase I, monooxigenasas y carboxilesterasas llevan a cabo reacciones de óxido-reducción e hidrólisis, generándose compuestos más hidrofílicos que pueden ser más o menos tóxicos que el original. El producto de la fase I

entra en reacciones de fase II, donde las sustancias son atacadas por transferasas, propiciando su conjugación con azúcares, aminoácidos o glutatión, formando complejos sin actividad biológica. En la fase III los complejos provenientes de la fase II son atrapados por estructuras de la planta, ya sea que ingresen a las vacuolas o que formen enlaces con componentes de la pared celular, como la lignina. Plantas como *Brassica juncea*, *Cichorium intybus* son capaces de metabolizar el DDT (diclorodifeniltricloroetano), que es un plaguicida de gran persistencia y movilidad ambiental, que fue muy utilizado hace algunos años para combatir insectos, tanto los que afectan las cosechas como los que funcionan como vectores de malaria y tifus. Otras plantas, como *Myriophyllum aquaticum*, *Helianthus annuus* pueden biotransformar el TNT (2,4,6-trinitrotolueno), un explosivo muy tóxico que contamina suelo y agua debido a su uso bélico.

### Fitovolatilización

Algunos metales y metaloides, al ingresar a la planta, son biotransformados a compuestos volátiles que pueden ser liberados a la atmósfera en la estrategia conocida como fitovolatilización (Fig. 7.1). Así, compuestos inorgánicos de Se, presentes en el suelo, son absorbidos por plantas, y mediante reacciones enzimáticas involucradas en el metabolismo del Se, los convierten a compuestos orgánicos, menos tóxicos que los originales, que son liberados a través de las hojas al aire. *Chara canescens* y *Arabidopsis thaliana* son plantas en la que se ha observado este mecanismo de remediación, y se ha reportado que en este proceso el Hg se volatiliza como el ion  $\text{Hg}^{2+}$  que es menos tóxico, y el selenio como  $(\text{CH}_3)_2\text{Se}$  que es 600 veces menos tóxico que el elemento.

### Rizorremediación

Con la rizorremediación se produce la eliminación de contaminantes del suelo por procesos que llevan a cabo las raíces de las plantas y los microorganismos que se encuentran en el sitio (Fig. 7.1). En el suelo, la planta puede participar con los procesos de fitoestabilización y rizofiltración. La fitoestabilización limita la lixiviación, la movilidad, la biodisponibilidad y la peligrosidad de los contaminantes. Un ejemplo de fitoestabilización es la conversión de la forma

nociva del cromo ( $\text{Cr}^{6+}$ ) a su forma menos soluble ( $\text{Cr}^{3+}$ ) sin que se remueva del suelo y afecte a la planta. La rizofiltración facilita la absorción y la concentración del contaminante en las células de la raíz. La rizofiltración ha sido empleada para eliminar metales pesados y metales radiactivos como uranio (U) y estroncio (Sr) con especies como *Brassica juncea* y *Helianthus annuus*.

Por otro lado, el suelo y las plantas son colonizados por una gran diversidad de microorganismos. Esto es especialmente evidente en la rizósfera, donde bacterias y hongos asociados a las raíces influyen positivamente en la vida de la planta. Los microorganismos participan tanto directa como indirectamente en la remediación del suelo, ya sea activamente degradando, adsorbiendo o absorbiendo los contaminantes; o previniendo o neutralizando efectos adversos que producen factores bióticos o abióticos, y aumentando la resistencia de las plantas a la presencia de los contaminantes. Los microorganismos contribuyen a que la planta esté en buenas condiciones para realizar la fitorremediación, proporcionando enzimas, solubilizando minerales, fijando nitrógeno y suministrando fitohormonas, como el ácido indol acético que promueva la elongación de la raíz. En suelos contaminados con metales pesados, bacterias de los géneros *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Arthrobacter* y *Rhizobia*, y hongos como Ascomicetos, Basidiomicetos y micorrizas arbusculares, pueden cambiar la forma iónica del metal, disminuir su toxicidad o modificar su solubilidad. Estos procesos permiten la eliminación de contaminantes del suelo, sin que alcancen partes aéreas de la planta, como en la fitoextracción, limitando su ingreso a la cadena trófica y su volatilización.

## Mejoras en la capacidad de fitorremediación

Plantas que se desarrollan en los sitios contaminados pueden ser útiles en la fitorremediación, en cuyo caso, la intervención humana consistiría en aportar humedad y fertilizantes para favorecer el desarrollo vegetal (Fig. 7.2a). Por su parte, los ensayos *in vitro* han permitido seleccionar plantas potencialmente útiles en la fitorremediación. Se busca que las plantas cumplan con las siguientes características: (1) que tengan un rápido crecimiento, (2) que sean de fácil mantenimiento, (3) que resten toxicidad al contaminante, (4) que produzcan gran cantidad de biomasa y por supuesto, (5) que sean tolerantes al contaminante. Pueden conseguirse plantas con una mayor producción de biomasa, de

acumulación de metal y de tolerancia a la toxicidad de los metales pesados por técnicas de fitomejoramiento clásicas o biotecnológicas, como la obtención de transgénicas (Fig. 7.2b). Mediante técnicas de ingeniería genética, se ha logrado la transformación de plantas, especialmente con genes provenientes de bacterias, que le confieren mejores características en el transporte de metales, en la respuesta al estrés oxidativo o la capacidad de detoxificación. También se ha empleado la estrategia de bioaumentación, que es el enriquecimiento del suelo con microorganismos que establecen simbiosis en la rizósfera con las plantas, bacterias (*Rizobium* o endofíticas) u hongos micorrízicos o con otro tipo de microorganismos no necesariamente simbióticos (Fig. 7.2c).

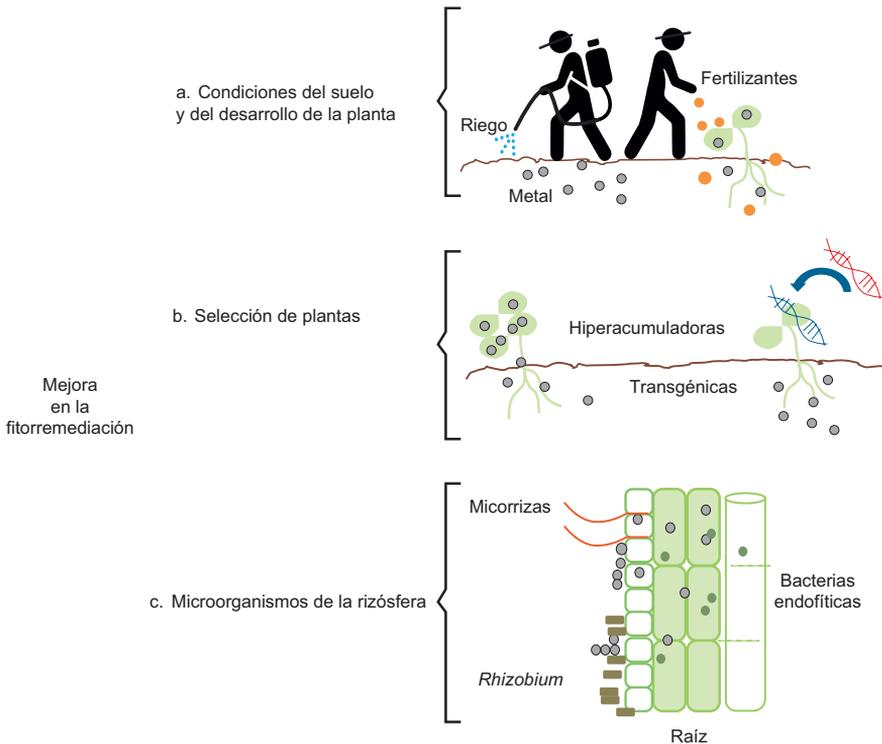


Figura 7.2. Plantas para la fitorremediación. (a) Intervención con técnicas de cultivo para favorecer el desarrollo de plantas nativas en los sitios contaminados; (b) selección de plantas con mejor capacidad de hiperacumulación, mayor biomasa y tolerancia a los metales; (c) enriquecimiento de la rizósfera con microorganismos que favorezcan la fitorremediación.

## Leguminosas en la fitorremediación

La familia de las leguminosas (Fabaceae) incluye alrededor de 200 especies, y han sido consideradas en diversos estudios como candidatas para la fitorremediación, especialmente por su capacidad de desarrollarse en suelos con pocos nutrientes. Además, son conocidas por formar asociaciones simbióticas con bacterias del género *Rhizobium*. La rizerremediación y en general la fitorremediación pueden verse beneficiada por los microorganismos presentes en el suelo, ya que favorecen el desarrollo de la raíz y del follaje de las plantas, además de que están implicadas en la resistencia ante condiciones de estrés biótico y abiótico. Las plantas de la familia de las leguminosas son importantes en los ecosistemas, ya que incrementan la fertilidad por su capacidad de fijar nitrógeno atmosférico, capacidad que se ve aumentada en la simbiosis *Rhizobium*-leguminosa, y que puede ser benéfica en suelos contaminados con metales. En un estudio realizado con *Phaseolus coccineus* se observó el beneficio de la asociación de esta leguminosa con microorganismos de la rizósfera, tanto en el desarrollo de la planta como en la regeneración del suelo contaminado con hidrocarburos. En una investigación utilizando la especie *Acacia farnesiana* se demostró que tolera y acumula plomo, haciéndola una especie competente para este tipo de tecnologías. Por su parte, *Prosopis laevigata*, conocido comúnmente como mezquite, es capaz de germinar y crecer en diferentes concentraciones de Cd (II) y Cr (VI), por lo que también se considera con potencial en la fitorremediación de metales pesados.

## Protocolo

Evaluación de la tolerancia a la exposición a metales y de la capacidad de fitorremediación de plantas

1. Preparar dos soluciones de  $\text{CuSO}_4$ , una a 10 mM y la otra a 20 mM.
2. Mezclar 100 ml de cada una de las soluciones con 100 g de tierra libre de hojas, piedras o terrones. Incluir como control, tierra con agua sin cobre.
3. Colocar la mezcla en macetas.
4. Sembrar de 10 semillas de diferentes plantas.
5. Incubar a temperatura ambiente.

6. Contabilizar las semillas germinadas y mediante análisis estadístico de Chi cuadrada, determinar si existen diferencias entre las cultivadas en presencia del metal con las de su respectivo control.
7. Continuar la incubación durante 3 semanas, manteniendo la humedad de la tierra, evitando escurrimiento.
8. Observar crecimiento y desarrollo de las plantas.
9. Mantener el desarrollo durante 3 meses.
10. Mediante análisis en espectroscopio de absorción atómica determinar el contenido de Cu en diferentes secciones de la planta y suelo.
11. Calcular el factor de bioconcentración (FBC), cuyo valor indica la capacidad de la planta de acumular el metal; y el factor de traslocación (FT), que representa la capacidad de la planta para llevar el metal desde las raíces hasta los brotes utilizando las siguientes fórmulas:

$$\text{FBC} = \text{Cu planta } \mu\text{g/g} / \text{Cu suelo } \mu\text{g/g}$$
$$\text{FT} = \text{Cu aéreo } \mu\text{g/g} / \text{Cu raíz } \mu\text{g/g}$$

En un experimento, se pusieron semillas de mezquite, rábano, jitomate y lechuga a diferentes concentraciones de  $\text{CuSO}_4$ . Las semillas de mezquite mostraron un porcentaje de germinación y una elongación de la plántula sin diferencias significativas entre las concentraciones de 0 y 10 mM de  $\text{CuSO}_4$  (Fig. 7.3a y 7.3b). Aunque con mezquite se observó un efecto inhibitorio con 20 mM de  $\text{CuSO}_4$ , con las otras especies se presentó una inhibición de la germinación y del crecimiento a concentraciones menores (Fig. 7.3a y 7.3b), lo que sugiere una mayor tolerancia del mezquite.

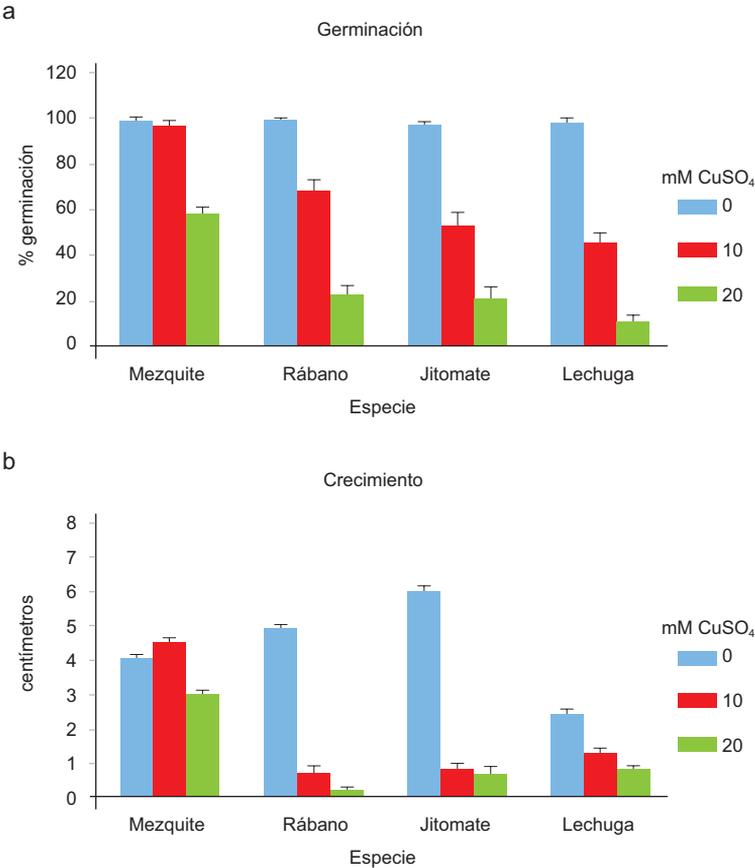


Figura 7.3. Germinación y crecimiento en presencia de  $\text{CuSO}_4$ . (a) El porcentaje de germinación del mezquite se mantuvo sin diferencias significativas con el control hasta la concentración de 10 mM de  $\text{CuSO}_4$ , en las concentraciones superiores se observa una inhibición de la germinación. (b) La elongación de las plántulas de mezquite no se vio afectada por la exposición a 10 mM de  $\text{CuSO}_4$ , pero sí a mayores concentraciones. Las otras especies evaluadas resultaron ser menos tolerantes a la toxicidad del cobre.

## Abreviaturas

ADN: ácido desoxirribonucleico  
EROs: especies reactivas de oxígeno  
FBC: factor de bioconcentración  
FT: factor de traslocación  
CuSO<sub>4</sub>: sulfato de cobre  
mM: milimolar  
g: gramos  
µg: microgramo  
ml: mililitros

## Glosario

**Antioxidante.** Sustancia química que evitan la acción de los radicales libres y sus efectos adversos.

**Bioconcentración.** Acumulación de una sustancia química en un organismo al ingresar a él directamente del ambiente.

**Biodiésel.** Es un combustible obtenido a partir de lípidos de origen vegetal o animal.

**Biodisponibilidad.** Cantidad y velocidad con que una sustancia ingresa a un organismo.

**Biomasa.** Materia orgánica que puede ser utilizada para obtener energía.

**Biotransformación.** También llamado metabolismo. Es un proceso enzimático mediante el cual un organismo vivo modifica una sustancia química para convertirla en otra de más fácil eliminación.

**Cadena trófica.** También llamada cadena alimenticia. Secuencia de seres vivos que se alimentan unos de otros en un cierto orden.

**Canales iónicos.** Poros de la membrana celular formados por proteínas que permiten el paso de iones al interior o exterior de la célula.

**Endofítico (a).** Organismo que vive en el interior de una planta.

**Enzima.** También llamados catalizadores biológicos. Proteína que acelera la velocidad de una reacción.

**Especies reactivas de oxígeno.** Moléculas muy reactivas debido a la presencia de una capa de electrones de valencia no apareados. Son inestables, contienen oxígeno y reacciona fácilmente con otras moléculas de la célula.

- Hiperamumulador (a). Se refiere a plantas capaces de crecer en suelo rico en metales y de concentrarlos en su interior. Una planta se considera hiperacumuladora si puede contener por lo menos 1000 mg de níquel por kilogramo de materia seca en algún tejido de la parte aérea.
- Leguminosas. También llamadas fabáceas. Son una familia del orden de las fabales que agrupa árboles, arbustos y hierbas que producen fruto tipo legumbre.
- Lignina. Polímeros orgánicos que forma parte de los componentes de la pared celular vegetal, le da estructura y soporte a las plantas vasculares y a algunas algas.
- Lixiviación. También llamada extracción sólido-líquido. Es la separación de una o varias sustancias contenidas en una matriz sólida, usualmente pulverizada, mediante el uso de disolventes líquidos.
- Metales pesados. Elementos químicos metálicos de alta y que pueden ser tóxicos para los seres vivos.
- Mezquite. Especies de planta leguminosa del género *Prosopis*.
- Quelante. También llamado secuestrante. Sustancia química que forma complejos con iones metálicos
- Rhizobium. Género de bacterias gramnegativas fijadoras de nitrógeno, que junto con *Bradyrhizobium*, *Mesorhizobium*, *Sinorhizobium* y *Azorhizobium* comprenden el grupo de rizobios.
- Rizósfera. Es la parte del suelo cercana a las raíces de las plantas en donde se desarrolla la vida microbiana. Es un ecosistema donde interactúa la planta a través de sus raíces con el suelo y sus microorganismos.
- Simbiosis. Interacción entre seres vivos de distinta especie en la que se benefician mutuamente.
- Tolerancia. Es la capacidad que tienen los individuos de una especie de soportar cantidades excesivas de alguna sustancia.
- Traslocación. Cambio de posición o de lugar.
- Vacuola. Organelo en forma de pequeñas vesículas de las células de los hongos y de las plantas que permiten el almacenamiento de distintas sustancias, como azúcares o agua.
- Volatilización. Es el proceso en el que una sustancia química se convierte de un estado líquido o sólido a un estado gaseoso o de vapor.
- Xilema. Es un tejido que transporta agua y minerales disueltos desde la raíz hasta el resto de la planta.

## Bibliografía

- Anjum NA, Hasanuzzaman M, Hossain MA, Thangavel P, Roychoudhury A, Gill SS, Rodrigo MA, Adam V, Fujita M, Kizek R, Duarte AC, Pereira E, Ahmad I (2015) Jacks of metal/metalloid chelation trade in plants-an overview. *Front Plant Sci.* 6:192. <http://doi.org/10.3389/fpls.2015.00192>
- Arocena JM, Van Mourik JM, Schilder M, Faz A (2010) Initial soil development under pioneer plant species in metal mine waste deposits. *Restor. Ecol.* 18, 244–252
- Buendía-González J, Orozco-Villafuerte F, Cruz-Sosa CE, Barrera-Díaz, Vernon-Carter EJ (2010) *Prosopis laevigata* a potential chromium (VI) and cadmium (II) hyperaccumulator desert plant. *Bioresource Technology* 101. 5862–5867
- DalCorso G, Fasani E, Manara A, Visioli G, Furini A (2019) Heavy Metal Pollutions: State of the Art and Innovation in Phytoremediation. *Int J Mol Sci* 20(14). <http://doi.org/10.3390/ijms20143412>
- Delgadillo-López, A. E., González-Ramírez, C. A., Prieto-García, F., Villagómez-Ibarra, J. R. & Acevedo-Sandoval, O. (2011). Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical and subtropical agroecosystems*, 14(2), 597–612.
- Fagorzi C, Checcucci A, diCenzo GC, Debiec-Andrzejewska K, Dziewit L, Pini F, Mengoni A (2018) Harnessing Rhizobia to Improve Heavy-Metal Phytoremediation by Legumes. *Genes (Basel)* 9(11). <http://doi.org/10.3390/genes9110542>
- Ferrera-Cerrato R, Alarcón A, Trejo-Aguilar D, Sangabriel W, Mendoza-López MR, Cruz-Sánchez JS, López-Ortiz C y Delgadillo-Martínez J (2007) Fitorremediación de un suelo contaminado con combustóleo utilizando *Phaseolus coccineus* y fertilización orgánica e inorgánica. *Agrociencia* 41, 817–826
- Ghnaya T, Mnassri M, Ghabriche R, Wali M, Poschenrieder C, Lutts S, Abdelly C (2015) Nodulation by *Sinorhizobium meliloti* originated from a mining soil alleviates Cd toxicity and increases Cd-phytoextraction in *Medicago sativa* L. *Front Plant Sci* 6:863. <http://doi.org/10.3389/fpls.2015.00863>
- Gouda S, Kerry RG, Das G, Paramithiotis S, Shin HS, Patra JK (2018) Revitalization of plant growth promoting rhizobacteria for sustainable

- development in agriculture. *Microbiol Res* 206:131-140. <http://doi.org/10.1016/j.micres.2017.08.016>
- Hasan MM, Uddin MN, Ara-Sharmeen I, F Alharby H, Alzahrani Y, Hakeem KR, Zhang L (2019) Assisting Phytoremediation of Heavy Metals Using Chemical Amendments. *Plants (Basel)* 21;8(9). <http://doi.org/10.3390/plants8090295>
- Koźmińska A, Wiszniewska A, Hanus-Fajerska E, Muszyńska E (2018) Recent strategies of increasing metal tolerance and phytoremediation potential using genetic transformation of plants. *Plant Biotechnol Rep*12(1):1-14. <http://doi.org/10.1007/s11816-017-0467-2>
- Mahajan P & Kaushal J (2018) Role of Phytoremediation in Reducing Cadmium Toxicity in Soil and Water. *J Toxicol* 2018:4864365. <http://doi.org/10.1155/2018/4864365>
- Maldonado A, Favela-Torres E, Rivera-Cabrera F, Volke-Sepulveda T (2011) Lead bioaccumulation in *Acacia farnesiana* and its effect on lipid peroxidation and glutathione production. *Plant and Soil* 339, 377-389
- Mishra J, Singh R, Arora NK (2017) Alleviation of Heavy Metal Stress in Plants and Remediation of Soil by Rhizosphere Microorganisms. *Front Microbiol.* 8:1706. <http://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01706>
- Ojuederie OB & Babalola OO (2017) Microbial and Plant-Assisted Bioremediation of Heavy Metal Polluted Environments: A Review. *Int J Environ Res Public Health* 14(12). <http://doi.org/10.3390/ijerph14121504>
- Peñarrubia L, Romero P, Carrió-Seguí A, Andrés-Bordería A, Moreno J, San A (2015) Temporal aspects of copper homeostasis and its crosstalk with hormones. *Frontier in Plant Science* 6:255. <http://doi.org/10.3389/fpls.2015.00255>
- Saleem MH, Ali S, Rehman M, Hasanuzzaman M, Rizwan M, Irshad S, Shafiq F, Iqbal M, Alharbi BM, Alnusaire TS, Qari SH (2020) Jute: A Potential Candidate for Phytoremediation of Metals-A Review. *Plants (Basel).*;9(2). <http://doi.org/10.3390/plants9020258>
- Sangabriel W, Ferrera-Cerrato R, Trejo-Aguilar D, Mendoza-López M R, Cruz-Sánchez JS, López-Ortiz C, Alarcón A (2006) *Fuel*, 22(2), 63–73
- Suman J, Uhlik O, Viktorova J, Macek T (2018) Phytoextraction of Heavy Metals: A Promising Tool for Clean-Up of Polluted Environment? *Front Plant Sci* 9:1476. <http://doi.org/10.3389/fpls.2018.01476>