

Uso del cadmio como metal tóxico indicador en una empresa minera cooperante. Parte 1. Ejemplo de una prueba sencilla para toxicidad

Use of cadmium as a toxicity indicator metal in a cooperating mining company. Part 1. Example of a simple toxicity test

María Guadalupe Soto-Esquivel*

Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Facultad de Química, Departamento de Ingeniería Química, Conjunto E, Edificio E-3 Alimentos y Química Ambiental, Laboratorios 301, 302 y 303 de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental, Ciudad Universitaria, 04510 Ciudad de México, México. Tels.: +55 5622 5300 al 04, Fax +55 5622 5300. Correo-e (*e-mail*): magsotoe@comunidad.unam.mx

*Autora a quien debe dirigirse la correspondencia

Recibido: Mayo 10, 2022

Aceptado: Junio 30, 2022

RESUMEN

Con la finalidad de disminuir la problemática generada por el uso del agua en una empresa minera cooperante, que implica la reutilización del agua del proceso de flotación para volver a extraer y concentrar los minerales de interés, se realizó un bioensayo o prueba de toxicidad para cadmio en disoluciones acuosas empleando semillas de *Lactuca sativa* (lechuga romana). Se utilizaron siete concentraciones de CdCl_2 (0.0, 0.2, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 1.0 mg/L) y se analizaron tres variables de respuesta: Largo de radícula, largo de hipocótilo y % de germinación, bajo condiciones controladas de temperatura y contenido de humedad. Se observó claramente una relación inversa entre el incremento de la concentración del cloruro de cadmio y las longitudes de hipocotilo y radícula. De igual manera, el porcentaje de germinación de las semillas se ve disminuido a medida que la concentración del cadmio aumenta. Se plantea la realización de pruebas de cultivo de callos para verificar el efecto del cadmio en el tejido de dos especies de hidrofitas, tules (*Typha latifolia*) y carrizos (*Phragmites australis*), especies que formarán parte de un humedal artificial que será propuesto como parte de la solución a la empresa minera cooperante para el uso eficiente de sus fuentes de agua.

Palabras clave: Flotación selectiva de minerales, cadmio disuelto en agua, pruebas de germinación, *Lactuca sativa*

ABSTRACT

*In order to reduce the problems generated by the use of water in a cooperating mining company, which implies the reuse of water from the flotation process to re-extract and concentrate the minerals of interest, a well-test or toxicity test for cadmium was carried out. in aqueous solutions using seeds of *Lactuca sativa* (romaine lettuce). Seven concentrations of CdCl_2 (0.0, 0.2, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 1.0 mg/L) were used and three response variables were analyzed: Radicle length, hypocotyl length, and germination %, under controlled conditions of temperature and moisture content. An inverse relationship was clearly observed between the increase in cadmium chloride concentration and the hypocotyl and radicle lengths. Similarly, the percentage of seed germination is decreased as the concentration of cadmium increases. Callus culture tests are proposed to verify the effect of cadmium on the tissue of two species of hydrophytes, cattails (*Typha latifolia*) and reeds (*Phragmites australis*), species that will form part of an artificial wetland that will be proposed as part of the solution to the cooperating mining company for the efficient use of its water sources.*

Keywords: Mineral selection flotative, dissolved cadmium in water, germination tests, *Lactuca sativa*

INTRODUCCIÓN

Con la finalidad de disminuir la problemática generada por el uso del agua en una empresa minera cooperante, que implica la reutilización del agua del proceso de flotación para volver a extraer y concentrar los minerales de interés, se plantea como parte de un proyecto más grande, el uso de

bioensayos de toxicidad con cadmio y la verificación de los efectos del mismo en tules y carrizos. En la **Figura 1a** puede verse que el efluente líquido del proceso de flotación usado para concentrar los minerales de interés se envía a enormes depósitos construidos por el hombre en localizaciones geográficamente adecuadas para almacenarlos conocidas como presas de jales¹⁷, en las que separan el material sólido y retornan el agua para reutilizarla en el proceso nuevamente (**Figura 1b**). La presa original de esta empresa minera tiene un área de 132,800 m² (13 ha) y almacena aproximadamente 5.5 millones ton y hay una segunda presa de jales, en operación desde principios de 2008 (Soto Esquivel et al., 2013). En la **Figura 1b** se presenta la opción de pretratar el agua proveniente de la flotación antes de que se 'intemperice' en la presa de jales.



Figura 1a. Agua de reproceso bombeada de la presa de jales hacia la nave industrial donde se realiza la flotación para enriquecer los minerales deseables (esfalerita, galena y calcopirita) (Pacheco Gutiérrez y Durán de Bazúa, 2006)

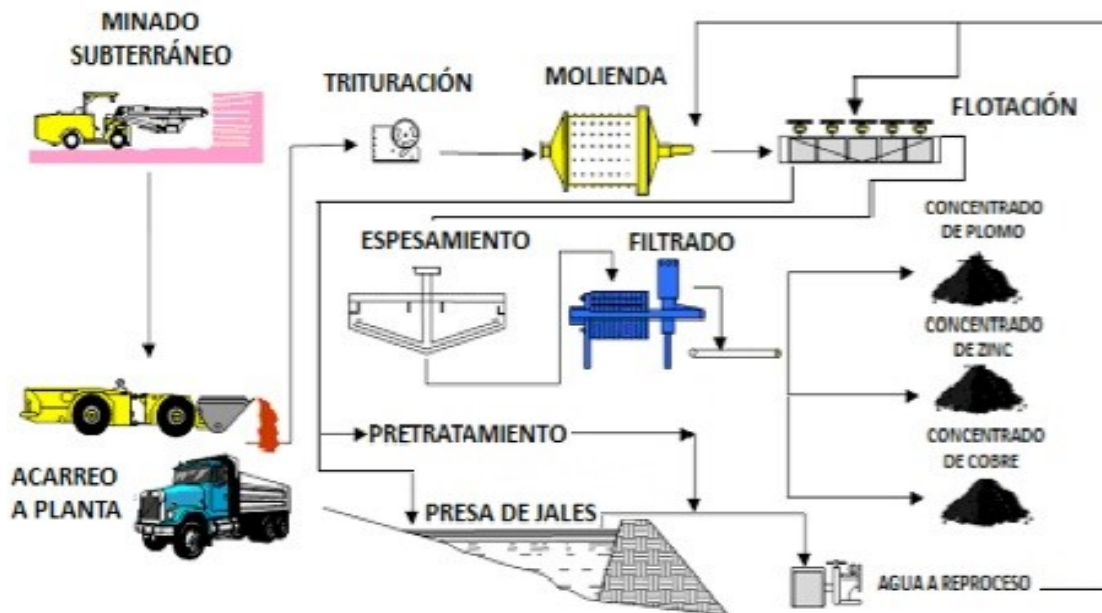


Figura 1b. Producción de concentrados de zinc, plomo y cobre a partir de un yacimiento subterráneo de sulfuros masivos con una posible derivación para el pretratamiento del agua que sale de las tinas de flotación para su tratamiento anaerobio-aerobio (Modificada de Pacheco Gutiérrez y Durán de Bazúa, 2006)

¹⁷ Palabra usada en México para designar estas instalaciones ingenieriles. Viene del náhuatl *xalli*, arenas finas (o partículas finamente molidas usadas en la metalurgia prehispánica para obtener oro y plata) [Cabrera, 2022]

Existen dos opciones que no son necesariamente excluyentes, una para pretratar el agua antes de sufra intemperismo usando un biorreactor anaerobio (Leal-Gutiérrez et al., 2021, 2022) seguido de un sistema de humedales artificiales (Rojas-Torreblanca, 2021;) o usar antes de retornar el agua, las especies vegetales para mantener los metales de estos minerales potencialmente tóxicos relativamente confinados (Ruiz-López, 2009), ya sea en la biomasa del biorreactor anaerobio y/o en el entorno de las plantas acuáticas.

Esta reutilización del agua del proceso de flotación permite volver a extraer y concentrar los minerales de interés sin detrimento de la eficiencia siendo una tecnología más limpia (Delfín Alcalá y Durán de Bazúa, 2008; González Sandoval et al., 2008; Leal-Gutiérrez et al., 2021, 2022). Para corroborar que esto sea posible es necesario estudiar la factibilidad de que esas plantas acuáticas puedan sobrevivir con esa agua de proceso de las empresas mineras (Ruiz-López, 2009; Soto-Esquivel et al., 2013).

La exposición de las plantas a metales pesados trae como consecuencia variadas respuestas biológicas, a nivel bioquímico, celular y fisiológico, cambios a los que se denomina biomarcadores (Livingstone, 1993; Melacon, 1995). Los principales biomarcadores reseñados en plantas como respuesta a la exposición a metales pesados son aumento en la pero-oxidación lipídica, variaciones en la relación clorofila/carotenoides, aumento en la concentración de ácido jasmónico, nicotianamina, glutatión (GSH) y tioles, aparición de péptidos quelantes y fitoquelatinas, y aumento en la actividad o inhibición de las enzimas antioxidantes (De-la-Rosa et al., 2005; Gallego et al., 1996; Mendoza y Moreno, 2006; Pernía et al., 2008, Smeets et al., 2005; Weber et al., 2004). El cadmio, por ejemplo, es considerando un metal fitotóxico debido a que su presencia produce efectos negativo sobre el desarrollo normal de las plantas (**Tabla 1**).

Tabla 1. Algunos efectos del cadmio sobre las plantas reportados en la literatura (modificado de Pernía et al., 2008)

Efectos	Referencias
Reducción en el crecimiento y de la elongación de las raíces	Aina, et al., 2007; Chaoui y Ferjani, 2005; Gianazza et al., 2007; Pomponi et al., 2006; Wang et al., 2007; Wang y Zhou, 2005
Inhibición de la apertura estomática	Barceló, et al., 1986; Barceló y Poschenrieder, 1990
Inhibición de la síntesis de clorofila	Drazic y Mihailovic, 2005; Mishra et al., 2006; Padmaja et al., 1990; Wu et al., 2004
Inhibición de la fotosíntesis	Dalla-Vecchia et al., 2005; Drazkiewicz et al., 2003; Pietrini et al., 2003; Van-Assche y Clijsters, 1990
Clorosis	Aidid y Okamoto, 1992; Aravind y Prasad, 2003, 2005; Mishra et al., 2006
Disminución en el contenido de carotenoides	Larsson et al., 1998; Mishra, et al., 2006; Rai et al., 2005
Disminución en la tasa de transpiración	Haag-Kerwer et al., 1999; Sandalio et al., 2001
Inhibición de la germinación del polen y el crecimiento del tubo polínico	Xiong y Peng, 2001
Aumento en los niveles de peroxidación lipídica	Chaoui et al., 1997; Mishra et al., 2006; Singh et al., 2006; Zhang et al., 2005
Estrés oxidativo y enzimas antioxidantes	Brahim et al., 2007; Gallego et al., 2005; Han et al., 2008; Maksymiec y Krupa, 2006; Romero-Puertas et al., 2004, 2007
Inhibición de la fosforilación oxidativa mitocondrial	Kessler y Brand, 1995

Efectos	Referencias
Interferencia con la toma, transporte y uso de varios macro y micronutrientes, especialmente Fe, Mn y Zn	Sanita-di-Toppi y Gabbrielli, 1999
Aceleración de la senescencia celular	Sanita-di-Toppi y Gabbrielli, 1999
Reacciones semejantes a hipersensibilidad	Piqueras et al., 1999
Reducción del intercambio normal de H ⁺ /K ⁺ y la actividad de la ATPasa de membrana plasmática	Obata et al., 1996
Disturbio en el control redox y el metabolismo	Devi et al., 2007; Ernst et al., 2008; Schützendübel y Polle, 2002
Polimorfismos en el ADN	Liu et al., 2005; Mukherjee et al., 2004

Recientemente se ha propuesto otra manera de evaluar la toxicidad de residuos industriales, municipales, plaguicidas, sedimentos de agua dulce, suelo y lixiviados de residuos sólidos, mediante la realización de bioensayos con plantas (Panizza de León, 2009). Con este tipo de bioensayos se determina lo que se conoce como fitotoxicidad. Los bioensayos deben involucrar especies de importancia comercial y rápido crecimiento, por ello es habitual utilizar las semillas de lechuga romana (*Lactuca sativa*) en estos bioensayos. El bioensayo de toxicidad con semillas de lechuga (*Lactuca sativa*) es una prueba estática de toxicidad aguda (120 horas de exposición) en el que se pueden evaluar los efectos fitotóxicos de compuestos puros o de mezclas complejas en el proceso de germinación de las semillas y en el desarrollo de las plántulas durante los primeros días de crecimiento (Sobrero y Ronco, 2008). En la **Figura 2** se presenta la morfología de la mencionada planta, observándose claramente el hipocótilo y la radícula.

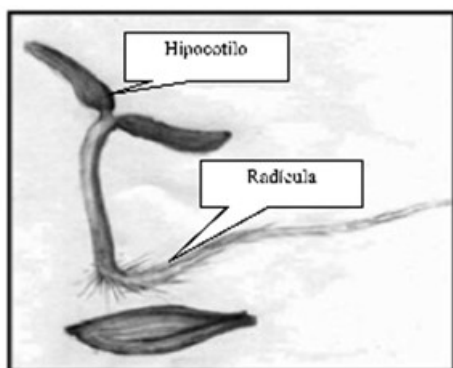


Figura 2. Morfología de la semilla y la plántula de lechuga, *Lactuca sativa* (tomado de Sobrero y Ronco, 2008)

Entre los factores más importantes a tener en cuenta para lograr la respuesta morfológica deseada en un cultivo de tejido no diferenciado *in vitro*, es la composición del medio de cultivo. El medio de cultivo está conformado por macro y micronutrientes esenciales para la supervivencia de la planta, nutrientes (hidratos de carbono, vitaminas), agentes reguladores del crecimiento y hormonas vegetales, que ayudarán a obtener un callo, una planta completa, o un órgano vegetal en particular, a partir del explante elegido (en condiciones de asepsia) y algún agente gelificante inerte (agar, gelrite, etc.). También es necesario adoptar procedimientos de asepsia para mantener los cultivos libres de contaminación microbiana (Badillo-Corona et al., 2009; Fuerte-Martínez et al., 2019; Rewers et al., 2012).

Usando técnicas de cultivo de tejidos la formación de callos puede ser inducida en numerosos órganos y tejidos de plantas, que usualmente no desarrollan callos en respuesta a un daño. El material vegetal comúnmente cultivado incluye cambium vascular, parénquima de reserva, periciclo de raíz, cotiledones, mesófilo de la hoja y tejido provascular (Fuerte-Martínez et al., 2019; Lallana y Lallana, 2003; Dodds y Roberts, 1987; Rogers, 2003).

Una de las características importantes del callo, desde un punto de vista funcional, es su irregular crecimiento, teniendo el potencial para desarrollar raíces normales, brotes y embriones que forman plántulas.

El objetivo de esta fase de la investigación fue la implantación de una sencilla metodología para corroborar la toxicidad de un metal tomando como ejemplo el cadmio.

MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño de experimentos

Se consideraron siete niveles (concentraciones de cadmio en solución acuosa de cloruro de cadmio ($\text{CdCl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) (0, 0.2, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 1.0 mg/L). Hubo diez repeticiones de cada nivel. Las concentraciones mencionadas arriba fueron sugeridas considerando las concentraciones máximas y mínimas de cadmio total y soluble que determinó Ruiz-López (2009), en una mezcla de 30% lixiviados de jales y 70% de una solución nutritiva (**Tabla 2**).

Tabla 2. Valores máximos y mínimos de cadmio total y soluble, medidos por Ruiz-López (2009)

Cadmio medido	Concentración mínima (mg/L)	Concentración máxima (mg/L)
Total	0.15	0.45
Soluble	0.20	0.50

Bioensayo con lechuga (*Lactuca sativa*)

La solución preparada se ajustó a un pH de 4.8, con ácido sulfúrico (0.1 N) e hidróxido de sodio (0.1 N) según la metodología de Panizza-de-León (2009), antes de hacer las diluciones mencionadas. Una vez que las diluciones quedaron listas, se adicionaron 4 mL por caja de Petri, de 50 mm de diámetro, previamente preparada con un poco de algodón y una capa de papel filtro Whatman No. 40. Después se añadieron diez semillas de lechuga por cada caja y se mantuvieron en una cámara oscura termostatazada, a 22°C, por 120 h (5 días).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Bioensayo con lechuga (*Lactuca sativa*)

Después de los 5 días de incubación, se revisaron las cajas y se midieron el largo radicular y largo del hipocótilo de cada brote y se calcularon los porcentajes de inhibición de las semillas.

La información experimental obtenida está plasmada en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Valores promedio y desviación estándar de la longitud radicular, la longitud de hipocótilo y el porcentaje de germinación de las semillas de lechuga romana (*Lactuca sativa*)

Concentración de Cd (mg/L)	Longitud del hipocótilo (cm)	Longitud de la radícula (cm)	Germinación de las semillas (%)	Observaciones en el color
0.0	3.4 ± 0.3	2.2 ± 0.4	93 ± 7.8	Verde brillante
0.2	3.3 ± 0.5	1.9 ± 0.5	94 ± 6.6	Verde brillante
0.4	3.1 ± 0.5	1.8 ± 0.7	92 ± 8.7	Verde brillante
0.5	2.7 ± 0.5	1.5 ± 0.5	87 ± 14.2	Verde menos intenso
0.6	2.3 ± 0.4	1.2 ± 0.5	85 ± 12	Verde café
0.8	1.7 ± 0.5	1.0 ± 0.4	76 ± 12.8	Verde café
1.0	1.4 ± 0.4	0.6 ± 0.3	68 ± 12.5	Más café que verde

Al graficar la concentración de cadmio contra la longitud del hipocótilo, la longitud de la radícula y el porcentaje de germinación de las semillas de lechuga, se obtienen las **Figuras 4, 5, y 6**.

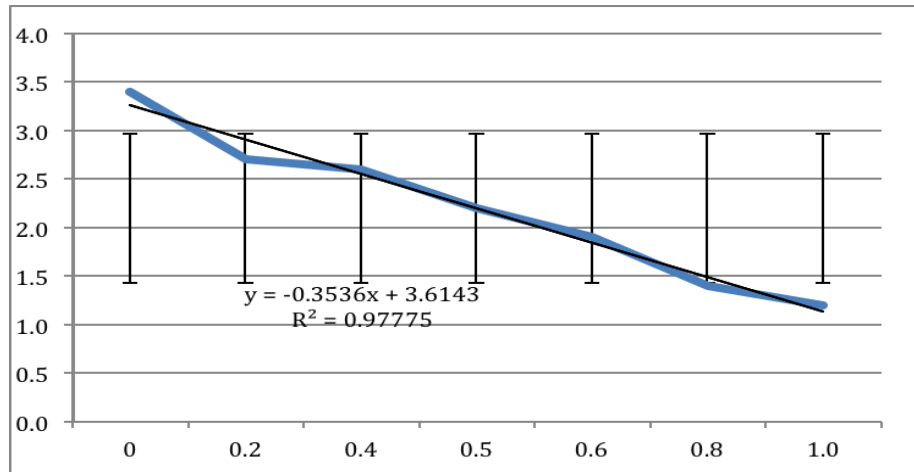


Figura 4. Longitud del hipocótilo (cm) vs. concentración de cadmio (mg/L)

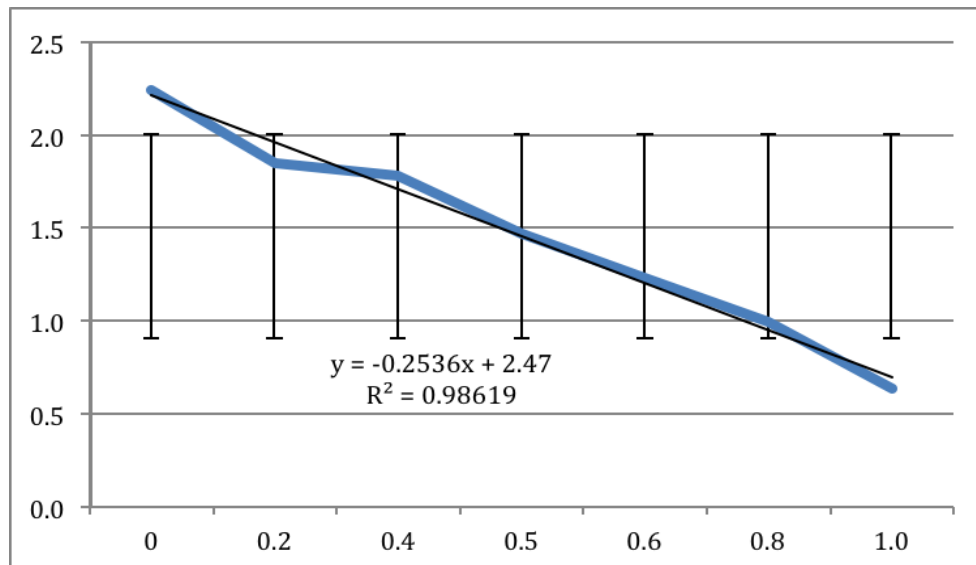


Figura 5. Longitud de la radícula (cm) vs. concentración de cloruro de cadmio (mg/L)

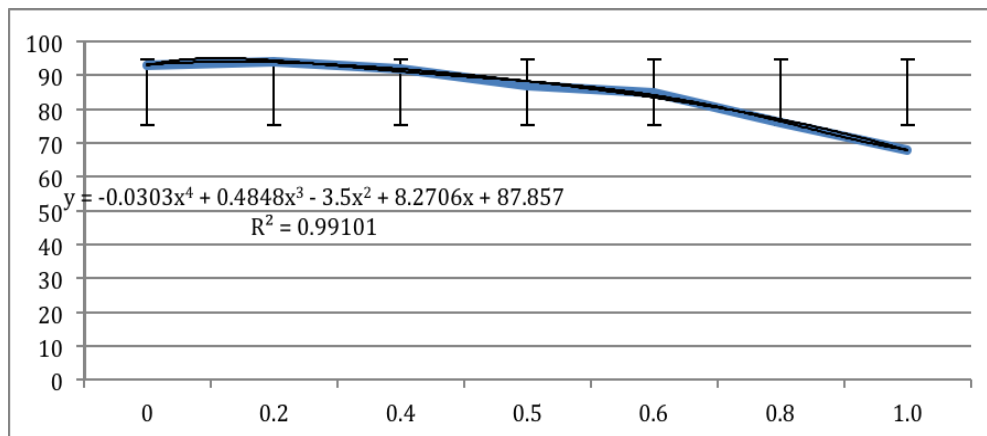


Figura 6. Germinación de las semillas (%) vs. concentración de cloruro de cadmio (mg/L)

DISCUSIÓN FINAL

Bioensayo con lechuga (*Lactuca sativa*)

Se observa en la **Figura 4** una relación inversa entre las dos variables comparadas: Es decir que, a mayor concentración de cadmio en el sistema, la longitud del hipocotilo es menor; la planta creció menos. Con respecto a la **Figura 5**, se aprecia el mismo tipo de relación inversa que se observó en la figura anterior (**Figura 4**). Pareciera que la concentración alta de cadmio les impidiera el crecimiento. Se observa que las longitudes de hipocótilo y radícula, conforme aumenta la concentración de cloruro de cadmio, disminuyen de manera drástica, lo que corrobora lo planteado por varios autores respecto a la reducción en el crecimiento y de la elongación de las raíces en plantas expuestas al cadmio (Chaoui y Ferjani, 2005; Gianaza et al., 2007; Pomponi et al., 2006; Wang et al., 2007; Wang y Zhou, 2005).

A MANERA DE CONCLUSIONES

El cadmio afecta definitivamente el desarrollo de las semillas de lechuga. Por ello es que esta planta sirve para corroborar si un lote de agua contiene sustancias tóxicas. En una comunidad rural, este método tan sencillo puede ayudar para que las personas no consuman una fuente de agua determinada aunque parezca limpia.

Asimismo, será importante probar con las plantas acuáticas que soportaron estas concentraciones de cadmio, carrizos (*Phragmites australis*) y tules (*Typha latifolia*), para ver qué mecanismo es el que las hace ser más resistentes al cadmio y que les permite separar al cadmio del agua.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Término	Significado
Cámbium vascular	Las células del cámbium vascular se dividen formando una banda de células entre el xilema secundario (paredes celulares de color rojo) y el floema secundario (paredes celulares de color verdeazulado). Estas células se dividen periclinalmente, las dos células hijas se disponen en un plano horizontal, perpendicular a la superficie de la planta, originando el floema secundario hacia el exterior y el xilema secundario hacia el interior.

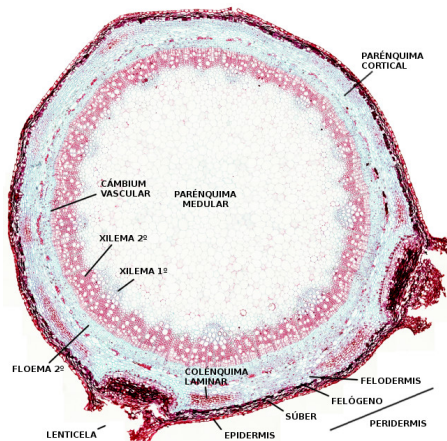

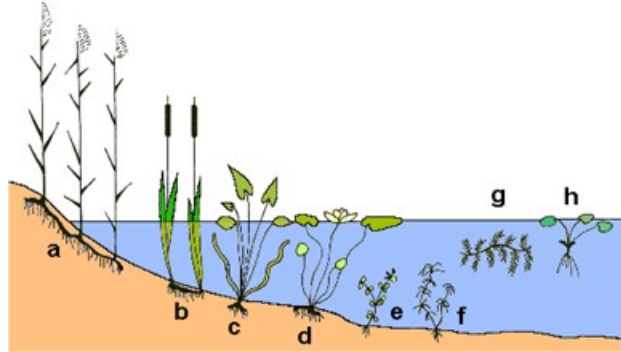
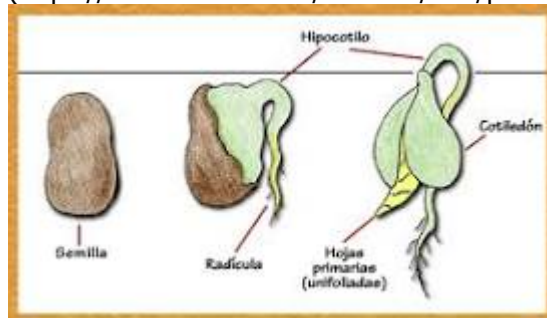


Imagen del tallo de sambuco (sauco, alcanfor, Flor del Sauco, sauce, azumate, sanabuco) a menos aumentos se puede localizar el cámbium vascular en el tronco (http://mmegias.webs.uvigo.es/1-vegetal/v-imagenes-grandes/cambium_vascular.php)

Término	Significado
Cotiledones	Se denomina cotiledón a las hojas primordiales de las plantas con flores (fanerógamas) y que se desarrollan con la germinación de la semilla, donde forman la primera hoja del embrión
	
<p>(https://www.ecologiaverde.com/que-es-un-cotiledon-1972.html#:~:text=Monocotiled%C3%B3neas%20y%20dicotiled%C3%B3neas,Qu%C3%A9%20es%20un%20cotiled%C3%B3n%3A%20definici%C3%B3n,la%20primera%20hoja%20del%20embri%C3%B3n)</p>	
Hidrofitas	Son plantas acuáticas que viven en el agua o en suelos inundados. Junto a los cuerpos de agua. La vegetación muestra una zonación que está determinada en parte por la profundidad creciente del agua.
	
<p>Hay plantas acuáticas emergentes fijas (a, b, c, d), sumergidas fijas (e, f), flotantes sumergidas (g) y flotantes libres (h)</p>	
<p>(www.biologia.edu.ar/botanica/tema3/tema3_4hidrofita.htm, tomado de Arriola-de-León-Régil y Reyes-Morales, 2015)</p>	
Hipocótilo	El hipocótilo , que corresponde a la parte subterránea del tallo principal, comienza a expresarse uno a dos días después que la radícula y conduce a los cotiledones hacia arriba hasta posicionarlos por sobre el nivel del suelo. El hipocótilo es el tallo que hay entre los cotiledones y la radícula y es, por lo tanto, el que mantiene erguidas a las plantas. Además, a medida que pasa el tiempo este tiende a cambiar de color y/o transformarse en un tronco leñoso (Wikipedia, 2022)
Intemperie	Modismo a la intemperie: 1. Loc. adv. A cielo descubierto, sin techo ni otro reparo alguno. De ella se han derivado los términos intemperismo, intemperización y el verbo intemperizar, para las acciones que ocurren a cielo abierto (https://dle.rae.es/intemperie?m=form)
Mesófilo de la hoja	El mesófilo o mesofilo se ubica entre las epidermis de la cara superior (el haz) y de la cara inferior (el envés). Está formado por una clase de tejido parenquimal llamado clorénquima y por tejidos vasculares que se desarrollan en las venas. Proviene del griego <i>φύλλον</i> - hoja, con el prefijo <i>meso</i> , literalmente en medio de la hoja (Font Quer, P. 1982. <i>Diccionario de botánica</i> . Editorial Labor, S.A., p. 1244. Barcelona, España)
Parénquima	Tejido vegetal de tipo parenquimático característico de los órganos de reserva de las

Término	Significado
de reserva	plantas superiores. Sus principales funciones son: Elaborar alimentos mediante el proceso de fotosíntesis y acumular y reservar diferentes sustancias, por ejemplo: Almidón, aleurona, cristales, etc. El parénquima también puede adoptar otras funciones como ayudar en la conducción de la savia bruta y elaborada (Wikipedia, 2022)
Periciclo de raíz	Tejido parenquimático que rodea al tejido vascular en la raíz de las plantas vasculares, tiene actividad meristemática y funciona como un meristema, originando el cambium, felógeno y raíces laterales. ¿Qué función cumple el periciclo de la raíz? En las plantas con crecimiento secundario el periciclo contribuye a la formación del cámbium vascular y al cámbium suberoso. En el centro de la raíz están los tejidos vasculares que se organizan de forma radial, es decir, el xilema y el floema primarios que se disponen en cordones separados y alternos (ver figura arriba) (Wikipedia, 2022)
Plántula	Se denomina así a la planta en sus primeros estadios de desarrollo, desde que germina hasta que se desarrollan las primeras hojas verdaderas. Es posible reconocer las plántulas de las malas hierbas al menos a nivel de género y, para ello, existen guías especializadas. Las plántulas de dicotiledóneas tienen las partes siguientes: Cotiledones u hojas embrionarias , cuando la germinación es hipógea los cotiledones se quedan enterrados, mientras que si es epígea éstos son los primeros órganos fotosintetizadores; hojas verdaderas o nomófilas , las primeras hojas pueden ser distintas de las que la planta desarrolla más adelante; epicótilo , espacio entre los cotiledones y las primeras hojas verdaderas; hipocótilo , espacio entre los cotiledones y la radícula; yema apical y yemas axilares ; radícula (https://www.unavarra.es/herbario/htm/plantula_BAMH_01.htm)



Sambuco, sauco, saúco, alcanfor, Flor del Sauco, sauce, azumate, sanabuco	Esta especie se distribuye desde Canadá hasta Panamá y Las Antillas. Crece entre los 20 a más de 3,000 metros sobre el nivel del mar en una variedad de hábitats incluyendo bosque mesófilo de montaña, bosque de pino, bosque de encino y bosque tropical perennifolio. Es un árbol pequeño o arbusto que alcanza una altura de aproximadamente 10 metros. Se trata de una especie que ha recibido varios nombres científicos y que finalmente ha quedado con el nombre original (<i>Sambucus canadensis</i>) publicado por Linneo en 1753... Las flores y los frutos son comestibles. De la flor se puede disfrutar un té relajante que en exceso tiene un efecto diurético. Las abejas que visitan sus flores producen una miel muy sabrosa. Los frutos pueden usarse para elaborar un rico vino. El sauco tiene registrados muchos usos medicinales algunos de los cuales se incluyen para tratar la calentura y la tos, la bronquitis, ronquera, asma, catarro o gripe y amigdalitis, en el tratamiento de trastornos digestivos, dolor de estómago y del hígado. En problemas de piel como caspa, salpullido, caída del pelo, sarampión, sarna, y quemaduras. Además, como purgante y tratar hemorroides y alcoholismo (https://www.inacol.mx/inacol/index.php/es/ct-menu-item-25/planta-del-mes/37-planta-del-mes/912-saucu)
---	--

Término**Significado***Sambucus canadensis*

Del latín *sabūcus*. Arbusto o arbolillo de la familia de las caprifoliáceas, con tronco de dos a cinco metros de altura, lleno de ramas, de corteza parda y rugosa y médula blanca abundante, hojas compuestas de cinco a siete hojuelas ovales, de punta aguda, aserradas por el margen, de color verde oscuro, de olor desagradable y sabor acre, flores blancas y fruto en bayas negruzcas. Es común en España, y el cocimiento de las flores se usa en medicina como diaforético (Del latín *diaphoreticus* y este del griego διαφορητικός *diaphorētikós*: adjetivo, en medicina, sudorífico) y resolutivo (adjetivo, en medicina, que tiene virtud de hacer desaparecer un tumor o una inflamación)

[<https://dle.rae.es/sa%C3%BAco#XM1WfDj>;

<https://dle.rae.es/diafor%C3%A9tico?m=form>; <https://dle.rae.es/resolutivo?m=form>]

Tejido

provascular

Es un **tejido** embrionario que se sitúa en el futuro cilindro vascular. Aunque este **tejido** no dará directamente al xilema o al floema, produce los precursores de las células que darán tanto al xilema y como al floema, es decir, dará lugar al procámbium (ver figura para cámbium vascular)

UNAM

Universidad Nacional Autónoma de México

RECONOCIMIENTOS

La autora agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca doctoral otorgada. Asimismo, se agradece también a la empresa minera cooperante el apoyo logístico para realizar esta investigación. Finalmente y no menos importante, agradece la valiosa ayuda y apoyo académico en los momentos más difíciles durante la crisis de salud por parte de los miembros del Comité Tutoral, los Dres. José Antonio Barrera-Godínez, María del Carmen Durán-Domínguez-de-Bazúa, Petia Mijaylova-Nacheva, así como por parte de los miembros del jurado predoctoral.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aidid, S.B., Okamoto, H. 1992. Effects of lead, cadmium and zinc on the electric membrane potential at the xylem: Symplast interface and cell elongation of *Impatiens balsamina*. *Env. Exp. Bot.* 32: 439-448.
- Aina, R., Labra, M., Fumagalli, P., Vannini, C., Marsoni, M., Cucchi, U., Bracale, M., Sgorbati, S., Citterio, S. 2007. Thiolpeptide level and proteomic changes in response to cadmium toxicity in *Oryza sativa* L. roots. *Env. Exp. Bot.* 59: 381-392.
- Aravind, P., Prasad, M.N.V. 2003. Zinc alleviates cadmium induced oxidative stress in *Ceratophyllum demersum* L.: A free floating freshwater macrophyte. *Plant Physiol. Biochem.* 41: 391-397.
- Aravind, P., Prasad, M.N.V. 2005. Modulation of cadmium induced oxidative stress in *Ceratophyllum demersum* by zinc involves ascorbateglutathione cycle and glutathione metabolism. *Plant Physiol. Biochem.* 43: 107-116.
- Arriola-de-León-Régil, A.I., Reyes-Morales, E.M. 2015. Informe de vegetación acuática en el Lago de Atitlán 2015. Departamento de Investigación y Calidad Ambiental, DICA. Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca del Lago de Atitlán y su Entorno, AMSCLAE. Guatemala.
<https://amsclae.gob.gt/descargas/informesdica2015/vegetacionacuatica.pdf>
- Badillo-Corona, J.A., Oliver-Salvador, M.C., Moreno-Guerrero, K.G., Pacheco-González, V., Cortes-Arroyo, H. 2009. Manual del laboratorio de cultivo de tejidos. UPIBI-IPN. Ciudad de México, México.
- Barceló, J., Poschenrieder, C. 1990. Plant water relations as affected by heavy metal stress: A review. *J. Plant Nutr.* 13: 1-37.

- Barceló, J., Poschenrieder, C., Andreu, I., Gunse, B. 1986. Cadmium induced decrease of water stress resistance in bush bean plants (*Phaseolus vulgaris* L. cv *Contender*) I. Effects on water potential, relative water content and cell wall elasticity. *J. Plant Physiol.* 125: 17-25.
- Bernal-González, M. 2022. Manual de operación de un espectrofotómetro de absorción atómica. UNAM, Facultad de Química, Departamento de Ingeniería Química, Laboratorios 301, 302 y 303 de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental, Ciudad Universitaria, 04510 Ciudad de México, México.
- Brahim, S., Cuyper, A., Smeets, K., Van-Belleghem, F., Horemans, N., Schat, H., Vangronsveld, J. 2007. Cadmium responses in *Arabidopsis thaliana*: Glutathione metabolism and antioxidative defence system. *Physiol. Plant.* 129: 519-528.
- Cabrera, L. 2002. Diccionario de aztequismos. Revisión y puesta en orden: J. Ignacio Dávila-Garibi. Términos nahuas: Luis Reyes-García. Términos latinos (clasificaciones botánicas y zoológicas): Esteban Inciarte. Ed. Colofón S.A. 5ª edición. ISBN 968-867-038-3. Ciudad de México, México.
- Chaoui, A., Ferjani, E.E. 2005. Effects of cadmium and copper on antioxidant capacities, lignification and auxin degradation in leaves of pea (*Pisum sativum* L.) seedlings. *Compt. Rend. Biol.* 328: 23-31.
- Chaoui, A., Mazhoudi, S., Ghorbal, M.H. Ferjani, E.E. 1997. Cadmium and zinc induction of lipid peroxidation and effects on antioxidant enzyme activities in bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Plant Sci.* 127: 139-147.
- Dalla-Vecchia, F., La-Rocca, N., Moro, I., De-Faveri, S., Andreoli, C., Rasci, N. 2005. Morphogenetic, ultrastructural and physiological damages suffered by submerged leaves of *Elodea canadensis* exposed to cadmium. *Plant Sci.* 168: 329-338.
- Delfín-Alcalá I., Durán-de-Bazúa, C. 2008. La microbiota presente en un desecho minero como opción de restauración de jales. *Rev. AIDIS Ing. Cs. Amb. Invest. Des. Práct.* 3(2): 15 pp. *Rev. Electr.*: <http://www.metrik.cl/aidis/?p=101> (Chile).
- De la Rosa G., Martínez Martínez A., Pelayo H., Peralta Videá J. R., Sánchez Salcido B., Gardea-Torresdey, J.L. 2005. Production of low molecular weight thiols as a response to cadmium uptake by tumbleweed (*Salsola kali*). *Plant Physiol. Biochem.* 43: 491-498.
- Devi, R., Munjal, Gupta, K., Kaur, N. 2007. Cadmium induced changes in carbohydrate status and enzymes of carbohydrate metabolism, glycolysis and pentose phosphate pathway in pea. *Env. Exp. Bot.* 61: 167-174.
- Dodds, J.H., Roberts, L.W. 1987. Initiation and maintenance of callus. In *Experiments in plant tissue culture*. 2a ed. 2a Reimpr. Chapter 5. Pp. 54-69. Cambridge University Press. Nueva York, NY. EE.UU.
- Drazic, G., Mihailovic, N. 2005. Modification of cadmium toxicity in soybean seedlings by salicylic acid. *Plant Sci.* 168: 511-517.
- Drazkiewicz, M., Tukendorf, A., Baszynski, T. 2003. Age-dependent response of maize leaf segments to cadmium treatment: Effect on chlorophyll fluorescence and phytochelatin accumulation. *J. Plant. Physiol.* 160: 247-254.
- Ernst, W., Krauss, G., Verkleij, J., Wesenberg, D. 2008. Interaction of heavy metals with the sulphur metabolism in angiosperms from an ecological point of view. *Plant Cell Env.* 31: 123-143.
- Fuerte-Martínez, D. 2022. Efecto del cadmio sobre tejido vegetal: Masa de células no diferenciadas (*callos*, *Phragmites australis*). Tesis profesional (Química Farmacéutico Biológica). UNAM, Facultad de Química. Ciudad de México, México.
- Fuerte-Martínez, D., Olivera-Flores, M.T.d.J., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.d.C. 2019. Effect of cadmium on plant tissue: Mass of undifferentiated cells (callus, *Phragmites australis*). En 16th International Phytotechnology Conference 2019. International Phytotechnology Society. Sept. 23-27, 2019. Changsha, China (*R, I:6 págs.).
- Gallego, S.M., Kogan, M.J., Azpilicueta, C.E., Peña, C., Tomaro, M.L. 2005. Glutathione-mediated antioxidative mechanisms in sunflower (*Helianthus annuus* L.) cells in response to cadmium stress. *Plant Grow. Regul.* 46: 267-276.
- Gallego, S.M., Benavides, M.P., Tomaro, M.L. 1996. Effect of heavy metal ion excess on sunflower leaves: Evidences for involvement of oxidative stress. *Plant Sci.* 121: 151-159.
- Gianazza, E., Wait, R., Sozzi, A., Regondi, S., Saco, D., Labra, M., Agradi, E. 2007. Growth and protein profile changes in *Lepidium sativum* L. plantlets exposed to cadmium. *Env. Exp. Bot.* 59: 179-187.
- González-Sandoval, M.R., Sánchez-Tovar, S.A., Márquez-Herrera, C., Lizárraga-Mendiola, L. G., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.C. 2008. Oxidación de jales ricos en pirita en un reactor a escala de banco. *Rev. Latinoam. Recs. Nats. (México)*. 4(2): 130-138.
- Haag-Kerwer, A., Schafer, H.J., Heiss, S., Walter, C., Rausch, T. 1999. Cadmium exposure in *Brassica juncea* causes a decline in transpiration rate and leaf expansion without effect on photosynthesis. *J. Exp. Bot.* 50: 1827-1835.
- Han, Y., Zhang, J., Chen, X., Gao, Z., Xuan, W., Xu, S., Ding, X., Shen, W. 2008. Carbon monoxide alleviates cadmium induced oxidative damage by modulating glutathione metabolism in the roots of *Medicago sativa*. *New Phytol.* 177: 155-166.
- Kessler, A., Brand, M.D. 1995. The mechanism of the stimulation of state 4 respiration by cadmium in potato tuber (*Solanum tuberosum*) mitochondria. *Plant Physiol. Biochem.* 33: 519-528.
- Lallana, V.H., Lallana, M.C. 2003. Manual de Prácticas de Fisiología Vegetal - Edición digital - Facultad de Ciencias Agropecuarias - UNER. Universidad Nacional de Entre Ríos. Oro Verde, Paraná, Provincia de Entre Ríos. República Argentina.
- Larsson, E.H., Bornman, J.F., Asp, H. 1998. Influence of UV-B radiation and Cd₂ on chlorophyll fluorescence, growth, and nutrient content in *Brassica napus*. *J. Exp. Bot.* 49: 1031-1039.
- Leal-Gutiérrez, M.J., Bernal-González, M., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.C., Chávez-Castellanos, Á.E., Bazúa-Rueda, E.R. 2022. Exergy analysis of a laboratory-scale upflow anaerobic sludge blanket reactor with sulfate-reducing microorganisms to precipitate heavy metal ions (Cu, Fe, Zn, and Pb) using Aspen Plus®. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 39(1): 273-287. DOI:[10.1007/s43153-021-00195-2](https://doi.org/10.1007/s43153-021-00195-2)
- Leal-Gutiérrez, M.J., Cuéllar-Briseño, R., Castillo-Garduño, A.M., Bernal-González, M., Chávez-Castellanos, Á.E., Solís-Fuentes, J.A., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.-d.-C., Bazúa-Rueda, E.R. 2021. Precipitation of heavy metal ions (Cu, Fe, Zn, and Pb) from mining flotation effluents using a laboratory-scale upflow anaerobic sludge blanket reactor. *Water, Air, and Soil Pollution*, 232(5). DOI:[10.1007/s11270-021-05042-1](https://doi.org/10.1007/s11270-021-05042-1)
- Liu, M., Li, P.J., Qi, X.M., Zhou, Q.X., Zheng, L., Sun, T.H., Yang, Y.S. 2005. DNA changes in barley (*Hordeum vulgare*) seedlings induced by cadmium pollution using RAPD analysis. *Chemosphere*. 61: 158-167.

- Livingstone, D. 1993. Biotechnology and pollution monitoring: Use of molecular biomarkers in the aquatic environment. *J. Chem. Tech. Biotechnol.* 57: 195-211.
- Maksymiec, W., Krupa, Z. 2006. The effects of short term exposition to Cd, excess Cu ions and jasmonate on oxidative stress appearing in *Arabidopsis thaliana*. *Env. Exp. Bot.* 57: 187-194.
- Melacon, M. 1995. *Handbook of Ecotoxicology*. CRC. 755 pp. Boca Ratón, FL, EE.UU.
- Mendoza, D.G., Moreno, R. 2006. Control of glutathione and phytochelatin synthesis under cadmium stress. Pathway modeling for plants. *J. Theor. Biol.* 238: 919-936.
- Mishra, S., Srivastava, S., Tripathi, R. D., Govindarajan, R., Kuriakose, S.V., Prasad, M.N.V. 2006. Phytochelatin synthesis and response of antioxidants during cadmium stress in *Bacopa monnieri* L. *Plant Physiol. Biochem.* 44: 25-37.
- Mukherjee, S., Bhattacharyya, P., Duttagupta, A.K. 2004. Heavy metal levels and esterase variations between metal exposed and unexposed duckweed *Lemna minor*: Field and laboratory studies. *Env. Int.* 30: 811-814.
- Murashige, T., Skoog, F. 1962. A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures. *Physiol. Plant.* 15(3): 473-497.
- Obata, H., Inoue, N., Umabayashi, M. 1996. Effect of cadmium on plasma membrane ATPase from plant roots differing in tolerance to cadmium. *Soil Sci. Plant Nutr.* 42: 361-366.
- Pacheco-Gutiérrez, L.A., Durán-de-Bazúa, C. 2006. El agua en la industria minera mexicana. Parte 1. Balances de materia en una empresa cooperante / *Water use in the Mexican mining industry. Part 1. Mass balances in a cooperating industry*. Tecnol. Ciencia Ed. (IMI). 21(2): 96-102.
- Padmaja, K., Prasad, D.D.K., Prasad, A.R.K. 1990. Inhibition of chlorophyll synthesis in *Phaseolus vulgaris* L. seedlings by cadmium acetate. *Photosynthetica.* 24: 399-405.
- Panizza-de-León, A. 2009. Evaluación de la fitoextracción de aluminio en condiciones ácidas. Tesis de Doctorado en Ingeniería. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería. UNAM. Defensa: Enero 28. Ciudad de México, México.
- Pernía, B., De-Sousa, A., Reyes, R., Castrillo, M. 2008. Contaminación por cadmio en plantas. *Interciencia.* 33(002): 112-119.
- Pietrini, F., Lannelli, M.A., Pasqualini, S., Massacci, A. 2003. Interaction of cadmium with glutathione and photosynthesis in developing leaves and chloroplasts of *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steudel. *Plant Physiol.* 133: 829-837.
- Piqueras, A., Olmos, E., Martínez-Solano, J.R., Hellín, E. 1999. Cd induced oxidative burst in tobacco BY2 cells: Time course, subcellular location and antioxidant response. *Free Radical Res.* 31: 533-538.
- Pomponi, M., Censi, V., Di-Girolamo, V., De-Paolis, A., Di-Toppi, L., Aromolo, R., Costantino, P., Cardarelli, M. 2006. Overexpression of *Arabidopsis* phytochelatin synthase in tobacco plants enhances Cd²⁺ tolerance and accumulation but not translocation to the shoot. *Planta.* 223: 180-190.
- Rai, V., Khatoon, S., Bisht, S.S., Mehrotra, S. 2005. Effect of cadmium on growth, ultramorphology of leaf and secondary metabolites of *Phyllanthus amarus* Schum. and Ton. *Chemosphere.* 61: 1644-1650.
- Rewers, M., Kisiala, A., Drouin, J., Sliwiska, E., Cholewa, E. 2012. *In vitro* regenerated wetland sedge *Eriophorum vaginatum* L. is genetically stable. *Acta Physiol. Plant.* 34: 2197-2206.
- Rogers, S.M.D. 2003. Special Symposium: Applications of *in vitro* culture for habitat restoration tissue culture and wetland establishment of the freshwater monocots *Carex*, *Juncus*, *Scirpus*, and *Typha*. *In Vitro Cell. Dev. Biol. Plant.* 39, 1-5.
- Rojas-Torrealanca, F. 2021. Organismos metalotolerantes en la depuración de aguas residuales con metales pesados empleando humedales artificiales. Protocolo de investigación. UNAM, Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería. Campo disciplinario: Sustancias y residuos peligrosos. Lugar de desarrollo: UNAM, Facultad de Química. Tutora: Dra. María del Carmen Durán Domínguez de Bazúa. No. de tema: 70. Ciudad de México, México.
- Romero-Puertas, M.C., Rodríguez-Serrano, M., Corpas, F.J., Gómez, M., Del-Río, L.A. 2004. Cadmium induced subcellular accumulation of O²⁻ and H₂O₂ in pea leaves. *Plant. Cell Env.* 27: 1122-1134.
- Romero-Puertas M.C., Corpas, F.J., Rodríguez-Serrano, M., Gómez, M., Del-Río L.A., Sandalio, L.M. 2007. Differential expression and regulation of antioxidative enzymes by cadmium in pea plants. *J. Plant Physiol.* 164: 1346-1357.
- Ruiz-López, V. 2009. Remoción de cadmio y zinc de aguas residuales de una industria minera mediante reactores biológicos que simulan un humedal artificial. Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental. Facultad de Química, UNAM. Ciudad de México, México.
- Sandalio, L.M., Dalurzo, H.C., Gómez, M., Romero-Puertas, M.C., Del-Río, L.A. 2001. Cadmium induced changes in the growth and oxidative metabolism of pea plants. *J. Exp. Bot.* 52: 2115-2126.
- Sanita-di-Toppi, L.S., Gabbriellini, R. 1999. Response to cadmium in higher plants. *Env. Exp. Bot.* 41: 105-130.
- Schützendübel, A., Polle, A. 2002. Plant responses to abiotic stresses: heavy metal induced oxidative stress and protection by mycorrhization. *J. Exp. Bot.* 53: 1351-1365.
- Singh, S., Eapen, S., D'Souza, S.F. 2006. Cadmium accumulation and its influence on lipid peroxidation and antioxidative system in an aquatic plant. *Bacopa monnieri* L. *Chemosphere.* 62: 233-246.
- Smeets, K., Cuypers, A., Lambrechts, A., Semane, B., Hoet, P., Laere, A.V. Vangronsveld, J. 2005. Induction of oxidative stress and antioxidative mechanisms in *Phaseolus vulgaris* after Cd application. *Plant Physiol. Biochem.* 43: 437-444.
- Sobrero, M.C., Ronco, A. 2008. Ensayo de toxicidad aguda con semillas de lechuga *Lactuca sativa* L. En Ensayos toxicológicos para la evaluación de sustancias químicas en agua y suelo. La experiencia en México. Ramírez-Romero, P., Mendoza-Cantú, A. Compiladoras. SEMARNAT – INE (actual INECC). Ciudad de México, México.
- Soto-Esquivel, M.G., Barrera-Godínez, J.A., Mijaylova-Nacheva, P., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.C. 2013. El uso de la técnica de cultivo de tejidos para potenciar la investigación sobre el estudio del efecto de elementos y sustancias tóxicas en ambientes naturales y hechos por el hombre: Determinación del efecto del cadmio en hidrófitas, *Phragmites australis* y *Typha latifolia*, empleando cultivo de tejidos. En X SIMPOSIO LATINOAMERICANO DE QUÍMICA ANALÍTICA AMBIENTAL Y SANITARIA / X LATIN AMERICAN SYMPOSIUM ON ANALYTICAL ENVIRONMENTAL AND SANITARY CHEMISTRY. Abril 10-13, 2013. Puebla de Zaragoza, Puebla, México.
- Soto-Esquivel M.G., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.C. 2012. *Effect of different concentrations of cadmium on the germination of Roman lettuce (Lactuca sativa) seeds.* | Efecto de diferentes concentraciones de cadmio sobre la germinación de

-
- semillas de lechuga romana (*Lactuca sativa*). En *Proceedings of the 2012 Seventh International Minisymposium on Removal of Contaminants from Wastewaters, Atmosphere, and Soils*. M. Bernal-González, M.C. Durán-de-Bazúa, R.S. García-Gómez, L.I. Ramírez Burgos, J.A. Solís-Fuentes. Eds. Pp. 208-216. AMCATH-LIQAYQA, Facultad de Química, UNAM. ISBN 978-607-7807-10-0. Septiembre 12-15. Xalapa de Enríquez, Veracruz, México.
- Van-Assche, F., Clijsters, H. 1990. Effects of metals on enzyme activity in plants. *Plant Cell Env.* 13: 195-206.
- Wang, M., Zou, J., Duan, X., Jiang, W., Liu, D. 2007. Cadmium accumulation and its effects on metal uptake in maize (*Zea mays* L.). *Bioresource Technol.* 98: 82-88.
- Wang, X.F., Zhou, Q.X. 2005. Ecotoxicological effects of cadmium on three ornamental plants. *Chemosphere.* 60: 16-21.
- Weber, M., Harada, E., Vess, C., von-Roepenack-Lahaye, E., Clemens, S. 2004. Comparative microarray analysis of *Arabidopsis thaliana* and *Arabidopsis halleri* roots identifies nicotianamine synthase, a ZIP transporter and other genes as potential metal hyperaccumulation factors. *Plant J.* 37: 269-281.
- Wu, F.B., Chen, F., Wei, K., Zhang, G.P. 2004. Effect of cadmium on free amino acid, glutathione and ascorbic acid concentrations in two barley genotypes (*Hordeum vulgare* L.) differing in cadmium tolerance. *Chemosphere.* 57: 447-454.
- Xiong, Z.T., Peng, Y.H. 2001. Response of pollen germination and tube growth to cadmium with special reference to low concentration exposure. *Ecotoxicol. Env. Saf.* 48: 51-55.
- Zhang, H., Jiang, Y., He, Z., Ma, M. 2005. Cadmium accumulation and oxidative burst in garlic (*Allium sativum*). *J. Plant Physiol.* 162: 977-984.