

Hongos macroscópicos como bioacumuladores de metales pesados Macroscopic fungi as bioaccumulators of heavy metals

S. Alethia de Lucio-Flores ^b, E. M. Otazo-Sánchez ^b, L. Romero-Bautista ^a, J. C. Gaytán-Oyarzún ^{a,*}

^a Área Académica de Biología, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

^b Área Académica de Química, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

Resumen

El vínculo entre los hongos y el hombre ha generado diferentes intereses en función de su uso medicinal, comercial y alimenticio. La estrecha relación que mantienen los hongos macroscópicos con el suelo los convierte en organismos con alto potencial para la biodegradación de materia orgánica, la captación de nutrientes y la absorción de sustancias peligrosas como son los metales pesados, muchos de ellos de interés toxicológico. Es debido a los múltiples reportes sobre la capacidad de bioacumulación de contaminantes en los hongos macroscópicos, que los beneficios que estos organismos confieren al ser humano podrían estar acompañados de efectos colaterales sobre la salud. A través de esta revisión se observa que la información generada a nivel internacional es amplia, mientras que, a nivel nacional es significativamente escasa, y más aún en los estudios enfocados al impacto sobre la salud por consumo de hongos contaminados.

Palabras Clave:

Metales pesados, bioacumulación, hongos macroscópicos comestibles, toxicidad.

Abstract

Through the years, the union between fungi and man has generated different interests based on their medicinal, commercial and food use. The close relationship that macroscopic fungi have with the soil makes them organisms with a high potential for biodegradation of organic matter, the uptake of nutrients and for the absorption of dangerous substances present in the environment such as heavy metals, many of them of toxicological interest. It is due to the multiple reports of the bioaccumulation capacity of these contaminants in macroscopic fungi, that the benefits that these organisms confer on humans could be accompanied by unwanted side effects on their health. Through this review we were able to determine the information generated at the international level is broad, while at the national level is significantly scarce, and even more so in studies focused on the health impact of eating contaminated mushrooms.

Keywords:

Heavy metals, bioaccumulation, edible macroscopic fungi, toxicity.

1. Introducción

La relación entre los hongos silvestres y el ser humano se ha descrito a partir de los conocimientos tradicionales, así como de sus implicaciones culturales y/o ambientales, a las cuales se han sumado intereses debido a sus cualidades medicinales, su creciente valor comercial y uso alimenticio, este último basado en sus propiedades nutritivas, las cuales se consideran superiores a las de muchos productos de origen vegetal. El micelio de los hongos es capaz de secuestrar la fracción

asimilable de los metales pesados de diversos sustratos, por lo cual, los cuerpos fructíferos de los hongos se contaminan y pueden tener efectos nocivos si son consumidos por animales y por el hombre (Caamal-Caamal et al., 2016; Moyano et al., 2010).

Los seres vivos requieren de cantidades específicas de ciertos metales para el desarrollo de distintas funciones biológicas, sin embargo, cuando estas cantidades son alteradas, son capaces de generar afecciones en procesos bioquímicos,

*Autor para la correspondencia: jcgaytan@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: de298849@uaeh.edu.mx (Sharon Alethia de Lucio-Flores), profe_4339@uaeh.edu.mx (Elena María Otazo-Sánchez), romerob@uaeh.edu.mx (Leticia Romero-Bautista), jcgaytan@uaeh.edu.mx (Juan Carlos Gaytán Oyarzún).

como en procesos fisiológicos en un organismo, desencadenando diversas enfermedades o alterando algunas ya existentes (Alonso, 2010).

La capacidad de captación de metales pesados por hongos está relacionada tanto a parámetros medioambientales, como son: sus concentraciones, formas químicas e interacciones entre otros metales, el pH, la textura del suelo, por mencionar algunos; así como a las características propias de los hongos, tales como: su nutrición, la distribución del micelio en el sustrato, el estado de maduración del esporoma y su composición bioquímica (Moyano et al., 2010).

Los metales pesados, al ser considerados como elementos altamente dañinos, representan un peligro potencial al estar presentes en el medio ambiente, ya que, usualmente estos contaminantes se encuentran en concentraciones mayores a las permitidas. Se ha determinado que la presencia de estos compuestos ha aumentado con el paso de las últimas décadas, debido a distintas actividades antropogénicas como son la actividad industrial, el desarrollo de tecnologías, la minería, así como el uso excesivo de fertilizantes químicos a través de la agricultura. El conjunto de estos factores ha contribuido en gran medida en la alteración ambiental, generando no sólo daños en la sostenibilidad de las redes tróficas, alteraciones en cuerpos de agua, o en la generación de alimentos, sino serios problemas en la salud humana (Gunnar, 2012).

2. El reino Fungi

Los hongos son organismos eucariotas, heterótrofos, pueden ser unicelulares o pluricelulares, su pared celular está conformada por polisacáridos, polipéptidos y quitina, su reproducción puede darse de forma sexual y/o asexual, ya sea por medio de esporas o mediante partes específicas del micelio (Salazar y Galeano, 2019). Las estructuras reproductoras de los hongos macroscópicos (esporoma) están conformadas por conjuntos de hifas mismos que forman “pseudotejidos” llamados plecténquimas, a su vez, estas masas de hifas se encuentran en el sustrato conformando lo que se conoce como micelio (Rodríguez, 2011). En la figura 1 se observan las estructuras principales de un esporoma.

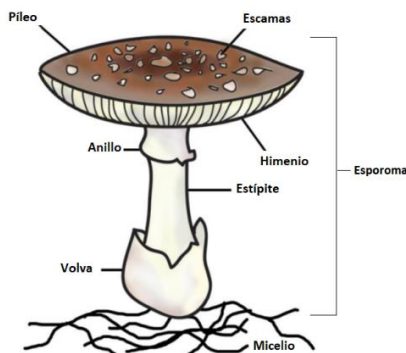


Figura 1: Estructura de un hongo macroscópico (la presencia de las estructuras depende de la especie) (Modificado de Salazar, 2016).

Una de las clasificaciones de los hongos se basa en la forma de obtención de su alimento, la cual los divide como se muestra a continuación: saprófitos, micorrízicos y parásitos. Los

hongos saprófitos tienen una relación directa con el suelo y se encargan de descomponer la materia orgánica del mismo. Por otro lado, los hongos micorrízicos son aquellos que se mantienen en simbiosis con las raíces de algunas plantas, en la cual ambos son beneficiados, mientras que, los hongos parásitos son aquellos que viven sobre materia orgánica en descomposición y no generan ningún beneficio (Salazar, 2016).

3. Factores que influyen en la bioacumulación de metales en hongos macroscópicos

La captación de metales tóxicos por macromicetes es dependiente de factores medioambientales, como de características propias del hongo. Los primeros determinan la disponibilidad de estos elementos como la movilidad y disponibilidad de los metales, mientras que las características del hongo definirán su capacidad acumuladora, además de las variaciones que pueden presentar las distintas especies (Alonso et al., 2003).

En cuanto a los aspectos ambientales, son consideradas las características químicas del suelo como el pH, la materia orgánica, la capacidad de adsorción del suelo, la textura, además de las concentraciones del elemento y sus interacciones, estos factores determinan no sólo la disponibilidad de estos elementos para los macromicetes, sino para demás organismos como las plantas, entre otros (Alonso et al., 2010).

Por otra parte, están los factores propios de los hongos. De acuerdo con Allen y Allen (1986) y Allen (1991), la masa de hifas que constituye el micelio de un hongo supera por mucho a la de las raíces de las plantas. Se considera que esta masa fúngica representa entre un 5 y un 10% del peso seco en los primeros 5 cm de la composición del suelo forestal. Si comparamos, en 1 cm³ pueden encontrarse hasta 50 m de hifas, mientras que la cobertura de raíz estaría presente de entre 2 a 4 cm, es esta peculiar característica del micelio es la que le confiere a los hongos un amplio contacto con el suelo, además, es debido a que las hifas poseen un diámetro bastante fino de entre 2 y 4 µm que son capaces de penetrar los microporos del suelo, sitios donde las estructuras absorbentes de las raíces de las plantas, de no menos de 10 a 20 µm, no pueden llegar.

Como se puede observar en la figura 2, en el Horizonte H, donde están presentes los restos vegetales y humus, se encuentran en altas proporciones, tanto el micelio de hongos saprófitos terrícolas, como algunos metales tóxicos. El micelio se desarrolla en el suelo de forma horizontal, y ocupa normalmente la parte superficial que va de los 5 a 10 cm, a excepción de algunos hongos ectomicorrízicos, lo cual hace que el micelio sea capaz de secuestrar metales tóxicos bioasimilables y prevenir la translocación a los vegetales, dejando a éstos menos disponibles para el suelo, además, permite su paso hasta los esporomas o setas, sitio en donde muchas veces las concentraciones suelen ser superiores a las presentes en del medio (Alonso et al., 2004; Alonso et al., 2010; González-Chávez, 2004).

García y colaboradores reportan en 2009 altas concentraciones de cadmio, plomo, cobre o zinc en la

cobertura del Horizonte H, al igual que en diferentes especies de hongos saprófitos terrícolas, principalmente, lo cual corrobora lo antes mencionado.

de metales pesados, los cuales estaban concentrados en mayor cantidad en el púleo, sólo con algunas excepciones.

4. ¿Qué se ha trabajado?

Estos organismos se consideran cosmopolitas, esto quiere decir que se encuentran ampliamente distribuidos y que son capaces de colonizar distintos ambientes. Las investigaciones realizadas en el campo de la toxicología ambiental con hongos, se han hecho en diversas esferas ambientales, desde sitios conservados, sitios cercanos a áreas contaminadas, sitios altamente contaminados y en cultivos dentro de laboratorio, en todos los casos, los resultados a la bioacumulación de metales tóxicos han sido positivos incluso en sitios conservados y en cultivos como lo muestra Tüzen et al. (1998).

La búsqueda de información demuestra que este campo de estudio no es reciente debido a que existen reportes desde el año 1976 (Stijve y Besson, 1976). Como se muestra en la tabla 1, las múltiples investigaciones han reportado datos de la bioacumulación de metales como zinc, hierro, cobre, manganeso, cadmio, plomo, arsénico, por mencionar algunos; tanto en especies de hongos comestibles como no comestibles presentes en sitios conservados y sitios contaminados.

Tres de los metales pesados más evaluados en las distintas investigaciones son cadmio, plomo y arsénico. Ejemplo de esto lo muestra la revisión bibliográfica de Zhang et al. (2019), en la cual determinaron la presencia únicamente de Arsénico tanto en especies de hongos comestibles y no comestibles, donde destacan la diferencia en la capacidad de bioacumulación de metales pesados entre la Familia Basidiomycota y Ascomycota.

Se observó una amplia diversidad de análisis tanto en hongos comestibles como en no comestibles, sin embargo, las especies consumidas por el ser humano cobran mayor atención en esta revisión debido a que algunas de las concentraciones que reportan de elementos tóxicos que reportan se encuentran por arriba de los límites permitidos (Siric et al., 2017; Su et al., 2018). En la tabla 2 se muestran algunas de las especies de macromicetes comestibles mayormente mencionadas en distintas investigaciones.

En la Tabla 2 se puede observar que *Boletus edulis* (figura 3) es una de las especies de hongos comestibles más analizada. Esta especie se encuentra entre las más valiosas dentro de la gastronomía, además, destaca por sus múltiples aplicaciones debido a sus propiedades antimicrobianas y sus usos terapéuticos (Cano-Estrada y Romero-Bautista, 2016).

En la Tabla 3 se pueden observar los resultados obtenidos de cuatro investigaciones, en los cuales se reportaron las cantidades de plomo y cadmio en diferentes estructuras de los esporomas.

Tabla 1: Reportes de metales analizados en hongos.

| Sitio de estudio | Metales evaluados | Citas |
|------------------|---|-----------------------------|
| Colombia | | |
| Bahía de Cispatá | -Ni, Cu, Mn, Cr, Zn, Co, Hg, Pb y Cd | (Cadavid-Velásquez, 2019) + |

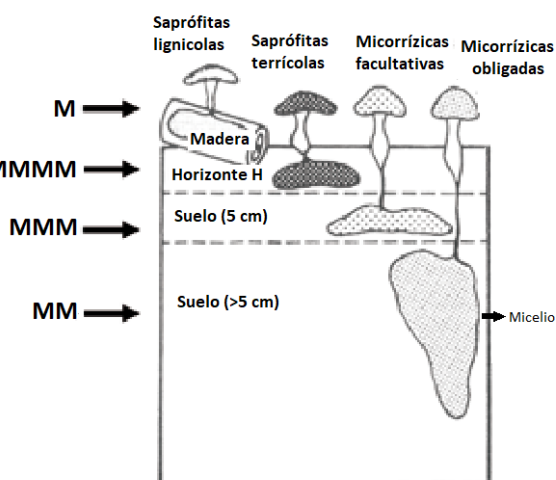


Figura 2: Distribución del micelio de los hongos de acuerdo con sus grupos ecológicos. Distribución de las concentraciones de metales tóxicos, donde la presencia de M determina una mayor o menor presencia de metales, <M= <metales, >M= >metales (Modificada de Alonso et al., 2010).

Como lo menciona Høiland (1995), la nutrición de los hongos está relacionada estrechamente con la liberación de enzimas de degradación. La mayor parte de estas enzimas forman parte del grupo de las fenoloxidasas, las cuales son utilizadas por los hongos para la descomposición de celulosa, ácido húmico, ácido fúlvico, lignina, entre otros, compuestos que están presentes en la materia orgánica, y que utilizan como alimento. Algunas de estas sustancias están compuestas de grupos de fenoles, mismos que cuentan con una gran capacidad de fijación de metales pesados a través de la quelación o del intercambio catiónico.

La composición bioquímica de la pared fúngica resulta ser clave esencial en la capacidad de obtención de metales por hongos, ya que, la presencia de polisacáridos como la quitina, además de componentes como proteínas, polímeros fenólicos, melaninas y otros pigmentos, hace de estos organismos buenos bioindicadores, gracias a que los grupos químicos funcionales que presentan tienen una amplia afinidad para la captación y fijación de metales tóxicos (Campanella et al., 2005).

De acuerdo con Chang y Chan (1973), considerando las estructuras principales de los esporomas, el estípite y el púleo, mencionan que cada una de ellas puede presentar diferentes grados de acumulación de metales lo cual atribuye a la naturaleza y concentración de proteínas que existen en las diferentes estructuras del esporoma, información que determinaron al de observar un patrón electroforético más complejo en el púleo respecto al obtenido del estípite en su investigación realizada con hongos agaricales. Como aportación a lo antes mencionado, Svoboda et al. (2000) y Alonso (2001) reportan esporomas con altos niveles de metales pesados, los cuales estaban concentrados en mayor cantidad en el púleo, sólo con algunas excepciones.

Como aportación a lo antes mencionado, Svoboda et al. (2000) y Alonso (2001) reportan esporomas con altos niveles

| | | |
|------------------------|--|--|
| China | | |
| Provincia de Yunnan | -Mn, Fe, Cu, Zn, As, Cd y Pb | (Liu et al., 2015) * |
| Provincia de Yunnan | -Co, Cu, Fe, Mn, Ni, y Zn | (Wang et al., 2017) * |
| Provincia de Yunnan | -Ba, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Na, Ni, Sr, V y Zn | (Su et al., 2018) * |
| Croacia | | |
| Trakošćan | -Pb, Cd y Hg | (Siric et al., 2017) * |
| Eslovaquia | | |
| Czech y Slovak | -Fe, Co, Zn y Se | (Borovička y Řanda, 2007) * " |
| Parque nacional Slovak | -Cd, Cu, Hg, Pb y Zn | (Arvay et al., 2015) * |
| España | | |
| Provincia de Lugo | -Hg, Cu y Zn; Se; Cd; Hg, Cd, Pb y As | (Alonso et al., 2000, 2003); (Melgar et al., 2009, 2016); (Chiocchetti et al., 2020) * |
| Grecia | | |
| Epirus y Macedonia | -Mg, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Pb, Cd, Al, As y Sn | (Ouzouni et al., 2007) * |
| Atenas | -Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb y Zn | (Kokkoris et al., 2019) * |
| Polonia | | |
| Świętokrzyskie | -Ag, Al, Ba, Ca, Cd, Co, Cu, Fe, Hg, K, Mg, Mn, Na, Rb, Sr y Zn | (Lipka y Falandysz, 2017) " |
| Noreste de Polonia | - Al, Ba, Cd, Ca, Co, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Hg, Rb, Ag, Na, Sr y Zn | (Lipka et al., 2018) " |
| Bosque Augustów | -Ag, Al, Ba, Ca, Cd, Co, Cu, Fe, Hg, K, Mg, Mn, Na, Ni, P, Pb, Rb, Sr y Zn | (Medyk et al., 2018) * |
| Serbia | | |
| Kopaonik | -Fe, Cu, Mn, Ni, Cd, Pb, Co, y Zn | (Kosanić et al., 2016) * |
| Rasina | -Ag, Se, As, Ca, Mg, Na y K | (Stefanovic et al., 2016) * |
| Suiza | | |
| Lago Geneva | -Hg, Cd, Pb y Se | (Stijve y Besson, 1976) * " |
| Turquía | | |
| Erzurum | -P, Fe, Ca, Zn, Mg, K, Na, Cu y Mn | (Gençcelep et al., 2009) * |

Uso de * especie o especies de hongos comestibles; " especie o especies de hongos no comestibles; + especie o especies no definidas

Es importante mencionar que en cuanto a la legislación nacional para la regulación de los límites permisibles de estos elementos tóxicos en hongos es nula. Por otra parte, la Comisión de las Comunidades Europeas (CCE) (2006) en su Reglamento 1881/2006, está enfocada en proteger la salud pública a través del establecimiento de contenidos máximos de sustancias contaminantes en los productos alimenticios. Este reglamento considera de forma general a los hongos, estableciendo límites permisibles para dos metales pesados de interés toxicológico: plomo con un 0,1 de contenido en setas y 0,3 en setas cultivadas; cadmio en un 0,05 de contenido en setas y 0,20 en setas cultivadas (mg/kg peso fresco). Comparando los datos de la Tabla 2 con los límites permisibles establecidos en por la CCE, se puede observar que, en todos los casos, las concentraciones están por arriba de las permitidas.

Tabla 2: Especies de hongos macroscópicos comestibles analizadas en diferentes investigaciones.

| Especies más evaluadas | Número de citas |
|-----------------------------|---|
| <i>Amanita rubescens</i> | (Alonso, 2010; Melgar et al., 2016) |
| <i>Agaricus bisporus</i> | (Stijve y Besson, 1976; Alonso et al., 2010; Melgar et al., 2016; Kokkoris et al., 2019) |
| <i>Agaricus campestris</i> | (Stijve y Besson, 1976; Alonso et al., 2010; Melgar et al., 2016; Siric et al., 2017) |
| <i>Boletus edulis</i> | (Alonso et al., 2010; Mleczek et al., 2013; Arvay et al., 2015; Liu et al., 2015; Melgar et al., 2016; Siric et al., 2017; Su et al., 2018) |
| <i>Lactarius deliciosus</i> | (Alonso et al., 2010; Mleczek et al., 2013; Arvay et al., 2015; Melgar et al., 2016) |
| <i>Leccinum scabrum</i> | (Alonso et al., 2010; Melgar et al., 2016; Medyk et al., 2018) |
| <i>Lepista nuda</i> | (Alonso et al., 2010; Melgar et al., 2016) |
| <i>Macrolepiota procera</i> | (Alonso et al., 2010; Melgar et al., 2016; Stefanovic et al., 2016; Siric et al., 2017) |
| <i>Pleurotus ostreatus</i> | (Melgar et al., 2016) |

Tabla 3: Concentraciones de plomo y cadmio reportadas en *Boletus edulis*.

| Citas | <i>Boletus edulis</i> | | | |
|-----------------------|-----------------------|-------------|-------------|-------------|
| | Pb | | Cd | |
| | Pileo | Estípote | Pileo | Estípote |
| (Arvay et al., 2015) | 1.54 ± 1.13 | 0.94 ± 1.45 | 2.97 ± 4.10 | 1.12 ± 1.41 |
| (Melgar et al., 2016) | | | 1.23 ± 0.44 | 0.64 ± 0.25 |
| (Siric et al., 2017) | 1.42 ± 0.10 | 0.99 ± 0.03 | 1.93 ± 0.08 | 1.73 ± 0.02 |
| (Su et al., 2018) | | | 11.5 ± 4.6 | 6.8 ± 2.6 |

5. Impacto en México

La diversidad de hongos en México es muy alta, se estima que en el país hay más de 200,000 especies, de las cuales solo el 4% son conocidas (Guzmán, 1998). Respecto a los hongos silvestres comestibles, se han reportado hasta el momento 371 especies, de las cuales 181 han sido identificadas en el estado de Hidalgo (Garibay-Orijel y Ruan-Soto, 2014), lo cual arroja un aplo panorama para la investigación de estos organismos.

Cabe destacar que, respecto a las investigaciones nacionales, existen múltiples trabajos realizados con metales tóxicos relacionados a distintos grupos de organismos, siendo significativamente escasos aquellos que se enfocan al estudio de macromicetos y nulos los enfocados a los posibles impactos negativos en la salud por el consumo de los mismos. Los únicos datos hallados para México fueron los obtenidos por López-Vázquez (2016) en su tesis doctoral, quien además de reportar en los primeros datos de contenidos nutraceuticos para cinco especies de hongos comestibles *Amanita caesarea*, *Boletus edulis*, *Cantharellus cibarius*, *Lactarius indigo* y *Ramaria sp.* de México (López-Vázquez et al., 2016), determinó la capacidad de acumulación de las mismas especies, en donde, *Boletus edulis* destacó como una especie hiperacumuladora de cromo.



Figura 3: *Boletus edulis*. Fotografía tomada en Acaxochitlán hidalgo, por Alethia de Lucio-Flores.

6. Daños sobre la salud por consumo de hongos contaminados

Los trabajos relacionados con daños a la salud por metales pesados a través de diferentes esferas de exposición son incontables, sin embargo, los trabajos relacionados directamente con daños por consumo de hongos contaminados son nulos. Esto puede estar estrechamente relacionado con el tiempo de exposición, al igual que con las cantidades de metales a las que el ser humano puede estar en contacto a través del consumo de hongos, sin embargo, no es un tema menos importante y es necesario generar mayor información al respecto.

Hasta el momento sólo se han determinado posibles daños a través de evaluaciones de riesgos para la salud humana, basados en comparaciones de las concentraciones obtenidas en algunas investigaciones, con los límites establecidos en el reglamento de la Comisión de las Comunidades Europeas, además, de las consideraciones del Comité Mixto FAO/OMS de Expertos en Aditivos Alimentarios y las ingestas semanales tolerables para metales específicos que establecen (Ouzouni, 2007; Arvay, 2015).

7. Perspectiva final

El presente trabajo muestra que este campo de investigación no es nuevo, que la investigación a nivel internacional ha brindado grandes aportes desde hace poco más de 40 años y que la exploración de este campo a nivel nacional es significativamente baja. México y específicamente Hidalgo, al ser un estado rico en diversidad de hongos es un sitio potencial para investigaciones futuras enfocadas en la capacidad de acumulación de estos contaminantes y en los posibles daños a la salud que estos puedan causar por su consumo. Hay mucho trabajo por realizar.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo por las facilidades institucionales para la realización de este trabajo. SALF agradece al CONACYT por la beca otorgada al programa de Doctorado en Ciencias Ambientales.

Referencias

- Allen, E., & Allen, M. (1986). Water Relations of Xeric Grasses in the Field: Interactions of Mycorrhizas and Competition. *The New Phytologist*, 104 (4), 559-571. <https://www.jstor.org/stable/2433031?seq=1>.
- Allen, M.F. (1991). The ecology of mycorrhizae. Cambridge University Press. [https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=w5XK4scCQfQC&oi=fnd&pg=PR9&dq=The+ecology+of+mycorrhizae.+Allen,+M.F.+\(1991\).+&ots=PEBfBPbtcv&sig=AObT318qzSLQgE1Bx72915YWZ4A#v=onepage&q=The%20ecology%20of%20mycorrhizae.%20Allen%20C%20M.F.%20\(1991\).&f=false](https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=w5XK4scCQfQC&oi=fnd&pg=PR9&dq=The+ecology+of+mycorrhizae.+Allen,+M.F.+(1991).+&ots=PEBfBPbtcv&sig=AObT318qzSLQgE1Bx72915YWZ4A#v=onepage&q=The%20ecology%20of%20mycorrhizae.%20Allen%20C%20M.F.%20(1991).&f=false).
- Alonso Díaz, J. (2001). Bioacumulación de metales pesados en macromicetos comestibles. Repercusiones toxicológicas y estudios de biorrecuperación. Tesis doctoral. Universidad de Santiago de Compostela (USC), Campus de Lugo. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=70113>.
- Alonso Díaz, J., Fernández, M., Melgar, M., Pérez, M., & Corral, M. (2010). Elementos traza en hongos comestibles. Repercusiones alimentarias y valoración nutricional. The presence of trace elements in mushrooms: nutritional value and food repercussions. *Boletín Micológico de FAMCAL*, 5, 101-126. https://www.researchgate.net/publication/311675849_Elementos_traza_en_hongos_comestibles_Repercusiones_alimentarias_y_valoracion_nutricional_The_presence_of_trace_elements_in_mushrooms_nutritional_value_and_food_repercussions.
- Alonso, J., García, M. A., Pérez-López, M., & Melgar, M. J. (2003). The Concentrations and Bioconcentration Factors of Copper and Zinc in Edible Mushrooms. *Arch Environ Contam Toxicol*, 44(2), 0180-0188. <http://doi.org/10.1007/s00244-002-2051-0>.
- Alonso, J., García, M. A., Pérez López, J. M., & Melgar, M. J. (2004). Acumulación de metales pesados en macromicetos comestibles y factores que influyen en su captación. *Revista de Toxicología*, 21(1), 11-15. https://www.researchgate.net/publication/26617856_Acumulacion_de_metales_pesados_en_macromicetos_comestibles_y_factores_que_influyen_en_su_captacion.
- Alonso, J., Salgado, M. J., García, M. A., & Melgar, M. J. (2000). Accumulation of mercury in edible macrofungi: influence of some factors. *Arch Environ Contam Toxicol*, 38(2), 158-162. <https://doi.org/10.1007/s002449910020>.
- Arvay, J., Tomas, J., Hauptvogel, M., Massanyi, P., Harangozo, L., Toth, T., . . . Bumbalova, M. (2015). Human exposure to heavy metals and possible public health risks via consumption of wild edible mushrooms from Slovak Paradise National Park, Slovakia. *J Environ Sci Health B*, 50(11), 833-843. <http://doi.org/10.1080/03601234.2015.1058107>.
- Borovička, J., & Řanda, Z. (2007). Distribution of iron, cobalt, zinc and selenium in macrofungi. *Mycological Progress*, 6, 249-259. <https://doi.org/10.1007/s11557-007-0544-y>.
- Cadavid-Velásquez, E. d. J., Marrugo-Negrete, J. L., & Pérez-Vásquez, N. d. S. P. (2019). Metales pesados en macromicetos asociados al manglar en la Bahía Cispata, Córdoba-Colombia. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 22(2). <https://revistas.udca.edu.co/index.php/ruadc/article/view/1082/1824>.
- Caamal-Caamal, L. G., Montonya, A., Trejo-Hernández, L., & Castillo-Guevara, C. (2016). Estado del arte relativo al conocimiento tradicional de los hongos silvestres en el estado de Tlaxcala, México. *Mexican Journal of Biotechnology*, 1-14.
- Campanella, L., E. Cardarelli, M. Cordatore & L. Patrolecco. (2005). Environmental protection by fungal activity. *Med. Fac. Landbouww. Univ. Gent*. 60(4b): 2545-2553. <https://www.tib.eu/en/search/id/BLCP%3ACN010939331/Environment-al-protection-by-fungal-activity/>.
- Cano-Estrada, A., & Romero-Bautista, L. (2016). Valor económico, nutricional y medicinal de hongos comestibles silvestres. *Revista chilena de nutrición*, 43, 75-80. <http://doi.org/10.4067/S0717-75182016000100011>.
- Chang, S.-T., & Chan, K.-Y. (1973). Quantitative and Qualitative Changes in Proteins During Morphogenesis of the Basidiocarp of *Volvariella*

- Volvacea. *Mycologia*, 65(2), 355-364. <https://doi.org/10.1080/00275514.1973.12019444>.
- Chiocchetti, G. M., Latorre, T., Clemente, M. J., Jadan-Piedra, C., Devesa, V., & Velez, D. (2020). Toxic trace elements in dried mushrooms: Effects of cooking and gastrointestinal digestion on food safety. *Food Chem*, 306, 125478. <http://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125478>.
- García, M. A., Alonso J Fau - Melgar, M. J., & Melgar, M. J. (2009). Lead in edible mushrooms: levels and bioaccumulation factors. *Journal of Hazardous Materials* 1, 777–783. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.01.058>.
- Garibay-Orijel, R. & Ruan, F., 2014. Listado de los hongos silvestres consumidos como alimento tradicional en México. En: *La etnomicología en México: estado del arte*. México: Red de Etnoecología y Patrimonio Biocultural-Asociación Etnobiológica Mexicana-Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo-Universidad Nacional Autónoma de México, pp. 99-120.
- Genççelep, H., Uzun, Y., Tuncturk, Y., & Demirel, K. (2009). Determination of mineral contents of wild-grown edible mushrooms. *Food Chem*, 113, 1033-1036. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.08.058>.
- Gonzalez-Chavez, M. C., Carrillo-Gonzalez, R., Wright, S. F., & Nichols, K. A. (2004). The role of glomalín, a protein produced by arbuscular mycorrhizal fungi, in sequestering potentially toxic elements. *Environ Pollut*, 130(3), 317-323. <http://doi.org/10.1016/j.envpol.2004.01.004>.
- Gunnar, N. 2012. Metales: propiedades químicas y toxicidad. En: enciclopedia de la OIT. España: D-INSHT (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo). <https://www.insst.es/documents/94886/162520/Cap%C3%ADulo+63.+Metales+propiedades+qu%C3%ADmicas+y+toxicidad>.
- Guzmán, G., 1998. Análisis cualitativo y cuantitativo de la diversidad de los hongos en México (Ensayo sobre el inventario fúngico del país) G. Halffter (Ed.), La diversidad biológica de Iberoamérica II, *Acta Zoológica Mexicana*, nueva serie vol. Especial, CYTED e Instituto de Ecología, Xalapa (1998), pp. 111-175.
- Høiland, K. (1995). Reaction of some decomposer basidiomycetes to toxic elements. *Nor. J. Bot.* 15(3): 305-318. <http://doi.org/10.1111/j.1756-1051.1995.tb00157.x>.
- Kokkoris, V., Massas, I., Polemis, E., Koutrotsios, G., & Zervakis, G. I. (2019). Accumulation of heavy metals by wild edible mushrooms with respect to soil substrates in the Athens metropolitan area (Greece). *Sci Total Environ*, 685, 280-296. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.447>.
- Kosanić, M., Ranković, B., Rančić, A., & Stanojković, T. (2016). Evaluation of metal concentration and antioxidant, antimicrobial, and anticancer potentials of two edible mushrooms *Lactarius deliciosus* and *Macrolepiota procera*. *Journal of Food and Drug Analysis*, 24(3), 477-484. <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2016.01.008>.
- Lipka, K., & Falandysz, J. (2017). Accumulation of metallic elements by *Amanita muscaria* from rural lowland and industrial upland regions. *J Environ Sci Health B*, 52(3), 184-190. <http://doi.org/10.1080/03601234.2017.1261547>.
- Lipka, K., Saba, M., & Falandysz, J. (2018). Preferential accumulation of inorganic elements in *Amanita muscaria* from North-eastern Poland. *J Environ Sci Health A Tox Hazard Subst Environ Eng*, 53(11), 968-974. <http://doi.org/10.1080/10934529.2018.1470805>.
- Liu, B., Huang, Q., Cai, H., Guo, X., Wang, T., & Gui, M. (2015). Study of heavy metal concentrations in wild edible mushrooms in Yunnan Province, China. *Food Chem*, 188, 294-300. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.05.010>
- López-Vázquez, E. (2016). Caracterización química, nutracéutica y evaluación de la actividad geomicológica de nueve setas silvestres del estado de Hidalgo. Tesis doctoral. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- López-Vázquez, E., Prieto-García, F., Gayosso-Canales, M., Sánchez, E. M. O., & Villagómez Ibarra, J. R. (2017). PHENOLICS ACIDS, FLAVONOIDS, ASCORBIC ACID, β -GLUCANS AND ANTIOXIDANT ACTIVITY IN MEXICAN WILD EDIBLE MUSHROOMS. *Italian Journal of Food Science*, 29(4). doi: <https://doi.org/10.14674/IJFS-838>.
- Medyk, M., Loganathan, B., Bielawski, L., & Falandysz, J. (2018). Inorganic elemental concentrations in birch bolete mushroom (*Leccinum scabrum*) and top soil: contamination profiles, bioconcentration and annual variations. *J Environ Sci Health B*, 53(12), 831-839. <https://doi.org/10.1080/03601234.2018.1505087>.
- Melgar, M. J., Alonso, J., & García, M. A. (2009). Acumulación de selenio en setas silvestres comestibles: captación y toxicidad Selenium accumulation in wild edible mushrooms: uptake and toxicity. *CyTA - Journal of Food*, 7(3), 217-223. <http://doi.org/10.1080/19476330903068688>.
- Melgar, M. J., Alonso, J., & García, M. A. (2016). Cadmium in edible mushrooms from NW Spain: Bioconcentration factors and consumer health implications. *Food and Chemical Toxicology*, 88, 13-20. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2015.12.002>.
- Moyano, A., Sánchez, A. G., Toirán, L. M. F., & Charro, E. (2010). Metales pesados en hongos de áreas contaminadas. *Revista de Ciências Agrárias*, 33, 13-21. http://www.scielo.mec.pt/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0871-018X2010000100002.
- Ouzouni, P., Veltistas, P., Paleologos, E., & Riganakos, K. (2007). Determination of metal content in wild edible mushroom species from regions of Greece. *Journal of Food Composition and Analysis*, 20, 480-486. <http://doi.org/10.1016/j.jfca.2007.02.008>.
- Rodríguez Morcuende, J. F. R. (2011). Principales tipos de intoxicaciones por consumo de setas. *Cuadernos del Tomás* (3), 150-172. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3761550>.
- Salazar, G. I. E., & Galeano, M. C. R. (2019). *Micología general* (C. C. Trujillo Ed.). Colombia. http://www.ucm.edu.co/wp-content/uploads/libros/Micologia_general.pdf.
- Salazar Vidal, V. (2016). Manual de Micología Básica: Introducción al Estudio de los Hongos. https://www.researchgate.net/publication/333774015_Manual_de_Micologia_Basica_Introduccion_al_Estudio_de_los_Hongos.
- Siric, I., Kasap, A., Bedekovic, D., & Falandysz, J. (2017). Lead, cadmium and mercury contents and bioaccumulation potential of wild edible saprophytic and ectomycorrhizal mushrooms, Croatia. *J Environ Sci Health B*, 52(3), 156-165. <https://doi.org/10.1080/03601234.2017.1261538>.
- Siric, I., Kasap, A., Bedekovic, D., & Falandysz, J. (2017). Lead, cadmium and mercury contents and bioaccumulation potential of wild edible saprophytic and ectomycorrhizal mushrooms, Croatia. *J Environ Sci Health B*, 52(3), 156-165. <https://doi.org/10.1080/03601234.2017.1261538>.
- Stefanovic, V., Trifkovic, J., Djurdjic, S., Vukojevic, V., Tesic, Z., & Mutic, J. (2016). Study of silver, selenium and arsenic concentration in wild edible mushroom *Macrolepiota procera*, health benefit and risk. *Environ Sci Pollut Res Int*, 23(21), 22084-22098. <http://doi.org/10.1007/s11356-016-7450-2>.
- Stijve, T., & Besson, R. (1976). Mercury, cadmium, lead and selenium content of mushroom species belonging to the genus *Agaricus*. *Chemosphere*, 5(2), 151-158. [https://doi.org/10.1016/0045-6535\(76\)90036-9](https://doi.org/10.1016/0045-6535(76)90036-9)
- Su, J., Zhang, J., Li, J., Li, T., Liu, H., & Wang, Y. (2018). Determination of mineral contents of wild *Boletus edulis* mushroom and its edible safety assessment. *J Environ Sci Health B*, 53(7), 454-463. <http://doi.org/10.1080/03601234.2018.1455361>.
- Tüzen, M., Özdemir, M., & Demirbaş, A. (1998). Heavy metal bioaccumulation by cultivated *Agaricus bisporus* from artificially enriched substrates. *Zeitschrift für Lebensmitteluntersuchung und -Forschung A*, 206(6), 417-419. <http://doi.org/10.1007/s002170050285>.
- Wang, X., Liu, H., Zhang, J., Li, T., & Wang, Y. (2017). Evaluation of heavy metal concentrations of edible wild-grown mushrooms from China. *J Environ Sci Health B*, 52(3), 178-183. <http://doi.org/10.1080/03601234.2017.1261545>.
- Zhang, J., Baralkiewicz, D., Wang, Y., Falandysz, J., & Cai, C. (2019). Arsenic and arsenic speciation in mushrooms from China: A review. *Chemosphere*, 246, 125685. <http://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125685>.