



Scientia Agropecuaria

Web page: <http://revistas.unitru.edu.pe/index.php/scientiaagrop>

Facultad de Ciencias
Agropecuarias

Universidad Nacional de
Trujillo

REVIEW



Fungal biomass potential: production and bioremediation mechanisms of heavy metals from municipal organic solid waste compost

Potencial de la biomasa fúngica: producción y mecanismos de biorremediación de metales pesados del compost de residuos sólidos orgánicos municipales

W. E. Nuñez^{1, 2, 3 *} ; D. A. Sotomayor^{1, 2} ; C. V. Ballardo³ ; E. Herrera⁴ 

¹ Doctorado en Ingeniería y Ciencias Ambientales, Universidad Nacional Agraria La Molina, Av. La Molina s/n, 15464, Lima, Perú.

² Departamento de Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional Agraria La Molina, Av. La Molina s/n, 15464, Lima, Perú.

³ Centro de Investigación en Gestión de Residuos Sólidos, Universidad Nacional del Centro del Perú, Av. Mariscal Castilla N° 3909, Junín, Perú.

⁴ Instituto de Investigación Especializado de Investigación de la Facultad de Zootecnia, Universidad Nacional del Centro del Perú, Av. Mariscal Castilla N° 3909, Junín, Perú.

* Corresponding author: wnunez@uncp.edu.pe (W. E. Nuñez).

Received: 14 September 2022. Accepted: 5 February 2023. Published: 27 February 2023.

Abstract

The compost produced based on municipal/urban organic solid waste (RSOM/U), is a valuable resource as a biofertilizer for agriculture, gardening, forestry and especially for soil remediation, whose production contributes to sustainable development through recycling of organic matter and nutrients. However, due to the raw materials used, the compost can have a significant content of heavy metals such as: cadmium (Cd), lead (Pb), arsenic (As), mercury (Hg) and selenium (Se), and contaminants such as potentially toxic trace elements that harm human health. These components can accumulate in plant tissues by absorption, giving rise to the possibility of being bioavailable to humans and animals. The fungal bioremediation of heavy metals in RSOM/U compost is highly efficient, cost-effective, available and friendly to the environment, therefore the removal of metals through this technique is a priority, if the purpose is to use it in agricultural soils. This review summarizes the studies based on the potential of fungal biomass for the bioremediation of heavy metals in RSOM/U compost, reporting information on RSOM/U-based compost, fungal biomass production and mechanisms of bioremediation of heavy metals by fungal biomass. In conclusion, the bioremediation of heavy metals using the fungal biomass in RSOM/U compost, with adequate segregation of raw material, coupled with bioremediation, could improve the removal of heavy metals in RSOM/U compost, and could be an ecological and viable alternative, which must be valued by intensifying its use.

Keywords: Fungal biomass; compost; bioremediation; metals; organic waste.

Resumen

El compost producido en base a residuos sólidos orgánicos municipales/ urbano (RSOM/U), es un valioso recurso como biofertilizante para la agricultura, jardinería, actividad forestal y sobre todo para la remediación de suelos, cuya producción contribuye al desarrollo sustentable a través del reciclado de materia orgánica y nutrientes. Sin embargo, debido a las materias primas utilizadas, el compost puede tener un contenido significativo de metales pesados como: cadmio (Cd), plomo (Pb), arsénico (As), mercurio (Hg) y selenio (Se), y contaminantes como oligoelementos potencialmente tóxicos que perjudican la salud humana. Estos componentes se pueden acumular en los tejidos vegetales por absorción, dando lugar a la posibilidad de ser biodisponibles para humanos y animales. La biorremediación fúngica de metales pesados en compost de RSOM/U, es altamente eficiente, económico, disponible y amigable con el medio ambiente, por ello la remoción de metales mediante esta técnica es prioritaria, si la finalidad es el uso en suelos agrícolas. La revisión sintetiza los estudios basados en el potencial de la biomasa fúngica para la biorremediación de metales pesados en compost de RSOM/U, reportándose información del compost a base de RSOM/U, producción de biomasa fúngica y mecanismos de biorremediación de metales pesados por biomasa fúngica. En conclusión, la biorremediación de metales pesados utilizando la biomasa fúngica en compost de RSOM/U, con una segregación adecuada de la materia prima, aunado a la biorremediación, podría mejorar la remoción de metales pesados en compost de RSOM/U, y podría ser una alternativa ecológica y viable, que debe ser valorada intensificando su uso.

Palabras clave: Biomasa fúngica; compost; biorremediación; metales; residuos orgánicos.

DOI: <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2023.008>

Cite this article:

Nuñez, W. E., Sotomayor, D. A., Ballardo, C. V., & Herrera, E. (2023). Potencial de la biomasa fúngica: producción y mecanismos de biorremediación de metales pesados del compost de residuos sólidos orgánicos municipales. *Scientia Agropecuaria*, 14(1), 79-91.

1. Introducción

Los residuos sólidos orgánicos municipales/urbanos (RSOM/U) son generados de la vida cotidiana y la actividad agrícola; principalmente de los desechos de los hogares, el comercio, sectores públicos y otras actividades que son atendidas por los municipios. Representan una fuente importante de contaminación ambiental (Soobhany, 2018), y están compuestos por residuos orgánicos (alimentos, excedentes de comida, entre otros) y por residuos inorgánicos (cartón, papel, madera, vidrio, plástico y metales) (Hernández et al., 2018a), y son considerados como un contaminante global, por la presencia de metales pesados, los cuales generan serios riesgos para el medio ambiente y los organismos vivos (Sharma et al., 2022). Por ello, el manejo inadecuado de los RSOM/U genera contaminación ambiental, sin embargo, dado que la población mundial sigue en crecimiento, se pronostica que la tasa de generación de RSOM/U se duplique en los próximos veinte años, alcanzando unos 2,2 mil millones de toneladas de residuos por año para el año 2025 (Hoorweg & Bhada, 2012). El compostaje es una tecnología importante para el tratamiento inocuo y el reciclaje de residuos sólidos orgánicos urbanos (Liu et al., 2021), demostrando su utilidad en términos de economía y eficiencia a través del uso de enmiendas de nutrientes en la agricultura urbana y reduciendo la carga ambiental (Ventorino et al., 2019). Del mismo modo funciona con residuos agrícolas, estiércol de ganado, residuos de cosecha; sin embargo, los riesgos de los metales pesados (HM) durante el proceso de compostaje a escala industrial no se han evaluado adecuadamente, especialmente con la adición de agentes microbianos (Cao et al., 2022).

La contaminación medio ambiental específicamente por metales y metaloides, se debe principalmente a la actividad antropogénica, la creciente urbanización y el desarrollo industrial (Kumar et al., 2022). A todo ello, se suma una deficiente recolección en fuentes de residuos sólidos orgánicos urbanos que influyen en el proceso de compostaje incrementando los niveles de metales pesados por un manejo inadecuado de residuos (Reyes-Pinto et al., 2020). La eliminación de metales mediante el uso de diferentes técnicas es prioritaria, si se quiere utilizar el compost como abono orgánico en la agricultura (Ozdemir et al., 2020). Las técnicas para la remediación de suelos se basan en métodos fisicoquímicos y biológicos; estas últimas llamadas biorremediación, ya que aprovecha el potencial metabólico de microorganismos vivos (bacterias y hongos) para la descontaminación. Los procesos más usados en la biorremediación son la sorción,

precipitación, lixiviación y volatilización de metales pesados (Covarrubias et al., 2015). Los enfoques de interacción de metales pesados y microorganismos reciben un gran interés por representar soluciones rentables y respetuosas con el medio ambiente en sitios contaminados (Rahman & Singh, 2020).

Los hongos en los ecosistemas son importantes en la degradación y mineralización de la materia orgánica, absorben elementos de alta toxicidad (metales pesados) y componentes esenciales siendo usados en procesos biotecnológicos (Cadavid-Velásquez et al., 2019). Los hongos tienen la capacidad de adsorción de metales pesados a través del micelio, por ello pueden considerarse que diversas especies tienen el potencial para ser utilizadas como biosorbentes de metales pesados, teniendo en cuenta el grado de tolerancia que es diferente para cada especie y para cada metal pesado (Vallejo et al., 2021). La biomasa fúngica puede desarrollarse adecuadamente tomando en cuenta el efecto del pH y la temperatura (Ahmed et al., 2017). Los hongos desarrollan una estrecha interacción entre el micelio y el sustrato, requiriendo alrededor de 40% a 60% de humedad (Yazid et al., 2017). Estos hongos crecen en residuos cítricos (Ramírez-Guzmán et al., 2016), cascarilla de arroz (Sala et al., 2020), residuos vegetales (Wolna-Maruwka et al., 2019), aserrín de pino (Lopez-Ramirez et al., 2018), residuos agrícolas (Arévalo et al., 2017) y degradan residuos lignocelulósicos (Hernández et al., 2019).

A pesar de que se ha avanzado en temas de biorremediación fúngica de compost contaminados con metales pesados, no hay una revisión relevante utilizando como materia prima los residuos sólidos orgánicos municipales, por ello se tomó en cuenta artículos de la base de datos de Scopus, Springer y Scielo, cuya información estuvo relacionado a la biorremediación de compost y suelos con biomasa fúngica, compost de residuos sólidos orgánicos municipales, metales pesados presentes en suelos agrícolas, biomasa fúngica potencialmente eficientes y tolerante a metales pesados y mecanismos de acción de microorganismos en la remoción de metales pesados. Por ello, esta revisión se centra en sintetizar los estudios sobre el potencial de la biomasa fúngica, su producción y mecanismos de biorremediación para reducir metales pesados en compost de residuos sólidos orgánicos municipales, con el fin de utilizar el compost en suelos agrícolas y/o enmienda de suelos contaminados. Finalmente, este artículo de revisión presenta los retos actuales y futuros, dando a conocer la aplicación de tecnologías de biorremediación a través de la biomasa fúngica con un enfoque ecosistémico y sostenible en la gestión ambiental.

2. Residuos sólido orgánico municipal / urbano

La producción mundial de residuos sólidos municipales es aproximadamente 1300 millones de toneladas por año y se estima que, en el año 2025, la producción aumentará a 2200 millones de toneladas por año, del cual aproximadamente el 46% es residuo sólido orgánico municipal (Campuzano & González-Martínez, 2016). En la **Tabla 1** se reporta la generación de RSOM/U de diferentes regiones del mundo y del Perú estimados para el año 2020. Por otro lado, la composición de los RSOM/U depende de diferentes factores como estacionalidad, clima, ubicación geográfica y está constituido principalmente de 30% - 69% de carbohidratos (almidón, celulosa y hemicelulosas), 5% - 10% de proteínas y 10% - 40% de lípidos aproximadamente, que lo convierte en un sustrato con alto potencial de aplicación en procesos biotecnológicos (López-Gómez et al., 2019). Los RSOM/U son generados en las poblaciones y sus zonas de influencia, englobando materiales y productos originados en actividades domiciliarias, como restos de alimentos y cocina, estiércol, poda de árboles, barrido de calles, ramas, paja y plantas (Hernández et al., 2018). La generación de RSOM se organiza en estructuras jerárquicas, utilizando un conjunto de datos estadísticos sobre la generación de residuos y variables socioeconómicas externas (Cubillos et al., 2021). Es importante conocer la composición de los residuos para determinar los sistemas de tratamiento, entre los factores que influyen en su composición, están las características de la población, si se trata de zonas rurales o urbanas, nivel de vida, clima y época del año, además la forma más adecuada de utilizar la biomasa de RSOM es transformarla en fertilizantes orgánicos a través del compostaje (Cerde et al., 2019).

De la **Tabla 1**, en base a los datos de generación de RSU o RSM per cápita, América del Norte produce la mayor cantidad de residuos en aproximadamente 2,22 kg/persona/día estimado en promedio para el año 2020, así mismo, el Perú produce 0,8 kg/persona/día de residuos, siendo similar a la región de Asia Oriental, Pacífico con 0,79 kg/persona/día, se proyecta que estas disparidades regionales persistan en las próximas décadas, aun cuando algunas regiones experimenten un crecimiento económico más rápido que otras (Carhuavilca et al., 2021; Kaza et al., 2021).

3. Compost de residuos sólidos orgánicos municipales/urbanos

El compost es el producto obtenido del proceso de biodegradación de materia orgánica en estado sólido en condiciones aerobias (Yuksel, 2015). Así

mismo, el compost producido en base a los residuos sólidos orgánicos municipales (RSOM), puede ser una oportunidad para el desarrollo de ciudades verdes en las áreas urbanas en crecimiento (Fetene et al., 2018), así como un valioso recurso para la agricultura y remediación de suelos, cuya producción contribuye al desarrollo sustentable a través del reciclado de materia orgánica y nutrientes (Paradelo et al., 2020). El compost maduro producido por compostaje aeróbico podría mejorar la fertilidad del suelo y aumentar el rendimiento en los cultivos, dependiendo de la fuente de residuos utilizados (RSU, agroindustriales, pecuarios entre otros) (Cui et al., 2021). Así mismo, en su composición presenta materia orgánica soluble derivada del proceso oxidativo biológico; por ello las sustancias orgánicas biodegradables se convierten durante el proceso en productos más estables tales como los ácidos húmicos, ácidos fúlvicos, humina y microorganismos endógenos que ayudan a mejorar la calidad del suelo (Epelde et al., 2018). El compost también contiene macro y micronutrientes, metales pesados y consorcios microbianos exógenos (protistas, hongos, oomicetos, levaduras, actinomicetos y bacterias) (De Corato, 2020). Las técnicas basadas en adsorción son muy competentes en el secuestro de varios contaminantes ambientales, el compost de RSOU evaluado a escala de laboratorio ha demostrado una alta capacidad de adsorción de metales pesados (Mudhoo et al., 2020). La técnica del compostaje utiliza la materia orgánica y la transforma, para ello requiere de condiciones necesarias como la temperatura, relación carbono-nitrógeno (C/N), humedad y aireación, el compost es rico en nutrientes, que puede utilizarse para mejorar la fertilidad del suelo (Awasthi et al., 2020), siendo este un método adecuado para reducir riesgos adversos de contaminación. Este proceso biológico tiene el objetivo de estabilizar los residuos orgánicos para que estos puedan ser utilizados como biofertilizantes, por tanto, el método aeróbico en el compostaje acorta el tiempo de tratamiento de la materia orgánica y aumenta la eficiencia del compostaje (Wan et al., 2020; Wang et al., 2021).

3.1 Normas técnicas para el uso del compost

Las normas técnicas internacionales de límites máximos permisibles para el compost permiten clasificar el nivel de calidad del compost para ser aplicado en actividades de jardinería, paisajismo y mantenimiento de todos los tipos de áreas verdes públicas y privadas, campos de cultivo o en caso de alguna restricción de uso, requerirá ser mezclado con otros elementos adecuados (Australiana, 2001; INACAL, 2021; Mexicana, 2018; NCh2880.c, 2003).

En la **Tabla 2** se presenta el contenido máximo permitido de metales pesados totales en compost, para el uso en la agricultura y otros, establecidos en cada país, en base a las normas internacionales de Chile, México, Australia y la norma peruana establecida por el Instituto Nacional de Calidad (INACAL).

4. Producción de la biomasa fúngica

4.1. Biomasa fúngica

La producción de biomasa fúngica se realiza mediante procesos fermentativos, que pueden llevarse a cabo en medios de crecimiento líquidos o sólidos (Pérez et al., 2018) representándose gráficamente en la Figura 1, en la cual se representa el protocolo para la producción de la biomasa fúngica a nivel laboratorio, a partir de una solución madre de un hongo en específico. Los hongos son organismos versátiles en procesos biotecnológicos y pueden crecer de manera controlada, por ello se requiere la determinación del crecimiento fúngico, monitoreo y control de los procesos fermentativos. Más del 50% de la biomasa microbiana del suelo está constituida por hongos, los cuales, además de su importancia como degradadores, contribuyen al mantenimiento de la estructura y la humedad de ese medio, con lo que se previene su erosión (Vázquez et al., 2016). Los hongos filamentosos tienen una clara ventaja sobre las bacterias debido a su alta tolerancia a los metales y su capacidad para crecer en condiciones extremas de pH, temperatura y disponibilidad de nutrientes, así como altas concentraciones de metales (Babu et al., 2014). Los hongos toleran y desintoxican los metales mediante precipitación extracelular, complejación y cristalización, transformación química, bioabsorción a la pared celular y pigmentos, disminución del transporte o impermeabilidad, eflujo, compartimentación intracelular y secuestro (Gorai et al., 2020). Así mismo, los hongos micorrízicos arbusculares (AMF) también son conocidos por remediar suelos contaminados por arsénico (As), por ejemplo, *Glomus etunicatum*, *Rhizoglyphus intrarradices* sirven para disminuir la toxicidad del arsénico (As) en *Triticum aestivum*. Los hongos micorrízicos, están presentes en aproximadamente el 80 % en todas las especies de plantas (Sharma et al., 2017).

5. Mecanismos de biorremediación de metales pesados del compost de RSOM/U

Los metales pesados son considerados como una amenaza ecológica a nivel mundial, intensificada por su alta durabilidad en el medio ambiente que pueden biomagnificarse en los seres vivos poniendo en peligro la salud humana (Gujre et al.,

2021) y pueden causar diversas complicaciones en animales y plantas (Mishra et al., 2021).

Los metales pesados tienen carga positiva y son atraídos por las cargas negativas de los grupos carboxilos, fosforilos y aminos que se encuentran en las paredes celulares, membranas y material extracelular de bacterias y hongos, una vez que se adhieren a la superficie celular los metales pesados se internalizan en la célula, donde los iones positivos metálicos se pueden precipitar dentro de vacuolas u otras estructuras para disminuir su toxicidad. Los mecanismos de biorremediación de metales pesados dependen directamente de la resistencia o tolerancia experimentada por los microorganismos (Vullo, 2003). Así mismo los microorganismos han desarrollado mecanismos fisiológicos y bioquímicos que les permiten tolerar los metales, estos mecanismos son principalmente: biosorción, bioacumulación, biotransformación, biomineralización y biodegradación (Figura 2) (Zhang et al., 2020). Los hongos filamentosos también pueden adsorber metales pesados en soluciones acuosas, pero su capacidad de biosorción depende del pH, los metales presentes en la solución y la concentración de biomasa (Abraham et al., 2015).

A diferencia de los contaminantes orgánicos, los metales pesados no pueden degradarse en el suelo y suelen acumularse en el organismo a través de la cadena alimentaria con un efecto más tóxico (Sun et al., 2020). La sorción de metales pesados en (bio) adsorbentes sucede a través de diferentes mecanismos, incluidos el intercambio iónico, la quimisorción y la precipitación (Mahmoud et al., 2018).

Por otro lado, la toxicidad biológica de los metales pesados está vinculada con sus formas químicas, el proceso de compostaje puede disminuir la movilidad y biodisponibilidad de los metales pesados al transformar los estados extraíbles y reducibles en formas más constantes; por ello el compostaje se considera una forma efectiva de hacer pasivos a los metales pesados (Awasthi et al., 2021).

El principal riesgo de los productos metálicos está íntegramente asociado al elemento no degradable y los métodos biológicos no podrían ser capaces de reducir la toxicidad de los metales de forma irreversible, por ello la remediación se logra a través de métodos como la movilización y la inmovilización en la micosfera, la sorción en las paredes celulares y la absorción en las células fúngicas (Ayangbenro & Babalola, 2017). En este sentido, los metales podrían convertirse químicamente después de la incorporación en el hongo y acumularse en diferentes partes de la célula o trasladarse de las hifas del hongo a la planta simbiótica.

Tabla 1
Generación de residuos sólidos urbanos (RSU) o Residuos sólidos municipales (RSM)

Región/Países	Generación de Residuos sólidos urbanos (RSU) o Residuos sólidos municipales (RSM)			Referencia
	kg/persona/día	t día ⁻¹	t año ⁻¹	
Oriente medio y Norte de África	0,82	0,384 millones	140 millones	(Kaza et al., 2021)
África Sub-Sahariana	0,47	0,529 millones	193 millones	
América Latina y el Caribe	1,01	0,658 millones	240 millones	
América del Norte	2,22	0,819 millones	299 millones	
Asia del Sur	0,39	0,726 millones	265 millones	
Europa y Asia Central	1,24	1,50 millones	420 millones	
Asia Oriental y el Pacífico	0,79	1,879 millones	686 millones	
Perú	0,8	15160,5	5 533 582,7	(Carhuavilca et al., 2021)

Fuente: Adaptado de **Kaza et al. (2021)** y **Carhuavilca et al. (2021)**.

Tabla 2
Contenido máximo permitido de metales pesados totales en compost

Metales Pesados	Norma Técnica Peruana ^d	Norma Chilena ^a		Norma Mexicana ^b			Norma Australiana ^c		
	Compost	Compost Clase B	Compost Clase A Agricultura Orgánica	Compost Tipo I	Compost Tipo II	Compost Tipo III	Compost Tipo A	Compost Tipo A'	Compost Tipo B
	Máximo contenido (ppm)	mg/kg (Base seca)*	mg/kg (Base seca)	mg/kg (Base seca)	mg/kg (Base seca)	mg/kg (Base seca)	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Arsénico (As)	15	15	10	0,1	0,7	2	n.n ⁽¹⁾	n.n ⁽¹⁾	n.n ⁽¹⁾
Cadmio (Cd)	2,5	2	1	0,7	1	2	1	0,7	3
Cobre (Cu)	250	100	50	70	150	300	150	70	500
Cromo (Cr)	200	120	60	70	70	250	70	70	250
Mercurio (Hg)	2	1	1	0,4	0,7	1,5	0,7	0,4	3
Molibdeno (Mo)	-	2	1	-	-	-	-	-	-
Níquel (Ni)	80	20	10	25	60	90	60	25	100
Plomo (Pb)	150	100	50	45	120	150	120	45	200
Selenio (Se)	-	12	6	-	-	-	-	-	-
Zinc (Zn)	1000	200	60	200	500	500	500	200	1800

* Concentraciones expresadas como contenidos totales. ⁽¹⁾ no normado. Fuente: Adaptado de las normas del contenido máximo permitido de metales pesados totales en compost (Norma Australiana, 2001c; Norma Peruana - **INACAL, 2021d, Norma Mexicana, 2018b: NCh2880.c, 2003a**).

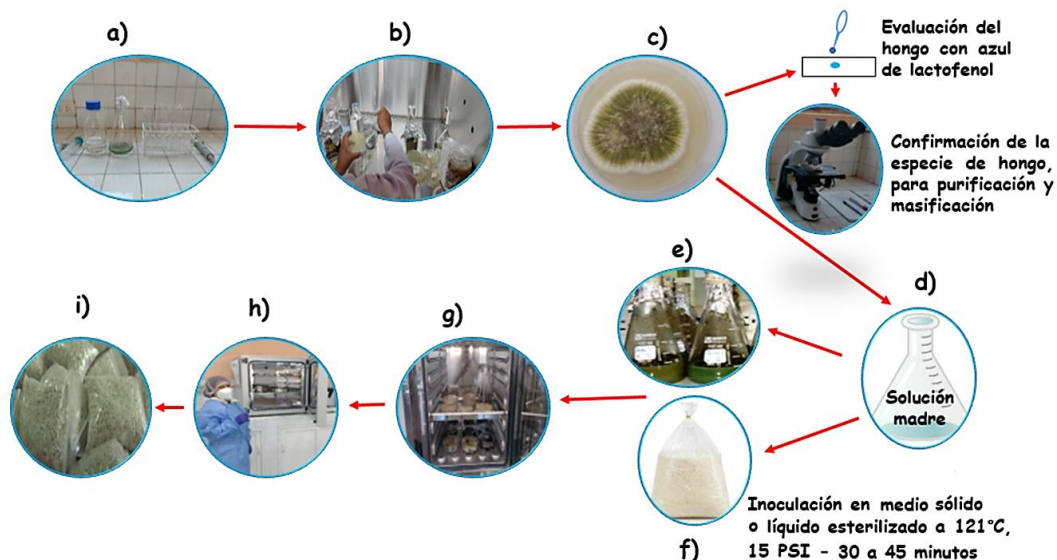


Figura 1. Producción de biomasa fúngica. a) Dilución de un gramo de hongo (sustrato sólido) en 10 ml de agua destilada b) Preparación del medio de cultivo y siembra del hongo c) Crecimiento de hongo 5 a 8 días. d) Solución madre a partir de muestra de hongo esporulado. e) Inoculación de hongo en sustrato líquido. f) Inoculación del hongo en medio sólido. g) Cultivo en incubadora a temperatura de 24-28 °C. h) Proceso de secado para disminuir la humedad 30% - 35%. i) Proceso de embolsado a una temperatura de 16-20 °C.

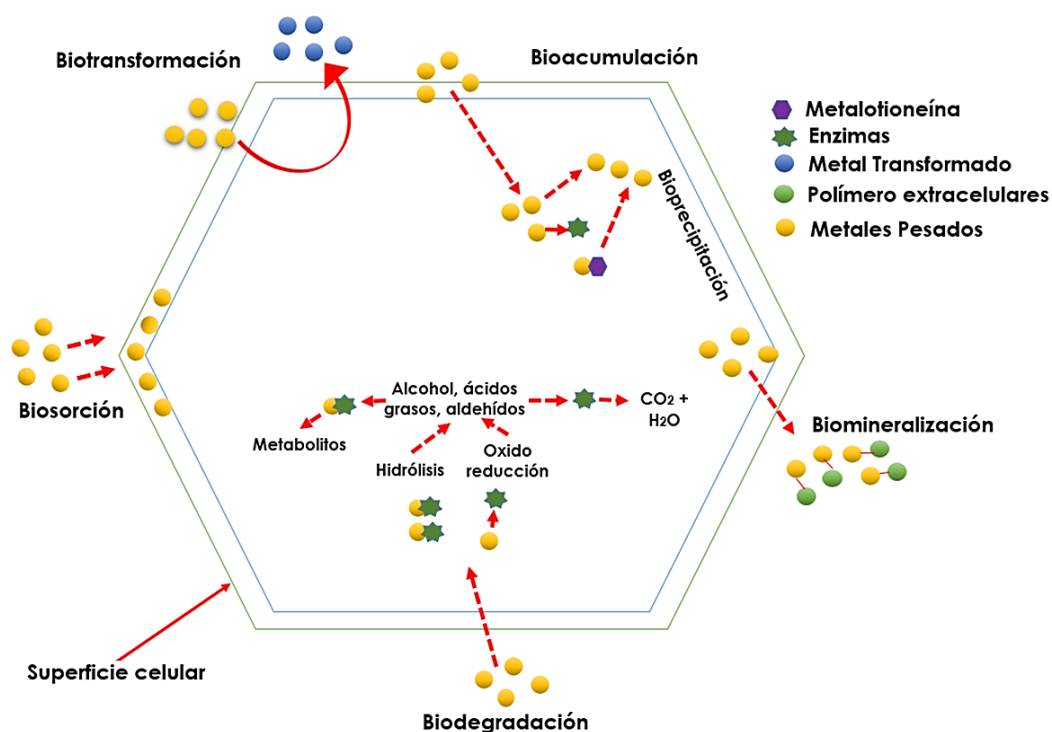


Figura 2. Mecanismos de biorremediación de microorganismos para la reducción de metales pesados, adaptado de Zhang et al. (2020).

5.1. Biorremediación de metales pesados del compost por biomasa fúngica

La biorremediación de metales pesados basada en microorganismos se considera eficiente, rentable y ecológica (Teng et al., 2020). En la **Tabla 3** se presenta algunas especies de hongos para la biorremediación además de presentar la acción de los

mismos, especie de hongo, tolerancia de metales, eficiencia de remoción o eliminación representado en porcentaje y mecanismos de acción.

Las bacterias y los hongos forman parte de las estrategias de la biorremediación por microorganismos para la reducción de la toxicidad de los metales y aumentan la calidad del suelo (Sowmya et al.,

2020), representado en la **Figura 3**. Es de interés destacar que entre los diversos metales pesados, el Cadmio (Cd) es el más tóxico para los organismos vivos, incluso en concentraciones muy bajas (<5 µM); el Cd responde muy lentamente a los procesos de biorremediación por ello permanece en el suelo durante períodos extendidos, sin embargo,

muchos microorganismos pueden estabilizar el Cd y otros metales pesados por adsorción en su pared celular, lo que se atribuye a la prevalencia de grupos funcionales aniónicos como carboxilo, amina, hidroxilo, fosforilo y sulfhidrilo en sus paredes celulares (Yin et al., 2019).

Tabla 3

Biorremediación de metales pesados por hongos, eficiencia de remoción y el mecanismo de acción

Especie de hongo	Tolerancia a metales	Eficiencia de remoción o eliminación (%)	Mecanismo de acción	Referencias
<i>Graphium putredinis</i>	Cadmio (Cd)	20 - 60	Bioacumulación	(Vargas-García et al., 2012)
<i>Fusarium solani</i>	Cromo (Cr)		Bioacumulación	
<i>Fusarium spp.</i>	Niquel (Ni)		Bioadsorción	
<i>Penicillium chrysogenum</i>	Zinc (Zn)		Bioacumulación	
	Plomo (Pb)	Superior a 90	Bioacumulación	
<i>Acremonium</i>	Mn, Fe, Zn, Cu, Al, Pb	64,9 - 96,9	Bioacumulación	(Ma et al., 2014)
<i>Pleurostostreatus</i>	Cd, Hg	0,5 - 52,2	Bioacumulación	(Baldrian et al., 2000)
<i>Fusarium flocciferum, Trichoderma, Trametesversicolor, Pleurotus</i>	Cd, Ni	21 - 93	Bioacumulación	(Atagana, 2009)
<i>Trichoderma asperellum</i>	Zinc (Zn)	73,5	Bioacumulación	(Jalali et al., 2016)
	Hierro (Fe)	64,1		
	Cadmio (Cd)	62,5		
	Cobre (Cu)	33,3 - 83,3		
	Manganeso (Mn)	50		
<i>Trichoderma viride</i>	Cromo (Cr)	0 - 29,7	Bioacumulación	
	Plomo (Pb)	51,5		
	Cadmio (Cd)	21,4		
	Cobre (Cu)	6,5		
	Zinc (Zn)	29,5		
	Niquel (Ni)	35,3		
<i>Aspergillus heteromorphus</i>	Cromo (Cr)	15,7	Biofiltración	(Manna et al., 2020)
	Plomo (Pb)	32		
	Cadmio (Cd)	14,3		
	Cobre (Cu)	22,3		
	Zinc (Zn)	32,5		
	Niquel (Ni)	32,6		
<i>Rhizomucor pusillus</i>	Cromo (Cr)	19,8	Biofiltración	(Manna et al., 2020)
	Plomo (Pb)	27,2		
	Cadmio (Cd)	21,4		
	Cobre (Cu)	13,6		
	Zinc (Zn)	32,8		
	Niquel (Ni)	31,6		
<i>Aspergillus flavus</i>	Cromo (Cr)	16	Biofiltración	(Manna et al., 2020)
	Plomo (Pb)	41,7		
	Cadmio (Cd)	21,4		
	Cobre (Cu)	10		
	Zinc (Zn)	28,8		
	Niquel (Ni)	36,8		
<i>Aspergillus terreus</i>	Cromo (Cr)	10,5	Biofiltración	(Manna et al., 2020)
	Plomo (Pb)	18		
	Cadmio (Cd)	7,1		
	Cobre (Cu)	7,9		
	Zinc (Zn)	4,6		
	Niquel (Ni)	21,1		
<i>Aspergillus awamori</i>	Cromo (Cr)	4,2	Biofiltración	(Manna et al., 2020)
	Plomo (Pb)	19,4		
	Cadmio (Cd)	14,3		
	Cobre (Cu)	12,5		
	Zinc (Zn)	6,6		
	Niquel (Ni)	15,5		
	Cromo (Cr)	3,6		

Entre bacterias y hongos, las especies del género *Trichoderma* representan un grupo de hongos filamentosos que comprende actualmente más de 89 especies, los cuales tienen un importante potencial en la biorremediación (Oshiquiri et al., 2020). *Trichoderma* inmoviliza los metales a través de mecanismos fisiológicos y bioquímicos que favorecen la quelatación, la acumulación, la biosorción, así como también puede cambiar su estado de oxidación (Sun et al., 2020). Algunos microorganismos implicados en la biorremediación de metales pesados, como *Trichoderma atroviride* evaluados en laboratorio, demostraron que hubo una absorción del 50% a 80% del Cu; este hongo no solo biorremedia la contaminación de Cu, sino que también tolera y absorbe los metales pesados como el Zn, Pb y Cd (Sun et al., 2020). Así mismo las cepas de hongos *Fusarium solani* y *Trichoderma citrinoviridae* que resultaron ser resistentes y con biosorción efectiva, evaluadas en suelos de un área industrial demostraron ser las mejores en microrremediación de Pb y Cu, respectivamente (Liaquat et al., 2021).

Por otro lado, se reportó que *Trichoderma lixii* CR700 fue capaz de eliminar el 84,6% de Cu_2 , mostrando un potencial de eliminación eficiente de Cu_2^+ en los rangos de pH de 5,0 a 8,0, en presencia de otros contaminantes coexistentes como metales pesados, aniones e inhibidores metabólicos, así como de aguas residuales de curtidurías reales

(Kumar et al., 2019). Las nanopartículas de selenio (SeNP) se sintetizaron mediante un proceso de reducción de SeO_2 simple y ambientalmente benigno en *Trichoderma sp.* donde se logró una tasa de eliminación de selenio del 84,73% (Sun et al., 2020). Así mismo, hay reportes que los biofiltros basados en *Trichoderma viride* y *Aspergillus flavus* son capaces de eliminar la mayor cantidad de Pb (> 40%) y Cd (> 20%). Por otro lado, biofiltros basados en *Aspergillus heteromorphus* fueron los más eficientes para eliminar el Cu y el Cr de los compost de RSOU (20%). Biofiltros basados en *Trichoderma viride*, *Aspergillus heteromorphus*, *Rhizomucor pusillus* y *Aspergillus flavus* fueron igualmente efectivos para provocar la toxicidad de Zn (~30%) y Ni (> 30%) (Manna et al., 2020).

El proceso de compostaje reduce significativamente el riesgo ecológico de la contaminación con metales pesados (Cr, Ni, Cu, Mn entre otros), después que el compost alcanza la madurez (Wang et al., 2021). El compost en la etapa madura, reporta un pH más alto que en la etapa inicial, lo cual es un factor para estabilizar los metales pesados (Li et al., 2018). La adición de agentes microbianos contribuye a la pasivación de metales pesados, este proceso acelera la degradación de materia orgánica en el compost, lo que resulta en la formación de ácidos húmicos y fúlvicos, que tienen más probabilidades de unirse a los iones metálicos (Lalas et al., 2017).

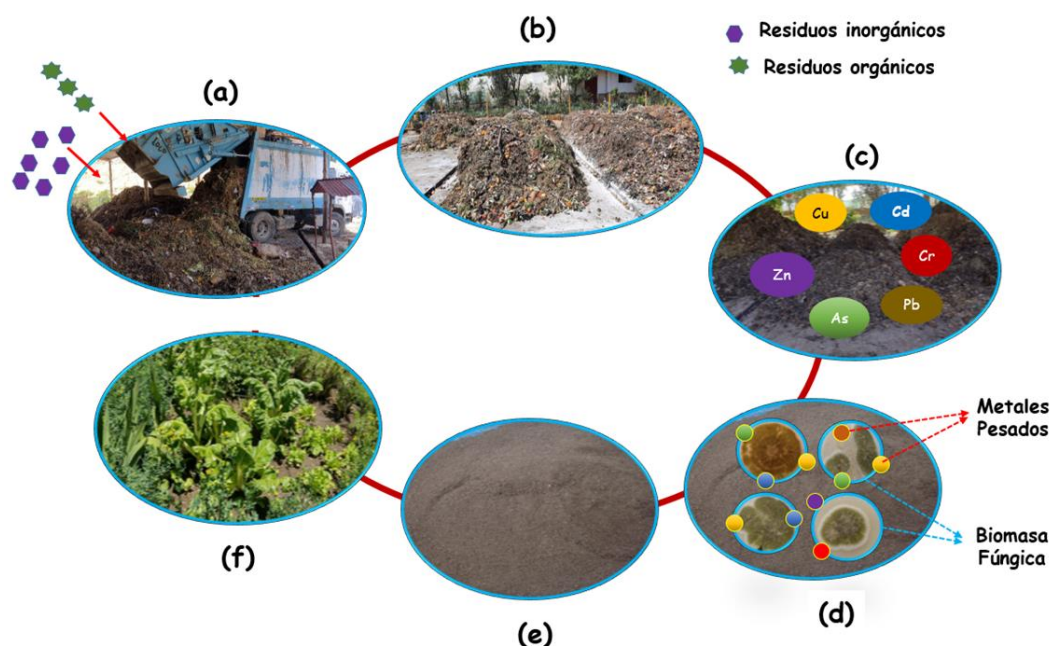


Figura 3. Biorremediación de compost de residuos sólidos orgánico municipal/urbano. a) Residuos sólidos orgánico municipal/urbano (RSOM/U). b) Proceso de compostaje de RSOM/U. c) Presencia de Metales pesados en compost de RSOM/U. d) Biorremediación con biomasa Fúngica. e) Compost apto para cultivos. f) Incorporación de compost en suelos agrícolas.

Por otro lado, la cantidad de comunidades bacterianas y fúngicas en el proceso de producción del compost utilizando diversos sustratos para su elaboración pueden ser similares, independientemente de la adición de agentes microbianos, lo que genera una fuerza impulsora en la estructura de la comunidad microbiana durante el proceso de compostaje. El cambio de temperatura y la degradación de las sustancias orgánicas son los principales factores del cambio de las concentraciones de metales pesados disponibles (Wang et al., 2021). Por otro lado, los hongos micorrízicos arbusculares (AMF) producen la proteína relacionada con la glomalina (GRSP) en ambos sentidos, es decir, intraradical y extra radical; la GRSP podría haber contribuido a la inmovilización de algunos metales como el Cromo (Cr) en las raíces, disminuyendo así su contenido en el suelo. En general, las GRSP ayudan al mantenimiento de la calidad del suelo aumentando el secuestro de metales pesados como Cd, Ni, Cu y Zn y estabilizan los perfiles del suelo en vertederos de RSU (Gujre et al., 2021).

Debido a la considerable adaptabilidad del metabolismo de las cepas fúngicas, se ha establecido que el cultivo de hongos es efectivo para degradar y transformar una amplia variedad de moléculas químicas naturales y sintéticas como pesticidas, metales pesados, detergentes, plastificantes, productos químicos industriales y productos farmacéuticos (Křesinová et al., 2018). Los microorganismos modifican la concentración de metales pesados en el ambiente, pues estos cuentan con mecanismos enzimáticos y no enzimáticos para remover metales en solución (Beltrán-Pineda & Gómez-Rodríguez, 2016). Por otro lado, *Trichoderma* ha alcanzado una posición única en la industria agrícola como un agente de control biológico exitoso contra enfermedades de las plantas, promotores del crecimiento de las plantas y biorremediación del suelo y ha sido capaz de tolerar o adsorber metales pesados y controlar sinérgicamente las enfermedades de las plantas (Sun et al., 2020).

5.2. Influencia del compost en la biorremediación de metales pesados

La reducción del contenido de metales y mejora de la calidad de los compost de residuos sólidos municipales puede darse por la segregación temprana en la fuente. Es oportuno un examen completo de la biodisponibilidad de metales en el compost para analizar diversos factores que pueden afectar el suelo que a largo plazo puede acumular metales pesados en su estructura y estos a su vez ser absorbidos por las plantas (Meena et al., 2019). Los factores que influyen en la acumulación de metales pesados durante el compostaje se pueden

categorizar en los siguientes: condiciones ambientales, propiedades de las sustancias y actividades microbianas. El compost tiene un impacto acumulativo en el medio ambiente si se aplica durante un largo período de tiempo, por ello es necesario controlar la tasa y la frecuencia de aplicación en los campos de cultivos (Xiong et al., 2022). El pH es un parámetro importante que influye en el proceso de compostaje y el rango óptimo para el desarrollo de bacterias es de 6-7,5 y para hongos 5,5-8,0, el valor de pH muestra una tendencia creciente de 7,4 a 8,0, creando así un ambiente alcalino durante el compostaje a medida que aumenta el pH, los metales tienden a formar óxidos y fosfatos metálicos insolubles (Chen et al., 2020).

La inactivación de metales pesados en el compostaje se ve influenciada por muchos factores, entre ellos están los fisicoquímicos, comunidades microbianas y componentes orgánicos (Song et al., 2021). Entre los factores fisicoquímicos más relevantes se considera al pH, el cual puede afectar la formación de complejos de metales pesados y polímeros que ejercen un efecto indirecto a través de su influencia sobre la comunidad microbiana y el mecanismo metabólico (Wang et al., 2021). Los residuos orgánicos están directamente relacionados con la solubilidad, movilidad y biodisponibilidad de los metales pesados, del mismo modo como la materia orgánica disuelta (DOM), sustancias húmicas (HS), ácido fúlvico (FA) y ácido húmico (HA). La DOM puede formar complejos solubles con metales pesados, lo que inhibe la adsorción o precipitación de metales pesados y hay la posibilidad de contaminación ambiental (Epelde et al., 2018; Huang et al., 2020). La combinación de HA y metales pesados (Cu, Zn, As y Cd) es fuerte e irreversible existiendo una correlación positiva, por ello propiciar la formación de HA es eficiente para la inmovilización de metales pesados (Cao et al., 2021). En este sentido, el proceso de humificación permite determinar el rango de transformaciones de los metales pesados durante el compostaje (Liu et al., 2022).

La reducción de la biodisponibilidad de los metales pesados (Cui et al., 2021) y el efecto de pasivación de los metales pesados en el compost, se da en la etapa de madurez, esto se debe a que en esta etapa se forman las sustancias húmicas en base a carbohidratos a través de la hidrólisis catalizada por ácido o reacciones de condensación por deshidratación (Wei et al., 2020), formando enlaces de grupos funcionales carboxílicos e hidroxilo superficiales a través de enlaces de hidrógeno y fuerzas hidrofóbicas para la adsorción de iones metálicos (Qu et al., 2019). Las sustancias húmicas derivadas del compost extraídas de la fase de madurez

mostraron una capacidad de biosorción de HM, mayor que en las etapas de calentamiento, termofílico y fases de enfriamiento (Wei et al., 2020). El período óptimo para la disminución de la biodisponibilidad de los metales pesados como el Zn, Cu, Cd, Cr, Pb y Ni fue de 80, 80, 50, 52, 52 y 60 días respectivamente, por tanto, la duración del compostaje mayor a 50 días se considera un factor crítico en la disminución de los HM biodisponibles en los productos finales de compost (Barthod et al., 2018). La adición de aditivos (zeolita, bio carbón, adición de paja de maíz, tallos de maíz, malas hierbas entre otros) en el proceso del compostaje para mejorar los parámetros fisicoquímicos del compost puede reducir significativamente los peligros ambientales causados por los metales pesados biodisponibles en los productos finales de compost (Zhou et al., 2022). Las concentraciones de metales pesados, especialmente Zn y Pb en el compost derivado de RSU son relativamente más elevadas que las del suelo, en términos de complejación de metales, el Pb tiene una fuerte afinidad, el Ni tiene la más débil y el Zn, el Cu y el Cd tienen propiedades de sorción intermedias (Yu et al., 2018).

Los compost producidos a partir de RSOU y lodos de depuradora de aguas residuales, se caracterizan por sus fuertes propiedades de sorción de metales, además la aplicación de cantidades excesivas de compost de RSOU en suelos cultivables puede provocar que los metales pesados penetren en la columna del suelo y contaminen las aguas subterráneas. Aunque no hay literatura disponible al respecto, se cree que estos contaminantes mutagénicos y cancerígenos pronunciados podrían permanecer persistentes en el medio ambiente después del compostaje de RSOU y la enmienda del suelo (Chen et al., 2018). Las materias primas utilizadas en la preparación del compost, proceden de una deficiente selección de residuos, debido a ello pueden tener un contenido significativo de metales pesados (Reyes-Pinto et al., 2020). Por otro lado, el compost, presenta en su composición fuentes enriquecidas con carbono, celulosa y sacarosa, los cuales son sustratos energéticos altamente disponibles para mejorar la actividad microbiana en sitios muy contaminados con metales pesados (Lipińska et al., 2019).

De igual manera, otros estudios refieren que el compost podría no crear un riesgo de contaminación por metales pesados y ser tolerados siempre que la dosis anual se mantuviera por debajo de 10 t ha⁻¹ de materia seca (Yuksel, 2015). Los metales pesados se consideran uno de los contaminantes más tóxicos en el ambiente por tener efectos nocivos a nivel de toda la cadena

trófica, en especial el Cd, Cr y Hg son relevantes debido a su persistencia y toxicidad (Beltrán-Pineda & Gómez-Rodríguez, 2016).

6. Retos actuales y futuros

Las investigaciones actuales para la biorremediación de metales pesados con el uso de la biodiversidad fúngica podrían fortalecerse con las siguientes recomendaciones:

- ✓ Los hongos estudiados en la reducción de metales pesados son eficientes debido a que permiten aminorar o reducir la contaminación por metales pesados. Es necesario realizar mayor investigación para conocer la eficiencia y así potenciar a la biomasa fúngica en la reducción de metales pesados.
- ✓ El uso de metodologías adecuadas en la producción de biomasa fúngica podría aumentar el efecto de la biorremediación de metales pesados en los compost.
- ✓ La combinación de varias técnicas físicas y químicas para la remediación de metales pesados en combinación como métodos híbridos utilizando la biorremediación con microorganismos (biodiversidad fúngica), podría mejorar de forma significativa la remoción de metales pesados del compost.
- ✓ En los compost producidos de residuos sólidos orgánicos municipales o urbanos, las investigaciones reportan metales pesados en su composición y al ser utilizados como enmienda orgánica en áreas de cultivo tienden a acumular o bioacumular metales pesados en la estructura del suelo, lo que evidencia la necesidad de investigación continua y permanente para evitar su contaminación.

7. Conclusiones

La investigación realizada en este artículo se basó en la revisión de algunas especies de la biodiversidad fúngica, la revisión de los metales pesados como contaminantes y resume la participación de la biomasa fúngica en la reducción de metales pesados del compost producido de RSOU o RSOM, aclarando la eficiencia de la biorremediación de los metales pesados combinados con la biomasa fúngica. Se ha encontrado que los metales pesados más contaminantes son: cadmio, cromo, cobre, mercurio, plomo, níquel y zinc; siendo estos contaminantes inorgánicos, los que no son degradados y tienden a concentrarse en el proceso de compostaje sobre la materia orgánica que se diluye y se mineraliza. Una técnica importante para conseguir reducir los metales pesados y eliminar oligoelementos potencialmente tóxicos en el proceso de

compostaje sería la bioadsorción fúngica, siendo la biomasa fúngica capaz de secuestrar metales pesados bio asimilables y prevenir la translocación a los vegetales, disminuyendo la disponibilidad de los metales en el suelo. Las investigaciones futuras deben centrarse en evaluar especies de hongos que mejor se adaptan a los metales pesados y determinar las cepas más eficientes en la biorremediación.

ORCID

W.E. Nuñez  <https://orcid.org/0000-0001-8690-6687>
 D. A. Sotomayor  <https://orcid.org/0000-0003-0534-5625>
 C.V. Ballardo  <https://orcid.org/0000-0002-3509-1980>
 E. Herrera  <https://orcid.org/0000-0003-0904-722X>

References

- Abraham, S., García, J., & Peña, J. J. (2015). Microorganisms role in the bioremediation of contaminated soils with heavy metals. *Acta Universitaria*, 25(NE-3), 40-45.
- Ahmed, S., Mustafa, G., Arshad, M., & Rajoka, M. I. (2017). Fungal Biomass Protein Production from *Trichoderma harzianum* Using Rice Polishing. *BioMed Research International*, 2017.
- Arévalo, E., Cayotopa, J., Olivera, D., Gárate, M., Trigos, E., Costa, B., & Leon, B. (2017). Optimización de sustratos para la producción de conidias de *Trichoderma harzianum*. Por fermentación sólida en la región de San Martín. Perú. *Rev. investig. Altoandin*, 19(2), 135-144.
- Atagana, H. I. (2009). Biodegradation of PAHs by fungi in contaminated-soil containing cadmium and nickel ions. *African Journal of Biotechnology*, 8(21), 5780-5789.
- Australiana, N. (2001). Ordenanza del Ministro Federal de Agricultura, Silvicultura, Medio Ambiente y Gestión del Agua sobre los requisitos de calidad para compost a partir de desechos (Ordenanza sobre Compost). *Bundesgesetzblatt Für Die Republik Österreich*, 1723-1745.
- Awasthi, S. K., Duan, Y., Liu, T., Zhang, Z., Pandey, A., et al. (2021). Can biochar regulate the fate of heavy metals (Cu and Zn) resistant bacteria community during the poultry manure composting? *Journal of Hazardous Materials*, 406, 124593.
- Awasthi, S. K., Sarsaiya, S., Awasthi, M. K., Liu, T., Zhao, J., Kumar, S., & Zhang, Z. (2020). Changes in global trends in food waste composting: Research challenges and opportunities. *Bioresource Technology*, 299(September 2019), 122555.
- Ayangbenro, A. S., & Babalola, O. O. (2017). A new strategy for heavy metal polluted environments: A review of microbial biosorbents. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(1).
- Babu, A. G., Shim, J., Bang, K. S., Shea, P. J., & Oh, B. T. (2014). *Trichoderma virens* PDR-28: A heavy metal-tolerant and plant growth-promoting fungus for remediation and bioenergy crop production on mine tailing soil. *Journal of Environmental Management*, 132, 129-134.
- Baldrian, P., In Der Wiesche, C., Gabriel, J., Nerud, F., & Zdražil, F. (2000). Influence of cadmium and mercury on activities of ligninolytic enzymes and degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons by *Pleurotus ostreatus* in soil. *Applied and Environmental Microbiology*, 66(6), 2471-2478.
- Barthod, J., Rumpel, C., & Dignac, M. F. (2018). Composting with additives to improve organic amendments. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 38(2).
- Beltrán-Pineda, M. E., & Gómez-Rodríguez, A. M. (2016). Biorremediación de metales pesados cadmio (Cd), cromo (Cr) y mercurio (Hg), mecanismos bioquímicos e ingeniería genética: una revisión. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 12(2), 172-197.
- Cadavid-Velásquez, E. D. J., Pérez-Vásquez, N. D. S., & Marrugo-Negrete, J. (2019). Contaminación por metales pesados en la bahía Cispatá en Córdoba-Colombia y su bioacumulación en macromicetos. *Gestión y Ambiente*, 22(1), 43-53.
- Campuzano, R., & González-Martínez, S. (2016). Characteristics of the organic fraction of municipal solid waste and methane production: A review. *Waste Management*, 54, 3-12.
- Cao, Y., Wang, X., Zhang, X., Misselbrook, T., Bai, Z., & Ma, L. (2021). An electric field immobilizes heavy metals through promoting combination with humic substances during composting. *Bioresource Technology*, 330(February).
- Cao, Y., Zhao, J., Wang, Q., Bai, S., Yang, Q., Wei, Y., & Wang, R. (2022). Industrial aerobic composting and the addition of microbial agents largely reduce the risks of heavy metal and ARG transfer through livestock manure. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 239(May), 113694.
- Carhuavilca, D., Sánchez, A., Robles, J. L., Vásquez, J., Blas, R., Quispe, E., & Huauya, A. (2021). Perú: *Anuario de Estadísticas Ambientales 2021*. Instituto Nacional de Estadística e Informática. 540.
- Cerda, A., Artola, A., Barrena, R., Font, X., Gea, T., & Sánchez, A. (2019). Innovative Production of Bioproducts From Organic Waste Through Solid-State Fermentation. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 3.
- Chen, H., Dou, J., & Xu, H. (2018). Remediation of Cr(VI)-contaminated soil with co-composting of three different biomass solid wastes. *Journal of Soils and Sediments*, 18(3), 897-905.
- Chen, X., Zhao, Y., Zhang, C., Zhang, D., Yao, C., et al. (2020). Speciation, toxicity mechanism and remediation ways of heavy metals during composting: A novel theoretical microbial remediation method is proposed. *Journal of Environmental Management*, 272(June 2019), 111109.
- Covarrubias, S. A., García Berumen, J. A., & Peña Cabriales, J. J. (2015). Microorganisms role in the bioremediation of contaminated soils with heavy metals. *Acta Universitaria*, 25(NE-3), 40-45.
- Cubillos, M., Wulff, J. N., & Wöhlk, S. (2021). A multilevel Bayesian framework for predicting municipal waste generation rates. *Waste Management*, 127, 90-100.
- Cui, H., Ou, Y., Wang, L., Yan, B., Li, Y., & Bao, M. (2021). Additive grain-size: An innovative perspective to investigate the transformation among heavy metal and phosphorus fractions during aerobic composting. *Journal of Environmental Management*, 292(May), 112768.
- De Corato, U. (2020). Agricultural waste recycling in horticultural intensive farming systems by on-farm composting and compost-based tea application improves soil quality and plant health: A review under the perspective of a circular economy. *Science of the Total Environment*, 738, 139840.
- Epelde, L., Jauregi, L., Urrea, J., Ibarretxe, L., Romo, J., Goikoetxea, I., & Garbisu, C. (2018). Characterization of Composted Organic Amendments for Agricultural Use. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2(July), 1-12.
- Fetene, Y., Addis, T., Beyene, A., & Kloos, H. (2018). Valorisation of solid waste as key opportunity for green city development in the growing urban areas of the developing world. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(6), 7144-7151.
- Gorai, P. S., Barman, S., Gond, S. K., & Mandal, N. C. (2020). *Trichoderma*. *Beneficial Microbes in Agro-Ecology: Bacteria and Fungi*, 571-591.
- Gujre, N., Agnihotri, R., Rangan, L., Sharma, M. P., & Mitra, S. (2021). Deciphering the dynamics of glomalin and heavy metals in soils contaminated with hazardous municipal solid wastes. *Journal of Hazardous Materials*, 416(April), 125869.
- Gujre, N., Mitra, S., Soni, A., Agnihotri, R., Rangan, L., Rene, E. R., & Sharma, M. P. (2021). Speciation, contamination, ecological and human health risks assessment of heavy metals in soils dumped with municipal solid wastes. *Chemosphere*, 262, 128013.

- Hernández, D. J., Ferrera-Cerrato, R., & Alarcón, A. (2019). Trichoderma: Agricultural and biotechnological importance, and fermentation systems for producing biomass and enzymes of industrial interest. *Chilean Journal of Agricultural and Animal Sciences*, 35(1), 98-112.
- Hernández, L., Benítez, M., & Bermúdez, J. (2018). Physical-chemical characterization of the organic fraction of urban solid waste from the controlled landfill at the Abel Santamaría Urban Center in Santiago de Cuba. *Tecnología Química*, 38(2), 369-379.
- Hoorweg, D., & Bhada, P. (2012). What a Waste a Global Review of Solid Waste Management. *Macro-cognition Metrics and Scenarios: Design and Evaluation for Real-World Teams*, 29-43.
- Huang, G., Zhou, X., Guo, G., Ren, C., Rizwan, M. S., Islam, M. S., & Hu, H. (2020). Variations of dissolved organic matter and Cu fractions in rhizosphere soil induced by the root activities of castor bean. *Chemosphere*, 254, 126800.
- INACAL. (2021). *Norma Técnica Peruana del Instituto Nacional de Calidad, para Fertilizantes. Compost para uso agrícola y requisitos. Primera Ed*, 17.
- Jalali, J., Magdich, S., Jarboui, R., Loungou, M., & Ammar, E. (2016). Phosphogypsum biotransformation by aerobic bacterial flora and isolated *Trichoderma asperellum* from Tunisian storage piles. *Journal of Hazardous Materials*, 308, 362-373.
- Kaza, S., Shrikanth, S., & Chaudhary, S. (2021). More Growth, Less Garbage. *More Growth, Less Garbage*.
- Křesinová, Z., Linhartová, L., Filipová, A., Ezechiáš, M., Mašín, P., & Cajthaml, T. (2018). Biodegradation of endocrine disruptors in urban wastewater using *Pleurotus ostreatus* bioreactor. *New Biotechnology*, 43, 53-61.
- Kumar, A., Singhania, R. R., Albarico, F. P. J. B., Pandey, A., Chen, C. W., & Dong, C. Di. (2022). Organic wastes bioremediation and its changing prospects. *Science of the Total Environment*, 824, 153889.
- Kumar, V., & Dwivedi, S. K. (2019). Hexavalent chromium stress response, reduction capability and bioremediation potential of *Trichoderma* sp. isolated from electroplating wastewater. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 185(September), 109734.
- Lalas, S., Athanasiadis, V., & Dourtoglou, V. G. (2017). *Humic and Fulvic Acids as Potentially Toxic Metal Reducing Agents in Water* † Department of Food Technology, Technological Educational Institute of Thessaly, Karditsa, Department of Oenology & Beverage Technology, Technological Educational Institute of November, 1-13.
- Li, H., Wang, J., Zhao, B., Gao, M., Shi, W., et al. (2018). The role of major functional groups: Multi-evidence from the binding experiments of heavy metals on natural fulvic acids extracted from lake sediments. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 162(July), 514-520.
- Liaquat, F., Haroon, U., Munis, M. F. H., Arif, S., Khizar, M., et al. (2021). Efficient recovery of metal tolerant fungi from the soil of industrial area and determination of their biosorption capacity. *Environmental Technology and Innovation*, 21.
- Lipińska, A., Kucharski, J., & Wyszowska, J. (2019). Activity of phosphatases in soil contaminated with PAHs. *Water Air Soil Pollut*, 230, 298.
- Liu, H., Wu, M., Gao, H., Yi, N., & Duan, X. (2021). Hydrocarbon transformation pathways and soil organic carbon stability in the biostimulation of oil-contaminated soil: Implications of 13C natural abundance. *Science of the Total Environment*, 788, 147580.
- Liu, Y., Ma, R., Tang, R., Kong, Y., Wang, J., Li, G., & Yuan, J. (2022). Effects of phosphate-containing additives and zeolite on maturity and heavy metal passivation during pig manure composting. *Science of the Total Environment*, 836(January), 155727.
- López-Gómez, J. P., Latorre-Sánchez, M., Unger, P., Schneider, R., Coll Lozano, C., & Venus, J. (2019). Assessing the organic fraction of municipal solid wastes for the production of lactic acid. *Biochemical Engineering Journal*, 150(February), 107251.
- Lopez-Ramirez, N., Volke-Sepulveda, T., Gaime-Perraud, I., Saucedo-Castañeda, G., & Favela-Torres, E. (2018). Effect of stirring on growth and cellulolytic enzymes production by *Trichoderma harzianum* in a novel bench-scale solid-state fermentation bioreactor. *Bioresource Technology*, 265(April), 291-298.
- Ma, X. kui, I., Wu, L., & Fam, H. (2014). Heavy metal ions affecting the removal of polycyclic aromatic hydrocarbons by fungi with heavy-metal resistance. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 98(23), 9817-9827.
- Mahmoud, E., Ibrahim, M., Ali, N., & Ali, H. (2018). Spectroscopic analyses to study the effect of biochar and compost on dry mass of canola and heavy metal immobilization in soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 49(16), 1990-2001.
- Manna, M. C., Sahu, A., De, N., Thakur, J. K., Mandal, A., et al. (2020). Novel bio-filtration method for the removal of heavy metals from municipal solid waste. *Environmental Technology and Innovation*, 17.
- Meena, M. D., Yadav, R. K., Narjary, B., Yadav, G., Jat, H. S., et al. (2019). Municipal solid waste (MSW): Strategies to improve salt affected soil sustainability: A review. *Waste Management*, 84, 38-53.
- Mexicana, N. (2018). *Dirección General de Normas -Norma Mexicana NMX-AA-180-SCFI-2018*.
- Mishra, S., Lin, Z., Pang, S., Zhang, Y., Bhatt, P., & Chen, S. (2021). Biosurfactant is a powerful tool for the bioremediation of heavy metals from contaminated soils. *Journal of Hazardous Materials*, 418(February), 126253.
- Mudhoo, A., Ramasamy, D. L., Bhatnagar, A., Usman, M., & Sillanpää, M. (2020). An analysis of the versatility and effectiveness of composts for sequestering heavy metal ions, dyes and xenobiotics from soils and aqueous milieus. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 197(April), 110587.
- NCh2880.c. (2003). Proyecto de Norma en Consulta Pública - Compost Clasificación y requisitos. *Instituto Nacional de Normalización*, 1-27.
- Oshiquiri, L. H., dos Santos, K. R. A., Ferreira Junior, S. A., Steindorff, A. S., Barbosa Filho, J. R., et al. (2020). *Trichoderma harzianum* transcriptome in response to cadmium exposure. *Fungal Genetics and Biology*, 134, 103281.
- Ozdemir, S., Turp, S. M., & Oz, N. (2020). Simultaneous dry-sorption of heavy metals by porous adsorbents during sludge composting. *Environmental Engineering Research*, 25(2), 258-265.
- Paradelo, R., Villada, A., & Barral, M. T. (2020). Heavy metal uptake of lettuce and ryegrass from urban waste composts. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(8), 1-10.
- Pérez, L., Salgado, I., Larrea, C., Martínez, A., Cruz, M., & Carballo, M. (2018). Biosorción microbiana de metales pesados: características del proceso. *Cuban Journal of Biological Sciences*, 6(1), 13.
- Qu, C., Chen, W., Hu, X., Cai, P., Chen, C., Yu, X. Y., & Huang, Q. (2019). Heavy metal behaviour at mineral-organo interfaces: Mechanisms, modelling and influence factors. *Environment International*, 131, 104995.
- Rahman, Z., & Singh, V. P. (2020). Bioremediation of toxic heavy metals (THMs) contaminated sites: concepts, applications and challenges. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(22), 27563-27581.
- Ramírez-Guzmán, K. N., De la Cruz-Quiroz, R., & Aguilar, C. N. (2016). Producción de *Trichoderma harzianum* y sus enzimas líticas por fermentación en medio sólido sobre residuos cítricos. *Agronomía Colombiana*, 34(1Supl), S1346-S1348.
- Reyes-Pinto, K., Meza-Contreras, V., Alegre-Orihuela, J. C., & Réategui-Romero, W. (2020). Bioavailability and Solubility of Heavy Metals and Trace Elements during Composting of Cow

- Manure and Tree Litter. *Applied and Environmental Soil Science*, 2020.
- Sala, A., Artola, A., Sánchez, A., & Barrera, R. (2020). Rice husk as a source for fungal biopesticide production by solid-state fermentation using *B. bassiana* and *T. harzianum*. *Bioresource Technology*, 296, 122322.
- Sharma, P., Dutta, D., Udayan, A., Nadda, A. K., Lam, S. S., & Kumar, S. (2022). Role of microbes in bioaccumulation of heavy metals in municipal solid waste: Impacts on plant and human being. *Environmental Pollution*, 305, 1-15.
- Sharma, S., Anand, G., Singh, N., & Kapoor, R. (2017). Arbuscular mycorrhiza augments arsenic tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.) by strengthening antioxidant defense system and thiol metabolism. *Frontiers in Plant Science*, 8(June), 1-21.
- Song, C., Zhao, Y., Pan, D., Wang, S., Wu, D., et al. (2021). Heavy metals passivation driven by the interaction of organic fractions and functional bacteria during biochar/montmorillonite-amended composting. *Bioresource Technology*, 329(February).
- Soobhany, N. (2018). Assessing the physicochemical properties and quality parameters during composting of different organic constituents of Municipal Solid Waste. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(2), 1979-1988.
- Sowmya, S., Rekha, P. D., Yashodhara, I., Karunakara, N., & Arun, A. B. (2020). Uranium tolerant phosphate solubilizing bacteria isolated from Gogi, a proposed uranium mining site in South India. *Applied Geochemistry*, 114, 104523.
- Sun, F. S., Yu, G. H., Ning, J. Y., Zhu, X. D., Goodman, B. A., & Wu, J. (2020). Biological removal of cadmium from biogas residues during vermicomposting, and the effect of earthworm hydrolysates on *Trichoderma* guizhouense sporulation. *Bioresource Technology*, 312(April), 123635.
- Sun, H., Meng, M., Wu, L., Zheng, X., Zhu, Z., & Dai, S. (2020). Function and mechanism of polysaccharide on enhancing tolerance of *Trichoderma asperellum* under Pb²⁺ stress. *International Journal of Biological Macromolecules*, 151, 509-518.
- Sun, J., Karupiah, V., & Chen, J. (2020). The mechanism of heavy metal absorption and biodegradation of organophosphorus pesticides by *Trichoderma*. In *New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering*. Elsevier B.V.
- Teng, Z., Shao, W., Zhang, K., Yu, F., Huo, Y., & Li, M. (2020). Enhanced passivation of lead with immobilized phosphate solubilizing bacteria beads loaded with biochar/ nanoscale zero valent iron composite. *Journal of Hazardous Materials*, 384, 121505.
- Vallejo, M., Marín, M., Ramos, M., Silva, S., Ibarra, D., & Tamaris, J. (2021). Biosorción y tolerancia de Pb, Cr y Cd por la biomasa de *Pleurotus* Introducción. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(2), 275-289.
- Vargas-García, M. del C., López, M. J., Suárez-Estrella, F., & Moreno, J. (2012). Compost as a source of microbial isolates for the bioremediation of heavy metals: In vitro selection. *Science of the Total Environment*, 431, 62-67.
- Vázquez, M. B., Amodeo, M. R., & Bianchinotti, M. V. (2016). Estimación de la biomasa fúngica en un suelo del sudoeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina) con una tinción directa con blanco de calcoflúor. *Revista Argentina de Microbiología*, 48(3), 252-258.
- Ventorino, V., Pascale, A., Fagnano, M., Adamo, P., Faraco, V., et al. (2019). Soil tillage and compost amendment promote bioremediation and biofertility of polluted area. *Journal of Cleaner Production*, 239(426), 118087.
- Vullo, D. (2003). Microorganismos Y Metales Pesados: Una Interacción En Beneficio Del Medio Ambiente. *Química Viva*, 2(3), 93-104.
- Wan, L., Wang, X., Cong, C., Li, J., Xu, Y., et al. (2020). Effect of inoculating microorganisms in chicken manure composting with maize straw. *Bioresource Technology*, 301, 122730.
- Wang, L., Liu, H., Prasher, S. O., Ou, Y., Yan, B., & Zhong, R. (2021). Effect of inorganic additives (rock phosphate, PR and boron waste, BW) on the passivation of Cu, Zn during pig manure composting. *Journal of Environmental Management*, 285(February), 112101.
- Wang, M., Liu, Y., Wang, S., Wang, K., & Zhang, Y. (2021). Development of a compound microbial agent beneficial to the composting of Chinese medicinal herbal residues. *Bioresource Technology*, 330(January), 124948.
- Wei, Y., Zhao, Y., Zhao, X., Gao, X., Zheng, Y., Zuo, H., & Wei, Z. (2020). Roles of different humin and heavy-metal resistant bacteria from composting on heavy metal removal. *Bioresource Technology*, 296.
- Wolna-Maruwka, A., Dach, J., Rafała, C., Czekala, W., Niewiadomska, A., Janczak, D., & Budka, A. (2019). An effective method of utilizing vegetable waste in the form of carriers for *Trichoderma* strains with phytosanitary properties. *Science of the Total Environment*, 671, 795-804.
- Xiong, R., Gao, X., Tu, X., Mao, Y., Jiang, L., Zheng, L., & Du, Y. (2022). Heavy metal remediation in sludge compost: Recent progress. *Journal of Renewable Materials*, 10(2), 469-486.
- Yazid, N. A., Barrera, R., Komilis, D., & Sánchez, A. (2017). Solid-state fermentation as a novel paradigm for organic waste valorization: A review. *Sustainability (Switzerland)*, 9(2), 1-28.
- Yin, K., Wang, Q., Lv, M., & Chen, L. (2019). Microorganism remediation strategies towards heavy metals. *Chemical Engineering Journal*, 360(October), 1553-1563.
- Yu, M., He, X., Liu, J., Wang, Y., Xi, B., et al. (2018). Characterization of isolated fractions of dissolved organic matter derived from municipal solid waste compost. *Science of the Total Environment*, 635, 275-283.
- Yuksel, O. (2015). Influence of municipal solid waste compost application on heavy metal content in soil. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(6).
- Zhang, H., Yuan, X., Xiong, T., Wang, H., & Jiang, L. (2020). Bioremediation of co-contaminated soil with heavy metals and pesticides: Influence factors, mechanisms and evaluation methods. *Chemical Engineering Journal*, 398.
- Zhou, S., Kong, F., Lu, L., Wang, P., & Jiang, Z. (2022). Biochar — An effective additive for improving quality and reducing ecological risk of compost: A global meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 806, 151439.