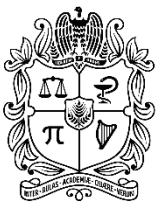


UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Avances en la remediación biológica del mercurio: Hongos macroscópicos como potenciales agentes de biorremediación

Advances in the biological remediation of mercury: Macroscopic fungi as potential bioremediation agents

Lina Marcela Guerra Yepes

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas

Área Curricular de Recursos Minerales

Medellín, Colombia

2019

Avances en la remediación biológica del mercurio: Hongos macroscópicos como agentes de biorremediación

Advances in the biological remediation of mercury: Macroscopic fungi as potential bioremediation agents

Lina Marcela Guerra Yepes

Trabajo final presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería – Recursos Minerales

Director:

Ph.D. Moisés Oswaldo Bustamante Rúa

Codirector:

Magíster. Juan Bautista López Ortiz

Línea de Investigación:

Desarrollo Sostenible y Minería

Grupo de Investigación:

Grupo de Investigaciones en Geología, Minas y Metalurgia Extractiva - CIMEX

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas

Área Curricular de Recursos Minerales

Medellín, Colombia

2019

Dedicatoria

A mí, porque el tiempo que me tomo llegar hasta aquí, me demostró que soy como le diente de león… …pequeñito, alegre, libre y feliz; pero sobre todo que es fuerte y perseverante, que crece y sigue creciendo sin importar en dónde.

A mis familias, por creer en mí, por la paciencia, por el amor y porque mucho de lo que soy, se lo debo a ellos.

A Diana, Mile y Kevin, mis amigos incondicionales, las baterías incansables, los soldaditos de plomo que han sido para mí.

Y en especial a mi abuela, porque a pesar de que no pudo ver este sueño realidad, fue y será la voz incesante de seguir adelante. Porque fueron sus últimos días, la motivación y la fuerza para terminar.

Agradecimientos

Al profesor Moisés Oswaldo Bustamante, director del trabajo final, porque a pesar de que hablamos lenguajes de conocimiento diferentes, siempre encontró el camino para entrelazarlos y lograr el aporte que deja este proceso de formación.

Al profesor Juan Bautista López, codirector del trabajo final, por su conocimiento, disposición, paciencia y cariño en este proyecto.

Al profesor Juan David Velásquez, por su tiempo, apoyo y voluntad para ayudarme a organizar y estructurar mis ideas.

A los profesores Pedro Benjumea, Ernesto Pérez, Néstor Rojas y Aura Ruíz, por las palabras de aliento, los consejos, el tiempo y el interés que siempre tuvieron para que yo culminara mi trabajo final.

Al profesor Neil Vásquez, quien fue uno de mis primeros maestros en la Universidad y con quién después de tanto tiempo, la vida vuelve a reencontrarme para no permitirme abandonar el camino y motivarme a retomar la maestría para terminar.

A todas las personas que de alguna u otra forma hicieron parte de esto en los últimos años, por la energía, el tiempo, las palabras y las preguntas de motivación perfectas: ¿Y tú tesis? La terminaste, entregaste, sustentaste, ninguna de las anteriores, ¿todas las anteriores? (Prof. LEGV)… Por sacarme una sonrisa, y sobre todo porque siempre hicieron que lograra encontrar el lado divertido y positivo de este proceso.

Resumen

Esta investigación examina la literatura sobre los procesos de remediación biológica de suelos contaminados con mercurio, a través del uso de hongos macroscópicos. Para esto, se realizó el método de revisión sistemática de la literatura (RSL), empleando una investigación exploratoria donde se utilizó la búsqueda documental de artículos publicados en la base de datos de SCOPUS. Las ecuaciones de búsqueda identificaron 33 estudios que cumplen con los requisitos de los criterios de inclusión y exclusión, dando respuesta a las preguntas de investigación derivadas del objetivo planteado.

Aunque los estudios relacionan la capacidad de acumulación, captación o concentración de metales pesados en los hongos macroscópicos, específicamente el mercurio. Estos no presentan planteamientos de procesos o protocolos de biorremediación de suelos contaminados con mercurio, usando hongos macroscópicos como agente biológico de remediación. Lo que abre hacia el futuro un área de investigación para el desarrollo sostenible y sustentable de procesos industriales productores de contaminantes como el mercurio.

Palabras clave: Biorremediación, Mercurio, Hongos macroscópicos, Biotecnología.

Abstract

This research examines the literature on the biological remediation processes of soils contaminated with mercury, through the use of macroscopic fungi. For this, the systematic literature review (SLR) method was carried out, using an exploratory investigation where the documentary search of articles published in the SCOPUS database was used. The search equations identified 33 studies that meet the requirements of the inclusion and exclusion criteria, answering the research questions derived from the objective.

Although the studies relate the capacity of accumulation, uptake or concentration of heavy metals in macroscopic fungi, specifically mercury. These do not present approaches to processes or protocols for bioremediation of soils contaminated with mercury using macroscopic fungi as a biological remediation agent. This opens up a future research area for the sustainable and sustainable development of industrial processes that produce pollutants such as mercury.

Keywords: Bioremediation, Mercury, Macroscopic Fungi, Biotechnology.

Contenido

Pág.

Resumen IX

Lista de Ilustraciones XIII

Lista de tablas XV

Introducción 1

1. Generalidades, Antecedentes y Justificación 5
   1.1 Desarrollo Sostenible, Minería Aceptable. 5
      1.1.1 La Industria Minera: Problemática Ambiental 5
   1.2 El Mercurio: Agente Contaminante 7
   1.3 Procesos de descontaminación o remediación de mercurio 8
      1.3.1 Remediación de Origen Biológico 9
   1.4 Antecedentes 11
   1.5 Justificación 12
   1.6 Objetivo General 13
      1.6.1 Objetivos Específicos 13
   1.7 Revisión Sistemática de Literatura - RSL 14

2. Metodología: Revisión Sistemática de Literatura (RSL) 15
   2.1 Planteamiento 15
      2.1.1 Preguntas de Investigación 16
   2.2 Ejecución 17
      2.2.1 Criterios de inclusión y exclusión 20
      2.2.2 Evaluación de la Calidad 21
      2.2.3 Recolección de datos 22

3. Resultados: Análisis Descriptivo y Evaluación de la Calidad 23
   3.1 Evaluación de la Calidad 30

4. Discusión 33
   P1: ¿Qué evidencias existen que indiquen que los hongos macroscópicos tienen la capacidad de disminuir la concentración de metales pesados en suelos? 33
   P2: ¿Qué evidencias existen que indiquen que los hongos macroscópicos tienen la capacidad de disminuir la concentración de Hg en suelos? 35

P3: ¿Qué métodos de biorremediación se han propuesto que utilicen hongos macroscópicos como agente remediador del mercurio? 38
P4: ¿Qué protocolos se han planteado para el proceso de biorremediación de suelos utilizando hongos como agente biorremediador? 39

5. Conclusiones y Recomendaciones 41
5.1 Conclusiones 41
5.2 Recomendaciones 42

Bibliografía 45

Lista de Ilustraciones

Pág.

Ilustración 1-1: Figura tomada y adaptada de (Elizabeth Paisio et al., 2012) 10
Ilustración 2-1: Figura tomada de (Elsevier Publicaciones, 2018) 17
Ilustración 3-1: Línea del tiempo: evolución de la producción (1958-2018) 23
Ilustración 3-2: Total de artículos seleccionados de la RSL, publicados por autor 28
Ilustración 3-3: Revistas con más publicaciones de la comunidad académica 28
Ilustración 3-4: Publicaciones distribuidas a nivel mundial 30
Ilustración 4-1: Filos, clases, ordenes, familias, géneros y especies de hongos macroscópicos reportados en los estudios obtenidos en la RSL. 34
Ilustración 4-2: Árbol filogenético de los hongos macroscópicos con capacidad de acumular concentraciones de mercurio. 38

Lista de tablas

Pág.

Tabla 1-1: Fases de la RSL. 14
Tabla 2-1: Preguntas de Investigación 16
Tabla 2-2: Ejes principales y palabras claves de la RSL 19
Tabla 2-3: Matriz de evaluación de calidad 21
Tabla 3-1: Artículos seleccionados en la RSL, ordenados por año de publicación de manera descendiente. 24
Tabla 3-2: Relación de las fuentes de publicación 29
Tabla 3-3: Índice de calidad de los artículos analizados 30
Tabla 4-1: Elementos químicos y número de ocurrencias encontradas en los artículos 34
Tabla 4-2: Artículos que evidencian la medición del FBC 36
Tabla 4-3: Artículos que reportan las especies de hongos macroscópicos utilizados en la investigación. 36
Tabla 4-4: Las especies de hongos más frecuentemente mencionadas en las publicaciones con concentraciones de mercurio. 37

Introducción

La contaminación ambiental es una de las mayores preocupaciones de la sociedad actual. La enorme cantidad de residuos orgánicos e inorgánicos generados anualmente en el ciclo de los materiales y las prácticas inadecuadas de eliminación utilizados, han terminado en un problema mundial. Estos contaminantes plantean amenazas ecológicas graves a los ecosistemas naturales con fatales consecuencias para la salud humana (Cortez, y otros 2010).

La industrialización y la extracción de recursos naturales han dado lugar a la contaminación a gran escala del medio ambiente. La contaminación de suelos, aguas subterráneas, sedimentos, agua superficial, y el aire, con productos químicos peligrosos y tóxicos, es uno de los principales problemas que enfrenta el mundo industrializado de hoy; y son resultado del impacto de las actividades antropogénicas con diferentes contaminantes, compuestos orgánicos y especialmente con metales pesados (Hg, Cd, Pb, Ni, Cu, Zn, Fe, Cr, Mo, Mn) (Baath 1989) (Nriagu 1990) (Wiedemeier, y otros 1999).

El manejo de los suelos contaminados entonces, se ha convertido en una actividad común. Los contaminantes penetran los suelos por derrames, fugas, roturas de tanques y tubería, y muchas veces por disposición de residuos a cielo abierto. En tales casos, se genera un cuestionamiento acerca del alcance y magnitud del riesgo que representa un suelo contaminado, así mismo surgen dudas acerca de las metas de limpieza que deben alcanzarse en caso de ser necesario remediar el suelo impactado (Barbosa Amaya 2011).

Uno de los mayores retos en este campo es cómo hacer frente a la enorme cantidad de residuos generados en las operaciones de procesamiento de la minería durante largos períodos de tiempo y en muchos casos localizados en la corteza terrestre (Cortez, y otros 2010).

Debido a la magnitud de este problema y la falta de una solución razonable, rentable, rápida y ecológica, es necesario un método de limpieza de costo rápido, eficaz y responsable con el medio ambiente como la "Biorremediación", que utiliza microorganismos para degradar los contaminantes tóxicos de manera económica eficiente (Adenipekun y Lawal 2012). Es una opción biológica, que usa los microorganismos y plantas, o sus productos, para restaurar (Ayangbenro & Babalola, 2017), reducir o eliminar el efecto de los contaminantes nocivos en el medio ambiente, a través de procesos como absorción, precipitación, oxidación y reducción de los contaminantes (Su et al., 2014), y parece una alternativa atractiva a técnicas físicas y químicas convencionales (Unz y Shuttleworth 1996).

En esencia, la biorremediación se basa en los procesos naturales que ocurren sin participación humana reduciendo el impacto ambiental de sitios contaminados, principalmente de suelos y aguas del subsuelo. Es un proceso que tiene lugar en casi todo el planeta y desde que la vida apareció por primera vez en la tierra hace casi 3.500 millones de años. De hecho, la hipótesis inicial del proceso de biorremediación, es que detrás de la idea formulada por Lovelock en 1979 en su teoría Gaia, que la Tierra, en su parte más externa, se asemeja a un solo organismo que bajo la acción de factores externos, principalmente las actividades humanas, activa los mecanismos para restaurar condiciones ambientales adecuadas para la vida (Lovelock 2000).

Uno de los escenarios más potenciales para estos procesos de auto regeneración o biorremediación son los suelos, pues existe un gran número de microorganismos presentes en este hábitat terrestre, tales como hongos, bacterias, algas e inclusive plantas (Adenipekun y Lawal 2012). Sin embargo, cada vez que se discute la biorremediación, los agentes bacterianos entran en el enfoque, pues son los más estudiados y utilizados, mientras que los hongos no han sido explorados de esta misma manera, el papel de los hongos se ha estudiado de forma inadecuada. La capacidad de los hongos, para transformar una amplia variedad de productos químicos peligrosos, ha despertado interés en el uso de ellos para biorremediación (Adenipekun y Lawal 2012), es ahora cada vez más evidente que los hongos juegan también un importante papel en materiales orgánicos degradantes en el ecosistema y que tienen potencial para remediar suelos y agua contaminados (Alexander 1994).

Es entonces el siguiente paso, el desarrollo de procesos biológicos para el tratamiento de suelos contaminados con metales pesados (Cortez, y otros 2010) usando los hongos como agente biorremediador. Es esta la motivación de esta investigación, en donde se pretende realizar una

búsqueda y análisis del estado y avance de las investigaciones y aportes científicos a nivel mundial, en el uso de hongos macroscópicos como alternativa para remediar mercurio en suelos contaminados, por su abundancia, naturaleza, economía y capacidad de acumulación de metales pesados como cadmio, cobre, mercurio, plomo y zinc (Sullia 2003).

El desarrollo de esta investigación, parte inicialmente de una Revisión Sistemática de Literatura (RSL) alrededor de los procesos de remediación biológica de suelos contaminados con mercurio, la cual se convierte en el insumo para el planteamiento de una visión general del proceso y los agentes biológicos utilizados, principalmente el uso de hongos macroscópicos. La forma en que se desarrollaron dichas aproximaciones y planteamientos se presenta mediante capítulos de la siguiente manera: En el capítulo 1, se busca contextualizar la importancia de la investigación alrededor de los conceptos, generalidades y procesos de remediación. Inicialmente se justifica la pertinencia del análisis de la remediación del mercurio. Más adelante, se exponen algunos antecedentes investigativos alrededor de la capacidad de acumulación de mercurio en los hongos macroscópicos, así como los factores y condiciones necesarias para ello. Finalmente se presentan los objetivos desarrollados en el presente trabajo. En el capítulo 2, se plantea la metodología utilizada para llevar a cabo el proceso de Revisión Sistemática de Literatura (RSL) mediante la definición de preguntas de investigación, estrategias de búsqueda y criterios de calidad; posteriormente, en el capítulo 3, se presenta los resultados, el análisis descriptivo y la evaluación de calidad. En el capítulo 4, se muestra la discusión en donde se responden las preguntas planteadas en esta investigación, a partir de los resultados previamente presentados. Y Finalmente, en el capítulo 5 se presentan las conclusiones y las recomendaciones sobre futuras investigaciones que se derivan del desarrollo de este trabajo final.

1. Generalidades, Antecedentes y Justificación

1.1 Desarrollo Sostenible, Minería Aceptable.

En 1987, la Comisión Brundtland estableció los parámetros para el desarrollo sostenible, que se ha convertido en un principio rector para las empresas, organizaciones y gobiernos. En su informe, Nuestro futuro común, la Comisión define el desarrollo sostenible como un desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades (WCED, 2018).

En otro ejemplo, la Organización para el Desarrollo Económico y de Cooperación (OCDE) afirma que el desarrollo sostenible implica equilibrar los objetivos económicos, sociales y ambientales, integrándolos a través de políticas y prácticas de apoyo mutuo y compensaciones (OECD, 2001).

Es entonces como la sociedad sostenible debe basarse en el uso de recursos renovables a tasas que no excedan su capacidad de renovarse; utilizando recursos no renovables a tasas que no excedan nuestra capacidad de sustituirlos; y no usar recursos a tasas que excedan la capacidad del mundo natural para asimilar o procesar los desechos asociados con su uso (Chiras, 1991).

Teniendo en cuenta lo anterior, la minería puede ser aceptable cuando sus efectos negativos inmediatos, se corrigen en gran medida a través de la remediación y sus beneficios socioeconómicos están diseñados para proporcionar un puente hacia un futuro más sostenible para la comunidad (Kumah, 2006).

1.1.1 La Industria Minera: Problemática Ambiental

La contribución de la minería al desarrollo mundial es fundamental y seguirá haciéndolo en el futuro (Ávila, 2004). Las industrias de extracción mineral producen una variedad de metales y minerales

industriales. En el sector de minería de metales se producen, metales como el antimonio, oro, mineral de hierro, plomo, plata, níquel, zinc entre otros. En la producción de minerales industriales se obtienen productos como arcilla, yeso, piedra caliza, mármol, puzolana, piedra pómez, sal, grava y otros. Como resultado de estos procesos de extracción, hay una degradación del medio ambiente y la contaminación de los ecosistemas, efectos que pueden perdurar durante varias décadas después del cese de las actividades de producción, creando graves peligros de salud ambiental a largo plazo para las poblaciones que viven en las regiones mineras (PNUMA 2008).

La minería de oro ya sea artesanal, en pequeña y mediana escala es una fuente importante de ingresos para los mineros, especialmente en comunidades y regiones rurales donde las alternativas económicas son sumamente limitadas (PNUMA 2008). En la actualidad, es una actividad que representa un componente importante de los ingresos de países pertenecientes a América Latina, como Colombia, y se constituye en una fuente de trabajo para su economía. Sin embargo, la minería de oro artesanal y en pequeña escala parece ser, con mucho, la mayor fuente mundial de contaminación por mercurio (Weinberg y Orgánicos Persistentes 2010), ya que se utilizan normalmente importantes cantidades de este elemento químico para procesar el mineral (oro), y es generalmente el método dominante y preferido de extracción, pues se considera bastante fácil de utilizar y no es costoso.

El mercurio es un elemento ampliamente utilizado en la minería para extraer oro de sedimentos y suelos, produciendo así uno de los principales problemas de contaminación por metales pesados. El mercurio se añade a los suelos que contienen partículas de oro, formándose una amalgama, la cual es luego quemada, para separar el oro y liberar los vapores de mercurio. En el proceso de amalgamiento un exceso de mercurio siempre es utilizado.

El exceso del metal pesado se pierde como pequeñas gotas y pasa a contaminar los suelos y los ríos (Lacerda y Salomons 1992). Asimismo, el mercurio volatilizado regresa al suelo por la acción del agua de lluvia y la asociación del metal pesado con las partículas más finas hace que la erosión hídrica y/o eólica contribuyan a su dispersión (Carrasquero y Adams 2001) (ROJAS et al., 2008).

Este metal pesado es frecuentemente utilizado en los procesos de extracción de oro en la minería artesanal y a pequeña escala, en donde los usos, la disposición final y el manejo del mismo no son llevadas a cabo de una manera segura y responsable tanto con el medio ambiente, como con las personas que se encuentran alrededor de estos procesos de producción. Se estima que el 15% del oro en el mundo se extrae de forma artesanal, en pequeñas minas donde en la mayoría de ellas se usa mercurio y los mineros que lo utilizan se arriesgan a envenenarse, envenenar a sus hijos y contaminar el suelo (Pressly 2013).

El mercurio es un metal pesado, y como todos ellos, es tóxico o venenoso a muy bajas concentraciones, y no puede ser degradado o destruido. De hecho, es uno de los tóxicos más peligrosos que se conoce y una vez liberado y emitido a la biosfera, el mercurio puede tener una gran movilidad y circular entre la superficie terrestre y la atmósfera, y entrar a la cadena trófica de los organismos vivos (José Álvarez 2011).

A lo anterior y al impacto que genera no sólo a nivel ambiental, sino también a nivel de salud, el uso del mercurio aumenta la necesidad y la demanda de buscar alternativas que sirvan para mitigar los impactos generados en el ambiente, que eviten la bioacumulación del mercurio en los animales y las plantas, el cual entra en contacto con la biota a través de una rápida difusión, donde es fuertemente unido a las proteínas. Es bioacumulado y biomagnificado por las especies de la cadena alimenticia (Olivero Berdel y Johnson Restrepo 2002).

La bioacumulación es el proceso mediante el cual una sustancia química es acumulada en una especie determinada en función de la concentración del químico presente en el medio. Por su parte, la biomagnificación involucra el incremento en la concentración del químico de organismo a organismo a medida que la especie aparece en niveles ascendentes de la cadena alimenticia (Casthilhos, Bidone y Hartz 2001).

1.2 El Mercurio: Agente Contaminante

Aunque los estudios y las investigaciones se han centrado inicialmente en contaminantes orgánicos, hay un creciente interés en la comprensión de contaminantes inorgánicos, especialmente los metales pesados en los suelos, en donde las características de la matriz del suelo tienen una gran

influencia en su movilidad y biodisponibilidad a través de adsorción y bioprocesos de lixiviación (Cortez, y otros 2010). Los metales pesados se consideran los principales contaminantes ambientales, ya que son citotóxicos, mutagénicos y cancerígenos (Damodaran et al., 2014).

De las fuentes de procedencia antropogénicas, las actividades mineras son una de las principales vías de ingreso directo del mercurio dentro del ambiente, particularmente las de explotación de oro, plata y mercurio (Elizabeth Paisio et al., 2012).

Las plantas pueden tomar el mercurio del suelo y acumularlo en sus tejidos, lo que implica un riesgo debido a su posible transmisión a los animales y a los seres humanos a través de la cadena alimentaria (Elizabeth Paisio et al., 2012).

El mercurio se encuentra en la naturaleza en sus formas inorgánicas: elemental (Hg(0)) o iónicas (Hg I y II) y orgánicas: Metilmercurio (CH3Hg)(MeHg), dimetilmercurio [(CH3)2Hg] y fenilmetilmercurio (C6H5Hg). El mercurio en su forma iónica tiende a unirse fuertemente a los componentes del suelo, lo cual reduce su biodisponibilidad, sin embargo, también puede cambiar de forma en el suelo y convertirse en metilmercurio (principalmente por metabolismo microbiano) (Davis et al., 2003) en (ROJAS et al., 2008)). Las formas orgánicas de este metal pesado, principalmente el metilmercurio, son altamente tóxicas y se acumulan en membranas biológicas; la toxicidad del mercurio en un organismo, depende del estado químico en el que se encuentre, del tiempo y el tipo de exposición (Elizabeth Paisio et al., 2012). El mercurio es un ejemplo particular de tóxico ambiental y alimentario debido a la alta toxicidad y biomagnificación del metilmercurio (MeHg) en las cadenas alimentarias (Falandysz, 2016).

1.3 Procesos de descontaminación o remediación de mercurio

Se utilizan varios métodos para eliminar metales de los desechos. La precipitación química, la coagulación con sales de alumbre o hierro, la filtración por membrana, la ósmosis inversa, el intercambio iónico y la adsorción son algunos de los procesos más utilizados (Francis et al., 1999; Salt et al., 1995; Krebs et al., 1999; Chen et al., 2000). Estos procesos son adecuados desde una perspectiva tecnológica, pero no son económicamente prometedores para la remediación del suelo,

(Damodaran et al., 2014) poseen algunas desventajas, tales como sus altos costos, utilización de grandes cantidades de reactivos y sus efectos adversos sobre los ecosistemas, (Elizabeth Paisio et al., 2012) producción de lodos tóxicos u otros productos que también se necesitan disposición (Das, 2005).

Las técnicas existentes de remediación y/o eliminación de mercurio, son métodos de extracción química o fisicoquímica que incluye principalmente a la amalgación, formación de sulfuros, desorción térmica, vitrificación, lavado de suelos, procesos de encapsulación, estabilización, solidificación nanotecnología y electro-remediación (Elizabeth Paisio et al., 2012). Son técnicas costosas, no lo suficientemente eficientes, y destruyen la estructura del suelo (Diman & Bahmanpour, 2013).

Y por último, procesos de recuperación a bajo costo y que a su vez los impactos sobre el ambiente son mínimos, procesos donde se utiliza organismos que si bien no son autóctonos de la zona a tratar, pueden adaptarse a las condiciones que esta tenga y potencializar sus capacidades absorción, lo que conducen a una remediación biológica o biorremediación.

1.3.1 Remediación de Origen Biológico

La eliminación de una amplia gama de contaminantes del agua y los suelos es un requisito absoluto para el desarrollo sostenible. Existen numerosos procesos de limpieza de agua, efluentes industriales y desechos sólidos, utilizando microorganismos aeróbicamente y anaeróbicamente. Algunos de ellos son bastante sofisticados, mientras que otros son simples y adaptados a las condiciones. (Diman & Bahmanpour, 2013).

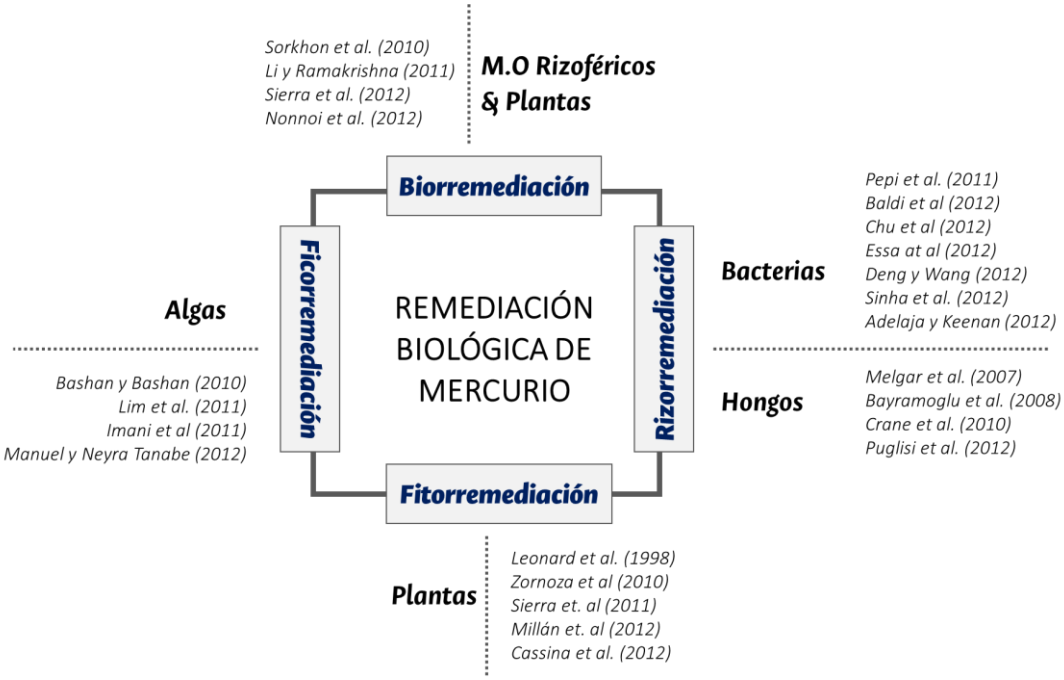
Los métodos de remediación biológica, utilizan organismos vivos para reducir, eliminar, contener o transformar los contaminantes del suelo, agua y aire (Elizabeth Paisio et al., 2012). La eficacia de los procesos biológicos, depende de varios factores entre los cuales los más relevantes son: los tipos de contaminantes y su concentración y la físico-química, mineralógica y características microbiológicas del suelo (Ahmad, Hayat y Pichtel 2005).

El uso de agentes de origen biológico ha surgido en la última década como una de las alternativas más promisorias para el control de la contaminación ambiental causada por metales pesados (Das, 2005). En este proceso, la absorción de metales pesados y compuestos radiactivos ocurre como resultado de interacciones fisicoquímicas de iones metálicos con los compuestos celulares de especies biológicas (Damodaran & Shetty, 2011).

Los organismos utilizados en la remediación biológica del mercurio pueden ser bacterias y hongos (biorremediación), algas (ficorremediación) o plantas (fitorremediación) y las acción conjunta de microorganismos rizoféricos y plantas (Rizorremediación) (Elizabeth Paisio et al., 2012).

Entre las estrategias e investigaciones que contribuyen al desarrollo y conocimiento del metabolismo y remoción del mercurio se encuentran:

Ilustración 1-1: Figura tomada y adaptada de (Elizabeth Paisio et al., 2012)



Desde hace décadas se han desarrollado numerosas investigaciones que involucran a la biorremediación bacteriana y a la fitorremediación de mercurio. Sin embargo la aplicación de hongos y algas para este fin constituyen áreas menos exploradas (Elizabeth Paisio et al., 2012).

Los hongos tienen varias ventajas sobre otros agentes de biorremediación; tienen una vida útil más corta, mayor capacidad de acumulación y facilidad de extracción de biomasa (Damodaran & Shetty, 2011). Los macro hongos, pueden actuar como un biosorbente eficaz de metales tóxicos. Ellos crecen en un hábitat natural con gran biomasa, textura resistente y otras características propicias que son necesarias para que su desarrollo actúe como sorbentes, evitando así la necesidad de inmovilización o despliegue de la configuración del reactor especializado como se requiere para otros sorbentes microbianos (Costa y Leite, 1991). En comparación con las plantas verdes, los hongos pueden acumular grandes concentraciones de algunos metales pesados, como el plomo, el cadmio y el mercurio, según lo informado por (Gast et al.1988). Esto sugeriría que los hongos poseen un mecanismo muy efectivo que les permite tomar algunos elementos traza del sustrato (Latiff) (Damodaran & Shetty, 2011).

Una gran cantidad de evidencia indica que los hongos tienen el potencial de limpiar el suelo contaminado con metales tóxicos. La identificación de las principales especies de acumulación de metales ha sido un impulso para la investigación de la micorremediación. A pesar de los importantes esfuerzos de investigación, la micorremediación sigue siendo una tecnología emergente (Damodaran & Shetty, 2011).

1.4 Antecedentes

Se reportaron los primeros datos de mercurio contenido en hongos, a mediados de los 70´s (Kalač & Svoboda, 2000). Muchos de los datos fueron reportados en diferentes países, Finlandia (1981), Francia (1990-1995), Alemania (1977), Italia (1988), Polonia (2000), España (1986-1988), Suiza (1976) y Yugoslavia (1973) (Vetter & Berta, 2005).

Tyler (1982); Michelot et al. (1998); Kalac y Svoboda (2000) informaron que la naturaleza del sustrato y del ecosistema juegan un papel importante en la captación de metales individuales por los hongos (Damodaran Raj & Shetty M n.d.)

La acumulación de metales pesados en los hongos es dependiente de la especie y la edad del hongo, la fuente de contaminación con metales pesados y la distancia a la fuente de contaminación. (Stihi et al. n.d.)

Según Malinowska, Szefer y Falandysz (2004), la biodisponibilidad de los metales pesados a partir del sustrato del suelo por el micelio de hongos se ve afectada por factores, como el pH, el potencial redox, el contenido de materia orgánica, la mineralogía de la arcilla y la capacidad de intercambio catiónico de la fase sólida y la composición de la solución del suelo (Svoboda et al., n.d.)

La capacidad de bioacumulación de los hongos depende de la naturaleza de los metales y en una pequeña proporción el género y la biomasa. Por lo tanto, los factores que afectan al crecimiento de los hongos también desempeñan un papel vital en la bioacumulación, principalmente la temperatura y la humedad (Damodaran Raj & Shetty M n.d.)

Si bien varios autores a través de sus investigaciones han identificado y establecido las especies de hongos macroscópicos con capacidades de bioacumulación de metales pesados y algunos factores que influyen en la captación de los mismos. Aún debe indagarse más sobre especies de hongos macroscópicos con capacidad de bioacumular metales pesados, ecosistemas diferentes, factores que han sido planteados o no, como posibles agentes influyentes en el proceso de bioacumulación del mercurio, mecanismos de acumulación de mercurio en los hongos, el cual es desconocido como se cita en (Falandysz & Chwir, 1997) entre otros.

1.5 Justificación

Uno de los usos del mercurio metálico, particularmente en Suramérica, que ha originado un impacto importante en el medio ambiente y en la salud de muchas poblaciones, es su utilización en los procesos de extracción del oro de manera artesanal (Olivero Verbel y Johnson Restrepo 2002).

El 37% de emisiones de mercurio al 2010 a nivel mundial, es procedente de extracción de oro artesanal y en pequeña escala y a su vez equivale al 71% procedente de América Latina y el Caribe (PNUMA 2014).

Una vez que el mercurio ingresa al ambiente como contaminante, es sumamente nocivo, dada su persistencia; movilidad (en la atmósfera puede transportarse a largas distancias); capacidad para formar compuestos orgánicos, bioacumulación (se acumula en los seres vivos) y biomagnificación

(aumenta la concentración a medida que se asciende en la cadena trófica); y, dados sus efectos negativos en la salud humana (PNUMA 2014).

Debido al alto riesgo que representan los ambientes contaminados con mercurio, surge la necesidad de tratarlos de manera efectiva, lo cual se puede realizar utilizando estrategias de saneamiento ambiental tales como la remediación biológica (Paisio, y otros 2012), encontrando entonces una posible solución al problema ambiental y de salud que ocasiona el uso del mercurio.

Por lo tanto, la biorremediación de los metales pesados debe considerar la aplicación de métodos biotecnológicos y que involucren nuevos microorganismos diferentes a las bacterias, las cuales son comúnmente utilizadas en lo actuales procesos de remediación biológica de contaminantes orgánicos o inorgánicos. Lo que sugiere entonces, el siguiente paso al desarrollo de procesos biológicos para el tratamiento de suelos contaminados con metales pesados (Cortez, y otros 2010) explorar en agentes biorremediadores como los hongos.

Hasta la fecha, la mayor parte del enfoque y el uso de hongos para limpieza ambiental ha surgido de la investigación previa sobre la degradación de hidrocarburos de petróleo (Atlas y Bartha 1992) por lo que se necesita realizar investigaciones más intensivas sobre el potencial de biorremediación y la ecología de un gran número de hongos comestibles eficaces para la remediación biológica (Adenipekun y Lawal 2012).

1.6 Objetivo General

Analizar los principales aportes que se han hecho a nivel mundial, sobre la biorremediación de suelos contaminados con mercurio usando hongos macroscópicos y contribuir a las futuras investigaciones o tendencias sobre esta área.

1.6.1 Objetivos Específicos

- Definir la estructura conceptual del campo de la biorremediación de suelos contaminados con mercurio, sobre los principales temas que se han estudiado, identificando su importancia y relevancia.

- Identificar las áreas de conocimiento en las que se encuentran los aportes e investigaciones sobre la biorremediación de suelos contaminados con mercurio usando hongos.
- Establecer futuras tendencias e investigaciones sobre el uso de hongos macroscópicos como agente biorremediador de suelos contaminados con mercurio.

1.7 Revisión Sistemática de Literatura - RSL

La Revisión Sistemática de Literatura (RLS) es un mecanismo para recolectar, identificar, evaluar y analizar las fuentes de información primaria, con el fin de sintetizar la información disponible, detectar vacíos de investigación y proveer un marco de referencia que genere nuevo conocimiento respecto al tema de interés.

Particularmente en este trabajo se aplicará la metodología propuesta por Ramírez, De León-Peguero, Cansino-Vega, Arellano- Contreras y Ochoa-Ayala (2009), Guirao-Goris, Olmedo Salas, & Ferrer Ferrandis (2008), Kitchenham (2014), Velásquez (2015ª y 2015b) y Calle (2016), los cuales proponen:

Tabla 1-1: Fases de la RSL.

FASE	DESCRIPCIÓN
PLANTEAMIENTO	Se formulan las preguntas de investigación y se diseña el protocolo de búsqueda
EJECUCIÓN	Se buscan los estudios con los criterios definidos en el planteamiento, se sintetiza la información y se extraen los datos más relevantes de la investigación
ANÁLISIS DE RESULTADOS	se escribe el reporte de los resultados obtenidos

Fuente: elaboración propia

2. Metodología: Revisión Sistemática de Literatura (RSL)

Para cumplir con los objetivos de la propuesta de investigación, se realizó una revisión sistemática de la literatura – RLS, sobre el estado y avance de los temas relacionados con la remediación biológica de suelos contaminados con mercurio utilizando hongos macroscópicos, aplicando una investigación exploratoria a partir de la revisión de los documentos publicados.

La técnica de análisis de datos es, además del recuento histórico y la revisión bibliográfica, la identificación de palabras claves, investigadores principales del tema, protocolos, procesos o procedimientos experimentales planteados, métodos propuestos y hongos macroscópicos identificados como posibles agentes potenciales de biorremediación de suelos contaminados con mercurio.

Para cumplir con lo anterior, el planteamiento, la ejecución y el análisis de resultados de la RSL se aplicará bajo la metodología propuesta por Ramírez, De León-Peguero, Cansino-Vega, Arellano-Contreras y Ochoa-Ayala (2009), Guirao-Goris, Olmedo Salas, & Ferrer Ferrandis (2008), Kitchenham (2014), Velásquez (2015ª y 2015b) y Calle (2016), esto le otorga o proporciona una confiablidad a los resultados, ya que permite de una manera sistemática, objetiva y cuantificable; la búsqueda, identificación y la síntesis de los documentos, de forma tal que dé respuesta a la pregunta y sub preguntas de investigación.

2.1 Planteamiento

Se expone la motivación de la revisión, tanto para el sector que utiliza el mercurio en sus procesos de producción, como para la academia e investigadores, al recopilar los diferentes estudios que tratan la remediación de los sitios contaminados con mercurio, en especial con el uso hongos, mostrando beneficios económicos y sostenibles (Velásquez, 2015 a). Adicionalmente se muestran los estudios preliminares o primarios previos a la revisión sistemática, los cuales se construirán a

partir de la opinión de experto, conclusiones presentadas en revisiones de literatura previas, y conocimiento personal, entre otros. Esto va a permitir abordar cada uno de los tópicos de la propuesta de investigación (Calle, 2016), lo cual será utilizado para construir el marco teórico y conceptual, que son claves para discutir el estado actual del tema de interés, y formular los objetivos de la revisión y las preguntas de investigación con su respectiva motivación (Velásquez, 2015 a; Guirao-Goris, Olmedo Salas, & Ferrer Ferrandis, 2008).

2.1.1 Preguntas de Investigación

Con el fin de recopilar, sintetizar y analizar los principales aportes realizados por la comunidad científica en el tema de remediación biológica de mercurio utilizando hongos macroscópicos, se plantearon las siguientes preguntas de investigación:

Tabla 2-1: Preguntas de Investigación

P1	¿Qué evidencias existen que indiquen que los hongos macroscópicos tienen la capacidad de disminuir la concentración de metales pesados en suelos?
P2	¿Qué evidencias existen que indiquen que los hongos macroscópicos tienen la capacidad de disminuir la concentración de mercurio en suelos?
P3	¿Qué métodos de biorremediación se han propuesto que utilicen hongos macroscópicos como agente remediador del mercurio?
P4	¿Qué protocolos se han planteado para el proceso de biorremediación utilizando hongos como agente biorremediador?

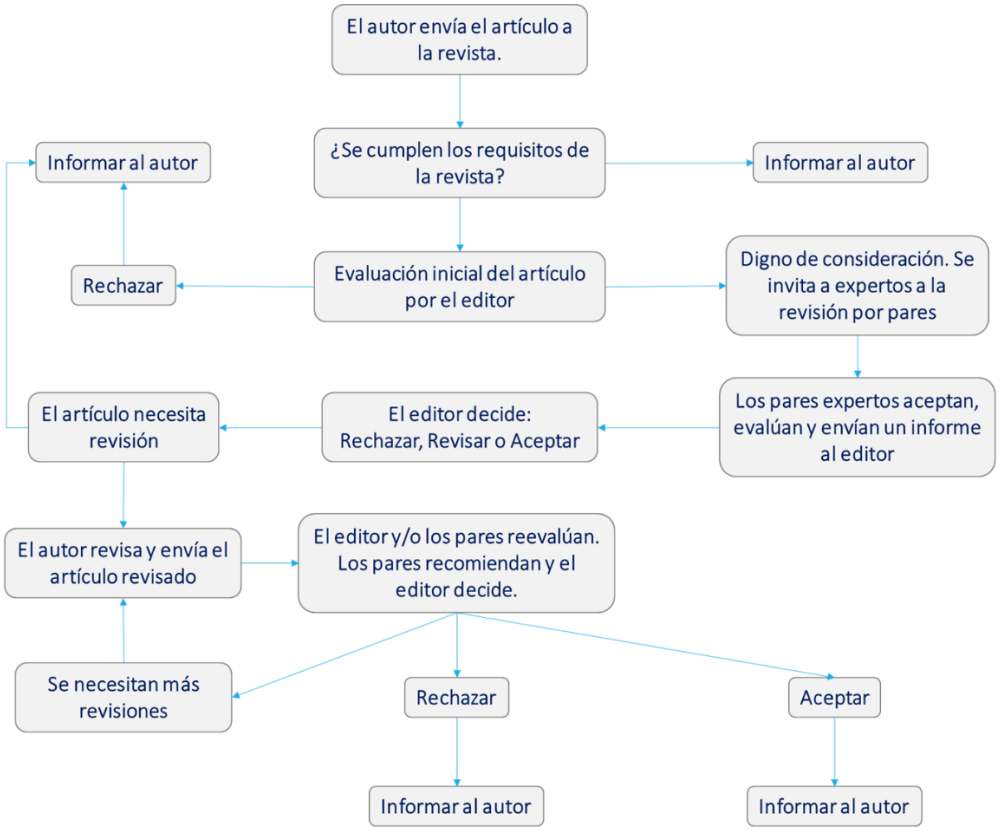
Fuente: elaboración propia

Para dar respuesta a las preguntas de investigación planteadas, se determinó un protocolo de búsqueda, el cual se describe a continuación en la ejecución.

2.2 Ejecución

Para el proceso de búsqueda y recolección de información se seleccionó la base de datos SCOPUS, la cual indexa contenido de 24,600 títulos activos y 5,000 editores (Elsevier, 2018). Adicionalmente cuenta con un sistema de "revisión por pares" (peer-reviewed) descrito en la Ilustración 2-1, que permite mantener la calidad y la validez de los artículos y las revistas que los publican (Elsevier Publicaciones, 2018).

Ilustración 2-1: Figura tomada de (Elsevier Publicaciones, 2018)



Tiene a su vez, un importante conjunto de herramientas que permite hacer el seguimiento, análisis y visualización de la literatura publicada (Fundación Española para la Ciencias y la Tecnología, 2019; Scopus, 2019):

- **Realizar diferentes opciones de búsqueda:** Búsqueda de documentos, por autor, por afiliación y búsqueda avanzada para usuarios expertos en la construcción de búsquedas complejas (presenta opciones para excluir o limitar la búsqueda por autores, años, instituciones, áreas temáticas, tipos de documento, palabras clave, afiliaciones, entre otros).
- **Funcionalidad "Citation Overview":** permite el cálculo de las citas para una selección de artículos, todos los artículos de un autor específico o todos los artículos publicados por una revista concreta en un año.
- **Perfil de afiliación o de autor:** Permite realizar un análisis del rendimiento en investigación de una institución o de un autor.
- **Journal Analyzer:** Es una herramienta para evaluar el rendimiento de una revista científica. Sobre cada revista proporciona información sobre:
    - N° total de citas recibidas cada año (Total CitationGraph).
    - N° de artículos publicados en un período de tiempo (ArticlesPublishGraph).
    - N° total de citas dividido por el número total de artículos publicados (Trend Line Graph).
    - Permite comparar hasta 10 títulos de revistas simultáneamente.
- **Métricas de impacto:** Permite analizar las revistas a través de múltiples métricas.
    - *SJR (SCimago Journal Rank):* es una métrica que pondera en función del prestigio de una revista.
    - *SNIP (Source Normalized Impact per Paper):* mide el impacto de una cita según las características de la materia sobre la que se investiga.
    - *Cite Score:* Calcula el número medio de citas recibidas entre todos los documentos publicados en los tres años anteriores a la métrica. Se actualiza anualmente y se presenta además del indicador se presentan los percentiles del indicador.
    - *Índice H:* Indicador de impacto de la producción de un autor específico. Este indicador muestra un balance entre el número de citas que recibe un investigador y el número de publicaciones que ha realizado a lo largo de su carrera.

De este modo, las características y el contenido indexado en SCOPUS, proporcionan y/o garantizan no sólo criterios de calidad, si no que a su vez permiten afianzar la búsqueda y obtener información

de los avances científicos y académicos desarrollados a nivel mundial, sobre la temática de interés para esta investigación.

Teniendo en cuenta lo anterior, el proceso de búsqueda y recolección de información realizado en SCOPUS, consistió en una indagación de los artículos publicados en este sistema de indexación, el cual contiene diferentes publicaciones de alta calidad, según el ranking de Scimago Journal & Country Rank. En SCOPUS, se ingresaron diferentes palabras claves (términos alternativos y posibles sinónimos) con ayuda de los operadores y códigos de campo, como estrategia de búsqueda, y finalmente se formula la cadena o ecuación de búsqueda. La ecuación de búsqueda se obtiene a partir de los términos plurales de las palabras claves, palabras cercanas, uso de comodines y frases exactas.

Las palabras claves relacionadas con los ejes principales de la RSL, útiles para la construcción de la cadena de búsqueda fueron:

Tabla 2-2: Ejes principales y palabras claves de la RSL

EJE PRINCIPAL RSL	PALABRAS CLAVES RELACIONADAS
PROCESOS DE BIORREMEDIACIÓN	*Remove, Mycoremediation, Bioremediation, Remediation, Biological Methods, Physical Methods, Chemical Methods*
HONGOS	*Mushrooms, Fungus, Fungi*
SUELOS CONTAMINADOS CON MERCURIO	*Heavy Metals, Soils, Mercury*

Fuente: elaboración propia

De acuerdo a lo presentado en la Tabla 2-2, se obtiene la ecuación inicial de búsqueda:

TITLE-ABS-KEY ((mushrooms OR fungus OR fungi) AND (“heavy metals” OR mercury) AND (remove OR mycoremediation OR bioremediation OR remediation OR “biological methods” OR “physical methods” OR chemical methods”) AND solis)

2.2.1 Criterios de inclusión y exclusión

Para definir los criterios de inclusión y exclusión, se hace una revisión de los artículos recuperados con la ecuación inicial de búsqueda, haciendo lectura de los títulos, resúmenes, palabras claves y conclusiones. Adicionalmente se definen las siguientes preguntas para evaluar cada documento:

- *¿Cuál es la relevancia de la información citada?*
- *¿Los datos presentados son sólidos y reconocidos por pares?*
- *¿Considera que este artículo está claro y bien escrito?*

De este modo, para esta investigación se encuentran como criterios de exclusión para refinar la ecuación de búsqueda inicial las palabras relacionadas con: agente biorremediador de plantas, microorganismos y bacterias; metales pesados diferentes al mercurio, y procesos de biorremediación realizados en medios diferentes al suelo. Una vez aplicados los criterios de inclusión y exclusión antes mencionados, se definió la ecuación de búsqueda final:

TITLE-ABS-KEY ((("edible Mushrooms" OR fungus OR fungi) AND ("heavy metals" OR mercury) AND (remove OR mycoremediation OR bioremediation OR remediation OR "biological methods" OR physical OR chemical OR methods) AND soils) AND NOT mycorrhizal AND NOT phytoremediation AND NOT sewage AND sludge AND NOT microbial AND NOT (cd OR cadmium) AND NOT vegetation AND NOT aqueous AND NOT plant AND NOT polysaccharides AND NOT "organic pollutants" AND NOT petroleum AND NOT microalgae AND NOT (copper OR cu) AND NOT (niquel OR ni) AND NOT (lithium OR li) AND NOT lead AND NOT cobalt AND NOT zinc AND NOT silver AND NOT arsenic AND NOT "filamentous fungi" AND NOT (uranium OR u) AND NOT wetland AND NOT iron AND NOT histoplasma AND NOT toxin AND NOT wastewater AND NOT waters AND NOT "Microscopic fungi" AND NOT aspergillus AND NOT manganese AND NOT (chromium OR cr) AND NOT citric AND acid)

2.2.2 Evaluación de la Calidad

En esta sección se evalúa si cada artículo seleccionado permite responder una o varias de las preguntas planteadas para la RSL, como lo sugieren Guirao-Goris, Olmedo Salas, & Ferrer Ferrandis (2008), Ramírez, De León-Peguero, Cansino-Vega, Arellano-Contreras, & Ochoa-Ayala (2009) Velásquez (2015 b) y Calle (2016). Se formulan las siguientes preguntas para la RSL:

- **ρ1:** ¿se midieron concentraciones de metales pesados en hongos macroscópicos y son presentadas de forma explícita en el artículo?
- **ρ2:** ¿se determinó el Factor de Bioconcentración (BCF) y es presentado de forma explícita en el artículo?
- **ρ3:** ¿se exponen métodos de biorremediación y son presentados de forma explícita en el artículo?
- **ρ4:** ¿se exponen protocolos de biorremediación y son presentados de forma explícita en el artículo?

Una vez formuladas las preguntas para la RSL, se construye la matriz de evaluación de calidad:

Tabla 2-3: Matriz de evaluación de calidad

N°	ρ_1	[...]	ρ_4	IC
A_1	S/N	[...]	S/N	
[...]	[...]	[...]	[...]	
A_i	S/N	[...]	S/N	

Fuente: elaboración propia

Donde:

A_i: es el número del artículo seleccionado en un rango de 1 a i

ρ_4: es el número de la pregunta de 1 a 4

S: si el artículo, SI responde a la pregunta de RSL y se le asigna un puntaje = 1

N: si el artículo, NO responde a la pregunta de RSL y se le asigna un puntaje = 0

IC: es el indicador de calidad

El peso total de la calidad para cada estudio se calculó sumando los puntajes de cada artículo en cada una de los cuatros preguntas, donde los posibles puntajes son de 0 a 4, donde 0 es una calidad baja del artículo, y 4 es un puntaje alto de calidad.

2.2.3 Recolección de datos

Los datos extraídos de cada estudio fueron:

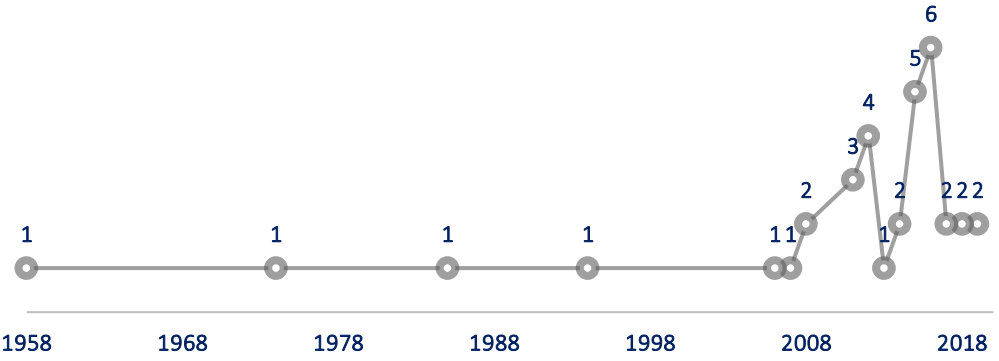
- Afiliación
- Año
- Área conocimiento
- Autor
- Cantidad de citaciones
- Cuartil de la revista según Scimago Journal & Country Rank
- Financiador
- Hongo macroscópico
- País de publicación
- Palabras claves
- Resumen
- Revista
- Tipo documento
- Título

3. Resultados: Análisis Descriptivo y Evaluación de la Calidad

Al ejecutar la ecuación de búsqueda inicial en el sistema SCOPUS se recuperaron automáticamente un total de 622 documentos, de los cuales el 77% (479) son artículos de revistas, el 9% (54) son capítulos de libro, el 8% (49) son revisiones y el 5% (31) restante, son artículos de conferencia. Se aplicaron de forma manual los criterios de inclusión y exclusión para la ecuación de búsqueda y se consolidaron 33 documentos, los cuales se depuraron manualmente identificando los ítems definidos para la recolección de datos.

Los documentos considerados, fueron aquellos que han estudiado e identificado la capacidad de acumulación u absorción de metales pesados, como el mercurio en hongos. Y se descartaron las publicaciones que se relacionaban con agentes biorremediadores como algas, bacterias, plantas, entre otros. Una vez finalizado el proceso de síntesis de la información de cada estudio, se hizo el análisis de los resultados. Inicialmente, se analizó gráficamente la evolución de la producción académica a lo largo del tiempo; la Ilustración 3-1 , muestra la línea de tiempo de las investigaciones.

Ilustración 3-1: Línea del tiempo: evolución de la producción (1958-2018)



Fuente: SCOPUS

El primer artículo publicado, data del año 1958 y pasa más de una década para publicarse el segundo artículo. La producción académica sobre el tema es poca hasta el año 2013 aproximadamente, donde aparentemente crece el interés de la comunidad científica en este tema, ya que para los últimos cinco años el porcentaje de producción fue del 52% con respecto al total analizado.

En la Tabla 3-1, se presentan los 33 documentos seleccionados con los principales datos tomados de cada estudio. El artículo con mayor cantidad de citaciones (95) es *"The determination of mercury in mushrooms by CV-AAS and ICP-AES techniques"* publicado en el año 2011 por los autores, Jarzyńska, G., Falandysz, J.

Tabla 3-1: Artículos seleccionados en la RSL, ordenados por año de publicación de manera descendiente.

#	AUTOR(ES)	TÍTULO	AÑO	AGENTE BIORREMEDIADOR	METAL PESADO	CITACIÓN
A1	Mikryukov, V.S., Dulya, O.V.	Fungal communities in organic and mineral soil horizons in an industrially polluted boreal forest	2018	*Ascomycota Basidiomycota Zygomycota Glomeromycota Chytridiomycota Rozellomycota*	C u, Zn, Cd, Pb, Fe	0
A2	Malov, A.M., Lukovnikova , L.V., Alikbayeva, L.A., Iakubova, I.S., Shchegolikhin, D.K.	The results of the monitoring of the mercury contamination within a megapolis	2018	*Agaricacea Boletaceae Russu-laceae Coprinaceae*	Hg	1
A3	Gong, X., Li, S., Sun, X., (...), Zhang, T., Wei, L.	Maturation of green waste compost as affected by inoculation with the white-rot fungi Trametes versicolor and Phanerochaete chrysosporium	2017	*Trametes versicolor Phanerochaete chrysosporium*	N/A	7
A4	López Berdonces, M.A., Higueras, P.L., Fernández-Pascual, M., Borreguero, A.M., Carmona, M.	The role of native lichens in the biomonitoring of gaseous mercury at contaminated sites	2017	*Lichen Ramalina Xanthoria parientina*	Hg	4
A5	Mahbub, K.R., Krishnan, K., Naidu, R., Megharaj, M.	Mercury resistance and volatilization by Pseudoxanthomonas sp. SE1 isolated from soil	2016	*Pseudoxanthomonas*	Hg	20
A6	Wiejak, A., Wang, Y.-Z., Zhang, J., Falandysz, J.	Mercury in sclerotia of Wolfiporia Extensa (Peck)	2016	*Sclerotia of Wolfiporia*	Hg	2

#	AUTOR(ES)	TÍTULO	AÑO	AGENTE BIORREMEDIADOR	METAL PESADO	CITACIÓN
		ginns fungus collected across of the Yunnan land				
A7	Kojta, A.K., Falandysz, J.	Soil-to-mushroom transfer and diversity in total mercury content in two edible Laccaria mushrooms	2016	*Laccaria amethystina* *Laccaria laccata*	Hg	4
A8	Saba, M., Falandysz, J., Nnorom, I.C.	Evaluation of vulnerability of Suillus variegatus and Suillus granulatus mushrooms to sequester mercury in fruiting bodies	2016	*Suillus variegatus* *Suillus granulatus*	Hg	3
A9	Falandysz, J.	Mercury bio-extraction by fungus Coprinus comatus: a possible bioindicator and mycoremediator of polluted soils?	2016	*Coprinus comatus*	Hg	20
A10	Krasińska, G., Falandysz, J.	Mercury in Orange Birch Bolete Leccinum versipelle and soil substratum: bioconcentration by mushroom and probable dietary intake by consumers	2016	*Leccinum versipelle*	Hg	20
A11	Falandysz, J., Zhang, J., Wang, Y., (...), Li, T., Liu, H.	Evaluation of the mercury contamination in mushrooms of genus Leccinum from two different regions of the world: Accumulation, distribution and probable dietary intake	2015	*Leccinum quercinum* *Leccinum rufum*	Hg	35
A12	Kojta, A.K., Zhang, J., Wang, Y., (...), Saba, M., Falandysz, J.	Mercury contamination of fungi genus Xerocomus in the Yunnan province in China and the region of Europe	2015	*Xerocomus puniceus* *Xerocomus spadiceus* *Xerocomus versicolor* *Xarocomus rubellus* *Xerocomus badius* *Xerocomus chrysenteron* *Xerocomus ferrugineus* *Xerocomus versicolor* *Xerocomus subtomentosus*	Hg	25
A13	Krasińska, G., Falandysz, J.	Mercury in Hazel Bolete Leccinum griseum and soil substratum: Distribution, bioconcentration and dietary exposure	2015	*Leccinum griseum*	Hg	14
A14	Horiike, T., Yamashita, M.	A new fungal isolate, Penidiella sp. strain T9, accumulates the rare earth element dysprosium	2015	Penidiella sp	Dy	21
A15	Paoli, L., Munzi, S., Guttová, A., (...), Sardella, G., Loppi, S.	Lichens as suitable indicators of the biological effects of atmospheric pollutants around a	2015	Liquen	Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Sb, As, Co, V, Tl, Mn, Hg	26

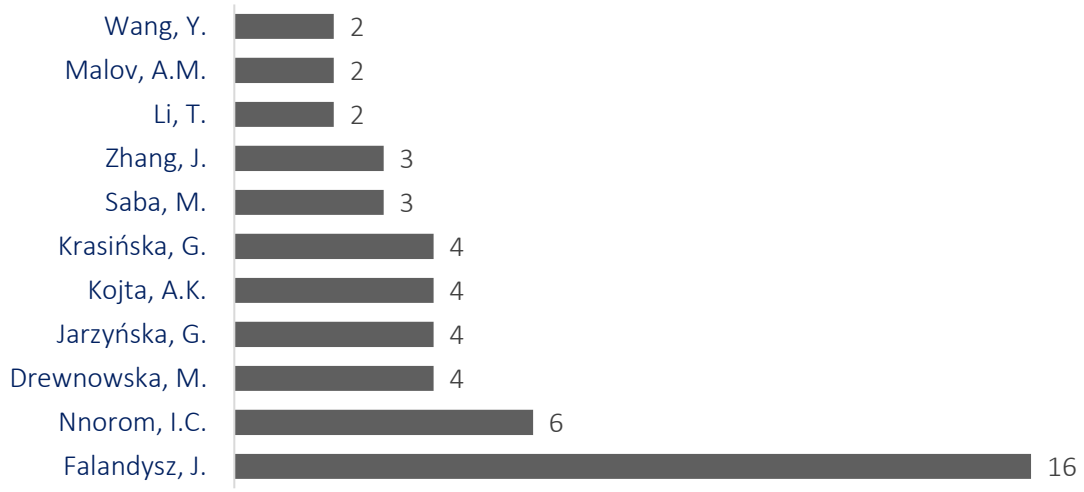
#	AUTOR(ES)	TÍTULO	AÑO	AGENTE BIORREMEDIADOR	METAL PESADO	CITACIÓN
		municipal solid waste incinerator (S Italy)				
A16	Falandysz, J., Krasińska, G., Pankavec, S., Nnorom, I.C.	Mercury in certain boletus mushrooms from Poland and Belarus	2014	Boletus reticulatus Boletus pinophilus Boletus impolitus Boletus luridus	Hg	17
A17	Drewnowska, M., Nnorom, I.C., Falandysz, J.	Mercury in the Grisette, Amanita vaginata Fr. and soil below the fruiting bodies	2014	Amanita vaginata	Hg	21
A18	Falandysz, J., Mazur, A., Kojta, A.K., (...), Dryzalowska, A., Nnorom, I.C.	Mercury in fruiting bodies of dark honey fungus (Armillaria solidipes) and beneath substratum soils collected from spatially distant areas	2013	Armillaria solidipes	Hg	30
A19	Chojnacka, A.a, Drewnowska, M.a, Jarzyska, G.a, Nnorom, I.C.a,b, Falandysz, J.	Mercury in Yellow-cracking Boletes X erocomus subtomentosus mushrooms and soils from spatially diverse sites: Assessment of bioconcentration potential by species and human intake	2012	Xerocomus subtomentosus	Hg	21
A20	Maćkiewicz, D., Falandysz, J.	Total mercury in Yellow Knights (Tricholoma equestre) mushrooms and beneath soils	2012	Tricholoma equestre	Hg	8
A21	Falandysz, J., Widzicka, E., Kojta, A.K., (...), Lenz, E., Nnorom, I.C.	Mercury in Common Chanterelles mushrooms: Cantharellus spp. update	2012	Cantharellus	Hg	52
A22	Guillén, J., Baeza, A.	Fungi as contributors to cycling of radionuclides in forest ecosystems	2012	Micorrizas	radionucleidos	0
A23	Rieder, S.R., Brunner, I., Horvat, M., Jacobs, A., Frey, B.	Accumulation of mercury and methylmercury by mushrooms and earthworms from forest soils	2011	Grupos de hongos: Micorrizos Descomponedores de madera Descomponedores de basura	Hg	70
A24	Jarzyńska, G., Falandysz, J.	The determination of mercury in mushrooms by CV-AAS and ICP-AES techniques	2011	Boletus edulis Macrolepiota procera Xerocomus badius	Hg	95
A25	Chudzyński, K., Jarzyńska, G., Stefańska, A., Falandysz, J.	Mercury content and bio-concentration potential of Slippery Jack, Suillus luteus, mushroom	2011	Suillus luteus	Hg	63
A26	Malov, A.M.	Mercury pollution in the ground of Saint-Petersburg	2008	Agaricacea Boletaceae Russu-laceae Coprinaceae	Hg	0

#	AUTOR(ES)	TÍTULO	AÑO	AGENTE BIORREMEDIADOR	METAL PESADO	CITACIÓN
A27	Zhou, Q.-X., An, X.-L., Wei, S.-H.	Heavy metal pollution ecology of macro-fungi: Research advances and expectation	2008	Hongos Macroscópicos	Metales pesados	5
A28	Compart, L.C.A., Machado, K.M.G., Matheus, D.R., Cardoso, A.V.	Immobilization of Psilocybe castanella on ceramic (slate) supports and its potential for soil bioremediation	2007	Psilocybe castanella	-	2
A29	Skvortsova, I.N., Rappoport, A.V., Prokof'eva, T.V., Andreeva, A.E.	Biological properties of soils in the Moscow State University Botanical Garden: The branch on Prospekt Mira	2006	Azotobacter	-	4
A30	Laskowski, R., Niklinska, M., Maryanski, M.	Heavy metals in forest litter: a chemical time-bomb	1994	-	-	3
A31	Halliday, C.G.	Seed Treatment Formulations: Development of a Protocol.	1985	-	-	0
A32	Prochacki, H., Engelhardt-Zasada, C.	Epidermophyton stockdaleae sp. nov.	1974	Epidermophyton stockdale	-	4
A33	van Emden, J.H.	Control of Rhizoctonia solaniKühn in potatoes by disinfection of seed tubers and by chemical treatment of the soil	1958	Rhizoctonia solaniKühn	-	7

Fuente: elaboración propia

Los artículos seleccionados, cuentan con un total de 604 citas, es decir, en promedio 18.3 citas en revistas de alto impacto. En la Ilustración 3-2, se muestra el número de artículos publicados para los autores con más un artículo publicado. De acuerdo a lo encontrado, el máximo exponente en términos de cantidad de artículos publicados es el autor *Jerzy Falandysz* con un total de 16 publicaciones de la muestra analizada, haciendo con esto un aporte del 48% de los estudios en el tema de interés, de los cuales, cuatro (4) artículos tienen las citaciones más altas de los 33 estudios seleccionados (95, 63, 52 y 32) por encima del promedio (18.3), lo que contribuye en un 71.2% de la citaciones de la ecuación de búsqueda (430).

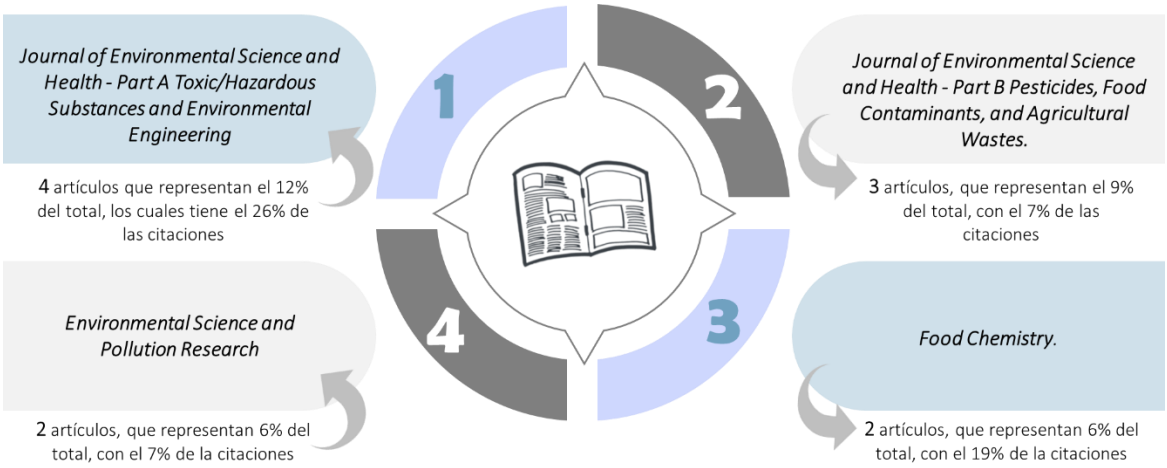
Ilustración 3-2: Total de artículos seleccionados de la RSL, publicados por autor



Fuente: SCOPUS

En la Tabla 3-2 se muestra la relación de las fuentes de publicación del tema de investigación con los 33 artículos seleccionados, distribuidas en un total de 26 revistas de alta calidad según Scimago Journal & Country Rank, destacando que el 30% de las publicaciones se encuentran en revistas de cuartil Q1 y el 33% en Q2. Las revistas donde más publica la comunidad académica relacionada se muestran en la Ilustración 3-3.

Ilustración 3-3: Revistas con más publicaciones de la comunidad académica



Fuente: elaboración propia

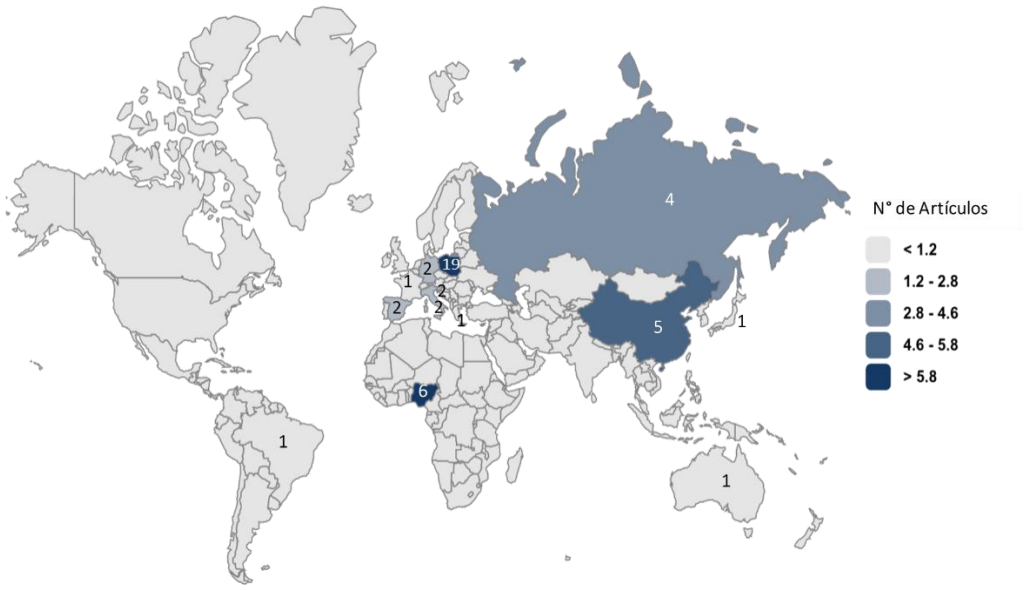
Tabla 3-2: Relación de las fuentes de publicación

REVISTA	N° ARTÍCULOS	CUARTIL
Applied and Environmental Microbiology	1	Q1
ASTM Special Technical Publication	1	-
Biodiversity	1	Q2
Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology	1	Q2
Chinese Journal of Applied Ecology	1	Q3
ConferencePapers-PolishAcademyofSciences,InstituteofGeography& Spatial Organization	1	-
Ecological Indicators	1	Q1
Environmental Earth Sciences	1	Q2
Environmental Pollution	1	Q1
Environmental Science and Pollution Research	2	Q1
Environmental Technology (United Kingdom)	1	Q2
Environmental Technology and Innovation	1	Q2
Eurasian Soil Science	1	Q2
European Potato Journal	1	-
Food Chemistry	2	Q1
Fungi: Types, Environmental Impact and Role in Disease	1	-
Gigiena i Sanitariya	1	-
Guang Pu Xue Yu Guang Pu Fen Xi/Spectroscopy and Spectral Analysis	1	Q4
Journal of Environmental Management	1	Q1
Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering	4	Q2
Journal of Environmental Science and Health - Part B Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes	3	Q3
Journal of the Science of Food and Agriculture	1	Q1
Mycopathologia et Mycologia Applicata	1	-
Proceedings of the 31st AMOP Technical Seminar on Environmental Contamination and Response	1	-
Science of the Total Environment	1	Q1
World Journal of Microbiology and Biotechnology	1	Q2
Total	33	

Fuente: adaptado de SCOPUS y Scimago Journal & Country Rank

Finalmente, se analizó la contribución de los países según las afiliaciones de los autores. Encontrando que el país con mayor impacto en el tema es Polonia (55%), seguido por Nigeria (18%) en coautoría con los investigadores de Polonia, China (15%) y Rusia (12%). Además, los resultados muestran el interés de varios países por el tema de acumulación u absorción de metales pesados por hongos macroscópicos, ya que para una muestra de 33 artículos se tiene un total de 48 afiliaciones, donde se destacan: Uniwersytet Gdanski (Polonia), Abia State University (Nigeria), Yunnan Agricultural Academy (China), Jozef Stefan Institute (Eslovenia), Yuxi Normal University (China).

Ilustración 3-4: Publicaciones distribuidas a nivel mundial



Polonia	Nigeria	China	Rusia	Alemania	Italia	Eslovenia	España	Australia	Austria	Brasil	Grecia	Japón	Países Bajos	Portugal	Eslovaquia	Suiza
19	6	5	4	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Fuente: Elaboración Propia

3.1 Evaluación de la Calidad

Se aplica la matriz de evaluación de la calidad, con los criterios definidos en la Sección 2.2.2. a los 33 documentos seleccionados durante la RSL. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 3-3 en la que cada fila corresponde a un artículo evaluado, para las columnas 2 a 5 se presenta el puntaje asignado por cada pregunta de calidad, y finalmente en la columna 6 se calcula el puntaje total obtenido, es decir el grado o índice de calidad que aporta el artículo a la investigación.

Tabla 3-3: Índice de calidad de los artículos analizados

N°	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	IC
A_1	S	N	N	N	1
A_2	S	N	N	N	1
A_3	N	N	N	N	0
A_4	S	S	N	N	2
A_5	N	N	N	N	0

N°	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	IC
A_6	S	N	N	N	1
A_7	S	S	N	N	2
A_8	S	S	N	N	2
A_9	S	S	N	N	2
A_{10}	S	S	N	N	2
A_{11}	S	S	N	N	2
A_{12}	S	S	N	N	2
A_{13}	S	S	N	N	2
A_{14}	N	N	N	N	0
A_{15}	S	N	N	N	1
A_{16}	S	S	N	N	2
A_{17}	S	N	N	N	1
A_{18}	S	S	N	N	2
A_{19}	S	S	N	N	2
A_{20}	S	S	N	N	2
A_{21}	S	N	N	N	1
A_{22}	N	N	N	N	0
A_{23}	S	S	N	N	2
A_{24}	S	N	N	N	1
A_{25}	S	S	N	N	2
A_{26}	S	N	N	N	1
A_{27}	S	N	N	N	1
A_{28}	N	N	N	S	1
A_{29}	N	N	N	N	0
A_{30}	N	N	N	N	0
A_{31}	N	N	N	N	0
A_{32}	N	N	N	N	0
A_{33}	N	N	N	N	0

Fuente: elaboración propia

Los resultados del análisis de la calidad arrojan que en promedio los artículos evaluados tienen una calificación de 1.15, lo que indica que la calidad de los artículos varía entre 0 y 2. Se resalta que este rango difiere de la máxima puntuación ideal 4. De forma general, se puede concluir que la mayoría de las investigaciones desarrolladas entre 1958 y 2018 no cumplen con todos los criterios para la remediación biológica de mercurio, utilizando hongos macroscópicos y se observa que no es común que se propongan soluciones basadas en la capacidad de acumulación u absorción de mercurio en los hongos. En este punto se debe resaltar que solo el 39% de los artículos mide las concentraciones de metales pesados en hongos macroscópicos y a su vez se determina el Factor de Bioconcentración (BCF).

4. Discusión

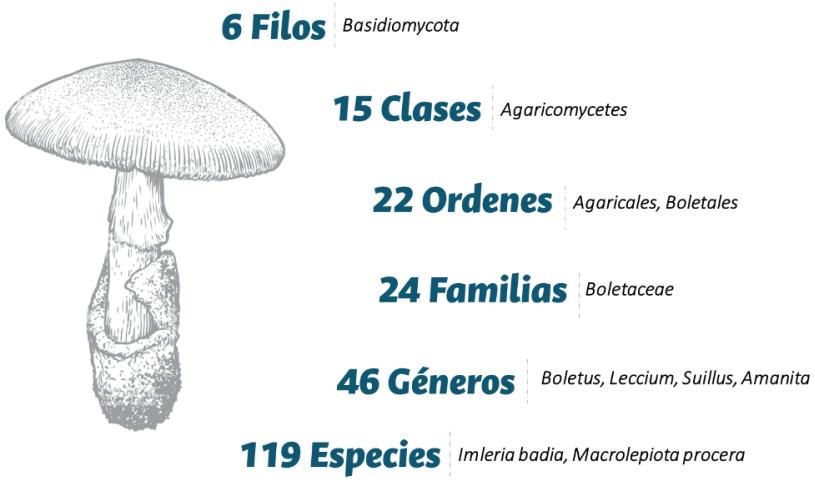
En esta sección se dará respuesta a las preguntas de investigación formuladas para esta investigación.

P1: ¿Qué evidencias existen que indiquen que los hongos macroscópicos tienen la capacidad de disminuir la concentración de metales pesados en suelos?

Uno de los mayores exponentes en la investigación de concentraciones de metales pesados en hongos macroscópicos encontrados en la RSL de esta investigación, es Jerzy Falandysz, quien en sus publicaciones, reporta entre sus referencias bibliográficas, los artículos "*Mercury content of mushrooms*" de la autora Ruth Seeger y "*Concentrations of some potentially toxic metals and other trace elements in wild mushrooms from Norway*" de los autores Ralph O. Allen y Eiliv Steinne, quienes para los años 1976 y 1978 respectivamente, ya anunciaban que los hongos podían absorber elementos traza y/o metales pesados del suelo.

El 72% de las investigaciones encontradas en la RSL, reportaron y referenciaron especies de hongos macroscópicos con contenidos de metales pesados al interior de los cuerpos fructíferos. El *Imleria badia* fue la especie más estudiada, y estuvo presente en 7 artículos de 20 que registraron especies de hongos. En muchos de los artículos, se reportó de manera general la información concerniente al filo y/o la clase de los hongos utilizados en los estudios. Los hallazgos del análisis, la sistematización y la recopilación de la información encontrada en los artículos, relacionada con los hongos macroscópicos se resume en la Ilustración 4-1.

Ilustración 4-1: Filos, clases, ordenes, familias, géneros y especies de hongos macroscópicos reportados en los estudios obtenidos en la RSL.



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a lo encontrado, los hongos pertenecientes al filo *Basidiomycota* y a los órdenes *Agaricales* y *Boletales* parecen ser eficientes acumuladores de metales pesados, según lo obtenido por los investigadores.

De acuerdo con la tabla periódica, un elemento químico con alta densidad (mayor a 4 g/cm3) es considerado un metal pesado (Londoño Franco et al., 2016). Los metales pesados más frecuentes en los hongos macroscópicos según los estudios, fueron principalmente mercurio, cobre, cadmio, arsénico, hierro y zinc, como se muestra en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1: Elementos químicos y número de ocurrencias encontradas en los artículos

NOMBRE	SÍMBOLO	N° ATÓMICO	DENSIDAD[1] (g/ml)	CLASIFICACIÓN	FRECUENCIA EN LOS ARTÍCULOS
Plata	Ag	47	10,5	Metal	1
Arsénico	As	33	5,72	Semi-Conductor	2
Cadmio	Cd	48	8,65	Metal	3
Cesio	Cs	55	1,90	Metal	1
Cromo	Cr	24	7,19	Metal	1

[1] Tomado de: https://www.lenntech.es/periodica/elementos/index.htm

NOMBRE	SÍMBOLO	N° ATÓMICO	DENSIDAD[1] (g/ml)	CLASIFICACIÓN	FRECUENCIA EN LOS ARTÍCULOS
Cobre	Cu	29	8,96	Metal	4
Hierro	Fe	26	7,86	Metal	2
Mercurio	Hg	80	16,6	Metal	21
Potasio	K	19	0,97	Metal	1
Manganeso	Mn	25	7,43	Metal	1
Sodio	Na	11	0,97	Metal	1
Plomo	Pb	82	11,4	Metal	1
Vanadio	V	23	4,51	Metal	1
Zinc	Zn	30	7,14	Metal	2

Fuente: Elaboración propia

De este modo, existen evidencias desde hace aproximadamente 40 años sobre la capacidad de acumulación de metales pesados en hongos macroscópicos, de acuerdo a lo encontrado en la RSL de esta investigación.

P2: ¿Qué evidencias existen que indiquen que los hongos macroscópicos tienen la capacidad de disminuir la concentración de Hg en suelos?

Como se muestra en la Tabla 4-1, el mercurio es uno de los metales pesados más analizados en las investigaciones reportadas en este estudio. 21 de los artículos encontrados en la RSL, evidencian concentraciones de mercurio en los hongos macroscópicos utilizados por los investigadores.

Se determinaron si los hongos podían captar concentraciones de mercurio en el suelo, mediante la medición de la relación de las concentraciones del metal pesado en los hongos, contra la concentración del mismo en los suelos analizados. Es decir, hallaron el Factor de Bioconcentración (FBC).

Sólo el 57% (12) de los artículos enuncian de manera explícita la medición del FBC, mientras que, en otros dos estudios, establecen modelos para calcular la relación entre el mercurio en las áreas de análisis y en los hongos, o hallan factores de transferencia del mercurio del suelo a los hongos.

Tabla 4-2: Artículos que evidencian la medición del FBC

ARTÍCULO	MEDICIÓN DE CONCENTRACIÓN DE MERCURIO
A4	Se establece un modelo para calcular la relación entre el Hg en las áreas de análisis y en los hongos
A7	Se analizan los factores de transferencia del mercurio del suelo a los hongos.
A8	Se realiza la evaluación del FBC
A9	Se realiza la evaluación del FBC
A10	Se realiza la evaluación del FBC
A11	Se realiza la evaluación del FBC
A12	Se realiza la evaluación del FBC
A13	Se realiza la evaluación del FBC
A16	Se realiza la evaluación del FBC
A18	Se realiza la evaluación del FBC
A19	Se realiza la evaluación del FBC
A20	Se realiza la evaluación del FBC
A23	Se realiza la evaluación del FBC
A25	Se realiza la evaluación del FBC

Fuente: elaboración propia

Como se reporta en la Tabla 4-3, el 55% de los artículos encontrados, se enfocan únicamente en analizar las concentraciones de mercurio en diferentes especies de hongos macroscópicos.

Tabla 4-3: Artículos que reportan las especies de hongos macroscópicos utilizados en la investigación.

ARTÍCULO	N° ESPECIES REPORTADAS
A6	1
A7	4
A8	2
A9	3
A10	4
A11	24
A12	9
A13	1
A16	4
A17	1
A18	1
A19	1
A20	1
A21	1
A23	36
A24	5
A25	1
A28	1

Fuente: elaboración propia

De acuerdo a lo encontrado en la RSL y presentado en la Tabla 4-4, las especies *Macrolepiota procera* e *Imleria badia* son los hongos macroscópicos reportados con mayor frecuencia en los artículos, y esto puede ser en gran medida debido a que son hongos comestibles, lo que sugiere que es de alto interés por los investigadores conocer que metales pesados y en qué concentraciones se encuentran dichos metales en los cuerpos fructíferos de los hongos.

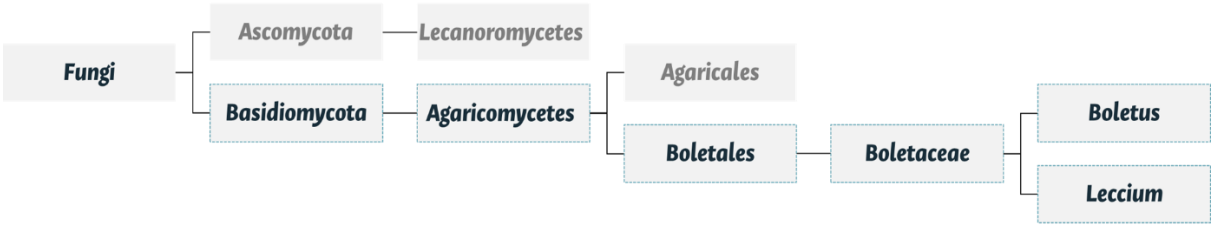
Tabla 4-4: Las especies de hongos más frecuentemente mencionadas en las publicaciones con concentraciones de mercurio.

ESPECIE	*N°*
Imleria badia	6
Macrolepiota procera	4
Boletus edulis	3
Laccaria laccata	3
Suillus luteus	3
Amanita muscaria	2
Amanita vaginata	2
Armillaria solidipes	2
Boletus ferrugineus schaeff	2
Boletus subtomentosus l	2
Hortiboletus rubellus	2
Laccaria amethystina	2
Leccinellum griseum	2
Leccinum griseum	2
Leccinum versipelle	2
Paxillus involutus	2
Suillus grevillei	2
Tricholoma equestre	2
Xerocomellus chrysenteron	2

Fuente: elaboración propia

Los estudios evidencian que sí existen hongos macroscópicos con capacidades de acumulación u absorción de mercurio, y que los más frecuentes en las investigaciones encontradas son los pertenecientes al filo *Basidiomycota*, de la clase *Agaricomycetes*, orden *Boletales*, familia *Boletaceae*, y géneros *Boletus* y *Leccinum,* como se presenta en la Ilustración 4-2.

Ilustración 4-2: Árbol filogenético de los hongos macroscópicos con capacidad de acumular concentraciones de mercurio.



Fuente: elaboración propia

P3: ¿Qué métodos de biorremediación se han propuesto que utilicen hongos macroscópicos como agente remediador del mercurio?

Particularmente, en la revisión de literatura no se encontró en sí, un método de biorremediación propuesto donde sea usado algún hongo macroscópico como agente de remediación del mercurio en el suelo.

Entre la bibliografía referenciada por el autor Falandysz, se encontró que los investigadores Allen y Steinnes, sugieren el uso de la capacidad de acumulación de mercurio de algunos hongos como agentes para el monitoreo de la contaminación por mercurio (Allen & Steinnes, 1978).

Adicionalmente, se encontró en la revisión y análisis, el artículo del autor Falandysz, J. titulado, *¿Mercury bio-extraction by fungus Coprinus comatus: a possible bioindicator and mycoremediator of polluted soils?*, que es publicado en el año 2016. El autor, expone el planteamiento del posible uso de hongos macroscópicos como potenciales agentes de biorremediación de los suelos contaminados con mercurio. Relaciona de acuerdo a los resultados de su investigación realizada en Europa, como agente potencial para el proceso, el hongo *Coprinus comatus,* el cual perteneciente al filo *Basidiomycota*, Clase *Agaricomycetes*, y es de orden *Agaricales*.

De acuerdo al Global Biodiversity Information Facility (GBIF), que es una organización internacional y una red de investigación financiada por gobiernos de todo el mundo, destinada a proporcionar en cualquier lugar, acceso abierto y gratuito a datos sobre cualquier tipo de forma de vida que hay en la Tierra (GBIF: The Global Biodiversity Information Facility, 2019), el *Coprinus comatus* cuenta con

un mayor número de registros de especies principalmente en el Reino Unido (4.455 registros) y en Holanda (3.485 registros). En América, el mayor número de registros se encuentra en Estados Unidos (2,433 registros), seguido de México (195 registros), Colombia (37 registros), Argentina (36 registros) y Brasil (26 registros) (*Coprinus comatus*, 1970).

Si bien los resultados obtenidos sobre las concentraciones de mercurio en el hongo *Coprinus comatos* por el investigador Falandysz, sugieren ser un potencial agente biorremediador de suelos contaminados con mercurio, esto es, conforme a las condiciones climáticas, geográficas y de exposición al metal pesado a la que se encuentra el hongo en el lugar de estudio (Europa).

Por otro lado, el artículo "*Mercury in sclerotia of Wolfiporia Extensa (Peck) ginns fungus collected across of the Yunnan land"* menciona que las concentraciones de mercurio en el esclerocio del hongo *Wolfiporia Extensa* son bajas, sin embargo es interesante tomar la funcionalidad de la estructura del esclerocio que sirve de supervivencia para los hogos *basidiomycota* (Money, 2016) para convertirlo en un posible método o medio de biorremediación.

P4: ¿Qué protocolos se han planteado para el proceso de biorremediación de suelos utilizando hongos como agente biorremediador?

En la revisión de la información, no se encontraron protocolos de biorremediación con hongos macroscópicos. Sin embargo, es importante mencionar un estudio realizado por investigadores brasileros publicado en el año 2007. En el artículo se plantea una investigación cuyo objetivo es desarrollar y caracterizar un soporte cerámico, para la inmovilización del hongo *Psilocybe castanella* con el fin de optimizar el proceso de incorporación del inoculo fúngico en el suelo.

Los resultados obtenidos por los investigadores, evidencian la eficacia del uso del soporte cerámico para la inmovilización del hongo, ya que proporciona el ambiente adecuado para el crecimiento y a su vez, la protección del inóculo durante el proceso de mezcla con el suelo. De esta manera, proponen y demuestran el potencial de los soportes cerámicos desarrollados con las características de su investigación, para la inmovilización de hongos basidiomicetos y para la aplicación a procesos de biorremediación del suelo.

De igual manera como se mencionó en el apartado anterior, un posible protocolo a desarrollar para la biorremediación de suelos contaminados con mercurio, es el uso de esclerocios, los cuales son masas compactas de micelios endurecidos, y que sirven para la conservación de los hongos durante condiciones adversas (Lau & Abdullah, 2016).

Las dificultades asociadas con el método de cultivo de sustrato sólido de hongos formadores de esclerocio que lleva mucho tiempo, han llevado a investigaciones exhaustivas sobre la posibilidad de utilizar micelios derivados de la fermentación líquida como un posible sustituto de los esclerocios. En muchos casos, las actividades biológicas de los micelios parecen ser comparables a las de los esclerocios, aunque su composición química puede variar según las condiciones del cultivo (Lau & Abdullah, 2016). Este tipo de investigaciones pueden adaptarse con los hongos macroscópicos con capacidad de acumular u absorber mercurio, para la configuración, diseño y desarrollo de protocolos de biorremediación de suelos contaminados con mercurio

5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

Los resultados obtenidos sobre la producción académica en el tema de la remediación biológica del mercurio a través del uso de hongos macroscópicos, muestra que no ha sido ampliamente estudiada por la comunidad científica. Sin embargo, el estudio de la capacidad de los hongos macroscópicos para acumular, capturar o absorber metales pesados como el mercurio, han permitido plantear su potencial para desarrollar procesos de biorremediación de suelos contaminados.

En el 83% de los artículos analizados que fueron publicados entre los años 2016 y 2018, evidencian investigaciones relacionadas con la capacidad de los hongos para acumular mercurio, lo que permite concluir, que este tema ha ganado interés por parte de la comunidad científica. Adicionalmente, se resalta que el tema se encuentra concentrado en pocos investigadores y países que han realizado contribuciones.

De los artículos analizados, solo dos trabajos con ocho años de diferencia en su publicación (2008 y 2016), concluyen que los hongos macroscópicos son potenciales para la remediación de los ambientes contaminados con metales pesados.

El tema se encuentra concentrado en pocos países e investigadores que han realizado contribuciones. Se dispone de datos importantes sobre la acumulación y distribución del mercurio en los cuerpos fructíferos de los hongos macroscópicos para Europa, sin embargo, no se dispone de mucha información para otras zonas como África, Asia y América.

Se puede inferir que parte de la motivación de los estudios analizados en esta investigación, es el hecho de que la mayoría de los hongos presentados en los artículos, son comestibles. Estos hacen

parte de la dieta habitual de las personas de los países en donde se han desarrollado las investigaciones, y es debido a las afectaciones que puede producir la ingesta de hongos con concentraciones de metales pesados, que el tema se ha abordado más desde las áreas de investigación de la agricultura, las ciencias ambientales y biológicas, la bioquímica y la toxicología que desde la ingeniería y la aplicación del conocimiento encontrado en el desarrollo de tecnologías o procesos de reparación y/o mitigación ambiental.

A partir de los resultados de este trabajo, se observa que si bien se han determinado concentraciones de mercurio en los hongos macroscópicos, no se identifican y/o determinan si las concentraciones de mercurio que pueden ser acumuladas por los hongos macroscópicos son de mercurio elemental, orgánico o inorgánico.

De acuerdo a la revisión de la literatura de esta investigación, se evidencia que para Colombia no se han reportado investigaciones relacionadas con la remediación biológica de suelos contaminados con mercurio utilizando hongos macroscópicos.

En consecuencia, de la revisión de literatura reportada en esta investigación se puede afirmar que no se ha explorado el uso de los hongos macroscópicos en un proceso de remediación biológica de mercurio, ni se ha presentado un trabajo investigativo que desarrolle el planteamiento de procesos, métodos o protocolos de biorremediación con recurso fúngico macroscópico para la descontaminación de suelos contaminados.

5.2 Recomendaciones

Con este trabajo se avanzó en la exploración e identificación de los aportes que se han realizado sobre la remediación biológica de los suelos contaminados con mercurio usando hongos macroscópicos como agente biorremediador. Se identificó que para América Latina aún es incipiente la investigación sobre este tema.

De acuerdo con lo anterior y el desarrollo de esta investigación, se pueden generar los siguientes trabajos futuros que complementen, amplíen o mejoren los análisis realizados:

- Intensificar, fortalecer e innovar en los estudios e investigaciones sobre la ecología de la contaminación y la relación entre los recursos biológicos como los hongos macroscópicos y la interacción con los metales pesados.
- Es imperativo desarrollar investigaciones en donde se determinen las condiciones ambientales, la identificación de las capacidades y potencialidades de captación, acumulación y/o degradación de metales pesados como el mercurio en hongos macroscópicos en Colombia y América Latina.
- Es necesario en futuras investigaciones determinar las formas (elemental, orgánico e inorgánico) y concentraciones del mercurio que son acumuladas por los hongos macroscópicos.
- Se recomienda estudiar e identificar las dinámicas e interacciones entre las principales variables que afectan el proceso de acumulación y absorción del mercurio en los hongos macroscópicos para establecer procesos o métodos de remediación de suelos contaminados.
- Replicar en Colombia, los estudios desarrollados para determinar las concentraciones de metales pesados, principalmente de mercurio en hongos macroscópicos.
- Realizar una comparación entre las concentraciones de mercurio reportadas en Europa, con las concentraciones de mercurio obtenidas en Colombia u América Latina en hongos macroscópicos.

Bibliografía

Adenipekun, C O, y R Lawal. «Uses of mushrooms in bioremediation: a review. » Biotechnology and Molecular Biology Reviews, 2012: 7(3), 62-68.

Ahmad, I, S Hayat, y J Pichtel. «Heavy metal contamination of soil: problems and remedies. » Science Publishers, 2005.

Alexander, M. Biodegradation and Bioremediation. San Diego: Academic Press, 1994.

Allen, R. O., & Steinnes, E. (1978). Concentrations of some potentially toxic metals and other trace elements in wild mushrooms from Norway. Chemosphere, 7(4), 371–378. https://doi.org/10.1016/0045-6535(78)90138-8

Atlas, R M, y R Bartha. «Hydrocarbon biodegradation and oil spill. » Advances in microbial ecology, 1992: 287-338.

Ávila, E. (2004). *La pequeña minería y los nuevos desafíos de la gestión pública*. https://books.google.com.br/books?hl=en&lr=&id=r-b1tDl_Y6EC&oi=fnd&pg=PA1&dq=HENTSCHEL+T.,+HRUSCHKA+F.,+PRIESTER+M.&ots=Nf6t_k8JbW&sig=VH1s_wu95afldEJjHdXYpimLCus

Ayangbenro, A. S., & Babalola, O. O. (2017). A new strategy for heavy metal polluted environments: A review of microbial biosorbents. In International Journal of Environmental Research and Public Health (Vol. 14, Issue 1). https://doi.org/10.3390/ijerph14010094

Baath, E. «Effects of heavy metals in soil on microbial processes and populations. » Water, Air and Soil Pollution, 1989: 47(3-4), 335-379.

Barbosa Amaya, Héctor Fernando. Cuadernillo de Apuntes de "REMEDIACIÓN DE SUELOS". México, 2011.

Berdonces, M. A. L., Higueras, P. L., Fernández-Pascual, M., Borreguero, A. M., & Carmona, M. (2017). The role of native lichens in the biomonitoring of gaseous mercury at contaminated sites. Journal of environmental management, 186, 207-213.

Calle, L. A. (2016). Metodologías para hacer la revisión de literatura de una investigación. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/301748735_Metodologias_para_hacer_la_revision_de_literatura_ de_una_investigacion.

Casthilhos, Z C, E D Bidone, y S M Hartz. «Bioaccumulation of mercury by Tucunare (Cichla ocellaris) from Tapajos River region, Brazilian Amazon: a field dose-response approach. » Bulletin of environmental contamination and toxicology, 2001: 66(5) 631-637.

Chiras, D. D. (1991). Environmental science (Vol. 14, Issue 3). https://doi.org/10.31729/jnma.1240

Chojnacka, A., Drewnowska, M., Jarzyńska, G., Nnorom, I. C., & Falandysz, J. (2012). Mercury in Yellow-cracking Boletes X erocomus subtomentosus mushrooms and soils from spatially diverse sites: Assessment of bioconcentration potential by species and human intake. Journal of Environmental Science and Health, Part A, 47(13), 2094-2100.

Chudzyński, K., Jarzyńska, G., Stefańska, A., & Falandysz, J. (2011). Mercury content and bio-concentration potential of Slippery Jack, Suillus luteus, mushroom. Food Chemistry, 125(3), 986-990.

Compart, L. C. A., Machado, K. M. G., Matheus, D. R., & Cardoso, A. V. (2007). Immobilization of Psilocybe castanella on ceramic (slate) supports and its potential for soil bioremediation. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 23(10), 1479-1483.

Coprinus comatus (O.F.Müll.) Pers. in GBIF Secretariat (2019). GBIF Backbone Taxonomy. Checklist dataset https://doi.org/10.15468/39omei accessed via GBIF.org on 2020-05-25.

Cortez, H, J Pingarrón, J A Muñoz, y A Ballest. «Bioremediation of soils contaminated with metalliferous mining wastes. » Trends in Bioremediation and Phytoremediation, 2010: 283-299.

Damodaran, D., & Shetty, V. B. (2011). Mushrooms in the Remediation of Heavy Metals From Soil. *International Journal of Environmental Pollution Control & Management*, *3*(1), 89–101. https://docplayer.net/49268908-Mushrooms-in-the-remediation-of-heavy-metals-from-soil.html

Damodaran, D., Vidya Shetty, K., & Raj Mohan, B. (2014). Uptake of certain heavy metals 76 Procesos de biorremediación en el tratamiento de residuos sólidos del cigarillo from contaminated soil by mushroom-Galerina vittiformis. Ecotoxicology and Environmental Safety, 104(1), 414–422.

Das, N. (2005). Natural Product Radiance Heavy metals biosorption by mushrooms. *Natural Product Radiance*, *4*, 454–459.

Diman, N. S., & Bahmanpour, H. (2013). Environmental biotechnology and its impact on sustainability. *Global Journal of Science, Engineering and Technology*, *14*(14), 2322–2441. http://www.gjset.org

Drewnowska, M., Nnorom, I. C., & Falandysz, J. (2014). Mercury in the Grisette, Amanita vaginata Fr. and soil below the fruiting bodies. Journal of Environmental Science and Health, Part B, 49(7), 521-526.

Elizabeth Paisio, C., Solange González, P., & Andrea Talano Elizabeth Agostini, M. (2012). Remediación biológica de Mercurio: Recientes avances. *Rev Latinoam Biotecnol Amb Algal*, *3*(2), 119–146.

Elsevier. (2018). Data | Curated. Connected. Complete. 2018-10-12 08:57:59. https://www.elsevier.com/solutions/scopus

Elsevier Publicaciones. (2018). ¿Qué es la revisión por pares? 1–6. https://www.elsevier.com/reviewers/what-is-peer-review

Falandysz, J. (2016). Mercury bio-extraction by fungus Coprinus comatus: a possible bioindicator and mycoremediator of polluted soils? Environmental Science and Pollution Research, 23(8), 7444-7451.

Falandysz, J., Zhang, J., Wang, Y., Krasińska, G., Kojta, A., Saba, M., ... & Liu, H. (2015). Evaluation of the mercury contamination in mushrooms of genus Leccinum from two different regions of the world: accumulation, distribution and probable dietary intake. Science of The Total Environment, 537, 470-478.

Falandysz, J., Krasińska, G., Pankavec, S., & Nnorom, I. C. (2014). Mercury in certain Boletus mushrooms from Poland and Belarus. Journal of Environmental Science and Health, Part B, 49(9), 690-695.

Falandysz, J., Mazur, A., Kojta, A. K., Jarzyńska, G., Drewnowska, M., Dryżałowska, A., & Nnorom, I. C. (2013). Mercury in fruiting bodies of dark honey fungus (Armillaria solidipes) and beneath substratum soils collected from spatially distant areas. Journal of the Science of Food and Agriculture, 93(4), 853-858.

Falandysz, J., Widzicka, E., Kojta, A. K., Jarzyńska, G., Drewnowska, M., Dryżałowska, A., ... & Nnorom, I. C. (2012). Mercury in Common Chanterelles mushrooms: Cantharellus spp. update. Food chemistry, 133(3), 842-850.

Fundación Española para la Ciencias y la Tecnología. (2019). Base de datos de Scopus | Recursos Científicos. Recursos Científicos-Fecyt. https://www.recursoscientificos.fecyt.es/licencias/productos-contratados/scopus

Gerhardt, K.E, X. D Huang, B.R Glick, y B.M Greenberg. «Phytoremediation and rhizoremediation of organic soil contaminants: Potential and challenges. » Plant Sci, 2009: 20-30.

GBIF: The Global Biodiversity Information Facility. (2019). What is GBIF? GBIF. https://www.gbif.org/what-is-gbif

Gong, X., Li, S., Sun, X., Zhang, L., Zhang, T., & Wei, L. (2017). Maturation of green waste compost as affected by inoculation with the white-rot fungi Trametes versicolor and Phanerochaete chrysosporium. Environmental technology, 38(7), 872-879.

Guirao-Goris, J. A., Olmedo Salas, A., & Ferrer Ferrandis, E. (2008). El artículo de revisión. Revista iberoamericana de enfermería comunitaria, 1(1), 1-25.

Halliday, C. G. (1985, January). Seed Treatment Formulations: Development of a Protocol. In Pesticide Formulations and Application Systems: Fourth Symposium. ASTM International.

Horiike, T., & Yamashita, M. (2015). A new fungal isolate, Penidiella sp. strain T9, accumulates the rare earth element dysprosium. Appl. Environ. Microbiol., 81(9), 3062-3068.

Jarzyńska, G., & Falandysz, J. (2011). The determination of mercury in mushrooms by CV-AAS and ICP-AES techniques. Journal of Environmental Science and Health Part A, 46(6), 569-573.

José Álvarez, Víctor Sotero, Antonio Brack Egg, César A, Ipenza Peralta. Minería aurífera en Madre de Dios y contamnación con mercurio. Lima: Súper Gráfica E.I.R.L, 2011.

Kojta, A. K., & Falandysz, J. (2016). Soil-to-mushroom transfer and diversity in total mercury content in two edible Laccaria mushrooms. Environmental Earth Sciences, 75(18), 1264.

Kojta, A. K., Zhang, J., Wang, Y., Li, T., Saba, M., & Falandysz, J. (2015). Mercury contamination of fungi genus Xerocomus in the Yunnan Province in China and the region of Europe. Journal of Environmental Science and Health, Part A, 50(13), 1342-1350.

Krasińska, G., & Falandysz, J. (2016). Mercury in Orange Birch Bolete Leccinum versipelle and soil substratum: bioconcentration by mushroom and probable dietary intake by consumers. Environmental Science and Pollution Research, 23(1), 860-869.

Krasińska, G., & Falandysz, J. (2015). Mercury in Hazel Bolete Leccinum griseum and soil substratum: distribution, bioconcentration and dietary exposure. Journal of Environmental Science and Health, Part A, 50(12), 1259-1264.

Kumah, A. (2006). Sustainability and gold mining in the developing world. *Journal of Cleaner Production*, *14*(3), 315–323. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.08.007

Laskowski, R., Niklińska, M., & Maryański, M. (1994). Heavy metals in forest litter: a chemical time-bomb.

Lau, B. F., & Abdullah, N. (2016). Sclerotium-Forming Mushrooms as an Emerging Source of Medicinals: Current Perspectives. Current Perspectives. In Mushroom Biotechnology:

Developments and Applications (pp. 111–136). Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802794-3.00007-2

Londoño Franco, L. F., Londoño Muñoz, P. T., & Muñoz Garcia, F. G. (2016). LOS RIESGOS DE LOS METALES PESADOS EN LA SALUD HUMANA Y ANIMAL. Biotecnoloía En El Sector Agropecuario y Agroindustrial, 14(2), 145. https://doi.org/10.18684/bsaa(14)145-153

Lovelock, J E. Gaia: A New Look at Life on Earth. Oxford, UK.: Oxford University Press, 2000.

Maćkiewicz, D., & Falandysz, J. (2012). Total mercury in Yellow Knights (Tricholoma equestre) mushrooms and beneath soils. Bulletin of environmental contamination and toxicology, 89(4), 755-758.

Малов, А. М., Луковникова, Л. В., Аликбаева, Л. А., Якубова, И. Ш., & Щеголихин, Д. К. (2018). Результаты биомониторинга ртутного загрязнения территории мегаполиса. Гигиена и санитария, 97(12), 1189-1194.

Mahbub, K. R., Krishnan, K., Naidu, R., & Megharaj, M. (2016). Mercury resistance and volatilization by Pseudoxanthomonas sp. SE1 isolated from soil. Environmental technology & innovation, 6, 94-104.

Malov, A. (2008, July). Mercury Pollution in the Ground of Saint-Petersburg. In Materials of 31st AMOP Technical Seminar on Environmental Contamination and Response. Canada. Calgary, 2008. www. etc-cte. ec. gc. ca/news/conferences_e. html.

Mikryukov, V. S., & Dulya, O. V. (2018). Fungal communities in organic and mineral soil horizons in an industrially polluted boreal forest. Biodiversity, 19(3-4), 161-171.

Money, N. P. (2016). Fungal Cell Biology and Development. In The Fungi: Third Edition (pp. 37–66). Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382034-1.00002-5

Nriagu, J O. « Global metal pollution: poisoning the biosphere? » Environment: Science and Policy for Sustainable Development, 1990: 32(7), 7-33.

OECD. (2001). *Strategies for Sustainable Development INTERNATIONAL DEVELOPMENT The DAC*

Guidelines Strategies for Sustainable Development «. www.oecd.org

Olivero Verbel, Jesús, y Boris Johnson Restrepo. El Lado Gris de la Minería de Oro: La contaminación con mercurio en el norte de Colombia. Cartegena: Universidad de Cartagena, 2002.

ONU. Objetivos de Desarrollo del Milenio: Una Mirada Desde América Latina y el Caribe. Santiago de Chile: Naciones Unidas, 2005.

Paisio, Cintia Elizabeth, Paola Solange González, Melina Andrea Talano, y Elizabeth Agostini. «Remediación biológica de Mercurio: Recientes avances.» Revista Latinoamericana de Biotecnología Ambiental y Algal, 2012: 119.

Paoli, L., Munzi, S., Guttová, A., Senko, D., Sardella, G., & Loppi, S. (2015). Lichens as suitable indicators of the biological effects of atmospheric pollutants around a municipal solid waste incinerator (S Italy). Ecological Indicators, 52, 362-370.

PNUMA. El Convenio de Minamata sobre el Mercurio y su implementación en la región de América Latina y el Caribe. Uruguay: PNUMA/ORPALC, 2014.

—. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Nairobi: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2008.

Pressly, Linda. BBC MUNDO. 23 de septiembre de 2013. http://www.bbc.co.uk/mundo/noticias/2013/09/130919_salud_mercurio_envenenamiento_poblacion_gtg (último acceso: 15 de marzo de 2015).

Prochacki, H., & Engelhardt-Zasada, C. (1974). Epidermophyton stockdaleae sp. nov. Mycopathologia et mycologia applicata, 54(3), 341-345.

Ramírez-Ramírez, F. J., De León-Peguero, N. G., Cansino-Vega, R. A., Arellano-Contreras, D., & Ochoa-Ayala, D. (2009). ¿Cómo redactar un artículo científico de revisión?. Revista Médica MD, 1(2), 21-22.

Rieder, S. R., Brunner, I., Horvat, M., Jacobs, A., & Frey, B. (2011). Accumulation of mercury and methylmercury by mushrooms and earthworms from forest soils. Environmental pollution, 159(10), 2861-2869.

Rodríguez, L.A, I Padilla, H Tayibi, y A. López Delgado. «Concerns on liquid mercury and mercury-containing wastes: A review of the treatment technologies for the safe storage. » J Environ Man, 2012: 197-205.

ROJAS, L., PRIN, J. L., NORIEGA, J., ALBORNOZ, L. A., HIDALGO-PRADA, B., & RAMÍREZ, A. (2008). DETERMINACIÓN DE MERCURIO EN SUELOS DEL SECTOR MINERO LAS CLARITAS, ESTADO BOLÍVAR, MEDIANTE PROCESOS ANALITICOS DE ESPECIACIÓN Y MICROSCOPÍA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB). *SABER*, *20*(3).

Saba, M., Falandysz, J., & Nnorom, I. C. (2016). Evaluation of vulnerability of Suillus variegatus and Suillus granulatus mushrooms to sequester mercury in fruiting bodies. Journal of Environmental Science and Health, Part B, 51(8), 540-545.

Scopus. (2019). Scopus content coverage by subject area. www.elsevier.

Skvortsova, I. N., Rappoport, A. V., Prokof'eva, T. V., & Andreeva, A. E. (2006). Biological properties of soils in the Moscow State University Botanical Garden: the branch on Prospekt Mira. Eurasian Soil Science, 39(7), 771-778.

Stihi, C., Radulescu, C., Busuioc, G., Popescu, I. V, Gheboianu, A., & Ene, A. (n.d.). *STUDIES ON ACCUMULATION OF HEAVY METALS FROM SUBSTRATE TO EDIBLE WILD MUSHROOMS*.

Sullia, S. Fungal Diversity and Bioremediation. 2003. http://fbae.org/2009/FBAE/website/special-topics_student_zone_fungal_diversity_and_bioremediat.html.

Unz, R F, y K L Shuttleworth. «Microbial mobilization and immobilization of heavy metals. » Current opinion in biotechnology, 1996: 7(3), 307-310.

Van Emden, J. H. (1958). Control ofRhizoctonia solani Kühn in potatoes by disinfection of seed tubers and by chemical treatment of the soil. European Potato Journal, 1(1), 52-64.

WCED. (2018). Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development. *World Commission on Environment and Development*, 1–300. https://doi.org/10.1080/07488008808408783

Weinberg, Jack, y Orgánicos Persistentes. Introducción a la Contaminación por Mercurio para las ONG. 2010.

Wiedemeier, T H, H S Rifai, C J Newell, y J T Wilson. Natural Attenuation of Fuels and Chlorinated Solvents in the Subsurface. NY: John Wiley & Sons, 1999.

Wiejak, A., Wang, Y. Z., Zhang, J., & Falandysz, J. (2016). Mercury in Sclerotia of Wolfiporia Extensa (Peck) Ginns Fungus Collected Across of the Yunnan Land. Guang pu xue yu guang pu fen xi= Guang pu, 36(9), 3083-3086.

Zhou, Q. X., An, X. L., & Wei, S. H. (2008). Heavy metal pollution ecology of macro-fungi: research advances and expectation. Ying yong sheng tai xue bao= The journal of applied ecology, 19(8), 1848-1853.