



## La minería asociada con la contaminación de mercurio en el Chocó, Colombia, y posible estrategia de fitorremediación con macrófitas

### Mining associated with mercury contamination in the Chocó, Colombia, and possible phytoremediation strategy with macrophytes

Jorlin Rivas-Jordán\* , Helcias José Ayala-Mosquera\* 

#### Resumen

*La minería es una actividad que genera bienes a la sociedad, pero a su vez deja nefastas consecuencias en el medio ambiente como la deforestación de los bosques y la contaminación de los suelos, agua y aire. Esta actividad está generando preocupación, por el uso indiscriminado de productos químicos como el mercurio (Hg), que produce problemas ambientales casi irreversibles, porque el Hg se bioacumula y biomagnifica hasta llegar al hombre, causando problemas de salud. El objetivo de este estudio es determinar el papel que juega la minería en la distribución y contaminación de mercurio en el Chocó, Colombia, y el papel que realizan las macrófitas como posibles estrategias biológicas de descontaminación. Se hizo una búsqueda exhaustiva en los distintos buscadores digitales, como Scopus y ScienceDirect. Se concluye que la actividad minera del oro se relaciona directamente con la contaminación de mercurio en el ambiente y que la mejor estrategia para disminuir las concentraciones por metales pesados en ambientes acuáticos es la fitorremediación utilizando macrófitas.*

**Palabras clave:** Contaminación, Ecosistemas, Fitorremediación, Mercurio, Minería.

#### Abstract

*Mining is an activity that generates goods for the community, but at the same time leaves harmful consequences to the environment such as deforestation of forests, pollution of soils, water, and air. This activity is generating concern due to the indiscriminate use of chemicals such as mercury (Hg) which generates almost irreversible environmental problems because Hg is bioaculated, biomagnified, and reaches generating health problems. The objective of this study is to determine the role that mining plays in the distribution and contamination of mercury in the biogeo-*

\* Grupo de investigación Biodiversidad y etnodesarrollo en el Pacífico colombiano, Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico (IIAP), Quibdó, Colombia.

Autor correspondencia:  
jorlinjordan@gmail.com

Recepción: Octubre 23, 2020  
Aprobación: Diciembre 15, 2020  
Editor asociado: Palacios-Mosquera L



*graphical Chocó, Colombia, and the possible biological strategies of decontamination. For this study, an exhaustive search was carried out in the different digital search engines mainly Scopus and ScienceDirect. Finally, gold mining activity is directly related to mercury pollution in the environment, and the best strategy to reduce concentrations by heavy metals is phytoremediation.*

**Keywords:** *Ecosystems, Mercury, Mining, Pollution, Phytoremediation.*

## Introducción

Los metales pesados se han convertido en un problema mundial por la facilidad que tienen para contaminar el ambiente (aire, suelo y agua), y a esto se suma su capacidad de bioacumulación y bioconcentración (Beltrán-Pineda y Gómez-Rodríguez 2016). El acelerado aumento de mercurio (Hg) en el medio se debe a factores antrópicos, sobre todo las diversas industrias (Marrugo-Negrete *et al.* 2017). El Hg es uno de los metales que genera más contaminación y toxicidad en la biosfera (Olivero-Verbel *et al.* 2015).

La minería artesanal y de pequeña escala (MAPE) es la principal fuente de liberación de Hg en el mundo; se estima que el 37% del mercurio liberado de forma antropogénica proviene de la MAPE (Falagán *et al.* 2017, Gallo *et al.* 2021a). La producción de oro en Colombia ha aumentado significativamente debido al aumento del precio de los metales preciosos en los mercados internacionales, incidiendo con el progreso de la minería en Colombia, y, por consiguiente, con el deterioro ambiental, aumentado por el uso de Hg y compuestos químicos (Gallo *et al.* 2021b).

Las pozas abandonadas por la extracción minera de la subregión de San Juan representan un proceso histórico, porque fueron el resultado de la industrialización minera en Colombia, con la llegada de la Anglo Colombiana Development Company (ACDC) y/o la compañía minera Chocó

Pacífico siglo XX (Leal 2009), y el resultado del aprovechamiento minero con retroexcavadoras; estos sitios son susceptibles a altas concentraciones de mercurio en su compartimiento. Los niveles altos de Hg en estos cuerpos de agua remanente de minería se deben sobre todo a la deposición directa en los procesos mineros para hacer amalgama con el oro, separación de metales y por escorrentía, convirtiendo estos sitios en la deposición final del Hg (Gutiérrez-Mosquera *et al.* 2018, 2021). Debido a esto, las pozas abandonadas por la acción minera en el departamento del Chocó probablemente presentan altas concentraciones de Hg, lo que puede producir un vínculo directo con los habitantes de los sitios cercanos por los bienes y servicios que prestan estos ecosistemas a las comunidades (Salazar-Camacho *et al.* 2017, Gutiérrez-Mosquera *et al.* 2018).

Debido a la facilidad con que el Hg pasa de un organismo a otro (biomagnificación), se considera uno de los metales pesados más tóxicos para los ecosistemas, porque altera el equilibrio ecológico de las poblaciones biológicas, en especial las comunidades ícticas (Gracia *et al.* 2010), que representan una fuente esencial de proteína para el hombre. En los seres humanos al Hg se le atribuye afectaciones como intoxicación masiva, cambios epigenéticos y lesiones a diferentes órganos, como el hígado y riñones (Carranza-López *et al.* 2019); los más graves ocurren en fetos y recién nacidos que pueden nacer con malformaciones, y/o con la enfermedad de Minamata, caracterizada por trastornos del neurodesarrollo (Gaioli *et al.* 2012).

Debido a que resulta muy costosa la descontaminación con técnicas físicas como la excavación, fijación y lixiviación de suelos afectados con mercurio y además de contribuir con el deterioro de las zonas tratadas con estos sistemas (LeDuc y Terry 2005), se ha llegado a la utilización de estrategias biológicas, como es el uso de algunas plantas con la capacidad de absorber metales pesados (Olsen *et al.* 2019).

Teniendo en cuenta lo anterior, el objetivo de

este estudio de revisión es determinar el papel que juega la minería en la distribución de mercurio en el departamento del Chocó, Colombia, y una posible alternativa biológica para mitigar el impacto, encaminada a fortalecer las políticas públicas, estrategias de control y mitigación para la reducción de los impactos producido por la actividad minera sobre el medio ambiente y en especial sobre los recursos hídricos.

## **Desarrollo**

Este estudio se realizó gracias a la búsqueda exhaustiva de información disponible en revistas científicas y otras fuentes de información verídicas a nivel local, regional y nacional; se utilizaron como instrumentos de búsqueda las plataformas virtuales Scopus y ScienceDirect; para ambas se realizó un filtro por línea de tiempo (2012-2022) y se utilizaron las mismas palabras clave (mercury, macrophytes, Colombia). Se obtuvo como resultado para Scopus seis artículos científicos y 47 para ScienceDirect. De igual forma, se realizó otra búsqueda con las palabras clave mercury y minery, donde para Scopus se obtuvo un total de nueve artículos para Colombia y ScienceDirect solo mostró dos documentos científicos. Estos artículos sirvieron de base para la realización de la presente investigación.

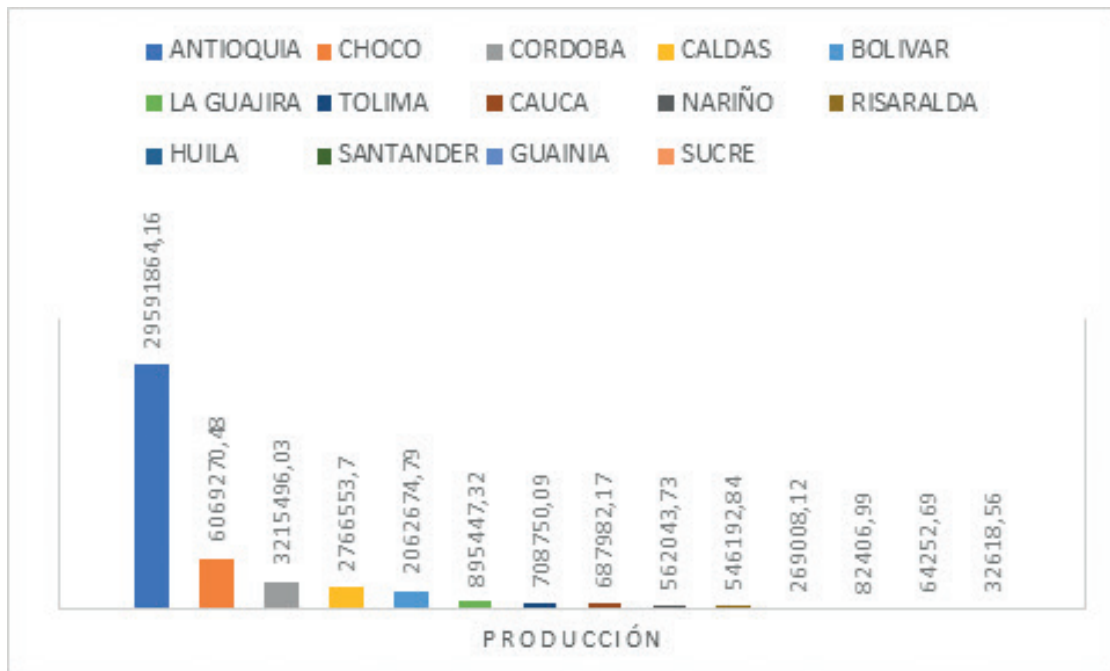
## **El mercurio asociado con la minería**

La minería artesanal y de pequeña escala (MAPE) es una actividad económica de subsistencia que trae muchos beneficios a las comunidades, empresas y gobierno (Halland *et al.* 2016, Gallo *et al.* 2021a). La MAPE ha crecido de tal manera, que según el Banco Mundial (2019) ya es considerada una actividad económica de importancia en todo el mundo; si bien la industria minera es importante para el desarrollo económico, es preocupante el efecto alterno que causa en los sistemas naturales, sobre todo por el uso de metales pesados y en

especial el mercurio (Raimann *et al.* 2014, Hilson 2016, Gerson *et al.* 2018, Viana 2018). Para la separación del oro los mineros elaboran una amalgama con Hg elemental que se une al oro y una vez formada esta unión se calienta hasta que el Hg se evapora o se separa, dejando solo el oro (Restrepo *et al.* 2021).

La utilización de Hg en la MAPE y sus afectaciones han sido reportadas por muchos autores (Camizuli *et al.* 2018, Vargas-Licon y Marrugo-Negrete 2019, Agudelo-Echavarría *et al.* 2020, Gutiérrez-Mosquera *et al.* 2020). Según los estudios reportados por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA 2018), la MAPE representa aproximadamente el 15% de las emisiones globales totales de Hg y el 80% de las emisiones totales de metales de América del Sur y África. Además, datos reportados por PNUMA (2013) indican que las emisiones de Hg generadas por la minería aurífera a pequeña escala en América Latina se encuentran en un rango entre 128 y 465 t/año, informe que revela lastimosamente, que la minería ilegal a pequeña escala no ha sido controlada en muchos países del mundo (más de 70) (Agudelo-Echavarría *et al.* 2020) a los que incluimos a Colombia, donde las nuevas políticas buscan potencializar el sector minero (López-Barrera y Barragán-González 2016), convirtiéndose en uno de los países en América del Sur con más producción de oro (Digna 2016). Según los estudios realizados por Díaz-Arriaga (2014) Colombia solo en el 2010 liberó 75 t/año de mercurio, convirtiéndose en el país más contaminante en América Latina y el segundo a nivel mundial después de China (444,5 t/año). El departamento del Chocó es uno de los departamentos con mayor producción de oro, y se ubica como la segunda región que más utiliza mercurio en sus procesos mineros, con 24 t/año de Hg para la extracción de oro (Salazar-Camacho *et al.* 2021).

El incontrolable crecimiento de la minería ilegal a pequeña escala en Colombia está causando



**Figura 1. Producción de oro (gramo) anual en los departamentos de Colombia en el año 2020**  
 Fuente: SIMCO 2020

grandes impactos ambientales en muchas de las regiones del país (Betancur-Corredor *et al.* 2018); las áreas más afectadas por minería son: Antioquia, noroeste de Bolívar y occidente del Chocó (Salazar-Camacho *et al.* 2017). Es importante mencionar que según Sistema de Información Minero Colombiano (SIMCO) para el año 2020 los departamentos con mayor producción de oro fueron: Antioquia, Chocó y Córdoba (Figura 1). La minería ilegal se ha trasladado al departamento del Chocó trayendo consigo consecuencias perjudiciales para el ambiente, porque a medida que el valor del oro aumenta, la producción del metal en la región crece, llegando al punto que durante el período 2005 y 2008 se producía 2.000 kg/año y entre 2010 y 2012 se extrajeron 25.627 kg/año (Salazar-Camacho *et al.* 2017). Además, es importante mencionar que el departamento del Chocó es el segundo lugar de Colombia con más producción de oro, al mismo tiempo que presenta los indicadores más bajos de pobreza, violencia y desnutrición (Tubb 2015).

Es importante destacar que el departamento del Chocó alberga la más grande riqueza ecosistémica y biodiversidad de Colombia registrando 4.584 especies de espermatofitas, 793 de aves (Rangel-Ch y Rivera-Díaz 2004), 188 reptiles (Castaño *et al.* 2004), 139 anfibios, 196 peces de agua dulce (Mojica *et al.* 2004), 206 mamíferos (Muñoz-Saba y Alberico 2004) y 176 escarabajos (García *et al.* 2004), haciendo de la minería un factor de amenaza para los ecosistemas y por ende de la riqueza de especies establecida en el departamento, porque muchos lugares donde se realiza minería corresponden a áreas de alta importancia para la biodiversidad, además del uso de Hg que es potencialmente tóxico y ejerce una gran presión en la biota, provocando problemas como la pérdida de biodiversidad, el agotamiento de los recursos de subsistencia y el desarrollo de enfermedades, que al final ponen en riesgo la salud y el sustento de la población humana (Palacios-Torres *et al.* 2018, Betancur-Corredor *et al.* 2018).

### Impacto ambiental del mercurio en el aire

La extracción de oro artesanal y en pequeña escala (*ASGM*) es el mayor contribuyente de emisión de mercurio atmosférico en el mundo (37% anual), sobre todo por América del Sur, África subsahariana y el este y sudeste de Asia (PNUMA 2013). PNUMA (2013, 2019) calcula que cada año la ASGM emite directamente a la atmósfera 727 toneladas de mercurio (estimado entre 410 y 1040 t/año). Del mercurio liberado al ambiente utilizado en la MAPE, el 70% es emitido a la atmósfera durante el proceso de amalgama y aproximadamente 30% es vertido a las fuentes hídricas de forma directa o indirecta (Olivero-Verbel *et al.* 2014).

Para explicar mejor cómo llega el mercurio al aire, es necesario saber que en la actividad minera se utiliza el mercurio para crear amalgama con el oro; para separar los metales se utiliza calor o descomposición térmica (Veiga *et al.* 2014), donde trazas de mercurio se volatizan y suben a la atmósfera y luego se precipitan a los suelos y fuentes hídricas por medio de la lluvia, contaminando incluso zonas donde no hay actividad minera. Su impacto principal en el aire es relacionado con la intoxicación y afectaciones nocivas que ocurren en el mismo sitio de la descomposición térmica (Ramírez-Morales *et al.* 2019). Sin embargo, en Colombia existen pocos estudios que evidencien el impacto de la MAPE sobre el aire que respiran las personas de los sitios mineros (Olivero-Verbel *et al.* 2014) y el departamento del Chocó no es un caso aparte, aunque solo reporta un artículo sobre contaminación mercurial en el aire (Palacios-Torres *et al.* 2018).

### Impacto ambiental del mercurio en el suelo

El Hg puede aparecer de forma natural en el suelo, aunque en concentraciones muy bajas. Se

calcula que a nivel mundial los niveles de mercurio en el ambiente de forma natural son de 0,06 µg/g. Pero los últimos años, los niveles de mercurio en los suelos han aumentado significativamente debido a diferentes factores antrópicos; la contaminación mercurial en el ambiente depende en gran medida de la fuente contaminante o de emisión, como es el caso de la minería cinabrio, la metalúrgica (Llanos *et al.* 2011), la industria química (Miller *et al.* 2013) y la extracción de oro (Kpan *et al.* 2014) entre otras. En este último, la contaminación se puede dar de manera de deposición directa o con pérdida indirecta en el proceso de amalgama (Cordy *et al.* 2011, Marrugo-Negrete *et al.* 2017); una situación ocurre cuando el Hg es liberado al ambiente por medio de las aguas residuales, en lo que conocemos como colero o relave (forma directa); otra forma es como se explicó en el párrafo anterior donde el mercurio, en el proceso de separación de metales, se evapora sube a la atmósfera, se condensa en partículas más gruesas y cae en forma de lluvia (forma indirecta) contaminando los suelos (Adjorlolo-Gasokpoh *et al.* 2012).

Una vez el Hg se encuentra depositado en el suelo, es afectado por las condiciones del lugar (pH, la temperatura y el contenido de ácido húmico), y forma uniones con otros elementos del suelo; lo más preocupante es que muchas especies de plantas absorben este metal y lo incorporan en sus órganos, y luego esas plantas son consumidas por otros animales y el hombre, realizando el proceso de biomagnificación de mercurio (Ramírez-Morales *et al.* 2019). El estudio de Hg en suelos contaminados en Colombia ha sido reportado por muchos autores (Araújo *et al.* 2019, Montoya *et al.* 2019, Marrugo-Negrete *et al.* 2020, Marrugo-Madrid *et al.* 2021, Morosini *et al.* 2021). Sin embargo, a pesar de la mucha información que existe sobre los efectos de la minería aluvial y la contaminación por mercurio en el departamento del Chocó, la mayoría de las investigaciones han sido relacionadas con otras





matrices, y son muy pocos los estudios en suelo (Rodríguez 2019, Llano 2021). Basado en la información encontrada, la generación de este artículo sirve como base para que se aumenten las investigaciones sobre mercurio en suelo.

### Impacto ambiental del mercurio en el agua

El mercurio se puede encontrar en los ambientes acuáticos por escorrentía desde los suelos, por precipitación y por el vertimiento directo en los procesos mineros (UNEP 2013, Ramírez-Morales *et al.* 2019); una vez el metal está en el agua es transformado por bacterias en un nuevo elemento llamado metilmercurio (MeHg), siendo este el más perjudicial para la biota; se bioacumula con mucha facilidad y es más tóxico que la forma inorgánica. Es relevante mencionar que este elemento se pasa de un organismo a otro por medio de la cadena alimenticia, incluso afectando al hombre (Male *et al.* 2013, Vargas-Licona y Marrugo-Negrete 2019). Los pobladores de zonas cercanas donde se realiza la extracción de oro son los más afectados por la contaminación mercurial, esto se debe a que las emisiones de Hg contaminan directamente los cuerpos de agua cercanos (PNUMA 2019), que a su vez contaminan a los residentes de las comunidades que extraen oro de manera artesanal y en pequeña escala a través del consumo de pescado contaminado; en el organismo el MeHg se transporta por el tracto intestinal hasta llegar el torrente sanguíneo desde donde puede cruzar las barreras hematoencefálica y hemotoplacentaria (Horvat *et al.* 2012) causando un sin número de afectaciones en el cuerpo humano.

En Colombia las afectaciones causadas por la minería de oro en el medio ambiente son preocupante debido a las fragmentaciones de los sistemas naturales y al acelerado crecimiento de esta actividad en el país, reportándose en 17 departamento y 80 municipios (Díaz-Arriaga 2014). No obstante, existen otros aspectos importantes de las

afectaciones relacionadas con la minería aluvial, como es el consumo y utilización de aguas contaminadas con Hg utilizadas por las poblaciones aguas abajo, generando un impacto negativo en las actividades humanas, al igual que en su salud (Díaz-Arriaga 2014). Existen muchos estudios en Colombia que confirman la contaminación por mercurio en el agua (Olivero-Verbel *et al.* 2015, Gallo *et al.* 2021a, Gallo *et al.* 2021b, Vélez *et al.* 2021). Sin embargo, la utilización clandestina de mercurio, el poco control de las autoridades ambientales y la falta de conciencia por parte de los mineros informales establece la contaminación mercurial como una problemática sin resolver. El Chocó no es ajeno a la problemática ambiental por mercurio en el país, reportando estudios que evidencian contaminación en diversos cuerpos hídricos (Palacios-Torres *et al.* 2018, Palacios-Torres *et al.*, 2020, Salazar-Camacho *et al.* 2021, Gutiérrez-Mosquera *et al.* 2021), situación que pone en riesgo a los pobladores de las zonas contaminadas.

### Riesgo del mercurio en la salud humana

En seres humanos el Hg puede ingresar al cuerpo a través del tracto respiratorio, digestivo y la absorción dérmica (Eqani *et al.* 2016). En su mayoría el mercurio absorbido por el hombre viene a través de la cadena alimenticia (Vargas-Licona y Marrugo-Negrete 2019), donde la transformación de Hg inorgánico a orgánico, metilmercurio (MeHg) inicia cuando el Hg se deposita en los sedimentos, luego las bacterias lo metilizan y lo convierten en MeHg que es absorbido por fito y zooplancton, que a su vez son consumidos por peces, y estos son consumidos por otros peces y animales (biomagnificación) en la cadena trófica hasta llegar al hombre (Gutiérrez-Mosquera *et al.* 2018, Vargas-Licona y Marrugo-Negrete 2019).

El Hg inhalado en los procesos mineros (quema de amalgama) llega a los pulmones y es

absorbido por los glóbulos rojos donde se oxidan rápidamente al catión inorgánico divalente (Hg inorgánico, InHg). Los daños ocasionados por las elevadas cantidades de Hg el cuerpo puede causar daño en los sistemas respiratorio, cardiovascular, digestivo e inmunitario (Clarkson y Magos 2006), pero principalmente afecta el sistema nervioso y los riñones, donde el InHg se acumula preferentemente después de la inhalación de vapor de Hg elemental (Santa-Ríos *et al.* 2021). Los principales problemas para la salud humana por exposición de Hg incluyen neurotoxicidad, teratogenicidad, nefrotoxicidad e inmunotoxicidad (Calao *et al.* 2021). Además, la exposición con Hg durante el embarazo puede alterar el desarrollo cerebral del feto, incluso existe evidencia que relaciona la formación de cáncer con la exposición a los compuestos de mercurio (Casas *et al.* 2015).

Según los datos mundiales de biomonitorio en seres humanos, entre 3.3 y 6.5 millones de mineros sufren intoxicación por vapor de mercurio de forma moderada o crónica (Casas *et al.* 2015). Los riesgos del Hg en la salud humana y en el ambiente ha generado una gran preocupación en el ámbito científico (Gutiérrez-Mosquera *et al.* 2018), lo que ha motivado a muchos investigadores a monitorear el comportamiento del mercurio en humanos. Para Colombia existen muchas investigaciones que aportan información sobre la relación entre el mercurio y afecciones en humanos (Casas *et al.* 2015, Calao y Marrugo 2015, Rodríguez-Villamizar *et al.* 2015, Galeano-Páez *et al.* 2021, Calao *et al.* 2021). Para el departamento del Chocó se pueden destacar los trabajos realizados por Salazar-Camacho *et al.* (2017), Gutiérrez-Mosquera *et al.* (2018) y Palacios-Torres *et al.* (2018), que evidencia los niveles de mercurio en seres humanos.

### **La fitorremediación como estrategias biológicas de descontaminación**

El desarrollo económico basado en la minería

de oro se pensó como una alternativa eficaz para alcanzar la prosperidad en muchas regiones del país, sin pensar en los daños ocasionados en el ecosistema y las alteraciones de la calidad del agua, suelo y aire, lo que hizo tomar conciencia de que el crecimiento económico basado en actividades extractivas trae efectos adversos o puede ser contraproducente (Maqueda 2003).

Uno de los mayores desafíos para los investigadores es lograr remediar el mercurio que se encuentra depositado en las fuentes hídricas y sedimentos, con la finalidad de anular los riesgos de toxicidad; esta preocupación se debe a que los metales pesados no se pueden degradar o mineralizar como otros contaminantes orgánicos. Por lo anterior, la única manera para remediar el Hg es convertir el mercurio orgánico (forma más tóxica) en una menos tóxica y volátil que no pueda ingresar a la cadena alimenticia. La utilización de métodos físicos convencionales utilizados para la remediación de Hg presenta la siguiente desventaja o inconveniente: dejar atrás un gran volumen de biomasa y lodos de Hg cuya eliminación no es ambiental ni económicamente favorable (Kumari *et al.* 2020).

La descontaminación de los suelos degenerados con metales pesados por técnicas físicas representa un costo monetario muy elevado, además contribuye con la afectación de la zona tratada (LeDuc y Terry 2005); por lo anterior, se han buscado nuevas alternativas para remediar esas zonas afectadas con metales, lo que llevó al empleo de plantas, porque son las principales recolectoras y transportadoras de oligoelementos mediante la absorción activa y pasiva (Bonanno y Cirelli 2017). Además, muchas especies de plantas pueden acumular altos niveles de metales pesados del ambiente gracias a su sistema bien desarrollado de raíces, tolerancia a la toxicidad y biomasa altamente productiva (Rezania *et al.* 2016); estas propiedades de los vegetales se han utilizado en una técnica llamada fitorremediación, que consiste en el uso de plantas para remover,



acumular e inactivar contaminantes del suelo (Padmavathiamma y Li 2007).

La técnica de fitorremediación ha sido muy utilizada en ecosistemas tanto terrestres como acuáticos, cumpliendo con la finalidad de mejorar las condiciones ambientales de esos sitios. En Colombia ha aumentado el uso de esta técnica, de igual forma se han realizado muchas investigaciones en diferentes plantas sobre sus propiedades acumulativas de metales pesados (Vidal *et al.* 2010, Romero *et al.* 2011, Olivero-Verbel *et al.* 2015, Marrugo-Negrete *et al.* 2010, 2016, 2017).

Sumado a lo anterior, la practicidad de los procesos de biorremediación de convertir sustancias tóxicas como los metales pesados, hidrocarburos aromáticos policíclicos y otros compuestos tóxicos, en compuestos no tóxicos o menos tóxicos (Patel *et al.* 2022). Por esta razón, en los últimos años se ha aumentado el uso de tecnología de remediación biológica, que a diferencia de las otras técnicas, ofrecen las siguientes ventajas: “(1) La remediación impulsada biológicamente elimina los elementos peligrosos de los medios contaminados en lugar de simplemente transferirlos. (2) Es notablemente menos perjudicial para el medio ambiente que los diversos métodos basados en la excavación y (3) El tratamiento de sitios con desechos peligrosos puede ser significativamente menos costoso que cualquier método convencional” (Azubuike *et al.* 2016).

### **Las macrófitas y su potencial acumulador de mercurio**

El aumento de las actividades antropogénicas inapropiadas y la industrialización han resultado en una grave contaminación ambiental en todo el mundo. Su tratamiento eficaz es vital para los problemas generales de salud. La gravedad de la contaminación puede diferir dependiendo de las características de los contaminantes. Para el tratamiento sostenible de ambientes contaminados, la biorremediación se acepta como el método más

eficiente, económico y amigable con el medio ambiente (Patel *et al.* 2022).

Ha tenido mucho interés el estudio a nivel mundial sobre distintas estrategias para remoción de mercurio de los sistemas naturales, debido a la capacidad que tiene este metal para biomagnificarse fuertemente por medio de la cadena trófica (Beauvais-Flück *et al.* 2017, Bonanno *et al.* 2017a). Por tal motivo se están utilizando plantas para los procesos de fitorremediación (Medina-Marcos *et al.* 2014), siendo muy aceptada la utilización de las macrófitas como mecanismo de reducción de los contaminantes en el ambiente (Tabla 1), por su gran producción de biomasa, junto con su capacidad de acumular metales pesados (Beauvais-Flück *et al.* 2017, Bonanno *et al.* 2017b, Bonanno *et al.* 2018).

Algunos estudios (Cardwell *et al.* 2002, Marrugo-Negrete *et al.* 2010, Beauvais-Flück *et al.* 2017) afirman que las macrófitas tiene más capacidad de acumular concentraciones de mercurio en sus tejidos que los que se encuentran depositados en los sedimentos. Además, es relevante mencionar que los órganos subterráneos de las plantas (raíces y rizoma) tienden a captar y acumular niveles más altos de metales pesados que los otros órganos (Bonanno 2012, Cicero-Fernández *et al.* 2017). Existen muchas hipótesis que tratan de explicar la razón del porqué los metales se acumulan sobre todo en estos órganos; la primera, es que exista un sistema de tolerancia de la planta que evite que los metales invadan con mayor fuerza o facilidad otras de sus partes (Hozhina *et al.* 2001, Bonanno *et al.* 2017a). Otra hipótesis indica que las raíces de las macrófitas están cubiertas de muchas bacterias que favorecen el proceso de metilación (Achá *et al.* 2005). Otros estudios afirman que se debe a la capacidad interna de desintoxicación de las raíces, o más específicamente, en las células que conforman las paredes de este órgano, que tienen espacios de aire intercelular que se caracterizan por presentar parénquima en la corteza de los órganos subterráneos, permitiéndole mayor



Tabla 1. Especies de macrófitas con potencial de fitorremediación en Colombia

Especies de macrófitas	Variables y metales	Referencia
<i>Limnocharis flava</i>	Mercurio Variables fisicoquímicas del agua	Marrugo-Negrete J, <i>et al.</i> 2017
<i>Eichhornia crassipes</i>	Mercurio en humanos, pescados, agua, macrófitas y muestras de sedimentos	Olivero-Verbel J, <i>et al.</i> 2015
<i>Pistia stratiotes</i> L. y <i>Eichhornia crassipes</i> (Mart.) Solms.) y <i>Cyperus longus</i> L., <i>Marsilea quadrifolia</i> L., <i>Neptunia oleracea</i> Lour., <i>Ludwigia helminthorrhiza</i> (Mart.) H. Hara, <i>Polygonum punctatum</i> Elliott y <i>Eichhornia azurea</i> (Sw.) Kunth.	Hg, Cu, Pb, Cd, y Zn	Romero SR, <i>et al.</i> 2011
<i>Eichhornia crassipes</i>	Mercurio	Marrugo-Negrete J, <i>et al.</i> 2010
<i>Neptunia oleracea</i> Lour, <i>Eichhornia crassipes</i> (Mart.) Solms y <i>Paspalum repens</i> Bergius	Mercurio y níquel	Torres MPT, <i>et al.</i> 2019
<i>Eichhornia crassipes</i>	Mercurio	Domínguez MC, <i>et al.</i> 2016
<i>Eichornia crassipes</i>	Mercurio	Olivero J, Solano B. 1998.
<i>Salvinia biloba</i>	Plomo (Pb <sup>2+</sup> )	Tello Zevallos W, <i>et al.</i> 2015
<i>Limnocharis flava</i>	Mercurio	Marrugo-Negrete J, <i>et al.</i> 2017
<i>Eleocharis elegans</i>	Mercurio	Gutiérrez-Mosquera H. <i>et al.</i> 2021

acumulación de elementos tóxicos (Hall 2002, Mishra *et al.* 2008).

Sin contradecir el párrafo anterior, es importante mencionar que existen muchas especies de macrófitas, a las que se les encuentran altas concentraciones de metales en sus raíces y concentraciones similares en hojas, generando así un flujo constante entre esos dos órganos, independientemente de las concentraciones en el sedimento (Jiménez *et al.* 2011). A este flujo de contaminantes se le denomina factor de traslocación (FT), y se puede decir que es una medida del transporte interno de un metal e indica la relación entre la concentración acumulada en la parte aérea y la raíz de una planta (Mattina *et al.* 2003). Las especies que tienen esta estrategia poseen la capacidad de adaptarse y desarrollarse

en ambientes altamente contaminados (Fischerová *et al.* 2006, Bonanno y Cirelli 2017). Lo contrario ocurre con las especies de plantas donde es bajo el factor de translocación de sustancias tóxicas desde la raíz a los órganos aéreos (inferior a la unidad), lo que quiere decir que estas plantas son menos adecuadas para realizar fitoextracción y/o fitorremediación (Yoon *et al.* 2006, Pandey 2012, Bonanno *et al.* 2018a).

La capacidad de acumulación de metales de las macrófitas depende de varios factores: el principal es el tipo de especie de la planta, la clase de oligoelemento y las formas de vida (Bonanno *et al.* 2018b). Algunos autores afirman que las especies emergentes tienen una mayor capacidad bioacumulativa de metales, porque pueden capturar por medio de las hojas, los ele-



mentos tóxicos directamente de la columna de agua contaminada y por medio de las raíces los materiales dañinos depositados en el sedimento (Bonanno *et al.* 2017a, Marrugo-Negrete *et al.* 2010). A este proceso se le denomina factor de bioconcentración (FBC) y se utiliza para medir la capacidad de captación de un metal por una planta en relación con su concentración en el ambiente (Audet y Charest 2007, Olivares y Peña 2009).

Es difícil tratar de explicar los factores que se involucran en la captación y acumulación de metales por las macrófitas, porque este proceso depende de muchas variables, e inclusive difiere entre las plantas, incluso entre especies congéneras (Bonanno *et al.* 2018b). Sin embargo, existen múltiples componentes que nos ayudan a entender este proceso, por ejemplo, la estacionalidad del lugar, porque durante los meses de verano los niveles de las aguas bajan y las raíces de las plantas están más cercas y/o fijas en el sedimento por lo que son capaces de acumular cantidades significativas de metales (Hadad y Maine 2007, Marrugo-Negrete *et al.* 2010), además, en la estación seca del año, el aumento de la temperatura acelera la actividad de metilación y por consiguiente las plantas tienen mayor disponibilidad de Hg en el ambiente (Ullrich *et al.* 2001). Lo contrario ocurre en invierno, donde la capacidad de acumulación decrece, debido a la disminución de la biomasa por el aumento del nivel de las aguas (Hadad y Maine 2007). Otro factor muy importante es la edad de las plantas, pues con su envejecimiento la sensibilidad a los oligoelementos aumenta la capacidad de bioacumulación (Kabata-Pendias 2010).

Además, existen otras variables que influyen en la bioconcentración y translocación de elementos tóxicos en las plantas, tales como el pH, la temperatura, la salinidad y el contenido de material orgánico (Yang y Ye 2009). Hay estudios que afirman que el azufre en los suelos o sedimentos actúa como un estimulante para que las plantas acumulen Hg en sus tejidos (Moreno *et al.* 2005,

Muddarisna *et al.* 2013).

En Colombia, como en muchas partes del mundo, se han buscado estrategias para disminuir las concentraciones de mercurio en el ambiente, y con mayor esfuerzo en los ecosistemas acuáticos (Reyes *et al.* 2016). Para Colombia se han descrito las siguientes especies de macrófitas que tienen la capacidad de remover metales: *Salvinia biloba*, es una especie muy resistente con alta capacidad adaptativa a distintos ambientes, e incluso en condiciones de invernadero, tiene una gran capacidad de absorción de metales (Tello-Zevallos *et al.* 2016); el género *Salvinia* ha sido utilizado ampliamente para procesos de biorremediación (Olguín *et al.* 2005, Suñe *et al.* 2007, Sánchez-Galván *et al.* 2008, Dhir 2009, Tello-Zevallos *et al.* 2015, Tello-Zevallos *et al.* 2016). La especie *Limnocharis flava*, es una planta con alta producción de biomasa (Marrugo-Negrete *et al.* 2017), es adecuada para la utilización en proceso de remoción de mercurio y otros metales (Abhilash *et al.* 2009, Marrugo-Negrete *et al.* 2017). *Eichhornia crassipes* es una planta acuática dulceacuícola, común en Sur América y que se desarrolla con facilidad en zonas pantanosas (aguas lénticas), presenta una alta tasa de reproducción y un denso sistema radicular, ha sido una especie muy estudiada en Colombia (Tabla 1) y ha tenido muy buenos resultados en los procesos de fitorremediación (Olivero y Solano 1998, Marrugo-Negrete *et al.* 2010, Romero *et al.* 2011 y Olivero-Verbel *et al.* 2015, Torres *et al.* 2019). *E. crassipes* es una especie que se puede utilizar para fitorremediación por su alta ramificación en sus raíces; además, puede alcanzar porcentajes de metilación 30 veces más alto que en sedimentos, esto se debe a que las raíces están cubiertas de muchas bacterias que aceleran este proceso (Guimaraes *et al.* 2000, Mauro *et al.* 2001). *Ludwigia helminthorrhiza* y *Polygonum punctatum*, son especies que crecen en humedales y que pueden servir como plantas fitorremediadoras de ecosistemas contaminados

con metales pesados (Romero *et al.* 2011). Las especies *Typha latifolia*, *Phragmites australis*, *Phragmites karka*, y otras fueron resaltadas en el trabajo de revisión de Kataki *et al.* (2021). Por otro lado, en el departamento del Chocó es escaso el estudio sobre la capacidad acumulativa de las plantas, porque solo se documentó el trabajo realizado por Gutiérrez-Mosquera *et al.* (2021) en la especie *Eleocharis elegans*, por esto se recomienda iniciar procesos investigativos sobre la capacidad de absorción de las plantas de esta región.

## Conclusiones

En el departamento del Chocó, Colombia, la extracción aluvial es la actividad que más genera contaminación por mercurio en el ambiente. Debido al uso indiscriminado, el escaso control que ejercen las autoridades ambientales y la falta de conciencia de los mineros hace de esta región uno de los sitios con mayor contaminación mercurial en Colombia lo que evidencia una relación directa entre la presencia de la minería ilegal y la contaminación con mercurio en los ecosistemas.

La utilización de macrófitas como estrategia de fitorremediación es una buena alternativa para la descontaminación de sitios intervenidos con minería; es importante, generar más estudios que evalúen el potencial fitorremediador de las especies de plantas acuáticas presentes en el departamento del Chocó, porque se carece de información que permita conocer el potencial bioacumulador de metales y otras sustancias en las especies de macrófitas de la región, para poder utilizarse como estrategia de fitorremediación de áreas contaminadas con metales pesados.

## Literatura citada

- Abhilash PC, Pandey VC, Srivastava P, Rakesh PS, Chandran S, Singh N, *et al.* 2009. Phytofiltration of cadmium from water by *Limnocharis flava* (L.) Buchenau grown in free-floating culture system. *Journal of Hazardous Materials*. 170 (2-3): 791-7. <https://bit.ly/3Qshjch>
- Achá D, Iñiguez V, Roulet M, Guimarães, JRD, Luna R, Alanoca L, Sánchez S. 2005. Sulfate-reducing bacteria in floating macrophyte rhizospheres from an Amazonian floodplain lake in Bolivia and their association with Hg methylation. *Appl Environ Microbiol*. 71 (11): 7531-5. <https://bit.ly/47Dw7Mn>
- Adjorlolo-Gasokpoh A, Golow A, Kambo-Dorsa J. 2012. Mercury in the surface soil and cassava, *Manihot esculenta* (flesh, leaves and peel) near goldmines at Bogoso and Prestea, Ghana. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 89 (6): 1106-10. <https://bit.ly/3FN0I3j>
- Agudelo-Echavarría DM, Olid C, Molina-Pérez F, Vallejo-Toro PP, García-Orellana J. (2020). Historical reconstruction of small-scale gold mining activities in tropical wetland sediments in Bajo Cauca-Antioquia, Colombia. *Chemosphere*. 126733. <https://bit.ly/3tYVc5H>
- Amat-García GD, Blanco-Vargas E, Reyes-Castillo P. 2004. Lista de especies de los escarabajos pasálidos (Coleoptera: Passalidae) de Colombia. *Biota Colombiana*. 5 (2): 173-81. <https://bit.ly/473GiK4>
- Araújo PRM, Biond CM, do Nascimento CWA, da Silva FBV, Álvarez AM. 2019. Bioavailability and sequential extraction of mercury in soils and organisms of a mangrove contaminated by a chlor-alkali plant. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 183: 109469. <https://bit.ly/3QJFmVx>
- Audet P, Charest C. 2007. Heavy metal phytoremediation from a meta-analytical perspective. *Environmental Pollution*. 147 (1): 231-7. <https://bit.ly/3MsvMnm>
- Azubuiké CC, Chikere CB, Okpokwasili GC. 2016. Bioremediation techniques-classification based on site of application: principles, advantages, limitations and prospects. *World J Microbiol Biotechnol*. 32 (11): 180. <https://bit.ly/4713qcf>
- Restrepo O, Aristizábal G, Pimente MS, Flórez CA, Argumedo CE. 2021. Waste management and the elimination of mercury in tailings from artisanal and small-scale gold mining in the Andes municipality of Antioquia, Colombia. *International Journal of Mine Water*. 40 (1): 250-6. <https://bit.ly/3QMhznQ>
- Banco Mundial, EGPS, PACT. 2019. Estado del sector minero artesanal y de pequeña escala. Washington, DC: Banco Mundial. <https://bit.ly/3QMTfSY>
- Beauvais-Flück R, Gimbert F, Méhault O, Cosio C. 2017. Trophic fate of inorganic and methyl-mercury in a macrophyte-chironomid food chain. *J Hazard Mater*. 338: 140-7. <https://bit.ly/40nYQCh>
- Beltrán-Pineda ME, Gómez-Rodríguez AM. 2016.



- Biorremediación de metales pesados cadmio (Cd), cromo (Cr) y mercurio (Hg), mecanismos bioquímicos e ingeniería genética: una revisión. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*. 12 (2): 172-97. <https://bit.ly/3QtRXe0>
- Berrow ML, Reaves GA. 1984. Background levels of trace elements in soils and water. In *International Conference on Environmental Contamination*. Edimburgo: CEP Consultants. pp. 333-40. <https://bit.ly/47jNiSH>
- Betancur-Corredor B, Loaiza-Usuga JC, Denich M, Borgemeister C. 2018. Gold mining as a potential driver of development in Colombia: Challenges and opportunities. *Journal of Cleaner Production*. 199: 538-53. <https://bit.ly/460DYSW>
- Bonanno G. 2012. *Arundo donax* as a potential biomonitor of trace element contamination in water and sediment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 80: 20-7. <https://bit.ly/3FJdcDQ>
- Bonanno G, Cirelli GL. 2017. Comparative analysis of element concentrations and translocation in three wetland congener plants: *Typha domingensis*, *Typha latifolia* and *Typha angustifolia*. *Ecotoxicol Environ Saf*. 143: 92-101. <https://bit.ly/49zIESK>
- Bonanno G, Vymazal J. 2017. Compartmentalization of potentially hazardous elements in macrophytes: insights into capacity and efficiency of accumulation. *Journal of Geochemical Exploration*. 181: 22-30. <https://bit.ly/49opLBR>
- Bonanno G, Orlando-Bonaca M. 2018. Trace elements in Mediterranean seagrasses and macroalgae. A review. *Science of The Total Environment*. 618: 1152-9. <https://bit.ly/3QvIQcX>
- Bonanno G, Vymazal J, Cirelli GL. 2018a. Translocation, accumulation and bioindication of trace elements in wetland plants. *Science of The Total Environment*. 631: 252-61. <https://bit.ly/3swCx0B>
- Bonanno G, Vymazal J, Cirelli GL. 2018b. Translocation, accumulation and bioindication of trace elements in wetland plants. *Sci Total Environ*. 631-632: 252-61. <https://bit.ly/3sp2XBx>
- Calao CR, Marrugo JL. 2015. Efectos genotóxicos asociados a metales pesados en una población humana de la región de La Mojana, Colombia, 2013. *Biomédica*. 35: 139-51. <https://bit.ly/3QtTVuU>
- Calao CR, Bravo AG, Paternina-Urbe R, Marrugo-Negrete J, Díez S. 2021. Occupational human exposure to mercury in artisanal small-scale gold mining communities of Colombia. *Environ Int*. 146: 106216. <https://bit.ly/460XPBe>
- Camizuli E, Scheiffler R, Garnier S, Monna F, Losno R, Gourault C, *et al*. 2018. Trace metals from historical mining sites and past metallurgical activity remain bioavailable to wildlife today. *Scientific Reports*. 8 (1): 1-11. <https://bit.ly/3sm9Svf>
- Cardwell AJ, Hawker DW, Greenway, M. 2002. Metal accumulation in aquatic macrophytes from southeast Queensland, Australia. *Chemosphere*. 48 (7): 653-63. <https://bit.ly/49m8Cc9>
- Carranza-López L, Caballero-Gallardo K, Cervantes-Ceballos L, Turizo-Tapia A, Olivero-Verbel J. 2019. Multicompartment mercury contamination in major gold mining districts at the department of Bolívar, Colombia. *Arch Environ Contam Toxicol*. 76 (4): 640-9. <https://bit.ly/47ILVD7>
- Casas IC, Gómez E, Rodríguez LM, Girón SL, Mateus JC. 2015. Hacia un plan nacional para el control de los efectos del mercurio en la salud en Colombia. *Biomédica*. 35: 8-19. <https://bit.ly/3SsHBO8>
- Castaño OV, Cárdenas G, Hernández EJ, Castro F. 2004. Reptiles en el Chocó Biogeográfico. En: Rangel-Ch. JO (ed.). *Colombia diversidad biótica IV: El Chocó Biogeográfico/Costa Pacífica*. pp. 599-632. Bogotá: Instituto de Ciencias Naturales-Conservación Internacional. <https://bit.ly/3QuUFAd>
- Cicero-Fernández D, Peña-Fernández M, Expósito-Camargo JA, Antizar-Ladislao B. 2017. Long-term (two annual cycles) phytoremediation of heavy metal-contaminated estuarine sediments by *Phragmites australis*. *N Biotechnol*. 38: 56-64. <https://bit.ly/475FDrx>
- Clarkson TW, Magos L. 2006. The toxicology of mercury and its chemical compounds. *Crit Rev Toxicol*. 36 (8): 609-62. <https://bit.ly/3slymVl>
- Cordy P, Veiga MM, Salih I, Al-Saadi S, Console S, García O, *et al*. 2011. Mercury contamination from artisanal gold mining in Antioquia, Colombia: The world's highest per capita mercury pollution. *Sci Total Environ*. 410-411: 154-60. <https://bit.ly/3smyOml>
- Gallo JA, Vargas GL, Velasco M, Gutiérrez L, Pérez EH. 2021a. Use of the gray water footprint as an indicator of contamination caused by artisanal mining in Colombia. *Resources Policy*. 73: 102197. <https://bit.ly/3Su9THZ>
- Gallo JA, Pérez EH, Figueroa R, Figueroa A. 2021b. Water quality of streams associated with artisanal gold mining; Suárez, Department of Cauca, Colombia. *Heliyon*. 7 (6): e07047. <https://bit.ly/40sSf9v>
- Dhir B. 2009. *Salvinia*: an aquatic fern with potential use in phytoremediation. *Environ We Int J Sci Tech*. 4: 23-7.
- Díaz-Arriaga FA. 2014. Mercurio en la minería del oro: impacto en las fuentes hídricas destinadas para consumo humano. *Rev Salud Pública*. 1 (6): 947-57. <https://bit.ly/3SuNZVo>
- Domínguez MC, Gómez S, Ardila AN. 2016. Fitorremediación de mercurio presente en aguas residuales provenientes de la industria minera. *UGCiencia Ingeniería*. 22 (1): 227-37. <https://bit.ly/3Msi588>



- Eqani SAMAS, Bhowmik AK, Qamar S, Shah STA, Sohail M, Mulla SI, Shen H. 2016. Mercury contamination in deposited dust and its bioaccumulation patterns throughout Pakistan. *Sci Total Environ.* 569-570: 585-93. <https://bit.ly/470u2tT>
- Falagán C, Graill BM, Johnson DB. 2017. New approaches for extracting and recovering metals from mine tailings. *Minerals Engineering.* 106: 71-8. <https://bit.ly/3SwN46Q>
- Fischerová Z, Tlustoš P, Száková J, Šichorová K. 2006. A comparison of phytoremediation capability of selected plant species for given trace elements. *Environmental Pollution.* 144 (1): 93-100. <https://bit.ly/3QNpmlh>
- Gaioli M, Amoedo D, González D. 2012. Impacto del mercurio sobre la salud humana y el ambiente. *Arch Argent Pediatr.* 110 (3): 259-64. <https://bit.ly/40zcNxx>
- Galeano-Páez C, Espitia-Pérez P, Jiménez-Vidal L, Pastor-Sierra K, Salcedo-Arteaga S, Hoyos-Giraldo LS, *et al.* 2021. Dietary exposure to mercury and its relation to cytogenetic instability in populations from “La Mojana” region, northern Colombia. *Chemosphere.* 265: 129066. <https://bit.ly/3smi4eS>
- Gerson JR, Driscoll CT, Hsu-Kim H, Bernhardt ES. 2018. Senegalese artisanal gold mining leads to elevated total mercury and methylmercury concentrations in soils, sediments, and rivers. *Elementa Sci Anth.* 6: 11. <https://bit.ly/3swsl8i>
- Gracia L, Marrugo JL, Alvis EM. 2010. Contaminación por mercurio en humanos y peces en el municipio de Ayapel, Córdoba, Colombia, 2009. *Rev Fac Nac Salud Pública.* 28 (2): 1-7. <https://bit.ly/47mhhcU>
- Guimaraes JRD, Meili M, Hylander LD, Silva EDC, Roulet M, Mauro JBN, *et al.* (2000). Mercury net methylation in five tropical flood plain regions of Brazil: high in the root zone of floating macrophyte mats but low in surface sediments and flooded soils. *Sci Total Environ.* 261 (1-3): 99-107. <https://bit.ly/3MtacPJ>
- Gutiérrez-Mosquera H, Sujitha SB, Jonathan MP, Sarkar SK, Medina-Mosquera F, Ayala-Mosquera H, *et al.* 2018. Mercury levels in human population from a mining district in Western Colombia. *Journal of Environmental Sciences.* 68: 83-90. <https://bit.ly/46XUrIT>
- Gutiérrez-Mosquera H, Marrugo-Negrete J, Díez S, Morales-Mira G, Montoya-Jaramillo, LJ, Jonathan MP. 2020. Distribution of chemical forms of mercury in sediments from abandoned ponds created during former gold mining operations in Colombia. *Chemosphere.* 258: 127319. <https://bit.ly/463afst>
- Gutiérrez-Mosquera H, Marrugo-Negrete J, Díez S, Morales-Mira G, Montoya-Jaramillo, LJ, Jonathan MP. 2021. Mercury distribution in different environmental matrices in aquatic systems of abandoned gold mines, Western Colombia: Focus on human health. *Journal of Hazardous Materials.* 404 (Part A): 124080. <https://bit.ly/472ZwPU>
- Hadad HR, Maine MA. 2007. Phosphorous amount in floating and rooted macrophytes growing in wetlands from the Middle Paraná River floodplain (Argentina). *Ecological Engineering.* 31 (4): 251-8. <https://bit.ly/3u1lft8>
- Hall JL. 2002. Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance. *Journal of Experimental Botany.* 53 (366): 1-11. <https://bit.ly/3QktwQg>
- Halland H, Lokanc M, Nair A. 2016. El sector de las industrias extractivas: Aspectos esenciales para economistas, profesionales de las finanzas públicas y responsables de políticas. World Bank Publications. 164 pp.
- Hilson G. 2016. Farming, small-scale mining and rural livelihoods in Sub-Saharan Africa: A critical overview. *The Extractive Industries and Society.* 3 (2): 547-63. <https://bit.ly/3QqaE2s>
- Horvat M, Tratnik JS, Miklavčič A. 2012. Mercury: Biomarkers of exposure and human biomonitoring. In: *Biomarkers and Human Biomonitoring.* pp. 381-417.
- Hozhina EI, Khramov AA, Gerasimov PA, Kumarkov AA. 2001. Uptake of heavy metals, arsenic, and antimony by aquatic plants in the vicinity of ore mining and processing industries. *Journal of Geochemical Exploration.* 74 (1-3): 153-62. <https://bit.ly/3MsrZGv>
- Jiménez MN, Bacchetta G, Casti M, Navarro FB, Lallena AM, Fernández-Ondoño E. 2011. Potential use in phytoremediation of three plant species growing on contaminated mine-tailing soils in Sardinia. *Ecological Engineering.* 37 (2): 392-8. <https://bit.ly/3Qszf6L>
- Kabata-Pendias A. 2010. Trace elements in soils and plants. Boca Raton: CRC Press. <https://bit.ly/3FSmpJO>
- Kataki S, Chatterjee S, Vairale MG, Dwivedi SK, Gupta DK. 2021. Constructed wetland, an eco-technology for wastewater treatment: A review on types of wastewaters treated and components of the technology (macrophyte, biofilm and substrate). *J Environ Manage.* 283: 111986. <https://bit.ly/464VTrF>
- Kpan JD, Opoku BK, Anukwah GD. 2014. Heavy metal pollution in soil and water in some selected towns in Dunkwa-on-Offin District in the Central Region of Ghana as a result of small-scale gold mining. *Journal of Agricultural Chemistry and Environment.* 3: 40-7. <https://bit.ly/3FLxT23>
- Lara-Rodríguez JS. 2018. All that glitters is not gold or platinum: Institutions and the use of mercury in mining in Chocó, Colombia. *The Extractive Industries and Society.* 5 (3): 308-18. <https://bit.ly/3SvrpM5>
- LeDuc DL, Terry N. 2005. Phytoremediation of toxic





- trace elements in soil and water. *J Ind Microbiol Biotechnol.* 32 (11-12): 514-20. <https://bit.ly/3FPN6Pm>
- Leal León, C. 2009. The Chocó Pacifico Mining Company and the Platinum Boom in Colombia, 1897-1930. *Historia Crítica.* 39: 150-64. <https://bit.ly/3QTGWTw>
- Llano Vásquez JD. 2021. Metales pesados en suelos bajo la influencia de la minería aurífera en los departamentos de Antioquia, Bolívar y Chocó. Trabajo de grado. Montería: Ciencias Ambientales, SUE-Caribe. <https://bit.ly/40tPeFZ>
- Llanos W, Kocman D, Higuera P, Horvat M. 2011. Mercury emission and dispersion models from soils contaminated by cinnabar mining and metallurgy. *Journal of Environmental Monitoring.* 13 (12): 3460-8. <https://bit.ly/3Sx74WY>
- López-Barrera EA, Barragán-González RG. 2016. Metals and metalloids in eight fish species consumed by citizens of Bogotá DC, Colombia, and potential risk to humans. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A.* 79 (5): 232-43. <https://bit.ly/3u1odO5>
- Male YT, Reichelt-Brushett AJ, Pocock M, Nanlohy A. 2013. Recent mercury contamination from artisanal gold mining on Buru Island, Indonesia-Potential future risks to environmental health and food safety. *Marine Pollution Bulletin.* 77 (1-2): 428-33. <https://bit.ly/4638TxJ>
- Maqueda Gálvez AP. 2003. Fitorremediación de suelos contaminados con metales pesados. Repositorio Nacional CONACYT. <https://bit.ly/47qsgm3>
- Marrugo-Negrete J, Benítez LN, Olivero-Verbel J, Lans E, Vázquez F. 2010. Spatial and seasonal mercury distribution in the Ayapel Marsh, Mojana region, Colombia. *Int J Environ Health Res.* 20 (6): 451-9. <https://bit.ly/45SJarO>
- Marrugo-Negrete J, Enamorado-Montes G, Durango-Hernández J, Pinedo-Hernández J, Díez S. 2017. Removal of mercury from gold mine effluents using *Limnocharis flava* in constructed wetlands. *Chemosphere.* 167: 188-92. <https://bit.ly/3FOltGp>
- Marrugo-Negrete J, Durango-Hernández J, Díaz-Fernández L, Urango-Cárdenas I, Araméndiz-Tatis H, Vergara-Flórez V, et al. 2020. Transfer and bioaccumulation of mercury from soil in cowpea in gold mining sites. *Chemosphere.* 250: 126142. <https://bit.ly/3MwfGt5>
- Marrugo-Madrid S, Turull M, Montes GE, Pico MV, Marrugo-Negrete JL, Díez S. 2021. Phytoremediation of mercury in soils impacted by gold mining: a case-study of Colombia. *Bioremediation for Environmental Sustainability.* 145-60. <https://bit.ly/3QMzyKV>
- Mattina MI, Lannucci-Berger W, Musante C, White JC. 2003. Concurrent plant uptake of heavy metals and persistent organic pollutants from soil. *Environmental Pollution.* 124: 375-8. <https://bit.ly/46iP6e5>
- Mauro JBN, Guimarães JRD, Melamed R. 2001. Mercury methylation in macrophyte roots of a tropical lake. *Water, Air, and Soil Pollution.* 127 (1): 271-80. <https://bit.ly/3QMqQkA>
- Medina-Marcos KD, Montano Chávez YN. 2014. Determinación del factor de bioconcentración y traslocación de metales pesados en el *Juncus arcticus* Willd. y *Cortaderia rudiusscula* Stapf, de áreas contaminadas con el pasivo ambiental minero Alianza-Ancash 2013. Trabajo de grado. Huaraz-Ancash: Facultad de Ciencias del Ambiente, Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional "Santiago Antúnez de Mayolo". 151 pp. <https://bit.ly/46YdB1h>
- Miller CL, Watson DB, Lester BP, Lowe KA, Pierce EM Liang L. 2013. Characterization of soils from an industrial complex contaminated with elemental mercury. *Environ Res.* 125: 20-9. <https://bit.ly/3Mz9NeG>
- Mishra VK, Upadhyaya AR, Pandey SK, Tripathi BD. 2008. Heavy metal pollution induced due to coal mining effluent on surrounding aquatic ecosystem and its management through naturally occurring aquatic macrophytes. *Bioresour Technol.* 99 (5): 930-6. <https://bit.ly/472rk7d>
- Mojica JI, Usma JS, Galvis G. 2004. Peces dulceacuicolas en el Chocó Biogeográfico de Colombia. Documento N° 21403, CO-BAC, Bogotá.
- Montoya AJ, Lena JC, Windmüller CC. 2019. Adsorption of gaseous elemental mercury on soils: Influence of chemical and/or mineralogical characteristics. *Ecotoxicology and Environmental Safety.* 170 (7): 98-106. <https://bit.ly/3u4k2kD>
- Moreno FN, Anderson CW, Stewart RB, Robinson BH, Ghomshei M, Meech JA. 2005. Induced plant uptake and transport of mercury in the presence of sulphur-containing ligands and humic acid. *New Phytol.* 166 (2): 445-54. <https://bit.ly/49pKJjN>
- Morosini C, Terzaghi E, Raspa G, Zanardini E, Anelli S, Armiraglio S, et al. 2021. Mercury vertical and horizontal concentrations in agricultural soils of a historically contaminated site: Role of soil properties, chemical loading, and cultivated plant species in driving its mobility. *Environ Pollut.* 285: 117467. <https://bit.ly/3sp8bNz>
- Medina FM, Ayala HJ. 2011. Determinación de la contaminación mercurial en personas vinculadas con la minería de oro en el Distrito Minero del San Juan, departamento del Chocó, Colombia. *Revista Bioetnia.* 8 (2): 195-206. <https://bit.ly/472Go4B>
- Muddarisna N, Krisnayanti BD, Utami SR, Handayanto E. 2013. Phytoremediation of mercury-contaminated soil

- using three wild plant species and its effect on maize growth. *Applied Ecology and Environmental Sciences*. 1 (3): 27-32. <https://bit.ly/3FLOfYa>
- Muñoz-Saba Y, Alberico M. 2004. Mamíferos en el Chocó Biogeográfico. En: Rangel JO (ed.). *Diversidad Biótica IV. El Chocó Biogeográfico/Costa Pacífica*. pp. 559-98.
- Romero SE, Marrugo-Negrete JL, Arias JE, Hadad HR, Maine MA. 2011. Hg, Cu, Pb, Cd, and Zn accumulation in macrophytes growing in tropical wetlands. *Water, Air, and Soil Pollution*. 216 (1): 361-73. <https://bit.ly/40pvFyP>
- Olguín EJ, Sánchez-Galván G, Pérez-Pérez T, Pérez-Orozco A. 2005. Surface adsorption, intracellular accumulation and compartmentalization of Pb (II) in batch-operated lagoons with *Salvinia minima* as affected by environmental conditions, EDTA and nutrients. *J Ind Microbiol Biotechnol*. 32 (11-12): 577-86. <https://bit.ly/47EWS31>
- Olivares E, Peña E. 2009. Bioconcentración de elementos minerales en *Amaranthus dubius* (bledo, pira), creciendo silvestre en cultivos del Estado Miranda, Venezuela, y utilizado en alimentación. *INCI*. 34 (9): 604-11. <https://bit.ly/3SrMmHJ>
- Olivero J, Solano B. 1998. Mercury in environmental samples from a waterbody contaminated by gold mining in Colombia, South America. *Sci Total Environ*. 217 (1-2): 83-9. <https://bit.ly/471ljaQ>
- Olivero-Verbel J, Young-Castro F, Caballero-Gallardo K. 2014. Contaminación por mercurio en aire del distrito minero de San Martín de Loba en el departamento de Bolívar, Colombia. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 30 (1): 7-13. <https://bit.ly/3MwK9a9>
- Olivero-Verbel J, Caballero-Gallardo K, Turizo-Tapia A. 2015. Mercury in the gold mining district of San Martín de Loba, South of Bolívar (Colombia). *Environ Sci Pollut Res*. 22 (8): 5895-907. <https://bit.ly/463vQB3>
- Olsen M, Fjeld E, Lydersen E. 2019. The influence of a submerged meadow on uptake and trophic transfer of legacy mercury from contaminated sediment in the food web in a brackish Norwegian fjord. *Science of The Total Environment*. 654: 209-17. <https://bit.ly/3QMpDF1>
- Padmavathiamma PK, Li LY. 2007. Phytoremediation technology: hyper-accumulation metals in plants. *Water, Air, and Soil Pollution*. 184 (1): 105-26. <https://bit.ly/3SsXh40>
- Palacios-Torres Y, Caballero-Gallardo K, Olivero-Verbel J. 2018. Mercury pollution by gold mining in a global biodiversity hotspot, the Chocó Biogeographic region, Colombia. *Chemosphere*. 193: 421-30.
- Palacios-Torres Y, de la Rosa J, Olivero-Verbel J. 2020. Trace elements in sediments and fish from Atrato River: an ecosystem with legal rights impacted by gold mining at the Colombian Pacific. *Environmental Pollution*. 256: 113290. <https://bit.ly/3QOfnfJ>
- Pandey VC. 2012. Phytoremediation of heavy metals from fly ash pond by *Azolla caroliniana*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 82: 8-12. <https://bit.ly/3sns9s5>
- Patel AK, Singhania RR, Albarico FPJB, Pandey A, Chen C-W, Dong C-D. 2022. Organic wastes bioremediation and its changing prospects. *Science of The Total Environment*. 824: 153889. <https://bit.ly/3SvyBYx>
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. 2013. *Global mercury assessment 2013: sources, emissions, releases and environmental transport*. 44 pp. Ginebra: ONU. <https://bit.ly/3sBWPWR>
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. 2018. *Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Evaluación mundial del mercurio 2018. Principales conclusiones*. Ginebra: ONU. 6 pp. <https://bit.ly/49jCfLn>
- Kumari S, Jamwal R, Mishra N, Singh DK. 2020. Recent developments in environmental mercury bioremediation and its toxicity: A review. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*. 13: 100283. <https://bit.ly/47ph9ty>
- Raimann X, Rodríguez L, Chávez P, Torrejón C. 2014. Mercurio en pescados y su importancia en la salud. *Revista Médica de Chile*. 142 (9): 1174-80. <https://bit.ly/47vGXo0>
- Ramírez-Morales D, Rodríguez-Artavia B, Sáenz-Vargas W, Sánchez-Gutiérrez R, Villalobos-González W, Mora-Barrantes JC. 2019. Minerías artesanales para la extracción de oro mediante el uso de mercurio: Estado del arte del impacto ambiental en los medios agua, aire y suelo. *Tecnología en Marcha*. 32 (3): 3-11. <https://bit.ly/3MyiO7s>
- Rangel-Ch JO, Rivera-Díaz O. 2004. *Diversidad y riqueza de espermatófitos en el Chocó Biogeográfico*. Colombia *Diversidad Biótica IV: el Chocó Biogeográfico/Costa Pacífica*. Bogotá: Instituto de Ciencias Naturales. pp. 83-104. <https://bit.ly/3Syk4bB>
- Reyes Y, Vergara I, Torres O, Díaz M, González EE. 2016. Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Ingeniería Investigación y Desarrollo*. 16 (2): 66-77. <https://bit.ly/47nNgt0>
- Rezania S, Taib SM, Din MF, Dahalan FA, Kamyab H. 2016. Comprehensive review on phytotechnology: heavy metals removal by diverse aquatic plants species from wastewater. *Journal of Hazardous Materials*. 318: 587-99. <https://bit.ly/3u3D8Yd>
- Rodríguez Arcila LV. 2019. Caracterización de la concentración de metales en agua, sedimentos y



- suelos a lo largo del río Quito (Chocó), zona de explotación de oro aluvial. Bogotá: Universidad de los Andes. Repositorio Institucional Séneca. <https://bit.ly/4744mwo>
- Rodríguez-Villamizar LA, Jaimes DC, Manquián-Tejos A, Sánchez LH. 2015. Human mercury exposure and irregular menstrual cycles in relation to artisanal gold mining in Colombia. *Biomedica*. 35: 38-45. <https://bit.ly/3QAYFE6>
- Salazar-Camacho C, Salas-Moreno M, Marrugo-Madrid S, Marrugo-Negrete J, Díez S. 2017. Dietary human exposure to mercury in two artisanal small-scale gold mining communities of northwestern Colombia. *Environment International*. 107: 47-54. <https://bit.ly/3QMTGMQ>
- Salazar-Camacho C, Salas-Moreno M, Paternina-Urbe R, Marrugo-Negrete J, Díez S. 2021. Mercury species in fish from a tropical river highly impacted by gold mining at the Colombian Pacific region. *Chemosphere*. 264 (part 2): 128478. <https://bit.ly/45Yxe7P>
- Sánchez-Arriaga DE, Cañón-Barriga JEC. 2010. Análisis documental del efecto de vertimientos domésticos y mineros en la calidad del agua del río Condoto (Chocó, Colombia). *Gestión y Ambiente*. 13 (3): 115-30. <https://bit.ly/3Qq3YkO>
- Sánchez-Galván G, Monroy O, Gómez J, Olguín EJ. 2008. Assessment of the hyperaccumulating lead capacity of *Salvinia minima* using bioadsorption and intracellular accumulation factors. *Water, Air, Soil Pollut*. 194 (1): 77-90. <https://bit.ly/3SrOyPt>
- Santa-Rios A, Barst BD, Tejada-Benitez L, Palacios-Torres Y, Baumgartner J, Basu N. 2021. Dried blood spots to characterize mercury speciation and exposure in a Colombian artisanal and small-scale gold mining community. *Chemosphere*. 266: 129001. <https://bit.ly/3u1sAbX>
- SIMCO. 2020. Sistema de Información Minero Colombiano. <https://bit.ly/49KKLDd>
- Suñe N, Sánchez G, Caffaratti S, Maine MA. 2007. Cadmium and chromium removal kinetics from solution by two aquatic macrophytes. *Environmental Pollution*. 145 (2): 467-73. <https://bit.ly/40soXIg>
- Tello Zevallos W, Loureiro DB, Reeves MC, Yujnovsky F, Salvatierra LM, Pérez LM. 2016. Evaluación de macrófitas autóctonas de flotación libre para su empleo en el tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados. *Energeia*. 14 (14): 30-6. <https://bit.ly/3u5fCdm>
- Tello Zevallos W, Salvatierra LM, Pérez LM. 2015. Evaluación de los mecanismos de eliminación de Pb<sup>2+</sup> en sistemas de fitorremediación en lotes operados con *Salvinia biloba* Raddi (acordeón de agua). *Energeia*. 13 (13): 9-17. <https://bit.ly/49meIct>
- Tierra Digna. 2016. La minería en Chocó, en clave de derechos. Bogotá: Red por la justicia ambiental en Colombia.
- Torres MP, Vitola D, Pérez A. 2019. Biorremediación de mercurio y níquel por bacterias endófitas de macrófitas acuáticas. *Rev Colomb Biotecnol*. 21 (2): 36-44. <https://bit.ly/3Qv4ZrE>
- Tubb D. 2015. Muddy decisions: gold in the Chocó, Colombia. *The Extractive Industries and Society*. 2 (4): 722-33. <https://bit.ly/47F0ySn>
- Ullrich SM, Tanton TW, Abdrashitova SA. 2001. Mercury in the aquatic environment: A review of factors affecting methylation. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 31 (3): 241-93. <https://bit.ly/471uxE2>
- UNEP Global Mercury Assessment. 2013. Sources, emissions, releases and environmental transport. Geneva: UNEP Chemicals Branch. <https://bit.ly/3FNILgT>
- United Nations Environment Program, 2013. United Nations Environment Program Global Mercury Assessment. Adaptation Gap Report. Geneva: UNEP Chemicals Branch. <https://bit.ly/40vWRvU>
- Vargas Licona SP, Marrugo Negrete JL. 2019. Mercurio, metilmercurio y otros metales pesados en peces de Colombia: Riesgo por ingesta. *Acta Biol Colomb*. 24 (2): 232-42. <https://bit.ly/3MzBNyF>
- Veiga MM, Angeloci-Santos G, Meech JA. 2014. Review of barriers to reduce mercury use in artisanal gold mining. *The Extractive Industries and Society*. 1 (2): 351-61. <https://bit.ly/47k1Emi>
- Vélez N, Bessudo S, Barragán-Barrera DC, Ladino F, Bustamante P, Luna-Acosta A. 2021. Mercury concentrations and trophic relations in sharks of the Pacific Ocean of Colombia. *Marine Pollution Bulletin*: 173 (part B): 113109. <https://bit.ly/3MwO7Qk>
- Viana Ríos R. 2018. Minería en América Latina y el Caribe, un enfoque socioambiental. *Rev UDCA Act Div Cient*. 21 (2): 617-37. <https://bit.ly/4653uGH>
- Vidal Durango JV, Marrugo Negrete JL, Jaramillo Colorado B, Pérez Castro LM. 2010. Remediation of contaminated soil with mercury using the guarumo (*Cecropia peltata*) trees. *Ing Desarro*. 27: 113-29. <https://bit.ly/46bdv5e>
- Yang J, Ye Z. 2009. Metal accumulation and tolerance in wetland plants. *Frontiers of Biology in China*. 4 (3): 282-8. <https://bit.ly/3FLNcaQ>
- Yoon J, Cao X, Zhou Q, Ma LQ. 2006. Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site. *Science of The Total Environment*. 368 (2-3): 456-64. <https://bit.ly/49hMdn4>



## Análisis temporal del comportamiento de la calidad fisicoquímica de la bahía de Buenaventura, Colombia

### Temporal analysis of the behavior of the physicochemical quality of Buenaventura Bay, Colombia

Yirlesa Murillo Hinestroza\* , Lady Vargas Porras\* 

#### Resumen

*Las zonas costeras son el lugar donde el continente se une con el mar y el agua dulce se mezcla con la salada, permaneciendo siempre en un constante estado de cambio. Con el objetivo de monitorear la calidad fisicoquímica y microbiológica de la bahía de Buenaventura como análisis de los diferentes aportes contaminantes urbanos, se tomaron muestras integradas a nivel vertical para el caso de aguas costera y horizontal para las aguas de la ribera del río Dagua. Se realizaron 3 muestreos en la zona de influencia del río Dagua hasta más de 200 metros sobre la bahía tanto en estado de marea baja como alta. En cada punto se hicieron mediciones in situ de variables fisicoquímicas como temperatura del agua, conductividad eléctrica, sólidos disueltos, salinidad, sólidos suspendidos, turbiedad, oxígeno disuelto, % de saturación, pH, y nutrientes como nitrato, nitrito, y fosfato, utilizando un colorímetro DR 900 y un multiparámetro HQ 40d. Adicionalmente se aplicó un análisis de componente principales para evaluar las tendencias de ordenación de los datos obtenidos en los muestreos realizados durante el período evaluado. Los resultados obtenidos durante el monitoreo permite inferir sobre la existencia de un posible mejoramiento en la calidad de las aguas costeras de Buenaventura, a pesar de que esta se encuentra influida por contaminantes que ingresan a través del río Dagua, los diferentes contenientes representados en descartadas domésticas y vertimientos líquidos aportados por los asentamientos humanos cercanos a la zona y otros originados por las diferentes actividades productivas, marinas y portuarias que se ejercen en el lugar.*

**Palabras clave:** Bahía, Buenaventura, Calidad del agua, Ecosistemas, Parámetros fisicoquímicos, Zonas costeras.

\* Grupo de Investigación en Conocimiento, Manejo y Conservación de los Ecosistemas del Chocó Biogeográfico, Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico (IIAP), Quibdó, Chocó, Colombia.

Autor correspondencia:  
yirdavid@hotmail.com

Recepción: Agosto 19, 2020  
Aprobación: Noviembre 26, 2020  
Editora asociada: Quesada-Martínez Z