



## Gestión ambiental de aguas residuales industriales con mercurio proveniente de la minería aurífera a nivel mundial: Estado del arte

Environmental management of industrial waste water with mercury from gold mining worldwide: State of art

Jennyfer Magdalia Garzón-Gutiérrez<sup>1</sup>, Juan Pablo Rodríguez-Miranda<sup>2</sup>

- 1 MSc. en Desarrollo sustentable y gestión ambiental. Universidad Distrital de Francisco José de Caldas. Bogotá D.C., Colombia. e-mail: jgarzonud7@gmail.co
- 2 Ingeniero Sanitario y Ambiental, candidato a PhD en Ingeniería. Profesor Asociado. Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales - Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C., Colombia. e-mail: jprodriguezmm@udistrital.edu.co

Fecha de recepción: Mayo 20 - 2014

Fecha de aceptación: Mayo 26 - 2015

---

Garzón JM, Rodríguez JP. Gestión ambiental de aguas residuales industriales con mercurio proveniente de la minería aurífera a nivel mundial: Estado del arte. *Rev Univ. salud.* 2015;17(1):132-144

---

### Resumen

**Introducción:** Dada la problemática social y ambiental generada por la minería aurífera artesanal y a pequeña escala (MAAPE), se lleva a cabo en el presente documento la revisión del estado del arte en cuanto a la gestión ambiental de aguas residuales con mercurio (Hg) a nivel mundial. **Materiales y métodos:** La revisión se realizó a partir de artículos científicos publicados durante los últimos cinco años, encontrando que las intervenciones para abordar los impactos por Hg en la MAAPE, se han enfocado en la creación de leyes de reducción y eliminación del uso del mercurio, las cuales han sido poco efectivas. **Resultados:** De esta manera, el 62% de los sitios evaluados, se encuentran en una categoría de gestión ambiental inexistente, el 8% se encuentra en etapa reactiva y el 31% en responsable, mientras que no se encontró ningún proceso en gestión proactiva o competitiva. De otra parte, se encontraron diversos estudios a nivel experimental sobre tratamientos de aguas residuales con Hg, que podrían ser adaptados a la gestión de los residuos líquidos provenientes de la MAAPE.

**Palabras clave:** Minería, oro, mercurio. (Fuente: DeCS, Bireme).

### Abstract

**Introduction:** Given the social and environmental problems caused by artisanal and small-scale gold mining (MAAPE), the review of the state of art was conducted in this paper in terms of environmental management of wastewater with mercury (Hg) worldwide. **Materials and methods:** The review was conducted from scientific articles published over the past five years. It was found that interventions to address the impacts by Hg in the MAAPE have been focused on the creation of laws to reduce and eliminate the use of mercury, which have been ineffective. **Results:** In this way, 62% of the tested sites are in a category of nonexistent environmental management, 8% is in reactive phase and 31% in charge phase, while no process was found in proactive or competitive management. Moreover, several experimental studies on wastewater treatment with Hg were found, which could be adapted to the management of liquid waste from the MAAPE found.

**Keywords:** Mining, gold, mercury. (Source: DeCS, Bireme).

## Introducción

A pesar de los beneficios económicos que genera la minería aurífera artesanal y a pequeña escala (MAAPE) practicada en más de 70 países, como la generación de empleos directos e indirectos que convierten a esta actividad en una fuente de subsistencia, especialmente para los sectores más pobres de la población mundial, se genera a partir de sus procesos varias externalidades negativas que merecen atención.<sup>1-3</sup>

Dichas externalidades, se ven reflejadas tanto en los ecosistemas donde se ve un notable deterioro de la calidad de los recursos y afectación a su fauna y flora, como en las poblaciones humanas que en el caso de los residuos líquidos, ven como los residuos mineros con mercurio (Hg) en las aguas de los ríos aledaños, impiden que estas sean utilizadas para realizar actividades agrícolas o incluso para el consumo humano debido a problemas asociados a su alta toxicidad.<sup>2-4</sup> Dado que se pueden contemplar desde daños menores hasta carcinogénesis, teratogénesis y neurotoxicidad.<sup>5</sup>

De igual manera, en la MAAPE llevada a cabo en varios países en desarrollo en el mundo, se emplean las alternativas tecnológicas más baratas para el proceso de recuperación como por ejemplo la amalgamación con mercurio (Hg), por lo cual, el uso de Hg para el beneficio del oro es extendido.<sup>3,6</sup>

Por lo tanto, los mineros enfrentan el dilema de la contaminación resultante del proceso de recuperación del oro, dado que además de la contaminación del ambiente, la MAAPE genera varias dificultades sociales, políticas y económicas que deben ser abordadas por los actores involucrados.<sup>3</sup>

Cabe resaltar, que el término minería aurífera artesanal y de pequeña escala (MAAPE) se refiere a las actividades informales llevadas a cabo utilizando poca tecnología y

maquinaria practicada por individuos, grupos o comunidades, usualmente de manera informal (ilegal) y en países en vías de desarrollo.<sup>6</sup>

En el desarrollo de estas actividades mineras, ya sean a través de explotaciones subterráneas, en filón o aluviales, se lleva a cabo la etapa de beneficio y transformación, la cual consiste en el proceso de separación, molienda, trituración, mezclado y homogenización, lavado y concentración a que se somete el mineral extraído para su posterior transformación y utilización.<sup>7</sup>

En la etapa de beneficio del oro, uno de los procedimientos más utilizados para separar el oro del material extraído se denomina amalgamación, en el cual el oro entra en contacto con el mercurio y forma una amalgama, las partículas de oro se adhieren al mercurio para posteriormente ser separadas mediante técnicas de destilación manual.<sup>6</sup>

Existen varias tecnologías que han sido aplicadas para la remoción de mercurio, las cuales se clasifican en físico-químicas (adsorción, intercambio iónico, nanotecnología, electrocoagulación, procesos de membrana, precipitación química, entre otros) y biológicas (fitorremediación, bioacumulación, biomineralización, biotransformación y bioadsorción).<sup>8-11</sup>

En este sentido, se han llevado a cabo numerosos estudios de casos sobre el uso del mercurio utilizado en el proceso de minería aurífera a nivel mundial, lo anterior teniendo en cuenta que la extracción de oro utilizando métodos artesanales o con un bajo grado de mecanización y baja productividad, es practicada por entre 10 y 15 millones de mineros en todo el mundo, quienes extraen en promedio 350 toneladas/año de oro y liberan en el proceso 640 a 1350 toneladas/año de mercurio en el ambiente.<sup>1,2</sup>

De igual manera, la información derivada de las investigaciones revisadas, permitió identificar

las diversas etapas de gestión ambiental de la MAAPE a nivel mundial, en relación con el tratamiento de las aguas residuales industriales con mercurio, clasificando ésta en niveles que se denominan reactivo; responsable; proactivo; competitivo e inexistente.

En este sentido, con base en la problemática identificada y las etapas de gestión ambiental, el objetivo del presente artículo, es establecer el estado del arte de la gestión ambiental de la MAAPE a nivel mundial, en relación con el tratamiento de las aguas residuales industriales con mercurio durante los últimos cinco años, e identificar si esta gestión ha sido o no sustentable.

### Materiales y métodos

Se llevó una investigación descriptiva, donde se caracterizó la gestión ambiental que se lleva a cabo en la MAAPE a nivel mundial, en relación con el tratamiento de las aguas residuales industriales con mercurio.

Se realizó una revisión de la literatura científica en los últimos cinco años, teniendo en cuenta la tendencia mundial a la eliminación del uso del mercurio en la minería aurífera, por lo cual se limitó la búsqueda a los artículos científicos y

técnicos más actualizados acerca de la gestión ambiental de la MAAPE en la que actualmente se esté utilizando mercurio en el proceso, así como la gestión que se esté dando a las aguas residuales industriales con este metal, y sobre las teorías de etapas de la gestión ambiental, registrados en las bases de datos de Science Direct, Springer Link y Scientific electronic library online (SciELO).

Se seleccionaron y revisaron los artículos científicos y técnicos publicados desde enero de 2009 hasta abril de 2014. Se utilizaron las siguientes palabras clave en español y en inglés: tratamiento mercurio minería aurífera, gestión ambiental mercurio minería aurífera, sustentabilidad minería aurífera y evolución de la gestión ambiental a través de estados de madurez. El número de artículos encontrados y porcentaje por cada buscador y palabras clave se registra en la tabla 1.

En este sentido, los títulos y resúmenes del total de artículos encontrados fueron revisados, seleccionando entre estos los que contenían la información específica sobre el tema de revisión. Además, de las referencias de los artículos evaluados se realizó una búsqueda manual para referencias exactas.

**Tabla 1. Número de artículos encontrados por buscador y palabra clave**

Buscador	Science Direct		Springer Link		SciELO		Total	
	N°	%	N°	%	N°	%	N°	%
Palabra clave								
Tratamiento mercurio minería aurífera	51	10	779	45	0	0	830	35,3
Gestión ambiental mercurio minería aurífera	16a	3	642	37	2	2	660	28,1
Sustentabilidad minería aurífera	259a	50	146	8	3	3	408	17,4
Evolución de la gestión ambiental a través de estados de madurez	193	37	166b	10	94	95	453	19,3
<b>Total</b>	<b>519</b>	<b>100</b>	<b>1733</b>	<b>100</b>	<b>99</b>	<b>100</b>	<b>2351</b>	<b>100</b>

a Filtro Hg    b Filtro gestión ambiental

Los criterios de exclusión de los artículos fueron: que no fuera minería aurífera artesanal y a pequeña escala y en el caso de los métodos de tratamiento de Hg, que no contarán con un estudio de caso para evaluar la eficiencia del método.

Del proceso de revisión de información relevante, se llegó finalmente a evaluar los textos completos de un total de 59 artículos.

### Análisis de la información

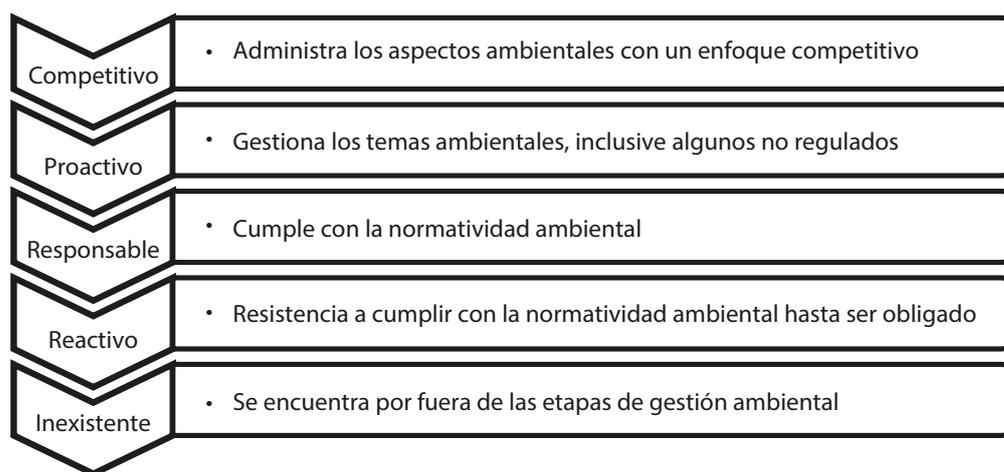
#### 1. Gestión de la MAAPE a partir de la eliminación del Hg

Se realizó como primera medida un análisis de la gestión que se ha venido dando a nivel mundial con respecto a la eliminación del uso del mercurio en la actividad minera.

#### 2. Gestión de aguas residuales industriales con Hg proveniente de la MAAPE a nivel mundial

Posteriormente, a partir del conjunto de artículos que abordaban la temática del tratamiento de vertimientos con Hg en la MAAPE y las teorías de las etapas de la gestión ambiental organizacional, se elaboró una tabla de resultados donde se incluyó el autor de la publicación, la localización (país, región, municipio), el método de tratamiento utilizado y la etapa de gestión ambiental de aguas residuales industriales con mercurio en la que se encuentra la actividad minera, sea de tipo reactivo (R); responsable (Re); proactivo (P); competitivo (C) e inexistente (I) (Figura 1).<sup>12</sup>

**Figura 1. Niveles de madurez de gestión ambiental**



En este sentido, la etapa de evolución de la gestión ambiental fue incluida dentro del análisis de la gestión de las aguas residuales industriales con Hg, considerando las posibles fases de la implementación de la gestión ambiental en una organización.<sup>13</sup>

Con la información obtenida, se establecieron los porcentajes encontrados y se determinó si la gestión ha sido o no sustentable y por qué.

#### 3. Métodos de tratamiento de aguas contaminadas con Hg en fase experimental

Teniendo en cuenta, que se encontraban estudios de métodos de tratamiento de aguas contaminadas con Hg en fase experimental, que no están asociados específicamente a la actividad de MAAPE, se realizó una tabla con esta información, indicando el autor, el país de origen, el método de tratamiento propuesto, la eficiencia y las condiciones en las que se llevó a cabo el proceso.

En este caso, se identificaron los tratamientos propuestos en los últimos cinco años, estableciendo el porcentaje de artículos encontrados por cada método, los países donde se llevaron a cabo las investigaciones, así como la alternativa más asequible para llegar a aplicar en la MAAPE.

## Resultados y discusión

### 1. Gestión de la MAAPE a partir de la eliminación del mercurio

Se identificó que a nivel internacional las intervenciones para abordar tanto la MAAPE como sus impactos asociados, se han enfocado casi exclusivamente en la creación de leyes de reducción y eliminación del uso del Hg y por ende en los cambios tecnológicos para sustituir este insumo.<sup>14,15</sup>

Dicho enfoque ha sido generado por las evidencias de toxicidad del mercurio, como lo ocurrido en Minamata en el suroeste de Japón, en donde se presentó un grave episodio de intoxicación por metilmercurio en la población, que se hizo evidente por primera vez en 1956 y se remonta a los vertidos de una fábrica química local.

De otra parte, en Colombia según el estudio realizado por Cogua P. et al.,<sup>16</sup> en la Bahía de Cartagena, en los años setenta se presentó un caso de contaminación con este metal causado por la compañía Ácalis de Colombia, la cual utilizaba Hg como sustancia catalítica para la producción cloro-soda. Estos y otros casos, han provocado la reacción mundial en contra del uso de Hg en los procesos productivos y de esta manera han originado acuerdos de eliminación gradual de este metal en la minería aurífera, partiendo del Convenio de Minamata en 2013 y los diversos programas que promueven otras tecnologías de beneficio del oro libres de Hg.<sup>14,15</sup>

En este sentido, en respuesta al Convenio Internacional de Minamata, que tiene como objetivo eliminar de forma sistemática el uso del mercurio en el sector en 2030, se han promovido

leyes que regulan o eliminan gradualmente el uso de este metal pesado, por ejemplo en países como Colombia, donde se limita su uso para la adquisición de oro a menos que los estudios técnicos lo consideren indispensable, y más recientemente se adoptó la Ley de eliminación gradual de su uso en la actividad minera.<sup>14,6,17</sup> En el caso de Brasil, se prohíbe el uso de mercurio y cianuro sin la obtención de licencia.<sup>18</sup>

Sin embargo, estos reglamentos y las restricciones relativas al mercurio no se hacen cumplir como es debido en estos países. Lo cual se evidencia en Colombia donde según las estimaciones realizadas por Guiza & Aristizabel,<sup>6</sup> la mayoría de los pequeños mineros ilegales que representan el 60% de la explotación de oro de Colombia, están utilizando Hg en su proceso de beneficio. Por lo cual, los niveles de mercurio exceden los límites de tolerancia en la población y en los organismos acuáticos, como se evidencia en los estudios realizados por varios investigadores.<sup>5,4</sup> En cuanto a Brasil, Sousa & Veiga,<sup>19</sup> demostraron que en la región de Tapajós el 99,3% los mineros utilizan mercurio o cianuro sin ningún permiso.

Un caso similar se presenta en Ghana donde la Ley de Minerales y Minería de 2006 (Ley 703), prohíbe a los no ghaneses realizar minería artesanal de oro, a pesar de esta prohibición, varios ghaneses y extranjeros (particularmente los chinos), practican ilegalmente la MAAPE, sin ningún manejo de sus vertimientos.<sup>20</sup>

De esta manera, la realidad de la MAAPE a nivel mundial, desarrollada de manera informal y en países en vías de desarrollo, es que a menudo se realiza de manera ilegal.<sup>6,19-21</sup> Por lo cual, tanto el cumplimiento de las regulaciones del uso del mercurio, como la adopción de tecnologías más limpias en el proceso de beneficio de oro, se ven limitadas por la ilegalidad de la actividad.

Así mismo, la marginalidad en la que viven los mineros artesanales y a pequeña escala se vuelve una barrera considerada muchas veces infranqueable para estas comunidades, debido

por una parte a que los procesos de legalización resultan ser trámites engorrosos que ellos no están dispuestos a llevar a cabo, dado que se presentan casos como en Perú y Colombia, donde los requisitos para la legalización de estos son más exigentes que los requeridos para las concesiones mineras de gran tamaño, razón de preferencia para continuar en la ilegalidad.<sup>6,22</sup>

De otra parte, las tecnologías libres de Hg resultan ser costosas y actualmente inaccesibles para la mayoría de estos mineros, dado los bajos ingresos percibidos por esta actividad para quienes desarrollan esta primera etapa de extracción y beneficio a pequeña escala.<sup>23,24</sup>

En contraste, el uso de mercurio para el beneficio del oro es extendido, lo cual se atribuye al fácil manejo de estos insumos que no requiere de conocimientos técnicos especiales, el costo más económico en comparación con otros métodos, además del tiempo es otro factor que crea resistencia a las otras tecnologías, dado que los mineros no están dispuestos a esperar cinco o más días para tener oro sin Hg por ejemplo mediante el proceso de cianuración.<sup>6,22</sup>

De esta manera, se evidencia que debido a la imposibilidad inmediata de la eliminación del uso del mercurio en la MAAPE, y como parte del proceso de reducción de la contaminación por Hg, se deben establecer mecanismos para que los pequeños mineros artesanales y a pequeña escala se formalicen y a partir de esto, entiendan la necesidad de cumplir con la legislación ambiental y de la aplicación de la gestión ambiental de sus actividades, entrando de esta manera en las diferentes fases que los lleven a poder contribuir con la sustentabilidad de sus procesos mineros, sin que atenten contra su salud, la salud de la comunidad del área de influencia minera y el ambiente.

## **2. Gestión ambiental de aguas residuales industriales con mercurio proveniente de la MAAPE a nivel mundial**

Se analizó la información de un total de diez países, de los cuales cuatro pertenecen al

continente sur americano, seis al continente africano y uno al continente asiático. La información consolidada se encuentra en la tabla 2, donde se estableció que 62% de los sitios evaluados, no cuenta con ningún tipo de gestión ambiental de sus residuos líquidos con Hg., por ello, la actividad se encuentra por fuera de las etapas de gestión ambiental y fue calificado como gestión inexistente.

De otra parte, el 8% se encuentra en etapa reactiva, en este caso Munhena – Mozambique. Teniendo en cuenta, que la MAAPE llevada a cabo en esta región, está debidamente legalizada y los relaves no se descargan directamente en los cuerpos de agua, sin embargo estos se encuentran mal dispuestos, por lo que el complejo de cianuro de mercurio soluble es fácilmente movilizadopor los sistemas de agua que alcanzan el agua de lluvia.<sup>25</sup>

Por lo tanto, a pesar de que esta asociación de mineros son receptivos a mejorar sus métodos de trabajo a fin de producir más oro y reducir las emisiones de mercurio, se presenta cierta resistencia a cumplir con la normatividad ambiental y las campañas de sensibilización promovidas por la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI), sobre técnicas más limpias y eficientes para el proceso de amalgamación de oro, así como la sensibilización de los riesgos del Hg y las vías de exposición, los cuales según Shandro, Veiga y Chounard,<sup>25</sup> no han arrojado resultados positivos debido entre otras razones, a la falta campañas de sensibilización estructuradas.

Así mismo, el 31% de los lugares con MAAPE evaluados en el presente artículo se consideran en una etapa de gestión responsable, dado que están en la búsqueda de cumplir con la normatividad ambiental, a partir de la gestión del proceso minero para contribuir a la gestión de los residuos líquidos con mercurio.

De esta manera, Perú y Brasil son los países donde se están llevando a cabo técnicas de mejoramiento del proceso, mediante estudios

piloto en áreas mineras, relacionados con cambios en el sistema de beneficio del oro, como la concentración por gravedad seguida de cianuración en un molino esférico planteada en Garimpo Ouro Roxo Brasil,<sup>26</sup> o las planteadas para la población de Misky, Arequipa, Perú,

donde se propone la realización de un sistema de recuperación mediante la mesa de Holman - Wilfley previo al proceso de amalgamación, ambos procesos con el fin de reducir la cantidad de mercurio utilizado.<sup>27</sup>

**Tabla 2. Revisión de la gestión ambiental aplicada en la minería aurífera a nivel mundial**

Localización	Método de tratamiento establecido o propuesto	Tipo de gestión ambiental				
		I	R	Re	P	C
Portovelo-Zaruma, Ecuador	La mayoría de las plantas de procesamiento descargan sus desechos cerca de los ríos locales, o descargan los relaves alrededor de los centros de procesamiento. <sup>28,29</sup>	X				
Garimpo Ouro Roxo. Brasil	Se generó una planta piloto transportable en la cual se genera concentración por gravedad seguida de cianuración en un molino esférico. <sup>26</sup>			X		
Rio Gualaxodo Mariana, Brasil	Se implementó un programa de gestión ambiental, que incluyó la construcción de un laboratorio amalgamación, la retorta en el proceso de fusión y eliminación controlada de residuos de amalgama. <sup>30</sup>			X		
Isla de Baru Indonesia	Los relaves de cianuración, junto con el Hg en solución, son depositados en estanques rudimentarios o simplemente lo descargan en los ríos. <sup>21,22</sup>	X				
Galangan Indonesia	Existen programas de la ONU, para capacitar a los mineros sobre los riesgos del Hg. <sup>31</sup>	X				
Lwamgasa Matundasi y Londoni /Tanzania	La legislación minera en Tanzania dicta el uso de retortas (con el cual reutilizan hasta el 95% de Hg) para la recuperación de oro, aunque prácticamente los mineros no lo utilizan. <sup>32,24</sup>	X				
Munhena Mozambique	El proceso de concentración por gravedad se produce en piscinas excavadas. Los relaves mal dispuestos, hacen que el Hg(CN) <sub>2</sub> sea fácilmente movilizado. <sup>25</sup>		X			
Colombia	A raíz del Proyecto Mundial sobre el Mercurio Iniciado por la ONU en 2002, persisten campañas de capacitación para utilizar retortas, sin embargo no se realiza tratamiento a los vertimientos. <sup>6,3,2</sup>	X				
Población de Misky, Arequipa, Perú	Se propone sistemas de recuperación mediante la mesa de Holman-Wilfley previamente al empleo de los quimbaletes para reducir la cantidad de Hg utilizado. <sup>27</sup>			X		
Distrito de Lomas Perú	Los relaves de amalgamación son preconcentrados con el concentrador Falcon. <sup>33</sup>			X		
Ghana	Varios ghaneses y extranjeros, practican ilegalmente la MAAPE, sin ningún manejo de los vertimientos. <sup>20</sup>	X				
Zimbabwe	El proceso se basa en las tecnologías introducidas hace más de 100 años. Alrededor de 5 Ton de Hg se pierden anualmente en la región, el 70% en los relaves y el 30% a la atmósfera. <sup>34</sup>	X				
Burkina Faso	El exceso de Hg es generalmente eliminado por escurrimiento. <sup>35</sup>	X				
<b>Total (%)</b>		<b>62</b>	<b>8</b>	<b>31</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

En el caso de Portovelo Ecuador, si bien el desarrollo de la actividad minera se ha caracterizado por la falta de conocimiento y la comprensión sobre el proceso de recuperación de oro como las principales causas de la mezcla de mercurio y cianuro en el sistema y por ende la inexistencia de la gestión de los vertimientos, los autores proponen los siguientes pasos para reducir o la contaminación por mercurio en la región: a) la eliminación de los restos minerales y toda fusión mediante “chanchas” (similares a un pequeño molino de bolas que operan con pequeñas barras o con grandes piedras de río); b) que los mineros realicen la amalgamación sólo por gravedad (no hacer fusión) y c) la promoción del uso de retortas individuales cuando amalgama se quema y los filtros cuando se haya derretido.<sup>28</sup>

Por el contrario, los sitios mineros ubicados en los países de África (excepto Mozambique) y Asia están en una etapa de gestión inexistente, a pesar de la evidencia de las problemáticas sociales y ambientales generadas por el uso del mercurio en la MAAPE.

De esta manera, lejos de contemplar esta problemática, los cerca de 15 millones de pequeños mineros en el mundo se encuentran inmersos en círculos de pobreza, generados por la falta de oportunidades de empleo, la falta de tierra y la pobreza extrema.<sup>2,6,20,36</sup>

Lo anterior impulsa a estos sectores sociales económicamente marginados a llevar a cabo las labores mineras bajo condiciones de informalidad, utilizando poca tecnología, maquinaria y técnicas de beneficio contaminantes y riesgosas para su propia salud y además siendo ilegales.<sup>6,20,21</sup>

Así mismo, han sido poco eficientes las inversiones de donantes como Banco Mundial, la Unión Europea (UE), (ONUDI) y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), las cuales han buscado sin éxito el desarrollo de

programas de reducción del uso del mercurio así como su gestión.<sup>37,31,25</sup>

Dado que han demostrado ser ineficaces en la difusión del conocimiento, especialmente porque los programas no son incluyentes con los mineros, no cuentan en muchos casos con el apoyo gubernamental y no han tenido en cuenta el contexto cultural, social, económico y de organización de los mineros, razón que evidencia la necesidad de avanzar hacia la adopción de estrategias orientadas a la comunidad minera artesanal y a pequeña escala.<sup>37,23,38</sup>

En este contexto, se demuestra que la eficacia de leyes y programas de reducción y gestión del uso del Hg es muy baja y por ende la gestión de los residuos con este metal es inexistente en un alto porcentaje de los sitios evaluados en el presente artículo, contando con algunas zonas en donde se pretende llevar a cabo mejoras en los procesos para disminuir la utilización de Hg, pero que no incluyen el manejo de los vertimientos que generan.

Por lo anterior, un primer paso para la gestión del uso del mercurio, es la mitigación del impacto que está generando actualmente este insumo en la MAAPE, generando alternativas de manejo tanto de sus residuos líquidos como de sus emisiones, a partir de la promoción de los métodos de tratamiento de este metal.

Así, a partir de los programas de formalización y de asistencia técnica, implementados con la comprensión de las dinámicas de la comunidad minera artesanal y a pequeña escala, se podrá dar a este sector los lineamientos necesarios para que comprendan la importancia de aplicar la gestión ambiental en sus procesos, identificando en qué estado se encuentran y estableciendo los pasos que tienen que seguir para llegar a la adecuada gestión ambiental.<sup>39</sup>

### **3. Métodos de tratamiento de aguas contaminadas con Hg en fase experimental**

En la tabla 3 se presentan los principales métodos que se están investigando a nivel mundial, para la remoción de los iones de Hg (II) de aguas residuales industriales.

Se encontró que se han venido desarrollando diversas investigaciones, entre las cuales se encuentran un mayor número de estudios para los métodos de adsorción con el 35%, seguidos de biorremediación con el 20%, la nanotecnología con el 15% y la electrocoagulación con el 10% de los estudios encontrados.

Dichos métodos han resultado efectivos en la remoción de Hg, por lo cual podrían ser utilizados en la gestión de los residuos líquidos con este metal, provenientes de la MAAPE.

De otra parte, los países donde se llevaron a cabo los estudios fueron en su orden: India con el 25% y Estados Unidos con el 15%, seguidos de Portugal y España con el 10% y los de menor número de estudios fueron Camerún, Argelia, Brasil, Colombia, Malasia, Grecia, Japón y Egipto cada uno con el 5%.

De las investigaciones realizadas, se destaca la bioadsorción como uno de los métodos más económicos, eficientes y de fácil operación para la remoción de Hg, considerada como una tecnología innovadora que está despertando en los últimos años un gran interés en la comunidad científica.<sup>40,41</sup>

Este método consiste en un proceso de captación de los iones del metal o elementos radiactivos por la biomasa (viva o muerta).<sup>42</sup>

La eficiencia de este proceso ha sido comprobada por diversos autores que han realizado investigaciones utilizando materiales bioadsorbentes de diferentes orígenes, como bacterias y biomasas de origen vegetal dentro de las más estudiadas.<sup>43-46</sup>

Cabe resaltar, que el éxito en la implementación de este o cualquier método de tratamiento que pretenda implementarse en el proceso de la MAAPE, depende de la integración de los mineros artesanales y a pequeña escala en la toma de decisiones que los afectan directamente, así como la comprensión de los beneficios que les aportan las nuevas tecnologías, dado que este sector de la población es propenso a adoptar nuevas tecnologías y métodos de extracción que ofrecen mejoras tangibles de subsistencia, sobre todo si la tecnología es asequible.<sup>47</sup>

De esta manera, se deberá hacer énfasis en la conveniencia de la misma, e introducirla a través de demostraciones, técnicas y habilidades de comunicación y lenguaje.

Considerando los patrones culturales locales y el ambiente circundante, teniendo flexibilidad con respecto a modificaciones de la tecnología a las condiciones locales, y estableciendo sistemas de seguimiento y evaluación adecuados.<sup>24</sup>

**Tabla 3. Métodos de tratamiento de aguas contaminadas con Hg en fase experimental**

País	Método de tratamiento	Eficiencia y condiciones
Portugal	Biorreactor de membrana de intercambio iónico. <sup>8</sup>	Remoción = 98 % del Hg (II) removido
EEUU	Precipitación: Sulfuro de hierro (FeS) reactivo soportado por ultrafiltración. <sup>9</sup>	Poros = 500 µM = remoción 99 % Poros = 1000-1250µM = remoción 94%
Camerún	Electrocoagulación electrodos Al y Fe. <sup>10</sup>	Remoción = 99,9 %
Argelia	Adsorción mediante material basado en quitosano. <sup>11</sup>	Capacidad máxima = 850 mg Hg/g quitosano
Japón	Biorremediación a partir de <i>B. megaterium</i> inmovilizadas en alginato. <sup>43</sup>	Remoción = 80% [ ] inicial 10 mg/L HgCl <sub>2</sub>
Brasil	Fitorremediación <i>Typha domingensis</i> . <sup>48</sup>	Remoción = 99.6 ± 0.4 %
Portugal	Adsorción mediante tapones de corcho. <sup>49</sup>	25 mg/l de adsorbente Remoción = 94% [ ] inicial = 500 µg/L
EEUU	Nanotecnología. <sup>50</sup>	Remoción = 97%
Colombia	Adsorción con carbón activado granular, a partir de cuesco de coco. <sup>51</sup>	Tiempo de ruptura = 20 minutos Columna = 1.7 cm diámetro y 2 cm de lecho. [ ] 5 y 10 mg Hg/L; Ph=2,5
India	Bioacumulación por células de <i>Bacillus cereus</i> inmovilizadas. <sup>52</sup>	La capacidad máxima de bioacumulación = 104,1 mg/g.
India	Biorremediación a partir de inmovilización en alginato de células <i>Enterobacter sp.</i> <sup>53</sup>	7,3 mg Hg/L Remoción = 100% Tiempo de contacto = 72 horas
España	Bioadsorción a de algas de <i>Sargassum muticum</i> . <sup>44</sup>	70 % se reduce 30 % se adsorbe
India	Adsorción a partir de papaína inmovilizada en esfera de alginato. <sup>45</sup>	Remoción = 98,88 % con 5g de adsorbente 30 ml de Hg (II); [ ] 10 mg Hg/L pH 7 y 35 ° C durante 8 min
Malaysia	Adsorción con carbón activado obtenido a partir de cáscara de la palma. <sup>54</sup>	Capacidad máxima = 83,33 mg/g pH 8. Tiempo de contacto = 3 horas [ ] 10-200 mg/L
EEUU	Reducción química. <sup>55</sup>	Remoción = 94 %
Grecia	Adsorción a partir de raicillas de malta. <sup>46</sup>	[ ] 0,3 g Hg/L = remoción 71 % [ ] 1 g Hg/L = remoción 100 %
España	Adsorción en una columna de lecho fijo de tiol funcionalizado con sílice mesoporosa. <sup>56</sup>	Tamaño de poro = 0,5 a 1 mm 25 mg de adsorbente, 45 ml de Solución Hg Remoción = 100%
Egipto	Adsorción por nanotubos de quitosano. <sup>57</sup>	pH = 4 y 70 °C. Capacidad máxima = 183.2 mg Hg /g
India	Adsorción por nanopartículas de Plata. <sup>58</sup>	Capacidad máxima = 0,8 g Hg/ g Ag
India	Electrocoagulación. <sup>59</sup>	Densidad de corriente = 0,15 A/dm <sup>2</sup> [ ] inicial = 0,1 mg Hg/L; pH = 7,0 Remoción = 99%

## Conclusiones

Se pudo determinar que en la MAAPE, la preocupación sobre el manejo del Hg, se ha centrado en la creación de leyes de reducción y eliminación del uso del Hg, así como en eliminar este insumo del proceso, a través de la implementación de otras tecnologías para el beneficio del oro, pero no en manejar los residuos líquidos que esta actividad continúa generando.

De esta manera, el 62% de los sitios con MAAPE evaluados, se encuentran en una categoría de gestión ambiental inexistente. El 8% se encuentra en etapa reactiva, y el 31 % en responsable, mientras que no se encontró ningún proceso en gestión proactiva o competitiva.

Por lo anterior, es primordial generar alternativas de manejo de los vertimientos mineros, que realmente puedan ser aplicadas por los mineros artesanales y de pequeña escala. En este sentido, los mecanismos viables para la gestión ambiental de efluentes con Hg, se deben buscar en base a las diferentes tecnologías existentes como la adsorción, biorremediación, nanotecnología y electrocoagulación, los cuales, han demostrado ser eficientes en la remoción de iones de Hg, por lo tanto, podrían ser utilizados en la gestión de los residuos líquidos provenientes de la MAAPE.

## Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la Universidad Distrital Francisco José de Caldas y los docentes de la Maestría en Desarrollo Sustentable y Gestión Ambiental Carlos Zafra Mejía y Julio Beltrán.

## Referencias

1. Telmer K VM. World emissions of mercury from small scale artisanal gold mining and the knowledge gaps about them. In Pirrone N MR. Mercury fate and transport in the global atmosphere.: UNEP; 2008. p. 96-129.
2. Cordy P, Veiga M, Salih I, Al-Saadi S, Console S, Garcia O, et al. Mercury contamination from artisanal gold mining in Antioquia, Colombia: The world's highest per capita mercury pollution. *Science of the Total Environment*. 2011;410-411:154-160.
3. Saldarriaga A, Villegas C, Arango S. The public good dilemma of a non-renewable common resource: A look at the facts of artisanal gold mining. *Resources Policy*. 2013;38(2):224-232.
4. Zapata L, Bock B, Palacio J. Mercury Concentrations in Tissues of Colombian Slider Turtles, *Trachemys callirostris*, from Northern Colombia. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 2014;92(5):562-6.
5. Olivero Verbel J, Caballero Gallardo K, Negrete Marrugo J. Relationship Between Localization of Gold Mining Areas and Hair Mercury Levels in People from Bolivar, North of Colombia. *Biological Trace Element Research*. 2011;144(1-3):118-132.
6. Guiza L, Aristizabel JD. Mercury and gold mining in Colombia: a failed state. *Universitas Scientiarum*. 2013;18(1):33-49.
7. Colombia. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA - MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. Guía Minero Ambiental: Beneficio y transformación. 2002.
8. Oehmen A, Vergel D, Fradinho J, Reis M, Crespo J, Velizarov S. Mercury removal from water streams through the ion exchange membrane bioreactor concept. *J Hazard Mater*. 2014;264:65-70.
9. Suk Han D, Orillano M, Khodary A, Duan Y, Batchelor B, Abdel-Wahab A. Reactive iron sulfide (FeS)-supported ultrafiltration for removal of mercury (Hg(II)) from water. *Water Research*. 2014;: p. 310-321.
10. Nanseu-Njiki CP, Tchamango SR, Ngom PC, Darchen A, Ngameni E. Mercury(II) removal from water by electrocoagulation using aluminium and iron electrodes. *Journal of Hazardous Materials*. 2009;: p. 1430-1436.
11. Allouche F, Guibal E, Mameri N. Preparation of a new chitosan-based material and its application for mercury sorption. *Colloids and Surfaces A: Physicochem and Engineering Aspects*. 2014;53:310-321.
12. Leal L, Sánchez E. Estrategia Ambiental Corporativa. Pequeñas y Medianas Empresas. In Maestría en Gestión y Evaluación Ambiental; 2013; Bogotá D.C: Universidad Sergio Arboleda. Escuela de Posgrados.
13. Chiappetta C, Fernando A. Evolução da gestão ambiental na empresa: uma taxonomia integrada à gestão da produção e de recursos humanos. *Gestão & Produção*. 2006;13(3):435-448.

14. Davies G. A toxic free future: Is there a role for alternatives to mercury in small-scale gold mining? *Futures*. 2014;62:113-119.
15. Zolnikov T. Limitations in small artisanal gold mining addressed by educational components paired with alternative mining methods. *Science of the Total Environment*. 2012; 419: 1–6.
16. Cogua P, Campos N, Duque G. Concentración de mercurio total y metilmercurio en sedimento y seston de la bahía de cartagena, caribe colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas*. 2012.
17. República de Colombia. *Ley del Mercurio 1658*. Bogotá D.C.: 2013.
18. Sousa R, Veiga M, Zyl D, Telmer K, Spiegel S, Selder J. Policies and regulations for Brazil's artisanal gold mining sector: analysis and recommendations. *Journal of Cleaner Production*. 2011;19(6-7):742-750.
19. Sousa RN, Veiga MM. Using performance indicators to Evaluate an environmental education program in artisanal gold mining communities in the Brazilian Amazon. *AMBIO*. 2009;38(1):40-46.
20. Armah F, Luginaah I, Taabazuing J, Odoi J. Artisanal Gold Mining and Surface Water Pollution in Ghana: Have the Foreign Invaders Come to Stay? *Environmental Justice*. 2013;6(3):94-102
21. Male Y, Reichelt A, Pocock M, Nanlohy A. 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):428-433.
22. Veiga M, Angeloci G, Hitch M, Colon P. Processing centres in artisanal gold mining. *Journal of Cleaner Production*. 2014;64:535-544
23. Spiegel S, Yassi A, Spiegel J, Veiga M. Reducing mercury and responding to the global gold rush. 2005;366(9503):2070-2072.
24. Bosse J, W.U P, Tihelwa R. A matter of approach: the retort's potential to reduce mercury consumption within small-scale gold mining settlements in Tanzania. *Journal of Cleaner Production*. 2009;17(1):77–86
25. Shandro J, Veiga M, Chouinard R. Reducing mercury pollution from artisanal gold mining in Munhena, Mozambique. *Journal of Cleaner Production*. 2009;17(5):525–532
26. Sousa R, Veiga M, Klein B, Telmer K. Strategies for reducing the environmental impact of reprocessing mercury-contaminated tailings in the artisanal and small-scale gold mining sector: insights from Tapajos River Basin, Brazil. *Journal of Cleaner Production*. 2010;18(16-17):1757-1766.
27. Costa M, Alfonso P, Palacios S. Proceso de tratamiento para la recuperación de oro en el asentamiento minero artesanal de Misky, Perú. In *II congreso internacional sobre geología y minería en la ordenación del territorio*; 2009; Utrillas, España. p. 231-242.
28. Velásquez-Veiga M, Hall K. Mercury balance in amalgamation in artisanal and small-scale gold mining: identifying strategies for reducing environmental pollution in Portovelo-Zaruma, Ecuador. *Journal of Cleaner Production*. 2010;18(3):226-232.
29. Hilson G, Garforth C. 'Agricultural Poverty' and the Expansion of Artisanal Mining in Sub-Saharan Africa: Experiences from Southwest Mali and Southeast Ghana. *Population Research and Policy Review*. 2012;31(3):435-464.
30. Hilson G. What is wrong with the global support Facility for small-scale. mining? *Progress in Development Studies*. 2007;7:235-49.
31. Spiegel S. Governance Institutions, Resource Rights Regimes, and the Informal Mining Sector: Regulatory Complexities in Indonesia. *World Development*. 2012;40(1):189-205.
32. Spiegel S, Veiga M. Building Capacity in Small-Scale Mining Communities: Health, Ecosystem Sustainability, and the Global Mercury Project. *EcoHealth Journal Consortium*. 2005;2:361-369.
33. Ormazábal M, Sarriegi J. Evolución de la gestión ambiental a través de estados de madurez. *Dirección y Organización*. 2013;43:17-26.
34. Liu X, Chen GR, Lee DJ, Kawamoto T, Tanaka H, Chen ML, et al. Adsorption removal of cesium from drinking waters: A mini review on use of biosorbents and other adsorbents. *Bioresource Technology*. 2014;16:142-149.
35. Naja G, Murphy V, Volesky B. Biosorption, Metals. *Encyclopedia of Industrial Biotechnology*. 2010. 1–29.
36. Volesky B. Detoxification of metal-bearing effluents: biosorption for the next century. *Hidrometallurgy*. 2001;59(2-3):203–216.
37. Chien M, Nakahata R, Ono T, Miyauchi K, Endo G. Mercury removal and recovery by immobilized *Bacillus megaterium* MB1. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*. 2012;6(2):192–197.
38. Carro L, Barriada J, Herrero R, Sastre M. Surface modifications of *Sargassum muticum* algal biomass for mercury removal: A physicochemical study in batch

- and continuous flow conditions. *Chemical Engineering Journal*. 2013;229:378–387.
39. Bhattacharyya A, Dutta S, De P, Ray P, Basu S. Removal of mercury (II) from aqueous solution using papain immobilized on alginate bead: Optimization of immobilization condition and modeling of removal study. *Bioresource Technology*. 2010;101(24):9421–9428.
  40. Boutsika LG, Karapanagioti HK, Manariotis ID. Aqueous mercury sorption by biochar from malt spent rootlets. *Water, Air, and Soil Pollution*. 2013;225(1805):1-10.
  41. Hilson G, Hilson C, Pardie S. Improving awareness of mercury pollution in small-scale gold mining communities: Challenges and ways forward in rural Ghana. *Environmental Research*. 2007;103(2):275-287.
  42. Bosse J, Elias J, Kalvig C. Toxic mercury versus appropriate technology: Artisanal gold miners' retort aversion. *Resources Policy*. 2013;38(1):60-67.
  43. Gomes M, de Souza R, Teles V, Araújo É. Phytoremediation of water contaminated with mercury using *Typha domingensis* in constructed wetland. *Chemosphere*. 2014;103:228–233.
  44. Lopes C, Oliveira J, Rocha L, Tavares D, Silva C, Silva S, et al. Cork stoppers as an effective sorbent for water treatment: the removal of mercury at environmentally relevant concentrations and conditions. *Environmental Science and Pollution Research*. 2014;21(3):2108-2121.
  45. Aramburú V, Núñez P, Azañero Á, Figueroa M, Gagliuffi P. Recuperación de oro y mercurio de los relaves del proceso de amalgamación con tecnología limpia. *Revista del Instituto de Investigaciones*. 2010;13(25):13-19.
  46. Rojas H, Guerrero D, Vásquez O, Valencia J. Aplicación del Modelo de Bohart y Adams en la Remoción de Mercurio de Drenajes de Minería por Adsorción con Carbón Activado. *Información Tecnológica*. 2012;23(3):21-32.
  47. Sinha A, Pant K, Kumar S. Studies on mercury bioremediation by alginate immobilized mercury tolerant *Bacillus cereus* cells. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2012;71:1-8.
  48. Ismaiel A, Aroua M, Yusoff R. Palm shell activated carbon impregnated with task-specific ionic-liquids as a novel adsorbent for the removal of mercury from contaminated water. *Chemical Engineering Journal*. 2013;225:306-314.
  49. Sinha A, Khare S. Mercury bioremediation by mercury accumulating *Enterobacter* sp. cells and its alginate immobilized application. *Biodegradation*. 2012;23(1):25–34.
  50. Xiong Z, He F, Zhao D, Barnett M. Immobilization of mercury in sediment using stabilized iron sulfide nanoparticles. *Water Research*. 2009;43(20):5171–5179.
  51. Guimaraes J, Betancourt O, Miranda M, Barriga R, Cueva E, Betancourt S. Long-range effect of cyanide on mercury methylation in a gold mining area in southern Ecuador. *Science of the Total Environment*. 2011;409(23):5026-5033.
  52. Jackson DG, Looney BB, Craig RR, Thompson MC, Kmetz TF. Development of chemical reduction and air stripping processes to remove mercury from wastewater. *Journal of Environmental Engineering*. 2013; 139: p. 1336-1342.
  53. Arsuaga JM, Aguado J, Arencibia A, López-Gutiérrez MS. Aqueous mercury adsorption in a fixed bed column of thiol functionalized mesoporous silica. *Adsorption*. 2014;20(2-3):311-319.
  54. Shawky HA, El-Aassar AHM, Abo-Zeid DE. Chitosan/carbon nanotube composite beads: Preparation, characterization, and cost evaluation for mercury removal from wastewater of some industrial cities in Egypt. *Journal of Applied Polymer Science*. 2012;125:E93-E101.
  55. Sumesh E, Bootharaju MS, Anshup , Pradeep T. A practical silver nanoparticle-based adsorbent for the removal of Hg<sup>2+</sup> from water. *Journal of Hazardous Materials*. 2011;189(1-2):450-457.
  56. Vasudevan S, Lakshmi J, Sozhan G. Optimization of electrocoagulation process for the simultaneous removal of mercury, lead, and nickel from contaminated water. *Environmental Science and Pollution Research*. 2012;19(7):2734-2744.
  57. Metcalf S, Veiga M. Using street theatre to increase awareness of and reduce mercury pollution in the artisanal gold mining sector: a case from Zimbabwe. *Journal of Cleaner Production*. 2012; 37: 179-184.
  58. Tomicic C, Vernez D, Belem T, Berode M. Human mercury exposure associated with small-scale gold mining in Burkina Faso. *International Archives of Occupational and Environmental Health*. 2011;84(5):539-546.
  59. Amade P, Mota H. Desenvolvimento sustentável e garimpo o caso do Garimpo do Engenho Podre em Mariana, Minas Gerais. *Revista Escola de Minas*. 2009;62(2):237-242.