

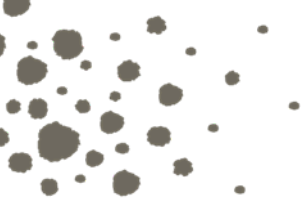
RECOMENDACIONES PARA DESARROLLAR ACCIONES DE REMEDIACIÓN EN SITIOS CONTAMINADOS Y CON PASIVOS AMBIENTALES POR MINERÍA ILEGAL DE ORO EN LA AMAZONÍA COLOMBIANA

Proyecto "Reduciendo el Avance de los Impactos de la Minería Ilegal en la Amazonía Colombiana", implementado por la Alianza Amazónica para la Reducción de los Impactos de la Minería de Oro (AARIMO)



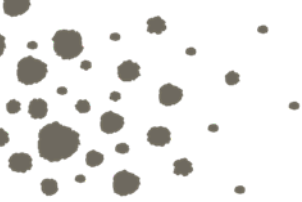
Documento elaborado por: Mariana Rodríguez

BOGOTÁ, COLOMBIA
DICIEMBRE
2025



CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	3
2. ALTERNATIVAS DE REMEDIACIÓN DE MERCURIO	4
2.1. Mercurio (Hg)	4
2.2. Remedación y Métodos Convencionales	4
2.3. Métodos No Convencionales y Biorremediación	5
3. IDENTIFICACIÓN DE EXPERTOS ACADÉMICOS EN REMEDIACIÓN	7
3.1. Colombia	7
3.2. Perú	11
4. RECOMENDACIONES	12
4.1. Estrategias de Remedación	12
4.2. Hoja de Ruta de Remedación	13
4.3. Rol Protector del Selenio Frente a la Toxicidad del Mercurio	15
4.4. Criterios para la Selección del Lugar de Implementación	16
4.5. Necesidad de Articulación	19
5. CONCLUSIONES	21

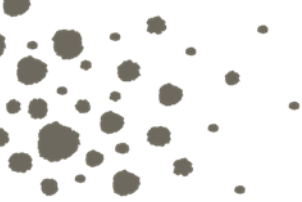


1. INTRODUCCIÓN

En el marco del proyecto “Reduciendo el Avance de los Impactos de la Minería Ilegal en la Amazonía Colombiana”, implementado por la Alianza Amazónica para la Reducción de los Impactos de la Minería de Oro – AARIMO, se desarrolló una consultoría con el objetivo de formular recomendaciones para desarrollar acciones de remediación en sitios contaminados y con pasivos ambientales por minería ilegal de oro en la Amazonía colombiana.

Las recomendaciones que se presentan en este documento son el resultado de una recopilación de información científica respecto a métodos de remediación, conversaciones estratégicas con actores académicos, un Intercambio de Experiencias en Remediación (Madre de Dios, Perú, septiembre 2025) con participación de Perú, Brasil y Colombia, y una Reunión de Expertos nacionales en el tema que tuvo lugar en Bogotá el pasado 7 de noviembre de 2025.

La contaminación por mercurio asociada a actividades mineras y deforestación constituye una de las amenazas más críticas para los ecosistemas amazónicos y para la salud de las comunidades indígenas y ribereñas que dependen estrechamente de ellos. Ante este escenario, el presente documento tiene como propósito orientar el desarrollo de acciones de remediación que sean viables y adecuadas al contexto ecológico, social y cultural de la Amazonía colombiana. Para ello, se evalúan diversas alternativas de remediación y se establecen criterios técnicos y comunitarios que permitan seleccionar un sitio piloto apto, desde el cual avanzar hacia la implementación de soluciones sostenibles y culturalmente pertinentes.



2. ALTERNATIVAS DE REMEDIACIÓN DE MERCURIO

2.1. Mercurio (Hg)

El mercurio (Hg) es un elemento químico naturalmente presente en la corteza terrestre y reconocido por su alta toxicidad incluso en concentraciones bajas. Una vez liberado al ambiente, puede transformarse en especies químicas más peligrosas, como el metilmercurio, que presentan una elevada capacidad de traslocación y bioacumulación en los distintos eslabones de la cadena alimentaria. A través de los ciclos biogeoquímicos, el Hg se transporta y redistribuye entre el aire, el agua, los suelos y los organismos vivos, afectando la estabilidad de los ecosistemas y la salud humana.

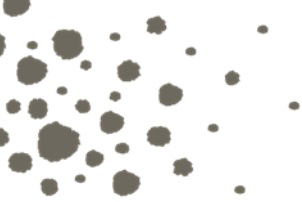
La alta movilidad del Hg, en especial en ecosistemas acuáticos, facilita su rápida incorporación al sistema biótico e ingreso a la cadena trófica, lo que complejiza significativamente su tratamiento. Además, por tratarse de un elemento que se volatiliza a temperatura ambiente en su forma elemental, puede desplazarse por grandes distancias a través de la atmósfera y depositarse lejos de su fuente de emisión. Esta combinación de persistencia, movilidad y toxicidad, sumada a la complejidad de su ciclo natural, constituye uno de los principales desafíos para los procesos de remediación y exige enfoques integrales adaptados al contexto amazónico.

2.2. Remediación y Métodos Convencionales

La remediación se refiere a la aplicación de estrategias físicas, químicas y/o biológicas para remover, contener o neutralizar los elementos tóxicos y mitigar sus impactos potenciales en un ecosistema. Estas técnicas buscan reducir la movilidad o toxicidad de los contaminantes mediante diversos mecanismos.

Históricamente, la remediación de sitios contaminados con Hg ha utilizado enfoques convencionales como la remoción física y la contención, y procesos químicos como adsorción, precipitación, lixiviación química, oxidación avanzada, fotodegradación y electrorremediación (Bell, 2016; Eckley et al., 2020).

Estas técnicas convencionales de remediación se pueden aplicar en escenarios en los cuales la fuente de contaminación es puntual, está identificada y controlada, sin embargo, en un contexto de contaminación difusa como es el caso Amazónico, el alcance de estas estrategias es muy limitado y adicionalmente implican un costo económico y un impacto ambiental muy elevado.



2.3. Métodos No Convencionales y Biorremediación

Las estrategias de biorremediación (mediante microorganismos o plantas) suelen ser más económicas, generan menor impacto ecológico y son menos invasivas que las técnicas físico-químicas (Wang et al., 2020).

2.3.1. Biorremediación

La biorremediación aprovecha la capacidad de microorganismos, principalmente bacterias, para degradar o transformar naturalmente ciertos contaminantes, reduciendo o eliminando residuos peligrosos. Esta técnica ha sido ampliamente aplicada en la industria petrolera y petroquímica, donde algunos microorganismos utilizan hidrocarburos como fuente de alimento y energía, transformándolos en sustancias menos tóxicas o inocuas.

La biorremediación emplea principalmente dos estrategias:

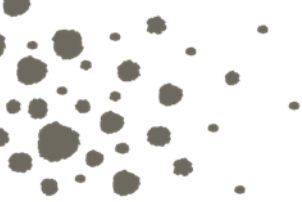
- **Bioaumentación:** consiste en introducir bacterias específicas en el sitio contaminado para degradar o reducir los contaminantes.
- **Bioestimulación:** implica agregar nutrientes al área afectada para estimular el crecimiento bacteriano y acelerar la remoción o reducción de los contaminantes.

Otras tecnologías emergentes para la biorremediación incluyen biorreactores con microalgas, reactores cerrados, filtros de membrana sumergidos y cepas microbianas diseñadas para tratar compuestos específicos (Sepúlveda y Casallas, 2018).

2.3.2. Fitorremediación

La fitorremediación, es una rama de la biorremediación que ofrece ventajas como baja inversión, operación sencilla y la posibilidad de realizarse in situ. Este enfoque comprende diversas tecnologías que aprovechan el crecimiento de plantas hiperacumuladoras de metales en zonas contaminadas, entre ellas la fitoestabilización, la fitoextracción y la fitovolatilización (Sepúlveda y Casallas, 2018).

- La **fitoestabilización** busca reducir la movilidad de los metales mediante las raíces de las plantas, que inmovilizan los contaminantes en el suelo, evitando su dispersión.
- La **fitoextracción y la fitovolatilización** se basan en la capacidad de las plantas para absorber contaminantes del suelo, agua y sedimentos, acumulándolos en su biomasa o liberándose a la atmósfera, respectivamente.



Las especies de plantas que se emplean en la fitorremediación dependen del contexto de cada proyecto, los criterios de selección incluyen que sean especies nativas, de rápido crecimiento, alta generación de biomasa y capaces de desarrollarse en ambientes contaminados y de translocar los metales desde la raíz a sus partes aéreas. Algunas de las especies comunes en proyectos de fitorremediación en Colombia son:

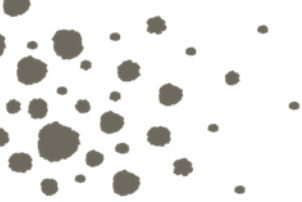
Especie	Referencia
<i>Cecropia peltata</i> (Guarumo)	Vidal et al., 2010
<i>Piper marginatum</i>	Obaji-Bernal, et al., 2024
<i>Jatropha curcas</i> L.	Obaji-Bernal, et al., 2024
<i>Colocasia esculenta</i> (Papa china)	Madera-Parra et al., 2015; Peña-Salamanca et al., 2025
<i>Heliconia psittacorum</i>	Peña-Salamanca et al., 2013; Madera-Parra et al., 2015
<i>Paulownia tomentosa</i>	Obaji-Bernal, et al., 2024
<i>Cytisus scoparius</i>	Obaji-Bernal, et al., 2024
<i>Eichhornia crassipes</i> (Buchón)	Romero Núñez et al., 2016
<i>Thalia geniculata</i>	Obaji-Bernal, et al., 2024
<i>Typha dominguensis</i>	Obaji-Bernal, et al., 2024
<i>Eleocharis interstincta</i>	Caraballo-Laza et al. 2025

2.3.3. Inmovilización mediante enmiendas *in situ*

Otra opción para reducir la movilidad y biodisponibilidad del mercurio es el uso de enmiendas *in situ*. La técnica de inmovilización es considerada un método eficaz y respetuoso con el medio ambiente, ya que disminuye la biodisponibilidad de los metales pesados en el suelo y evita que ingresen a la cadena alimentaria (Yang et al., 2021).

Las enmiendas son materiales que pueden ser obtenidos de fuentes naturales y/o procesados de manera artesanal como el caso del biochar (biocarbón). Éstas pueden ser inorgánicas como la cal, compuestos a base de fosfatos o cenizas y subproductos industriales u orgánicas como el biochar, compost o estiércol (Wu, 2017). La técnica se basa en la adsorción y precipitación de minerales, la formación de complejos estables con metales y el intercambio iónico .

La aplicación de enmiendas consiste en mezclarlas mecánicamente en sedimentos o suelos para disminuir la biodisponibilidad y el flujo del contaminante, en lugar de eliminarlo. Adicionalmente, mejora la estructura del suelo, amortigua el pH mediante el aumento del contenido de materia



orgánica, aumenta la capacidad del suelo para retener agua y nutrientes, contribuyendo así al crecimiento y la salud de las plantas (Martínez Madrid et al., 2021).

3. IDENTIFICACIÓN DE EXPERTOS ACADÉMICOS EN REMEDIACIÓN

3.1. Colombia

Los proyectos de remediación de mercurio en Colombia están liderados principalmente por:

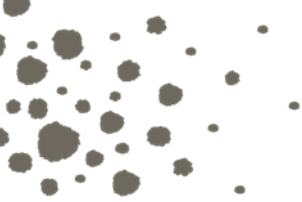
Organización	Investigadores Principales
Grupo de Investigación en Aguas, Química Aplicada y Ambiental (GAQAA) - Universidad de Córdoba	José Luis Marrugo Negrete, María José Carballo
Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas - SINCHI	Gladys Cardona y María Camila Escobar
Universidad Tecnológica del Chocó (UTCH)	Yuber Palacios Torres, Hamleth Valois Cuesta y Harry Gutiérrez Mosquera
Instituto en Ciencias del Mar y Limnología (INCIMAR) - Universidad del Valle	Enrique Peña
Universidad de La Amazonía, Universidad Nacional, Universidad del Tolima y CORPOAMAZONIA	Lis Manrique, Santiago Duque, Sebastian Reynaldi, Luis Carlos Montenegro, Cesar Augusto Jaramillo

- **Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas – SINCHI**

El Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas (SINCHI), trabaja desde el año 2018 en un proyecto liderado por Gladys Cardona y María Camila Escobar sobre la identificación, caracterización y aislamiento de un consorcio de bacterias reductoras de mercurio. Estas bacterias, altamente resistentes al mercurio y encontradas en sitios de minería en la Amazonía, transforman el mercurio de su estado más tóxico (metilmercurio), a mercurio elemental (Hg^0), que es menos tóxico y se dispersa a la atmósfera (Cardona G et al., 2022).

Este proyecto también ha trabajado en la producción de biochar (biocarbón) obtenido a partir de yuca y asaí y en pruebas en laboratorio demostrado remociones hasta un 80 % del Hg en suelos contaminados. Este material tiene un doble propósito, sirve como sustrato para aumentar el crecimiento de bacterias nativas y adicionalmente como superficie de inmovilización para el mercurio.

El proyecto se encuentra en una fase avanzada de laboratorio, el siguiente objetivo es montar un piloto en campo durante el próximo año (2026) para evaluar esta tecnología en campo.



- **Universidad de la Amazonía, Universidad Nacional, Universidad del Tolima y CORPOAMAZONIA - Proyecto "Análisis del impacto socio ambiental del mercurio y tecnologías sostenibles para su remoción en la cuenca del río Caquetá"**

Este estudio multi-actor inició hace 3 años (2022) y analiza el impacto del mercurio asociado a la minería de aluvión en la cuenca alta del río Caquetá, con el objetivo de ofrecer alternativas viables para la eliminación de Hg en el agua de consumo de las comunidades. Como resultado de la caracterización del ecosistema acuático (aguas, sedimentos y peces) se encontraron altas concentraciones de Hg en el agua del río Caquetá, y de las lagunas cercanas durante los periodos de aguas bajas.

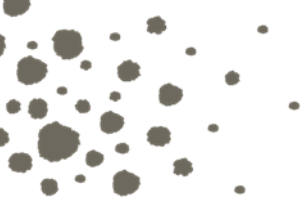
Sebastian Reynladi, docente de la Universidad Nacional (Sede Medellín), realizó un análisis socio ambiental que evidencia concentraciones de Hg en cabello humano entre las más altas reportadas en Colombia y a nivel mundial, confirmando una elevada exposición de las comunidades locales. Se observó mayor bioacumulación de mercurio en peces piscívoros —la principal vía de exposición para las poblaciones ribereñas—, así como mayores concentraciones en hombres que en mujeres y una correlación negativa entre nivel educativo y concentración de mercurio en cabello.

Desde la Universidad de la Amazonía, Lis Manrique está evaluando estrategias de absorción, utilizando materiales carbonosos derivados de la biomasa residual agroindustrial (coco, cacao, caña, etc.). Ésto con el propósito de implementar en las escuelas de las comunidades plantas pequeñas de potabilización de agua con filtros de Hg y otros metales.

El profesor Luis Carlos Montenegro y John Edward Cano de la Universidad Nacional (Sede Bogotá) investigan diferentes modelos de biorremediación utilizando microalgas y cianobacterias, como una estrategia de adsorción de Hg. Actualmente, están evaluando la eficiencia de cinco cepas, principalmente cepas locales que han demostrado alta eficiencia de remoción. La aplicación final práctica, implica la inmovilización de los organismos en una matriz, el reto actual del equipo está en desarrollar una solución para la disposición final del residuo biológico contaminado, y asegurar un ciclo completo de tratamiento.

- **Universidad Tecnológica del Chocó (UTCH)**

La investigación de la contaminación por Hg desde la UTCH, liderada por Yuber Palacios Torres, ha revelado que la problemática asociada a la minería de oro no se limita al Hg. Se han detectado otros elementos químicos potencialmente tóxicos (EPTs) que se están biomagnificando en los ecosistemas, como el uranio (radioactivo) y el cesio (con efectos adversos en la salud), sugiriendo la necesidad de ampliar el monitoreo a estos metales en diversos organismos (Palacios-Torres et al., 2018).



Algunas de las experiencias exitosas que se han implementado en la región, en colaboración con el profesor José Luis Marrugo, son la fitorremediación con macrófitas nativas que una vez removidas, se mezclan con desechos orgánicos en un proceso de compostaje, reduciendo así las concentraciones de Hg en cuerpos de agua y a su vez generan un producto útil como abono para suelos.

Adicionalmente a los procesos de remediación, Hamleth Valois, docente de la UTCH, ha desarrollado protocolos exitosos de sucesión ecológica en áreas degradadas por minería en el Chocó, e implementado proyectos de recuperación de estas áreas en la cuenca media del río San Juan (Valois-Cuesta et al., 2022).

La UTCH emplea una estrategia de monitoreo participativo para garantizar la sostenibilidad del trabajo a largo plazo y motivar a las comunidades a buscar recursos para impulsar sus propios proyectos de remediación.

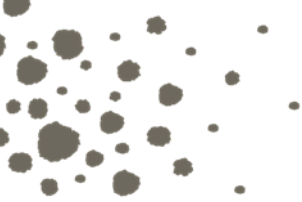
- **Instituto en Ciencias del Mar y Limnología (INCIMAR) - Universidad del Valle**

La Universidad del Valle desde INCIMAR ha trabajado en el diseño y prueba de Sistemas de Tratamiento Basados en la Naturaleza (SbN) para remover metales pesados como el Hg y otros contaminantes emergentes en ríos del Pacífico colombiano. Los sistemas piloto han logrado un 60 % de remoción de contaminantes, aunque aún se debe alcanzar el estándar normativo (>80 %) (Peña-Salamanca et al., 2025).

Los SbN desarrollados por INCIMAR, bajo el liderazgo del profesor Enrique Peña, son sistemas híbridos de tratamiento, llamados acoples tecnológicos, que combinan:

- Celdas de combustible microbianas, que utilizan bacterias para degradar contaminantes y generar energía.
- Biorreactores fotocatalíticos, que aprovechan luz y catalizadores para romper moléculas difíciles de degradar biológicamente.
- Sistemas de lagunas algales de alta tasa, con especies nativas de microalgas capaces de remover contaminantes.
- Humedales de tratamiento con plantas acuáticas nativas del Valle del Cauca, como la papa china (*Colocasia esculenta*) y la heliconia (*Heliconia psittacorum*).

El equipo ha superado la fase de caracterización en laboratorio para avanzar a la fase de pilotos, logrando resultados significativos. Esta experiencia previa servirá de base para un nuevo proyecto de remediación en Puerto Refugio, en la cuenca del Putumayo, en alianza con Amazon Conservation Team (ACT). En este proyecto serán aplicados los conocimientos previos, pasando a



la etapa de experimentación y piloto, e integrando activamente a la comunidad y actores locales. El trabajo incluirá componentes de salud, participación comunitaria y la implementación de un sistema de monitoreo continuo. El proyecto en el Putumayo iniciará en 2026 con un levantamiento de línea base de la problemática, monitoreando las matrices de agua, suelo, sedimento y el componente biótico (macroinvertebrados, algas, peces).

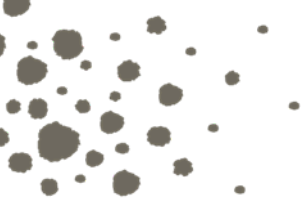
- **Grupo de Investigación en Aguas, Química Aplicada y Ambiental (GAQAA) - Universidad de Córdoba**

El grupo de investigación liderado por el profesor José Luis Marrugo Negrete, tiene más de 20 años de experiencia en la investigación de la problemática asociada a la contaminación por Hg en los ecosistemas y la salud humana. Con un enfoque de economía circular han implementado con éxito proyectos piloto de fitorremediación en diferentes regiones del país, como Córdoba, Sucre y Chocó (Marrugo-Negrete et al., 2024). La metodología específica empleada en cada territorio varía en función del contexto, no obstante, las técnicas implementadas incluyen la fitorremediación de ecosistemas acuáticos mediante macrófitas, o del suelo mediante plantas nativas, la inmovilización de contaminantes mediante materiales orgánicos e inorgánicos, valoración de biomasa y humedales de tratamiento.

De esta forma han logrado, además de un fortalecimiento comunitario, el restablecimiento de la cobertura vegetal y una significativa reducción de Hg en suelos de áreas mineras con concentraciones de hasta 10 mg/kg-Hg. La biomasa vegetal contaminada con Hg tras la fitorremediación, se trata mediante procesos de compostaje que permiten inmovilizar el metal, reduciendo así su riesgo ambiental y generando un subproducto para el mejoramiento de suelos (Carballo-Laza et al., 2025).

El libro, titulado *Alternativas Basadas en la Naturaleza para la Recuperación de Ecosistemas Degradados por Minería Aurífera bajo un Enfoque de Economía Circular* (Marrugo-Negrete et al., 2024) resume experiencias exitosas, innovaciones tecnológicas y estudios de caso que ilustran cómo las soluciones basadas en la naturaleza (SbN) pueden remediar y restaurar ecosistemas afectados por actividades mineras. Este enfoque se fundamenta en que los sistemas naturales poseen una capacidad intrínseca para regenerarse, y que las acciones humanas pueden maximizar estos procesos para su mayor eficiencia y sostenibilidad.

3.2. Perú



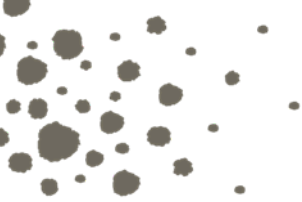
- **Centro de Innovación Científica Amazónica (CINCIA), Madre de Dios, Perú.**

La experiencia de CINCIA en Perú constituye un referente clave para la restauración de ecosistemas degradados en la Amazonía. Su enfoque de investigación aplicada demuestra que es posible diseñar soluciones científicas prácticas, transferibles y de alto impacto para recuperar áreas afectadas por la minería aurífera. La metodología desarrollada por CINCIA, es adaptable y escalable, lo que permite su aplicación en otros contextos de degradación ambiental.

France Cabanillas y Jhon Farfan, Coordinador y Especialista del programa de Restauración de Ecosistemas CINCIA han liderado desde 2016 un proyecto piloto de restauración ecológica, donde se han realizado estudios sobre recuperación de áreas degradadas por la minería, así como estudios sobre suelos, fauna, ecosistemas acuáticos y contaminación por mercurio. El paisaje se caracteriza por ser una zona inundable, lo que facilita los procesos de regeneración natural. Debido al tipo de degradación presente (minería con bombas de succión), es muy difícil recuperar completamente el paisaje original, por lo que se plantea como alternativa la restauración de funciones ecológicas clave.

Algunas de las técnicas de CINCIA que podrían ser implementadas en el contexto de la Amazonía colombiana son:

- Uso de biochar producido con materiales locales como estrategia para mejorar la fertilidad de los suelos degradados. Esta práctica es técnicamente sólida y socialmente viable, pues aprovecha residuos orgánicos disponibles en la región y puede implementarse en pequeña escala con participación activa de las comunidades (Lefebvre et al., 2018).
- Uso de drones como herramienta principal en la etapa de planeación y monitoreo posterior a la plantación. Esto se traduce en una planificación más eficiente, en cuanto al área a intervenir, el número de plantas necesarias, así como el personal, los insumos y el esfuerzo requerido para la intervención.
- Técnicas de restauración aplicadas en parcelas experimentales en concesiones mineras y estudio del rol del bosque como sumidero o trampa de mercurio (Gerson et al., 2022).
- Reforestación con diversas especies maderables nativas, lo que contribuye no sólo a la recuperación ecológica, sino también a generar oportunidades de manejo forestal sostenible en el futuro (Cabanillas et al., 2018).
- Valor ecológico de las antiguas pozas mineras en zonas inundables, que pueden convertirse en hábitats importantes para la biodiversidad si se manejan de manera adecuada (Alarcón et al., 2019).



4. RECOMENDACIONES

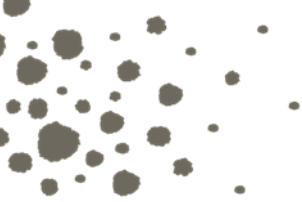
4.1. Estrategias de Remediación

El contexto amazónico requiere estrategias de remediación específicas que se ajusten a su diversidad y complejidad ecológica, social y cultural. Por ende, las estrategias convencionales físico-químicas de remediación no son recomendables por su elevado costo ambiental y económico, y por su alcance limitado en contextos de contaminación difusa. Las recomendaciones de remediación para el territorio amazónico se enfocan principalmente en métodos no convencionales y SbNs como la biorremediación, fitorremediación y la inmovilización.

El éxito de cualquier estrategia de remediación radica en un enfoque multidisciplinario, la inclusión de la comunidad y la caracterización rigurosa del contexto, previo a la implementación del proyecto. La línea base detallada debe identificar los puntos de deposición del Hg, la topografía y los niveles basales en diferentes matrices como aire, agua, suelo y sedimentos. Se recomienda un muestreo intensivo (mínimo 3 muestras por hectárea). La técnica a aplicar depende directamente del lugar, el tipo de minería y la forma química en la que se encuentra el Hg en las diferentes matrices. Adicionalmente, se debe medir la presencia de otros contaminantes de interés como el arsénico, asociado a procesos de deforestación y minería.

En este sentido se sugiere un cambio de estrategia, pasar de estudios y caracterizaciones puntuales a escala regional, a una caracterización detallada, idealmente a largo plazo, en puntos o lugares seleccionados bajo criterios específicos. Es fundamental implementar sistemas de monitoreo participativo con las comunidades locales y muestrear diferentes matrices incluyendo concentraciones de metales pesados en suelos de chagras y agua de consumo, para identificar las fuentes de asimilación del Hg, no sólo mediante la ingesta de pescado, sino también el agua y otros alimentos. Simultáneamente, realizar una caracterización del sitio con la mayor información biótica y abiótica posible (incluyendo suelo y geomorfología) y contrastando puntos contaminados con puntos prístinos como referencia.

Una vez establecida la línea de referencia en el área de implementación del proyecto se evalúan diferentes estrategias para la inmovilización y estabilización del Hg. Se deben establecer los umbrales de concentración y biodisponibilidad del Hg que definan desde el punto de vista técnico las acciones de remediación a seguir. No obstante, para garantizar la pertinencia y sostenibilidad de los proyectos las intervenciones se deben co-diseñar junto con las comunidades desde el inicio, garantizando que sus experiencias, visiones y saberes tradicionales estén alineados con el proyecto.



4.2. Hoja de Ruta de Remediación

A continuación, se presenta un enfoque metodológico general, desarrollado en colaboración con el profesor José Luis Marrugo, para la planificación e implementación de estrategias de intervención dirigidas a mitigar la contaminación por Hg con énfasis en la participación comunitaria.

Con base en esta metodología, está en construcción una propuesta para la implementación de un proyecto de remediación en la Amazonía colombiana mediante un eventual convenio con la Universidad de Córdoba.

FASE I: Caracterización, línea base y diseño

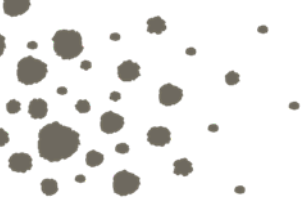
Subfase	Metodología
Alcance y localización	Selección del sitio de implementación y definición de criterios de intervención para concentraciones altas y bajas de Hg.
Línea base integral y participativa	Implementar un sistema de monitoreo participativo con las comunidades locales.
	Realizar una caracterización biótica y abiótica detallada del sitio, incluyendo análisis geomorfológicos.
Muestreo en múltiples matrices (mercurio, cadmio y arsénico)	Suelos productivos (chagras).
	Fuentes de agua de consumo.
	Alimentos principales de la dieta local.
Diseño de piloto	Diseñar el plan piloto de intervención en articulación con la experiencia y los saberes de la comunidad local.

FASE II: Estrategias de intervención

A. Estrategia para suelos con ALTAS concentraciones de Hg: Fitoextracción

Orientada a la remoción activa mediante ciclos intensivos:

Subfase	Metodología
Evaluación y selección de especies	Evaluar la capacidad fitorremediadora y seleccionar especies vegetales nativas con alta tasa de absorción de Hg.
Preparación del suelo	Aplicación de enmiendas orgánicas (ej. biochar, compost) para mejorar las condiciones edáficas y la biodisponibilidad del contaminante para las plantas.
Implementación	Siembra de las especies seleccionadas en ciclos (ej. 1, 2 o 3 ciclos de siembra y poda), complementada con bioaumentación (inoculación con bacterias



Subfase	Metodología
	beneficiosas que mejoran la absorción).
Monitoreo	Seguimiento del desarrollo, crecimiento y estado sanitario de las plantas durante los ciclos de siembra.
Manejo de biomasa	Cosecha y aprovechamiento de la biomasa contaminada mediante compostaje controlado para estabilizar y volatilizar parcialmente el Hg.

B. Estrategia para suelos con BAJAS concentraciones de Hg: Fitoestabilización

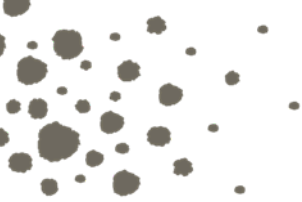
Orientada a inmovilizar el contaminante y restaurar el suelo:

Subfase	Metodología
Aplicación de enmiendas	Incorporación de enmiendas orgánicas (biochar, compost o lombriabono) según la caracterización del suelo para reducir la movilidad del Hg.
Establecimiento de cobertura	Siembra de especies vegetales nativas (ej. leguminosas) para establecer una cobertura densa que prevenga la lixiviación del contaminante.
Monitoreo	Evaluación de la cobertura vegetal, la materia orgánica del suelo y la biodisponibilidad del Hg post-intervención para validar la estabilización.

C. Estrategia para cuerpos de agua: Soluciones híbridas

Orientada a la contención, remoción y degradación de contaminantes en el sistema hídrico:

Estrategia	Metodología
Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN)	Implementación de humedales de tratamiento con macrófitas acuáticas para atrapar y estabilizar contaminantes.
	Desarrollo de filtros biológicos (canales plantados con macrófitas) o filtros físicos (uso de grava y piedra).
	Acoples tecnológicos: Integración de sistemas de lagunas algales de alta tasa y biorreactores para optimizar la remoción.



FASE III: Monitoreo, evaluación y transferencia de conocimiento

Subfase	Metodología
Evaluación de resultados	Monitoreo final de la concentración de Hg en suelo y agua post-intervención, comparando con los resultados de la línea base.
Generación y divulgación de conocimiento	Documentar los resultados y la metodología para generar producción científica.
	Desarrollar material de divulgación y accesible para socializar los avances y resultados con las comunidades.
Sostenibilidad y réplica	Continuar implementando sistemas de monitoreo participativo con las comunidades para la sostenibilidad a largo plazo.
	Facilitar intercambios de experiencias entre comunidades locales y de otras regiones del país para fomentar la réplica de las metodologías.

4.3. Rol Protector del Selenio Frente a la Toxicidad del Mercurio

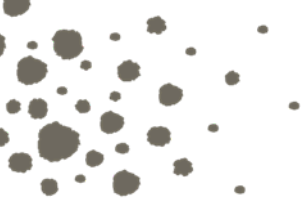
El selenio (Se) es un oligoelemento esencial que ha demostrado ser un agente protector contra la toxicidad del Hg, ya sea mediante la unión directa al Hg o actuando como cofactor antioxidante. Este mecanismo de protección está influenciado por las concentraciones relativas de ambos elementos en el organismo, el metabolismo, la dieta y la geografía (Córdoba-Tovar et al., 2022). Si bien se considera que un exceso molar de Se es altamente beneficioso, aún está por determinar el balance ideal para garantizar sus efectos positivos.

Actualmente, existe una brecha de datos significativa en regiones tropicales, donde la investigación sobre las interacciones Se:Hg es especialmente relevante para actualizar las recomendaciones de ingesta segura de pescado (Córdoba-Tovar et al., 2025)

Considerando que el pescado es la principal fuente de proteínas para las comunidades del territorio amazónico, es fundamental estudiar la proporción molar selenio-a-mercurio (Se:Hg) en peces de consumo y la dieta general de las comunidades locales.

Para consolidar una base científica sólida que permita mitigar los riesgos asociados al consumo de pescado contaminado con Hg, se recomienda investigar en las siguientes áreas:

- **Evaluación Integral:** Realizar un estudio robusto en el cual se analice y evalúe la relación entre los síntomas asociados a la intoxicación por Hg, la dieta tradicional de las comunidades y los niveles de Hg y Se en el organismo.



- **Nutrición Preventiva:** Así mismo, desde un enfoque biocultural, es esencial investigar cuáles alimentos que forman, o podrían, formar parte de la dieta local generan un aporte natural de Se cuya ingesta diaria recomendada para un adulto es de aproximadamente 55 µg/día (Córdoba-Tovar et al., 2025).

4.4. Criterios para la Selección del Lugar de Implementación

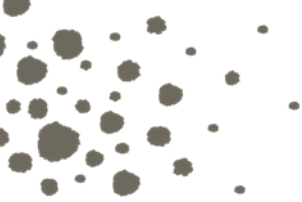
Como resultado del diálogo multiactor que tuvo lugar en las mesas de trabajo de la Reunión de Expertos en Remediación (Bogotá), en el cual se articuló la experiencia científica, institucional y territorial se definieron criterios básicos de selección y se identificaron posibles zonas de intervención, muchas de ellas dentro o en colindancia con Parques Nacionales Naturales (PNN).

La participación de Parques Nacionales Naturales (PNN) representa una oportunidad crucial para el desarrollo de acciones de remediación y la facilitación del acceso seguro a los territorios que se traslapan o colindan con áreas protegidas.

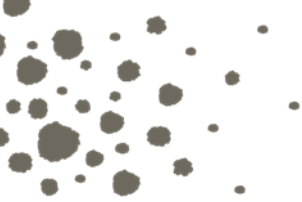
La selección del sitio de implementación de un proyecto piloto de remediación en la Amazonía colombiana debe ser estratégica e integral, buscando viabilidad logística, aceptación social y optimización de los resultados técnicos.

- **Viabilidad logística y acceso:** La prioridad fundamental es la selección de lugares con facilidad de acceso y un bajo riesgo de orden público, que garanticen la continuidad operativa del proyecto.
- **Línea base:** Se sugiere priorizar sitios que ya posean una línea base ambiental y social, documentada referente a la contaminación por Hg.
- **Aceptación comunitaria:** El proyecto debe contar con el aval y la implicación activa de la comunidad local. La aceptación y participación comunitaria son factores determinantes para la viabilidad, la implementación exitosa de las metodologías y la sostenibilidad del proyecto de remediación.
- **Diagnóstico:** La selección debe considerar los reportes de afectación a la salud humana y el estado de los ecosistemas. Esta información es crucial para dimensionar la problemática y establecer las metas de mitigación. El diagnóstico integral de la problemática de efectos de contaminación asociados a la minería, se beneficiaría mediante la comparación de resultados entre un punto de referencia prístino (sin afectación minera) versus un punto afectado por actividad minera reciente.

Se identificaron siete ubicaciones como posibles zonas de intervención destacando a continuación las oportunidades y desafíos que presenta cada una:



Ubicación	Ventajas y Oportunidades	Desafíos
Comunidad Mocagua (Amazonas)	<ul style="list-style-type: none"> - Fácil acceso (avión por Leticia y 1.5 h por río). - No reporta problemas de orden público. - Monitoreo comunitario en curso y capacidades instaladas (SZF). - Línea base de peces (SZF) y sedimento (SINCHI). 	<ul style="list-style-type: none"> - Reporta bajos niveles de contaminación por Hg. - Ausencia de línea base en humanos. - Desconocimiento de la procedencia específica de la contaminación por Hg.
Río Puré (Amazonas)	<ul style="list-style-type: none"> - Acuerdos de conservación con comunidades indígenas colindantes al PNN Río Puré.. - Interés en fenómeno de erosión en los meandros del río por minería. - Las comunidades indígenas vecinas tienen en marcha su propia estrategia de control y vigilancia. - Para un posible piloto se podría dialogar con los territorios indígenas: Resguardos Indígenas Curare Los Ingleses, Predio Putumayo, Cotuhé-Putumayo, PANI. 	<ul style="list-style-type: none"> - Acceso limitado por orden público. - Minería activa dentro del AP. - Contexto transfronterizo muy complejo.
Campoalegre - Reserva Puinawai (Guainía)	<ul style="list-style-type: none"> - Cuenta con datos de deforestación asociada a minería. - Dispone de información sobre niveles de mercurio (estudio del Resguardo Cuyari -Isana, PNN, SZF y Universidad de Cartagena, 2025/2026) - Acceso fluvial por el río Inírida. 	<ul style="list-style-type: none"> - Acceso costoso (vía chárter). - Actividad minera generalizada: Minería aluvial sobre el río Inírida y Guainía. - Minería a cielo abierto sobre el río Cuyari. - Un contexto de minería legal e ilegal y blanqueo de oro.
Río Orteguaza y Solano (Caquetá)	<ul style="list-style-type: none"> - Fácil acceso al casco urbano ubicado sobre el río Caquetá. - Línea base y monitoreo biótico (investigación ya realizada). 	<ul style="list-style-type: none"> - Área de alteración del orden público: reciente (Diciembre 2025) paro armado anunciado por el Frente Primero Carolina Ramírez del Bloque Amazonas en la zona.
Taraira (Vaupés)	<ul style="list-style-type: none"> - Cese parcial de la actividad minera. - Presencia y colaboración previa con la asociación de mineros ASOVIVA (SINCHI). - Línea base de contaminación por Hg (<i>Diagnóstico de las afectaciones ambientales por las actividades de explotación de yacimientos mineros en los departamentos de Guainía y Vaupés. CDA. 2021</i>). - Remoción total de cobertura vegetal en nacimientos de caños (impacto severo). 	<ul style="list-style-type: none"> - Acceso a la zona sólo vía chárter, lo que implica un desafío logístico y un costo asociado a la movilidad. - Ausencia de aliados comunitarios en el sector.



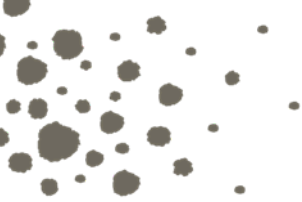
Ubicación	Ventajas y Oportunidades	Desafíos
PNN Cahuinari (Amazonas)	<ul style="list-style-type: none"> - Acceso aéreo a la Pedrera (4 vuelos semanales Satena). - Acuerdos activos de conservación (PNN/Indígenas - REM). - Línea base de contaminación por Hg (peces y cabello humano). 	<ul style="list-style-type: none"> - Minería activa y ruta activa de economías ilícitas. - Alto riesgo de orden público. - No hay acceso de funcionarios PNN (solo si pertenecen a resguardos).
PNN Churumbelos (Putumayo)	<ul style="list-style-type: none"> - Acceso terrestre y vuelos a Villagarzón. - Marco institucional sólido (PNN, Resguardo, Corpoamazonía, UNODC, etc.). - Resguardo con acción de tutela activa contra minería. 	<ul style="list-style-type: none"> - No existe línea base ni estudios de Hg. - No existen garantías para el ingreso de funcionarios de PNN. - Minería activa con retroexcavadoras.

Con base en los resultados del muestreo realizado en 2025 por PNN, SZF y Universidad de Cartagena, la SZF propone también el **PNN Yaigojé-Apaporis (La Victoria)** como posible zona de intervención dado que presenta los mayores valores de concentración de mercurio.

El análisis comparativo de las ubicaciones propuestas, sugiere a la comunidad de Mocagua como posible ubicación viable para el primer proyecto piloto por su potencial para un proyecto a largo plazo que permita evaluar la factibilidad de distintas técnicas, dado que presenta la mayor facilidad de acceso, el menor riesgo de orden público y cuenta con información de línea base sobre contaminación por Hg.

Cabe resaltar que ACT (Amazon Conservation Team), en el marco del nuevo proyecto de remediación que se implementará en asociación con la Universidad del Valle en 2026, ha seleccionado la vereda de Puerto Refugio municipio de Puerto Leguízamo, Putumayo, como lugar de ejecución. Esta elección estratégica se fundamentó en los siguientes factores clave:

- Relación de confianza: ACT ha consolidado una fuerte articulación y una relación de confianza con los líderes de salud de las comunidades de Puerto Refugio.
- Aceptación comunitaria: El municipio ha mostrado un alto interés y aceptación por parte de la comunidad para participar en el proyecto.
- Relevancia sanitaria: Si bien Puerto Refugio no presenta una afectación directa por la actividad minera, es el punto donde se están recibiendo y registrando los casos de salud relacionados con la exposición a Hg, lo que subraya la necesidad de implementar acciones de remediación en este lugar.



4.5. Necesidad de Articulación

La problemática de la contaminación por Hg y sus profundas afectaciones representa uno de los desafíos ambientales y de salud pública más urgentes en el territorio. Actualmente, se observa que las diversas organizaciones, proyectos e iniciativas en torno a esta temática trabajan, en gran medida, de manera aislada. Esta fragmentación limita el alcance, la eficiencia y la sostenibilidad de los esfuerzos individuales. El impacto creciente de esta actividad exige aunar fuerzas y lograr la articulación entre los actores de iniciativas de remediación para alcanzar resultados con un mayor alcance y escala.

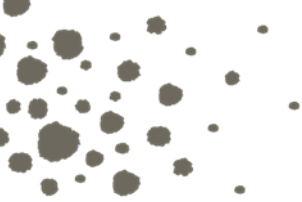
Existe un consenso claro y la motivación expresada por los actores para mantener una colaboración sostenida subrayando la viabilidad de establecer una alianza regional o nacional formal en torno a este tema. Esta alianza es crucial para complementar los esfuerzos técnicos, impulsar un mayor apoyo político y garantizar la articulación interinstitucional.

Actualmente existen dos propuestas:

- Constituir, a corto plazo, una Red Regional para la Restauración y Biorremediación de la Región Amazónica la cual surge del Intercambio de Experiencias en Remediación (Madre de Dios, Perú).
- Conformar una Red Nacional de Remediación en Colombia, propuesta en la Reunión de Expertos en Remediación (Bogotá, Colombia).

Ambas propuestas comparten objetivos y metas similares:

- La red debe involucrar a actores gubernamentales nacionales, regionales, ONGs, universidades y organizaciones mineras para centralizar bases de datos e información.
- Desarrollar una identidad institucional y presencia digital de la red (redes sociales, página web) para su visibilidad.
- Construir una visión común, una estrategia consolidada y coordinada para enfrentar el desafío del Hg a nivel regional y/o nacional.
- Establecer un mecanismo permanente de comunicación (por ejemplo, encuentros periódicos o plataformas virtuales) para compartir experiencias y metodologías de manera continua.
- Compartir lecciones aprendidas y canalizar recursos (técnicos, humanos y financieros) de manera más eficiente para evitar la duplicación de esfuerzos.
- Facilitar vínculos de colaboración específicos y formalizar alianzas concretas. Por ejemplo, vínculos de colaboración para el análisis de Hg y otros contaminantes en diferentes laboratorios.
- Garantizar que los resultados científicos sean comunicados de manera clara y accesible para que puedan influir directamente en las políticas públicas y se conviertan en la base de



las decisiones gubernamentales.

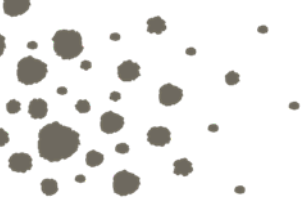
- Continuar y profundizar el involucramiento y la incidencia en las mesas de trabajo con los Ministerios clave (Ambiente, Minas y Salud) y el INS.
- Buscar recursos permanentes, priorizando el compromiso y financiamiento de los gobiernos, para garantizar la continuidad de la red.
- Realizar un simposio especializado que sirva como plataforma para exponer, debatir y sistematizar las experiencias y metodologías exitosas de remediación.

La Red Regional para la Restauración y Biorremediación de la Región Amazónica cuenta actualmente con la siguiente agenda, propuesta por FCDS (Perú) para 2026:

Primer trimestre	Reencuentro virtual de Expertos
Segundo Trimestre	Diseño de la propuesta para la formalización de la Red
Tercer trimestre	Organizar el segundo Intercambio de Experiencias en Remediación

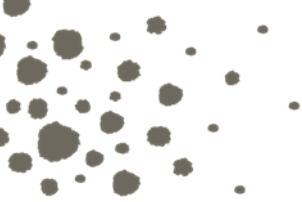
Consolidación de Conocimiento:

La articulación también se fundamenta en el intercambio activo y transparente de la información generada para la consolidación del conocimiento. La herramienta principal sugerida para este propósito es el Portal de Datos AARIMO. Este portal debe ser robustecido y mantenido mediante la alimentación continua de los datos, investigaciones y resultados generados tanto por las organizaciones ejecutoras de proyectos como por la academia y las instituciones de investigación. De esta manera, se puede posicionar como eje central para la gestión del conocimiento sobre la remediación y las afectaciones del Hg, facilitando la toma de decisiones basada en evidencia y el diseño de futuras intervenciones.

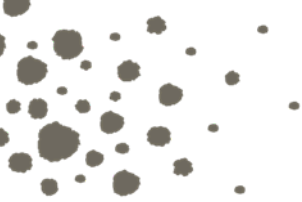


5. CONCLUSIONES

- En un contexto tan complejo y multisectorial como el amazónico, la remediación es necesariamente un proceso gradual que exige una implementación sostenida en el largo plazo. Bajo este escenario, las estrategias convencionales de remediación físico-química no resultan apropiadas debido a sus altos costos ambientales, económicos y logísticos. En su lugar, los enfoques no convencionales —como la biorremediación, la fitorremediación y la inmovilización del mercurio— se presentan como alternativas viables para la remediación de suelos y agua de consumo de las comunidades de la región.
- La alta movilidad del mercurio y su rápida incorporación al sistema biótico, con efectos directos sobre la cadena trófica, representan uno de los principales desafíos para su remediación en ecosistemas acuáticos. En este contexto, y dado que actualmente no existe una alternativa técnica efectiva para la remediación de ríos amazónicos, resulta imperativo detener el vertimiento de mercurio como medida prioritaria.
- Así mismo, frente al grave escenario de salud pública derivado de la intoxicación por mercurio que enfrentan las comunidades locales, resulta imprescindible que el primer paso de cualquier estrategia de remediación sea el fortalecimiento y la adopción de medidas de prevención de la exposición al Hg. Estas acciones inmediatas permiten reducir riesgos mientras se desarrollan y consolidan las intervenciones de remediación a mayor escala.
- Bajo este escenario, es importante generar un diagnóstico riguroso sobre las fuentes de asimilación de Hg en las comunidades. Para lograrlo se debe expandir el análisis e identificar todas las rutas de exposición, adicional a la ingesta de pescado; se requiere evaluar matrices ambientales adicionales, específicamente la calidad del agua de consumo, los suelos de las chagras, los alimentos cosechados y la carne de monte.
- Además, desde un enfoque biocultural, es prioritario investigar qué alimentos autóctonos aportan naturalmente selenio, dada su función como agente protector y antagonista ante la toxicidad del mercurio.
- Es esencial también comprender mejor los factores moduladores del riesgo a nivel comunitario. Para una evaluación integral, la relación entre los síntomas asociados a la intoxicación por Hg, los patrones alimentarios específicos y los niveles de Hg y Se en el organismo, son piezas clave para orientar estrategias de mitigación de riesgo, culturalmente pertinentes y científicamente fundamentadas.



- En cuanto a la selección de sitios para la implementación de un proyecto piloto, los criterios de accesibilidad, aceptación social, disponibilidad de línea base y diagnóstico previo de contaminación por mercurio resultan esenciales. Actualmente se han propuesto siete ubicaciones potenciales y se recomienda continuar profundizando la evaluación de los criterios y de los sitios a fin de definir aquellos que cumplan con dichas condiciones.
- Finalmente, se evidencia un consenso regional y un alto nivel de motivación entre los actores académicos para sostener una colaboración continua, lo cual abre la posibilidad de establecer una red o alianza formal a escala regional o nacional. Esta alianza es crucial para complementar esfuerzos técnicos, impulsar un mayor apoyo político y garantizar la articulación interinstitucional.
- En este marco, el Portal de Datos AARIMO se consolida como un componente estratégico que debe mantenerse y fortalecerse, garantizando la actualización permanente de información, investigaciones y resultados que sirvan de base para la gestión del conocimiento en torno a la remediación del mercurio y sus afectaciones.



6. PRÓXIMOS PASOS

6.1. Formalización de la propuesta técnica y la estrategia de financiación

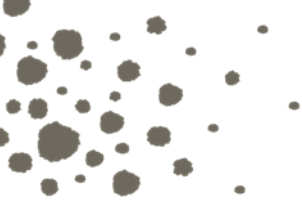
Se recomienda avanzar en la formalización de una propuesta técnica y en la definición de una estrategia de financiación para la implementación de un proyecto piloto en la región amazónica. El proyecto de remediación debería incorporar un componente de fortalecimiento de campañas de educación orientadas a la mitigación del riesgo y a la prevención de la exposición al mercurio por parte de las comunidades. Asimismo, se sugiere evaluar la disponibilidad de fuentes naturales de selenio en la dieta, así como desarrollar estrategias destinadas a aumentar los niveles de selenio en el organismo como medida complementaria de protección.

6.2. Constituir una Red regional o nacional de remediación

- Seguimiento de la agenda para la formalización de la Red regional de expertos en remediación y restauración, propuesta en el Intercambio de Experiencias en Madre de Dios, Perú.
- Evaluar el interés y propósito de conformar una Red nacional en torno a la mitigación de impactos asociados a la contaminación por mercurio y la minería de oro en el país.
- Mantener el Portal de Datos AARIMO a disposición de la academia y las instituciones para consolidar y utilizar la información generada.

6.3. Seguimiento a los resultados de proyectos en curso y estrategias de biorremediación experimentales

- Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas - SINCHI: Fase piloto de la estrategia de biorremediación del mediante bacterias reductoras de Hg y biochar como superficie de inmovilización.
- Proyecto "Prototipo móvil para tratamiento *in situ* en zonas afectadas por la minería de oro, especialmente en contextos de pequeña escala", desarrollado por la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC) y el Ministerio de Medio Ambiente, el cual fue entregado a la Universidad Tecnológica del Chocó (UTCH) el pasado mes de noviembre de 2025 para realizar pruebas de funcionamiento.
- Proyecto "Análisis del impacto socio ambiental del mercurio y tecnologías sostenibles para su remoción en la cuenca del río Caquetá" de la Universidad de la Amazonía, Universidad Nacional, Universidad del Tolima y CORPOAMAZONIA.
- Proyecto de remediación en Puerto Refugio, cuenca del Putumayo, en alianza entre Amazon Conservation Team (ACT) y Universidad del Valle.



7. REFERENCIAS

Alarcón, G., Caballero, K., & Olivero-Verbel, J. (2019). *Biodiversidad acuática en pozas abandonadas por minería de oro en Madre de Dios - Perú* (Serie de Resúmenes de Investigación No. 4). Centro de Innovación Científica Amazónica (CIN CIA).

Bell, L. (2016). *Guidance on the identification, management and remediation of mercury-contaminated sites*. IPEN.
https://ipen.org/sites/default/files/documents/ipen-guidance-mercury-contaminated-sites-v1_3-en.pdf

Cabanillas, F., Condori, E., & Llerena, L. (2018). *Restauración de áreas degradadas por la extracción minera aurífera en Madre de Dios: Ciencia para la toma de decisiones*. Centro de Innovación Científica Amazónica (CIN CIA).

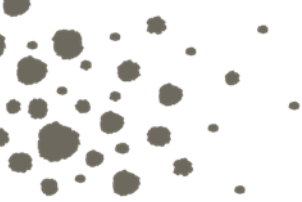
Caraballo-Laza, M. J., Ossa-Henao, D. M., Urango-Cardenas, I., Rosso-Pinto, M., Guimarães, J. R. D., Paternina-Urbe, R., Palacios-Torres, Y., & Marrugo-Negrete, J. (2025). Composting as a sustainable approach for managing mercury-contaminated aquatic biomass. *Toxics*, 13(7), 553.
<https://doi.org/10.3390/toxics13070553>

Cardona, G. I., Escobar, M. C., Acosta-González, A., Niño-García, J. P., & Marqués, S. (2022). Evaluación de bacterias resistentes a mercurio aisladas a partir de ecosistemas amazónicos afectados por minería de oro. *Acta Amazónica*, 52(1), 22–32.
<https://doi.org/10.1590/1809-4392202100862>

Córdoba-Tovar, L., Marrugo-Negrete, J., Ramos-Barón, P., & Díez, S. (2022). Drivers of biomagnification of Hg, As and Se in aquatic food webs: A review. *Environmental Research*, 204(Part C), 112226. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112226>

Córdoba-Tovar, L., Vargas-Licon, S., Palacios-Torres, Y., Marrugo-Negrete, J., & Díez, S. (2025). Selenium-to-mercury ratios in popularly consumed Colombian fish: A comprehensive risk-benefit assessment. *Journal of Hazardous Materials*, 494, 138321.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.138321>

Eckley, C. S., Gilmour, C. C., Janssen, S., Luxton, T. P., Randall, P. M., Whalin, L., & Austin, C. (2020). The assessment and remediation of mercury contaminated sites: A review of current approaches. *Science of The Total Environment*, 707, 136031. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136031>



Gerson, J. R., Szponar, N., Zambrano, G. J., Bergquist, B., Broadbent, E., Driscoll, C. T., Erdozain, M., Fernandez, L. E., Hsu-Kim, H., Selin, N. E., Silman, M., & Bernhardt, E. S. (2022). Amazon forests capture high levels of atmospheric mercury pollution from artisanal gold mining. *Nature Communications*, 13(1), Artículo 559. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-27997-3>

Lefebvre, D., Cabanillas, F., Román, F., Silman, M., & Fernandez, L. E. (2018). *Producción y utilización de biocarbón para la restauración de áreas degradadas por la minería aurífera en la Amazonía peruana*. Centro de Innovación Científica Amazónica (CIN CIA).

Lefebvre, D., Román-Dañobeytia, F., Soete, J., Cabanillas, F., Corvera, R., Ascorra, C., Fernandez, L. E., & Silman, M. (2019). Biochar effects on two tropical tree species and its potential as a tool for Reforestation. *Forests*, 10 (678)

Madera-Parra, C. A., Peña-Salamanca, E. J., Peña, M. R., Rousseau, D. P. L., & Lens, P. N. L. (2015). Phytoremediation of landfill leachate with *Colocasia esculenta*, *Gynerium sagittatum* and *Heliconia psittacorum* in constructed wetlands. *International Journal of Phytoremediation*, 17(1), 16–24. <https://doi.org/10.1080/15226514.2013.828014>

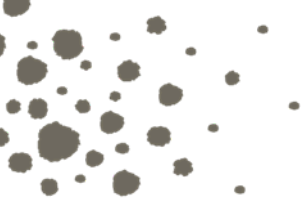
Marrugo-Negrete, J. L., Paternina Uribe, R. J., Navarro-Frómeta, A. (2024). ALTERNATIVAS BASADAS EN LA NATURALEZA PARA LA RECUPERACIÓN DE ECOSISTEMAS DEGRADADOS POR MINERÍA AURÍFERA BAJO UN ENFOQUE DE ECONOMÍA CIRCULAR. Editorial Navegante. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14826208>

Martínez-Madrid, D. E., & Marrugo-Negrete, J. L. (2021). Efecto de la adición de enmiendas en la inmovilización de metales pesados en suelos mineros del sur de Bolívar, Colombia. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 22(2), 2272. https://doi.org/10.21930/rcta.vol22_num2_art:2272

Martínez Sepúlveda, J. A., & Casallas, M. R. (2018). *Contaminación y remediación de suelos en Colombia: aplicación a la minería de oro* (1a ed.). Universidad EAN.

Obaji-Bernal, A. M., Viña-Pico, M. A., Enamorado-Montes, G. H., Burgos-Núñez, S., Urango-Cárdenas, I. D., Paternina-Urbe, R., & Marrugo-Negrete, J. L. (2024). La fitorremediación como alternativa para la recuperación de suelos afectados por minería aurífera en Colombia: Caso de estudio Ayapel, Córdoba. En L. F. Mercado Tobio et al. (Eds.), *Remediación de sitios contaminados con mercurio*. Editorial Navegante. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14825852>

Palacios-Torres, Y., Caballero-Gallardo, K., & Olivero-Verbel, J. (2018). Mercury pollution by gold mining in a global biodiversity hotspot, the Choco biogeographic region, Colombia. *Chemosphere*, 193, 421–430. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.10.160>



Peña-Salamanca, E. J., Madera-Parra, C. A., Sánchez, J. M., & Medina-Vásquez, J. (2013). Bioprospección de plantas nativas para su uso en procesos de fitorremediación: el caso de *Heliconia psittacorum*. *Revista de Ciencias*, 17(2), 37-46.

Peña-Salamanca, E. J., Ramírez-Lamus, J. C., Cabrera-Arana, H. M., Jiménez-Bambague, E. M., & Madera-Parra, C. A. (2025). Bioremediation strategies for the treatment of Emerging Contaminants: a view from Phytoremediation. *Ingeniería y Competitividad*, 27(1), Artículo e-30213470. <https://doi.org/10.25100/iyc.v27i1.13470>

Romero Núñez, S. E., Marrugo Negrete, J. L., Arias Rios, J. E., Hadad, H. R., & Maine, M. A. (2010). Hg, Cu, Pb, Cd, and Zn accumulation in macrophytes growing in tropical wetlands. *Water, Air, & Soil Pollution*, 216(1-4), 361–373. <https://doi.org/10.1007/s11270-010-0538-4>

Valois-Cuesta, H., Martínez-Ruiz, C., & Quinto-Mosquera, H. (2022). Revegetación natural de áreas afectadas por minería de oro en la selva pluvial tropical del Chocó, Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 70(1), 742–767. <https://doi.org/10.15517/rev.biol.trop.v70i1.48805>

Vidal Durango, J. V., Marrugo Negrete, J. L., Jaramillo Colorado, B., & Perez Castro, L. M. (2010). Remediación de suelos contaminados con mercurio utilizando guarumo (*Cecropia peltata*). *Ingeniería y Desarrollo*, (27), 113-129. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=85215098007>

Wang, L., Hou, D., Cao, Y., Ok, Y. S., Tack, F. M. G., Rinklebe, J., & O'Connor, D. (2020). Remediation of mercury contaminated soil, water, and air: A review of emerging materials and innovative technologies. *Environment International*, 134, 105281. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105281>

Wu, S., He, H., Inthapanya, X., Yang, C., Lu, L., Zeng, G., & Han, Z. (2017). Role of biochar on composting of organic wastes and remediation of contaminated soils—a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(20), 16560–16577. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9168-5>

Yang, Q., Wang, Y., & Zhong, H. (2021). Remediation of mercury-contaminated soils and sediments using biochar: A critical review. *Biochar*, 3(1), 23–35. <https://doi.org/10.1007/s42773-021-00087-1>