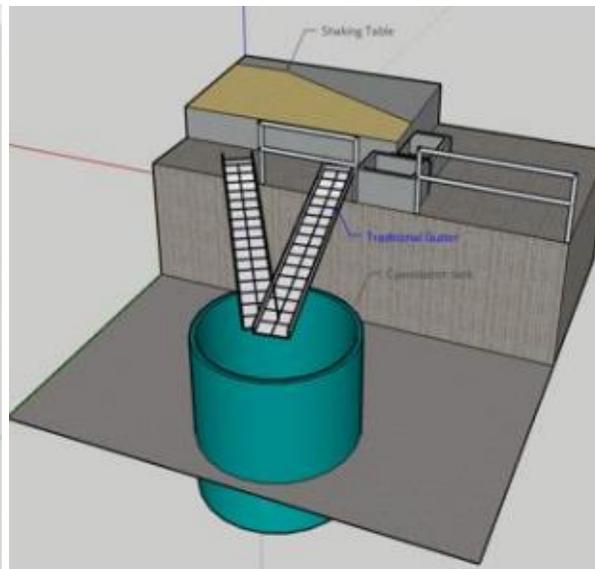
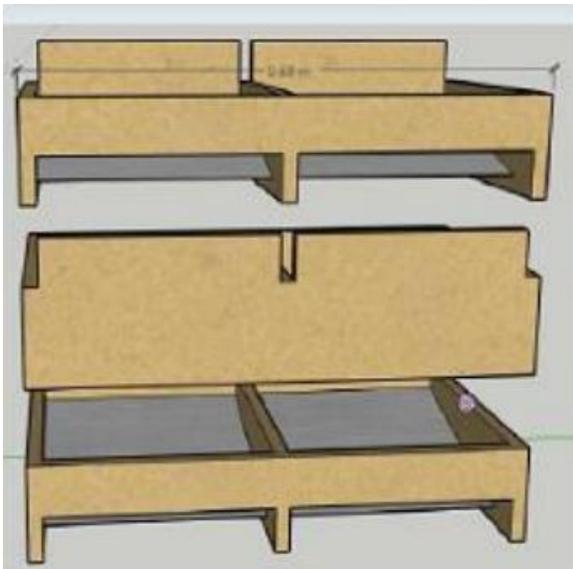


Promoviendo la recuperación y manejo responsable del mercurio en los relaves contaminados de minería de oro artesanal en Colombia

Modelo de implementación y económico para el uso de las placas de cobre

Febrero 2022



Financiado por:



En asociación con:



El ambiente es de todos

Minambiente

Implementado por:



Esta publicación fue financiada por una subvención del Departamento de Estado de los Estados Unidos. Las opiniones, los resultados y las conclusiones que se expresan en este documento son de los autores y no reflejan necesariamente las del Departamento de Estado de los Estados Unidos.



Tabla de contenido

1.	Introducción	4
2.	Objetivos	5
3.	Recuperación de mercurio en relaves	6
3.1.	Descripción general de la técnica de placas de cobre	7
3.2.	Preparación de placas de cobre	8
3.2.1.	Plateado de placas	9
3.3.	Guía para desarrollar pruebas piloto	14
3.3.1.	Tipos de montaje	14
3.3.2.	Requisitos de instalación	16
3.3.3.	Procedimiento de operación	16
4.	Modelo económico	22
4.1.	Costo de implementación de las placas de cobre	22
4.2.	Integración de costos a una planta de beneficio	24
4.2.1.	Variables generales	25
4.2.2.	Seguridad Social	25
4.2.3.	Variables de producción	26
4.3.	Esquema de rentabilidad	27
4.3.1.	Inversión	27
4.3.2.	Ingresos no gravables	27
4.3.3.	Egresos deducibles	28
4.3.4.	Impuestos	29
4.3.5.	Flujo de caja	29



Equipo técnico

Alfonso Rodríguez Pinilla

Director Pure Earth Colombia

Angie Tatiana Ortega-Ramirez

Coordinadora de Proyectos Pure Earth Colombia

Lina Hernández

Coordinadora Regional para América Latina y el Caribe Pure Earth

Diego Fernando Marín Maldonado

Investigador Pure Earth

Laura Andrea Vera Álvarez

Investigadora Pure Earth

Agradecimientos a

Shun-Ping Chau

Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA)

Marcello Veiga

Profesor Emérito, Universidad de Columbia Británica



1. Introducción

Bajo el alcance del proyecto *“Promoviendo la recuperación y manejo responsable del mercurio en los relaves contaminados de minería de oro artesanal en Colombia”*, financiado por el Departamento de Estado de Estados Unidos y ejecutado por Pure Earth, se presenta el siguiente documento que corresponde a un modelo de implementación de la tecnología denominada *“Placas de Cobre”*, la cual fue seleccionada como una de las alternativas más promisorias para la recuperación de mercurio de los relaves contaminados dentro de una serie de alternativas revisadas y presentadas por expertos nacionales e internacionales.

La presencia de relaves contaminados con mercurio en Colombia es un problema que no se puede omitir. Mas aún por la evidencia generada a partir de los datos recopilados bajo el proyecto de identificación de sitios y relaves financiado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y apoyado por Pure Earth entre el 2020 y 2021. A través de este proyecto se identificaron 34 relaves con concentraciones entre 13 y 153 mg/kg de Mercurio (Hg) en los departamentos de Antioquia, Bolívar, Cauca y Nariño.

Adicional a las concentraciones de mercurio reportadas en los relaves, también se encontraron concentraciones representativas de Oro (Au) que hace que este material sea atractivo para las comunidades mineras artesanales y se abra la posibilidad de reprocesarlos con el fin de extraer el oro restante presente.

La información presentada en este documento recoge las experiencias desarrolladas durante más de tres años de trabajo en la adaptación de las Placas de Cobre y su funcionamiento, las cuales incluyen pruebas a escala de laboratorio y tres fases de pruebas piloto en campo, en donde se procesaron más de 100 toneladas de relaves con diferentes características y concentraciones de Mercurio (Hg) y Oro (Au).



2. Objetivos

Los objetivos del modelo de implementación son:

- Presentar los criterios técnicos para la fabricación de las placas de cobre y su operación para la recuperación de mercurio de los relaves.
- Diseñar la base de un modelo económico de costos en la implementación de la técnica, que sirva como base de cálculo para la implementación a diferentes escalas y capacidades.
- Establecer un modelo de sostenibilidad de la técnica teniendo en cuenta los pilares del Desarrollo sostenible y su financiamiento con el potencial de recuperación del oro residual presente en los relaves.

En forma complementaria se esperan cumplir con:

- Reducir el Mercurio (Hg) presente en los relaves ocasionados por minería artesanal y de pequeña escala para mitigar su impacto negativo en el ambiente y la salud humana.
- Facilitar el reprocesamiento de relaves para la recuperación de valor agregado del Oro asociado en los relaves.
- Generar mayor grado de concientización a los mineros artesanales y de pequeña escala acerca de la importancia de eliminar el uso del Mercurio para la extracción de Oro.
- Identificar incentivos a las comunidades mineras que promueva la implementación de esta tecnología como práctica recurrente o permanente en sus operaciones.



3. Recuperación de mercurio en relaves

La extracción de oro por la MAPE es un proceso que se traduce en el sustento de miles de mineros artesanales alrededor del mundo. En Colombia, el sector minero genera más de 150.000 empleos directos (Mintrabajo, 2019), dentro de los cuales el 72% provienen de pequeña minería y dentro de este porcentaje, el 66% corresponde a minería ilegal (Güiza, 2013). Dichas prácticas ilegales son la fuente y la principal razón de contaminación por mercurio a través de los relaves que se producen por todo el país, generando daños a la salud humana y al ambiente. Debido a que la mayoría de los efectos a la salud por mercurio son a largo plazo, los mineros los consideran como inexistentes, sin embargo, la exposición a este compuesto puede causar graves problemas como: afectaciones irreversibles en el desarrollo intrauterino y en las primeras etapas de vida del ser humano. Además, el mercurio afecta el sistema nervioso e inmunitario, el aparato digestivo, la piel, los pulmones, los riñones y los ojos (Organización Mundial de la Salud, 2017). Por otro lado, los escasos recursos con los que cuentan los mineros artesanales evitan la construcción de relaveras o el correcto tratamiento de los relaves, y, aunque el mercurio ya es un elemento prohibido, se sigue utilizando ilegalmente en lagunas zonas del país, lo que deja como resultado un creciente número de relaves contaminados con mercurio en condiciones de necesidad de atención y gestión.

Recuperar el mercurio utilizado en la MAPE y también el usado en la industria en compañías que fabrican productos como amalgamas dentales, termómetros, baterías y joyas. Siendo la MAPE el que libera casi el 82% del Mercurio al ambiente., etc, puede significar la reducción de la contaminación por mercurio en el aire, en el suelo y hasta en fuentes hídricas; un ejemplo de esto se materializa en el posible regreso del coral a la bahía de Minamata en Japón, que alguna vez estuvo muy contaminada y actualmente continúa en proceso de restauración (ONU, 2020). Recuperar el mercurio de los relaves puede significar que la actividad microbiológica vital para la cadena alimentaria en los suelos se estabilice, además se puede reducir la bioacumulación en los peces que absorben con gran facilidad el metilmercurio y en consecuencia reducir las concentraciones de mercurio en la cadena trófica que termina con el consumo por depredadores mamíferos del nivel superior de la cadena alimentaria acuática, por ejemplo: el águila pescadora y, en efecto, el ser humano. (UNEP, 2018)

Existen diversas técnicas prometedoras para la recuperación de mercurio de los relaves, sin embargo, se deben tener en cuenta criterios como bajo costo, fácil acceso, implementación en campo, desempeño y complejidad entre otras, para seleccionar la tecnología más apropiada que se adecue a una planta de proceso artesanal. La metodología utilizada para llevar esto a cabo esta revisión, consistió en primera instancia, en una búsqueda secuencial de información en bases de datos como Science Direct (Para mayor información consultar el *Reporte Tecnologías de Recuperación de Mercurio de Relaves, Pure Earth*) para recoger información general de técnicas relacionadas con la recuperación de mercurio (Hg) de los relaves. En esta revisión se identificaron 17 tecnologías, dentro de las cuales solo 8 se clasificaron como las más prometedoras teniendo en cuenta que se tenían que encontrar en escala piloto o superior y que debían



cumplir con el objetivo de recuperar mercurio en su estado elemental (Hg^0) preferiblemente. Dichas tecnologías son:

- Placas de cobre
- Flotación de espuma
- Electrólisis
- Carbón activado y electrodeposición
- Nanotecnología
- Destilación
- Quemadores inteligentes
- Métodos de concentración gravimétrica

Después de evaluar cada criterio, la técnica denominada “Placas de Cobre” resultó ser la mejor opción para la recuperación de mercurio, debido a que sus condiciones de operación permiten su implementación en cualquier situación y terreno, además es de bajo costo en relación con otro tipo de técnicas.

Todas las formas químicas del mercurio representan una problemática debido a su habilidad para ser foco de contaminación. El mercurio inorgánico, que se obtiene cuando el mercurio se combina con elementos tales como el cloro (Cl), azufre (S) y oxígeno (O), se puede encontrar en la industria por medio de equipos tecnológicos, médicos y productos para el cuidado de la piel, el mercurio orgánico (Ejemplo, metilmercurio) se puede encontrar en bactericidas y plaguicidas (ATSDR, 2018), sin embargo, de todas las formas de mercurio las placas de cobre se enfocan principalmente en recuperar mercurio elemental (Hg^0), un compuesto de color gris plateado que a temperatura ambiente es líquido; esta especie de mercurio es la utilizada por los mineros artesanales para hacer la amalgama con el oro y así extraer lo máximo posible de este último metal.

3.1. Descripción general de la técnica de placas de cobre

El uso de placas de cobre para la recuperación de mercurio de los relaves presenta, como se mencionó previamente, suficientes ventajas para ser implementadas en campo por pequeños mineros como poca inversión y grandes beneficios.

Aunque la tecnología presenta un grado de eficiencia importante acorde a los reportados en las pruebas piloto, se recomienda que se adapte a otros procesos, especialmente físicos, con el fin de aumentar dicha eficiencia en la cantidad de mercurio recuperado.

En forma de antecedente, se tiene información que esta técnica ha sido también probada en forma piloto en países como Venezuela, Costa Rica y Brasil. Sin embargo, no se han encontrado evidencias científicas ni reportes que confirmen estas pruebas y más aún que den detalle alguno del porcentaje de mercurio recuperado.

Esta técnica ha sido presentada por el ingeniero Marcello Veiga, uno de los expertos internacionales en el campo de la minería enfocada a la recuperación del Mercurio, quien, desde documentos como *Tecnologías alternativas para el beneficio del oro*, ha buscado

contribuir a la difusión de las técnicas y tecnologías de la minería artesanal como una estrategia para eliminar el uso del Mercurio en Colombia.

La tecnología comprende el uso de placas de cobre (Cu), ubicadas en forma de cascada recubiertas con plata (Ag) y su principio corresponde a la captura de gotas de mercurio elemental que se adhieren a las placas gracias a la afinidad que tiene la plata por el mercurio. Estos dos últimos elementos son metales de transición y tienen la característica y habilidad de formar aleaciones entre ellos, lo que hace posible el atrapamiento. Un esquema simple del funcionamiento de esta tecnología de muestra en la Ilustración 1. Técnica de placas de cobre Ilustración 1.

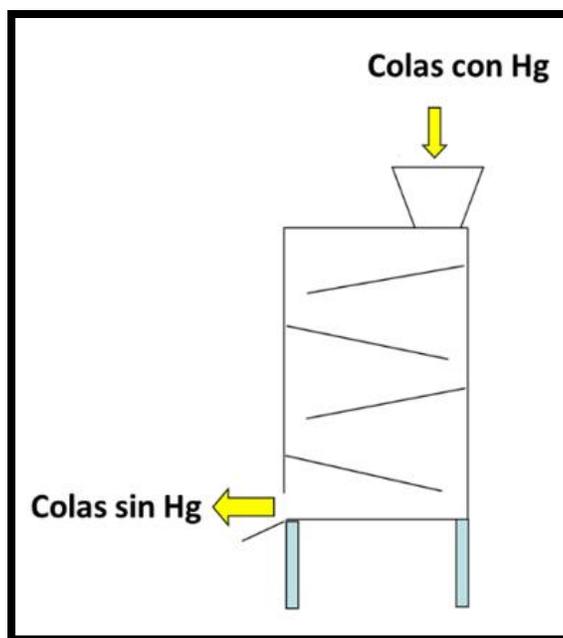


Ilustración 1. Técnica de placas de cobre.

Fuente: Tecnologías alternativas para el beneficio del oro - Marcello Veiga.

3.2. Preparación de placas de cobre

Para que el proceso de recuperación de mercurio presente en los relaves sea posible, es necesario realizar un adaptación y preparación de las placas de cobre. Uno de los principales factores a determinar en el uso de la técnica corresponde al tamaño de las placas. Teniendo como base la información disponible inicial en la técnica se decide usar el mismo tamaño recomendado el cual corresponde a una placa de 30 cm x 30 cm. Este tamaño permite una fácil adaptación de las placas a los procesos en planta y su cambio en forma rápida, sin afectar los tiempos de operación que tienen estimados los mineros.

Otra variable en la construcción de las placas corresponde al espesor de la misma, la cual puede variar entre 1,5 mm a 2 mm. La variación depende en primer lugar por la

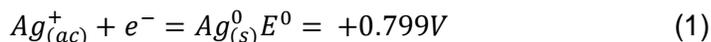


disponibilidad del proveedor, sin embargo, el único factor representativo que se evidenció en las diferentes pruebas piloto corresponde al peso de las placas. Es decir que los espesores utilizados no afectaron la recuperación de mercurio.

3.2.1. Plateado de placas

El principio clave en la captura del mercurio en esta tecnología está en la afinidad de la Plata (Ag) por el Mercurio (Hg), por lo que es necesario realizar un plateado electroquímico de las placas de cobre, el cual, es uno de los procesos más reconocidos de la industria (Lagos y Camus, 2017). El propósito principal del plateado es poder generar una superficie de plata con el fin que se forme una amalgama entre el contacto del mercurio y la plata sobrepuesta en la placa de cobre, principalmente aquel que podría estar disponible en forma elemental (Hg^0), en el relave, sin descartar otro tipo de compuestos como óxidos de mercurio.

De acuerdo con lo anterior, es necesario tener en cuenta que la plata es un metal muy electropositivo (+0.799V), y es desplazada de la solución por prácticamente todos los metales (Bard & Faulkner, 2001), depositándose con gran velocidad en forma de polvo negro sin ninguna adherencia, de acuerdo con la siguiente reacción:



La única manera de evitar este inconveniente es desplazando el potencial hacia valores más electronegativos; por ejemplo, mediante la disminución de la concentración de los iones de Ag^+ en la solución. Esto se puede realizar utilizando sales complejas, como los cianuros dobles, amoniacos dobles, etc.; de esta manera se produce la siguiente reacción:



De esta manera el ion $[Ag(CN)_2]^-$ no se reduce con tanta facilidad porque los ligandos estabilizan al ion de plata en su estado de oxidación +1, desplazando el potencial considerablemente. Sin embargo, un recubrimiento de mejor calidad se puede conseguir utilizando electrolitos que contienen plata a partir de diferentes complejos tales como $K[Ag(CN)_2]$, K_2AgI_3 , $[Ag(NH_3)_2]Cl$, $AgBF_4$.

Un compuesto complejo de plata, tal como el cianuro doble de plata y potasio $K[Ag(CN)_2]$, puede caracterizarse por su constante de formación numéricamente igual a $K_f = 1.0 * 10^{21}$

y las soluciones que producirán un mejor brillo y calidad serán aquellas que posean las mayores constantes de formación, es decir, los complejos cianurados (Lagos & Camus, 2017).

Los iones complejos deben disociarse continuamente en el medio acuoso, en presencia de un potencial eléctrico. Los potenciales de descarga del ion de plata varían no solo con la naturaleza del ligante, sino también con otros parámetros de la electrólisis (densidad de corriente, principalmente) y con los parámetros fisicoquímicos de la solución como el pH, la agitación y la temperatura (Ortiz González, 2011).

Los iones complejos de plata se dirigen hacia el cátodo donde deben disociarse antes de reducirse sobre la superficie metálica, de esta manera el ion libre (o hidratado) se descarga en la interface ganando electrones originando el átomo de plata que se irá acomodando en el retículo cristalino para ir formando los microcristales que, en definitiva, producen el brillo metálico. Se ha comprobado que los iones cianurados de plata pueden reducirse como complejos para generar plata metálica Ag^0 ; de acuerdo con esta teoría, el ion de plata no se descarga libre, sino en forma de complejo, sin embargo, finalmente se deberá producir la siguiente reacción en el cátodo:

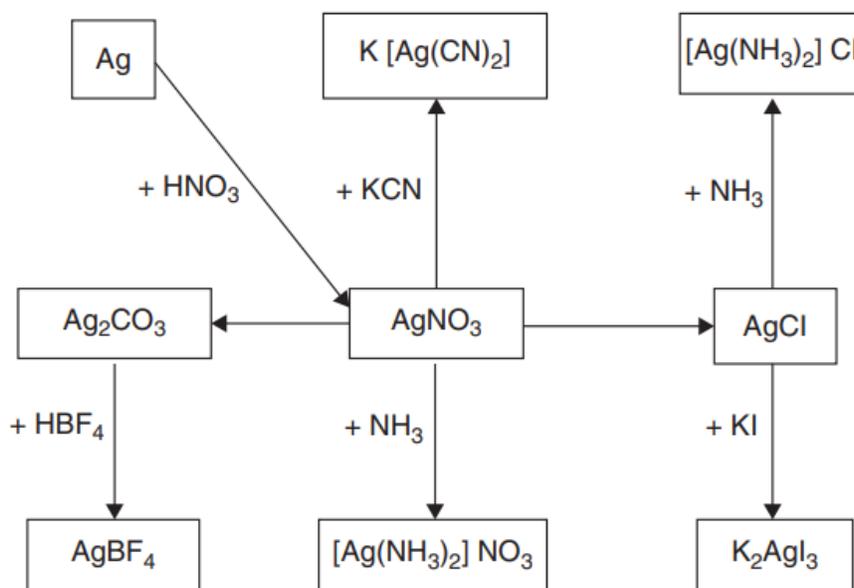
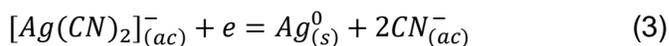


Ilustración 2. Mapa de síntesis de diversos complejos de plata.
Fuente: R. Lagos, J. Camus.

De acuerdo con el mapa de síntesis presentado en la Ilustración 2, la base para la preparación de los diferentes electrolitos de plata es el nitrato de plata ($AgNO_3$), el cual se prepara con base en la siguiente reacción:



Como se observa en la reacción (4), se emanan vapores nitrosos muy tóxicos, por esta razón, es recomendable atraparlos trabajando bajo campana de extracción de gases.

Para llevar a cabo el proceso descrito anteriormente, se propone la siguiente ruta con las respectivas cantidades de reactivos:



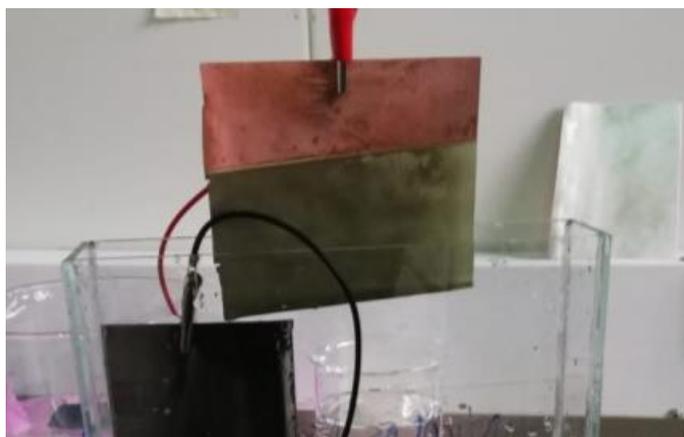
*Ilustración 3. Procedimiento para el plateado electroquímico de las placas de cobre.
Fuente: Pure Earth.*

La mezcla de las soluciones 1 y 2 para la precipitación de AgNO_3 con KCN , provoca la siguiente reacción:



El AgCN producido en la reacción (5) que posteriormente se vuelve a mezclar con el KCN para producir el cianuro doble de plata $[\text{Ag}(\text{CN})_2]^-$ es el responsable de la película generada en la placa de cobre y el KNO_3 no entra en la celda electrolítica ya que este se desecha por actuar como precipitante.

A continuación, algunas imágenes de este proceso:



*Ilustración 4. Plateado de placas de cobre con potencial eléctrico.
Fuente: Pure Earth.*

En la Ilustración 4 se evidencia la placa de cobre luego de ser sometida al proceso electroquímico de plateado, allí se observa una capa plateada con Plata (Ag) lista para retener el mercurio presente en el relave. La Ilustración 5 muestra cómo queda una placa de cobre después de su proceso completo de plateado por electrólisis.



Ilustración 5. Placa plateada con superficie irregular.
Fuente: Pure Earth.

3.3. Guía para desarrollar pruebas piloto

Teniendo las placas ya plateadas, es importante establecer el montaje más recomendable para hacer el paso de la solución de relaves a través de ellas y así poder recuperar el mercurio presente. A continuación, se presentan las diferentes alternativas que fueron probadas durante las pruebas piloto.

3.3.1. Tipos de montaje

El principio de las placas de cobre corresponde a la captura de las gotas de mercurio elemental (Hg^0) sobre la superficie de las placas, debido a esto es importante tener en cuenta factores como el grado de inclinación, porcentaje de sólidos, tipo y cantidad de flujo y el tiempo de residencia del relave con la superficie de las placas para conseguir la mayor afinidad posible entre la plata presente en la superficie de las placas y el mercurio contenido en el relave. Por lo anterior, se sugieren dos tipos de montaje de acuerdo con los resultados obtenidos de las pruebas piloto de las placas de cobre ([Revisar Reporte técnico de pruebas piloto de placas de cobre](#)).

Montaje de tipo modular

Uno de los montajes usados fue diseñado para ubicar las placas corresponde a un esquema tipo modular, en el cual permite ubicar las placas en parejas con una pendiente aproximada de 15 grados de inclinación, lo que permite un flujo constante entre los pisos de placas para aumentar el área de contacto. La cantidad del par de placas depende del lugar donde se ubiquen.

Teniendo en cuenta que cada una de las placas tiene un tamaño de 30 x 30 cm, el área total de contacto puede variar entre 3.600 cm² para el mínimo número de placas recomendado (4) y 10.800 cm² si se utiliza el número máximo recomendado de placas (12). En la Ilustración 6 se puede observar el diseño y el montaje anteriormente descrito.

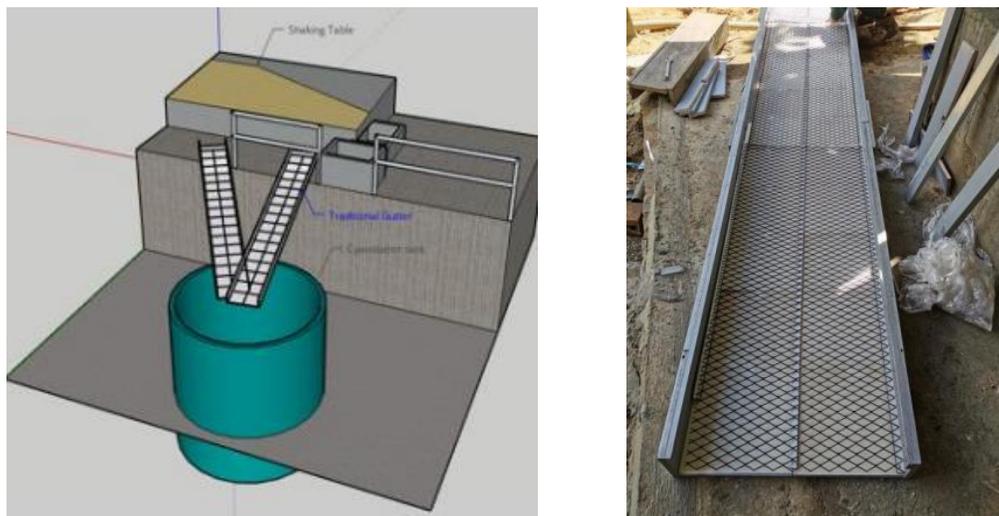


*Ilustración 6. Montaje modular de las placas de cobre.
Fuente: Pure Earth 2020*

Una de las grandes ventajas que presenta este montaje es su operabilidad y flexibilidad, esto facilita el traslado de las placas de una sección del proceso a otra para, a su vez, conseguir mayor variabilidad en los resultados, además de incrementar la velocidad de ejecución de las pruebas. Sin embargo, el tiempo de residencia es un factor clave para la efectividad de la técnica, por esto, puede suponer una desventaja que la cantidad de placas a instalar sea baja.

Montaje de tipo canalón

El diseño consta de un sistema tipo canalón con 30 placas y una malla expandida con una pendiente de 10° de inclinación. Está compuesto por 3 piezas de 1.5m, que unidas representan 4.5 m de longitud. Al igual que el montaje modular, cada una de las placas tiene un tamaño de 30 x 30 cm, lo que corresponde a un área total de contacto de 27.000 cm² siendo 5 veces mayor. Este montaje permite un mayor tiempo de residencia del relave con la superficie de las placas con el fin que el mercurio presente haga contacto con las placas y forma la amalgama con la plata. De igual manera, cabe sugerir la importancia de lograr un flujo lo más turbulento posible para aumentar la eficiencia del proceso. El montaje descrito se observa en la Ilustración 7.



*Ilustración 7. Montaje tipo canalón de las placas de cobre.
Fuente: Pure Earth 2021.*

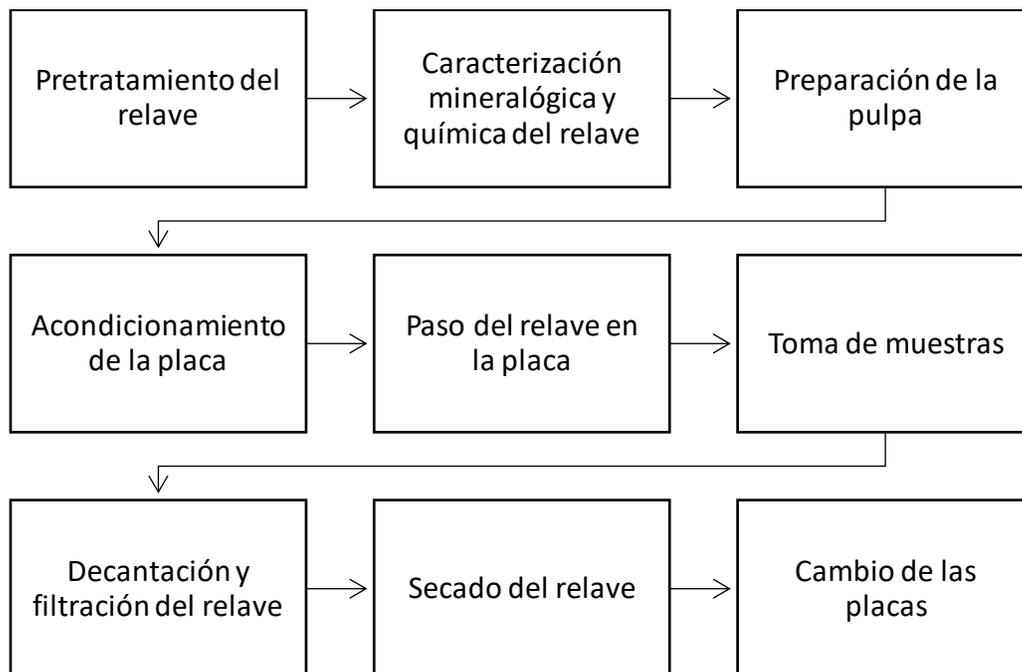
3.3.2. Requisitos de instalación

Teniendo en cuenta la importancia de la recuperación de mercurio en los relaves, se sugiere la instalación de cualquiera de los módulos anteriormente descritos en una planta de beneficio de minerales. La selección del mismo dependerá del espacio disponible para tal fin. Aunque no se descarta la instalación en zonas remotas con un pequeño módulo, se recomienda que la planta cumpla con algunos requisitos básicos para su máximo aprovechamiento entre lo que están como mínimo:

- Sitio de preparación de relaves
- Tanque de almacenamiento (tipo cianuración): El convenio de Minamata afirma que el mercurio debe ser retirado antes de los procesos de cianuración, por esto, es necesaria la presencia de un tanque para medir la efectividad de las placas por medio del muestreo de la cantidad de mercurio depositado en el tanque.
- Relavera: La presencia de una relavera cercana puede facilitar la ejecución de las pruebas porque evita la falta de material disponible usado como muestra.
- Suplencia de agua.
- Suplencia de energía para bombas de proceso.

3.3.3. Procedimiento de operación

Con el objetivo de asignar un tratamiento óptimo para la recuperación de oro y mercurio de los relaves se sugiere tener en cuenta diferentes pasos los cuales se presentarán de manera resumida en el siguiente diagrama.



*Ilustración 8. Diagrama de flujo del procedimiento de operación de las placas de cobre.
Fuente: Pure Earth 2022.*

- **Pretratamiento del relave**

En el pretratamiento del relave se realiza una clasificación del mismo dependiendo del tamaño de partícula. Para lo anterior, es necesario tamizar el relave en malla de 30 y 70 y concentrar el material por medio de una mesa vibratoria para obtener dos tipos de relaves (el concentrado y el fino). El fino se transporta directamente hacia las placas de cobre, mientras que el concentrado es dirigido a un concentrador para posteriormente realizar su paso por las placas. Independientemente de su clasificación los dos tipos de relaves deben seguir el mismo protocolo de procesamiento de pruebas.

- **Caracterización previa del relave**

Se sugiere caracterizar mineralógica y químicamente el relave con el objetivo de conocer en dónde y en qué cantidades se está presentando el oro y el mercurio para su correcto procesamiento y manipulación. Además, debe tenerse en cuenta que muchos de los relaves abandonados no corresponden a un solo tipo de explotación y pueden encontrarse mezclas de diversos relaves, por lo que su caracterización se hace necesaria.

Este proceso consta de 3 partes:



- Muestreo: Una correcta caracterización de los relaves incluye un buen esquema y una estrategia de muestreo, ya que esto puede indicar la ubicación y condición en la que se encuentra el relave.
- Caracterización mineralógica: Una caracterización mineralógica es de vital importancia en la toma de decisiones para la gestión de un relave, allí se puede identificar la presencia de minerales ricos en metales que pueden resultar de interés.
- Caracterización química: Esta etapa permite identificar la presencia de las sustancias de interés sanitario y ambiental que puedan estar presentes en el relave y priorizar las que aportan información relevante al proceso.

La mineralogía de los relaves se realiza por medio de dos pruebas: la primera a través de la técnica analítica de Fluorescencia de Rayos X (FRX) con el equipo Epsilon 1 – Panalytical, el cual reporta las concentraciones de los elementos en porcentaje. La segunda prueba es realizada por laboratorios especializados y consiste en una difracción de rayos X (DRX) con el equipo de referencia Aeris y cuyo fin es detectar estructuras cristalinas en la muestra y permite conocer los minerales presentes en esta.

En cuanto a la caracterización química se implementan dos métodos analíticos: uno corresponde a la determinación de metales pesados en relaves usando dispositivos de análisis tipo “screening” como el Analizador Portátil de Fluorescencia de Rayos X (XRF) (Marcas utilizadas en las prueba Olympus y Niton), se sugiere tomar aproximadamente 10 mediciones por muestra. Adicional al equipo en mención, también se recomiendan los analizadores de vapores de mercurio como Lumex, Jerome o Hermes.

Se sugiere tomar muestras de aproximadamente 300 g de relave en una bolsa, manteniéndola sellada por espacios de 20 minutos, y posteriormente se sugiere realizar mediciones de vapor de mercurio con el equipo Hermes.

El otro método corresponde a la absorción atómica por ensayo al fuego y con vapor frío para análisis de oro y mercurio total respectivamente; estas pruebas son realizadas por laboratorios acreditados.

- **Preparación de la pulpa**

Para la preparación de la pulpa se debe tener en cuenta el porcentaje de sólidos con el objetivo de evitar atascos o retención de material no deseado. De esta manera, se sugiere que la pulpa tenga una concentración de sólidos de 25% a 40%.

Con el fin de trasladar la solución de relave a las placas de cobre, es necesario disponer de una bomba con la capacidad de transportar sólidos a una potencia adecuada para obtener la máxima eficiencia posible de las placas. Se sugiere que dicha potencia sea aproximadamente de 520 kw.



- **Acondicionamiento de la placa**

Además de lo mencionado en el apartado 3.2 de este documento (preparación de las placas de cobre), se sugiere tener en cuenta la posición de las placas para obtener un mayor rendimiento en el proceso. Para esto es necesario que bajo su criterio basado en las condiciones que observa en campo y lo recomendado en este documento seleccione el mejor tipo de montaje, ya sea modular o canalón.

- **Paso del relave en la placa**

Es importante que la pulpa (mezcla de relaves con agua) mantenga un flujo constante en las placas para evitar, como se mencionó anteriormente, posibles atascos o retención de material no deseado. Sin embargo, este flujo debe ser lo más turbulento posible. Por lo tanto, el relave debe pasar por la placa a razón de 1,5 L/min por triplicado.

- **Toma de muestras**

Con el objetivo de medir la recuperación del mercurio y la cantidad de oro en el relave, se sugiere tomar muestras en recipientes o baldes que permitan recoger aproximadamente 500 ml de la pulpa a la entrada y a la salida de las placas. Este proceso debe realizarse de forma continua dependiendo del tiempo de operación, para lograr la acumulación de muestras en diferentes momentos del proceso.

- **Decantación, filtración y secado del relave**

Luego de la toma de muestras, se sugiere dejar decantar la solución aproximadamente por 5 horas y posteriormente a esto filtrar el relave y secarlo por un tiempo promedio de 6 horas en un desecador. Posteriormente, las muestras secas se analizan por Fluorescencia de Rayos X con el equipo portátil, Absorción atómica en el laboratorio y vapores de mercurio con el equipo HERMES.

- **Cambio de placas**

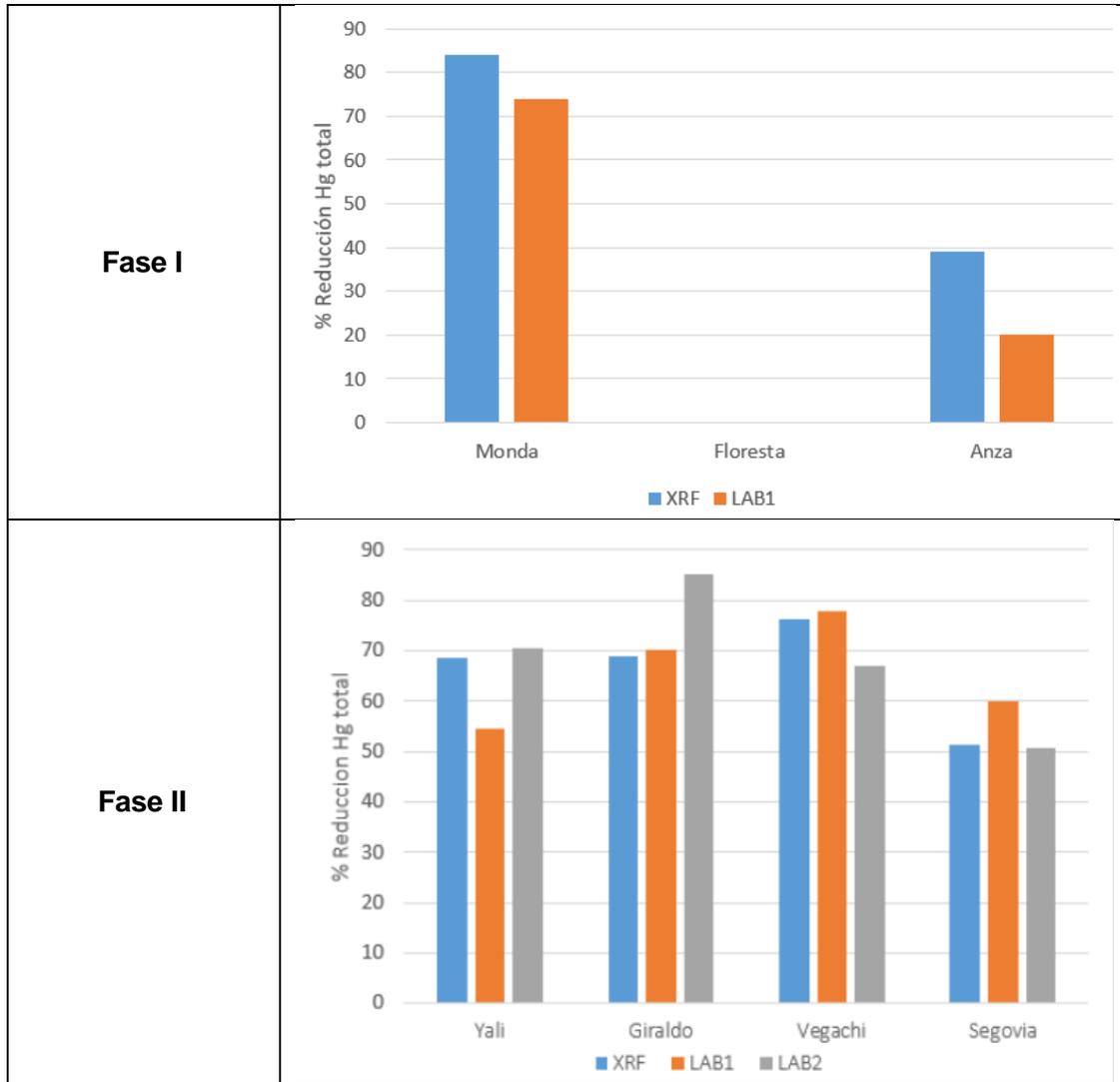
Finalmente, para aumentar el rendimiento de remoción de mercurio de los relaves se sugiere cambiar las placas cada 2 pruebas de aproximadamente 7 ton por prueba por ambas caras de la placa. Es necesario hacer el cambio por la oxidación que presentan las placas, esta oxidación está regida por la edad del relave, entre mayor edad tenga el relave mayor oxidación se presentará en las placas.

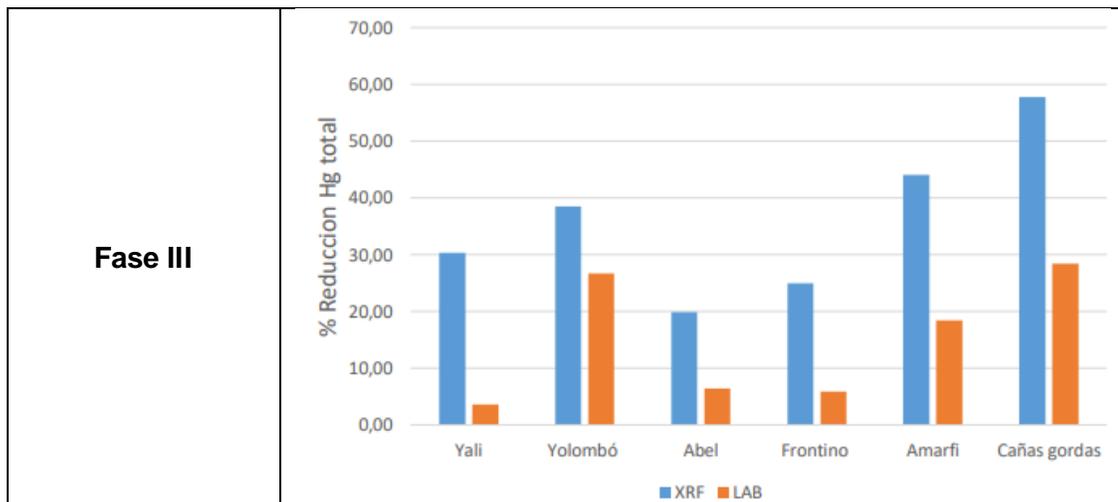
3.4. Resultados en la recuperación de mercurio

Con el fin de probar la efectividad de las placas de cobre en la recuperación de mercurio elemental (Hg^0) que pueda estar presente en los relaves que son reprocesados para la obtención de oro por parte de la minería a pequeña escala, se llevaron a cabo pruebas piloto en campo en 3 fases. A continuación, se presentan los resultados obtenidos en cada fase:



Tabla 1. Resultados obtenidos de las pruebas piloto en sus tres fases.





El porcentaje de reducción de Hg total es el factor más importante a tener en cuenta ya que el objetivo principal es reducir la mayor cantidad de mercurio antes de que el relave ingrese al proceso de cianuración y como se puede observar en la Tabla 1, en cada fase hay una reducción significativa del porcentaje de mercurio presente en los relaves.



4. Modelo económico

Para establecer la viabilidad del proyecto de implementación de las placas de cobre, con el fin de recuperar el mercurio de los relaves contaminados, se aplicó la metodología de evaluación financiera de proyectos.

Como punto de partida, un proyecto de inversión se define como un plan, al que se le asigna un determinado monto de capital y se le proporcionan insumos de varios tipos, para producir un bien o servicio. (Meza Orozco, 2017; Meza Orozco, 2017)

El ciclo de vida de un proyecto de inversión contiene cuatro etapas: idea, preinversión, inversión y operación. La etapa de formulación, después de identificado el problema o la oportunidad de negocio, tiene como propósito principal determinar el monto de la inversión inicial, los ingresos y egresos del proyecto mediante una serie de estudios secuenciales como el estudio de mercado, técnico, administrativo y financiero.

A través del estudio financiero se toma el ejercicio realizado en todos los demás estudios y se busca determinar la viabilidad del proyecto, determinando la inversión inicial, calculando los ingresos y determinando los egresos, que da como resultado los flujos netos de efectivo. Estos flujos permiten realizar la evaluación financiera del proyecto aplicando herramientas como el Valor Presente Neto – VPN - y la Tasa Interna de Retorno – TIR -. Para que el proyecto sea aceptable se debe obtener un VPN positivo y una TIR mayor que la tasa de descuento establecida.

A continuación, se desarrollará esta metodología para incluir en el proceso de la obtención de oro de los relaves el uso de las placas de cobre, con el fin de recuperar la mayor cantidad de mercurio, teniendo en cuenta que todos los datos que se presentarán se tomaron de los resultados de las pruebas piloto en sus tres fases realizadas en la planta de procesamiento de relaves “Juan Díaz”, por lo tanto, pueden existir variaciones en los costos respecto a la implementación de las placas en otras plantas de procesamiento de relaves. Como base de trabajo se tomó el modelo de costos realizado en el año 2018 por el Servicio Geológico Colombiano y el Ministerio de Minas y Energía, en donde se tomó como referencia una mina llamada La Llanada en el departamento de Nariño (Servicio Geológico Colombiano, 2018)

4.1. Costo de implementación de las placas de cobre

La implementación de las placas de cobre significa una inversión inicial y esta se divide en dos fases: Fase de plateado y Fase de montaje y los costos se pueden evidenciar a continuación.

Tabla 2. Costos de equipo y reactivos para fase de plateado.

FASE DE PLATEADO



DESCRIPCIÓN EQUIPO	ESPECIFICACIÓN TÉCNICA	VALOR COMERCIAL UNITARIO COP \$ *	CANTIDAD	VALOR COMERCIAL TOTAL COP \$
Celda de vidrio	4 MM 35*35	55.000	1	55.000
Celda de vidrio	4 MM 35*10*35	97.000	1	97.000
Mts cable	#8	5.000	10	50.000
Beaker	250 ml	6.303	2	12.606
Beaker	400 ml	8.655	3	25.965
Beaker	2000 ml	35.294	2	70.588
Bolsa	25x2	800	2	1.600
Agitador	De vidrio	3.529	2	7.058
Lámina	300x300 mm	11.500	3	34.500
Film Stretch calibre	-	43.900	2	87.800
Papel filtro	-	3.900	3	11.700
Película repuesto	TAMI Darnel	6.800	1	6.800
Caimán	Extragrande	1.700	4	6.800
Caimán	Mediano x pareja	11.000	2	22.000
Caimán	Pequeño x pareja	3.500	2	7.000
Termómetro	Digital	75.000	1	75.000
Caimán	Grande	2.500	2	5.000
Disco de corte	-	4.300	6	25.800
Lijas	#100	1.600	5	8.000
Soporte universal	-	33.193	1	33.193
Pinza	Doble para bureta	21.849	1	21.849
Vinipel	-	11.400	1	11.400
Ácido nítrico	50%	14.874	3,8 L	14.874
Agua destilada	-	40.756	40 Kg	40.756
Nitrato de Plata	En cristales 99%	1.546.218	500 g	1.546.218
Cianuro de Potasio	-	20.168	500 g	20.168
Fuente de poder Dual		1.100.000	1	1.100.000
Total maquinaria y equipo - fase de plateado				3.398.675

La fase de plateado corresponde a aquellos equipos y reactivos necesarios para el plateado electroquímico de las placas de cobre (Ver 3.2.1).

Tabla 3. Costos de maquinaria y equipo para fase de montaje.

FASE DE MONTAJE



DESCRIPCIÓN EQUIPO	ESPECIFICACIÓN TÉCNICA	VALOR COMERCIAL UNITARIO COP \$ *	CANTIDAD	VALOR COMERCIAL TOTAL COP \$
Tubo presión	2x1	16.900	2	33.800
Set 8 paños	Microfibra	22.900	1	22.900
Válvula bola	PVC 2 L	27.100	4	108.400
Codo presión	90x2	8.800	3	26.400
Tee 2 presión	PAVCO	14.150	4	56.600
Adaptador hembra	2:00 p. m.	9.400	2	18.800
Adaptador macho	2 PR	6.550	2	13.100
Candado	Rojo 3 dial	31.900	1	31.900
Candado	Maleta TSA	48.900	1	48.900
Tapones	2"	4.167	6	25.002
Codo presión	45x2	12.100	4	48.400
Balón volumétrico	500 ml ámbar	36.000	3	108.000
Lámina cobre	x0,60 mts	50.623	16	809.968
Módulos de madera	Con pintura impermeabilizante	-	6	900.000
Bio-remediación lodos xKg	Con metales pesados	1.495	990	1.480.050
Tiras rollo cobre xKg	60cm x 1mm	36.990	28,7	1.061.613
Tiras rollo cobre xKg	60cm x 0.9mm	39.950	67,48	2.695.826
Fabricación y suministro de un módulo tipo canal	4.50 mt de largo x 60 cm de ancho. Dos laterales de 15 cm de alto dividido en 3 partes iguales de: 1.50 mt largo, 60 cm ancho, 15 cm laterales	1.428.000	1	1.428.000
Total maquinaria y equipo - fase de montaje				8.917.659

El valor total de la inversión inicial es de COP **\$12.316.334**.

4.2. Integración de costos a una planta de beneficio

Para realizar una estimación de costos integrada a una planta de beneficio en Colombia, se tiene como referente la planta de procesamiento de relaves “Juan Díaz”, la cual está ubicada en el municipio de Yalí en el departamento de Antioquia. A continuación, se



describen los parámetros que se tuvieron en cuenta para la construcción del modelo financiero que estima los costos y la viabilidad del proyecto:

4.2.1. Variables generales

Las variables generales a aplicar en el esquema de producción de la planta de Yalí son las siguientes:

- **Horizonte de evaluación del proyecto:** Para poder establecer la viabilidad del proyecto se toma como horizonte de evaluación 5 años.
- **Tasa de descuento:** El valor de la tasa de descuento que se toma para efectos de este ejercicio es del 20%. Esta variable hace referencia al porcentaje que quisiera recuperar el inversionista y su valor debe ser menor a la TIR para que el proyecto sea viable.
- **Vida útil de la maquinaria:** Para efectos de depreciación, la vida útil de la maquinaria se establece en 10 años.
- **Inflación:** Se parte de un dato de inflación del 5% para el año 2021 que afectará los precios generales del año 2022. Dado que esta variable es uno de los objetivos de control del Banco de la República, se hace el supuesto que irá disminuyendo en el año 2022 y 2023 para ubicarse en el 3,5% y llegará al 3% en los años 2024 y 2025.
- **Precio del oro:** Para el año 2021 se toma el valor promedio de compra del gramo por parte del Banco de la República en un periodo comprendido entre enero del año 2000 a diciembre del año 2021, y para los demás años se plantea un crecimiento del precio del 6,5%, mediante el uso de un modelo autorregresivo bajo el supuesto que se seguirá presentando interrupciones intermitentes de los procesos productivos generales de la economía por efectos del COVID 19 y sus mutaciones llevando a una cotización al alza constante de este metal.
- **Aumento del Salario Mínimo:** Para el año 2022 se estableció un aumento del salario mínimo por parte del gobierno del 10,04%, sin embargo, para los años siguientes se tomaron valores más conservadores sumando un 1% a la inflación proyectada.

4.2.2. Seguridad Social

Se toman los aportes necesarios por parte del empleador que corresponden al 12% para pensión, 8.5% para salud, 6.96% para ARL, 4% para caja de compensación y se establece un valor del \$400.000 para dotaciones.



4.2.3. Variables de producción

- **Valor relaves:** Se parte del supuesto que los relaves se compran a razón de \$200.000 la tonelada y que el transporte de estos corresponde a un valor de \$400 kilómetro por tonelada. El otro supuesto es que la carga en promedio debe desplazarse por 300 kilómetros que da como resultado \$120.000 por tonelada de relave transportada.
- **Operación planta:** Se establece un funcionamiento de la planta de 8 horas con un turno por día y 25 días de operación en el mes.
- **Volumen de procesamiento:** La capacidad de procesamiento es de 7,5 toneladas por día, lo que representa 187 toneladas al mes.
- **Recuperación de oro:** Según las pruebas realizadas en las diferentes fases del proyecto se estableció que el tenor por tonelada asciende a 5 gr por tonelada, el porcentaje de recuperación de oro es del 79,77% lo que da como resultado una recuperación de oro de 4 gramos por tonelada.
- **Servicios públicos:**

- **Costo de energía eléctrica**

Fórmula para calcular el costo mensual de energía eléctrica:

$$\begin{aligned} \text{Costo de la energía eléctrica (\$)} \\ = \text{Consumo energía (KWh - mes)} * \text{Tarifa} \left(\frac{\$}{\text{KW}} \right) \end{aligned}$$

Donde la tarifa se establece en \$630 por Kilovatio.

- **Costo de agua**

Fórmula para calcular el costo mensual del agua:

$$\text{Costo del agua (\$)} = \text{Consumo mensual de agua (m}^3\text{)} * \text{Tarifa} \left(\frac{\$}{\text{m}^3} \right)$$

Donde la tarifa equivale a \$1,043 por metro cúbico.

La planta de procesamiento de relaves “Juan Díaz” desprecia el costo del agua debido a que obtienen el recurso de una fuente hídrica cercana, sin embargo, es importante tenerlo en cuenta para futuros modelos.



- **Costos:** Los costos indirectos se establecen como un 10% de los costos directos. El costo del mantenimiento de la maquinaria es del 0,5% del costo de ésta y finalmente, dado que ya se cuenta con toda la infraestructura para el procesamiento de los relaves, su costo de oportunidad es de \$40.0000.000. Este último se define como la ganancia obtenida por el alquiler de la planta y sus equipos, usualmente este costo de oportunidad no es tenido en cuenta en los modelos financieros, por ende, se sugiere considerarlo en modelos posteriores.
- **Disposición final de las placas de cobre:** Para establecer el valor de la disposición final de las placas de cobre como manejo de residuo peligroso se toma su peso inicial que es de 0,8 kilogramos y como valor final 1 kilogramo, lo que representa una recuperación de 0,2 kilogramos de mercurio recuperado por placa. Se hace el supuesto de la utilización anual de 42 placas que corresponden a 30 usadas en el canalón y 12 en el cajón de cascada. El precio del manejo de residuo peligroso es de \$1.500 por kilogramo.
- **Impuestos:** Según la legislación tributaria el impuesto a la renta corresponde al 35% y la tasa de regalías al 4%.

4.3. Esquema de rentabilidad

Como se explicó en el apartado anterior el horizonte de evaluación del proyecto es de 5 años, sin embargo, en el modelo se toma el año 0 que es en el período que se realizan las inversiones y el año 6 que corresponde al pago de los impuestos generados en el año 5.

Teniendo en cuenta lo anterior, a continuación, se describen cada uno de los componentes que hacen parte del flujo de caja:

4.3.1. Inversión

La inversión del proyecto se requiere para el montaje y puesta en funcionamiento de los elementos que permitirán el plateado de las placas de cobre, cuya finalidad es la recuperación del mercurio que se encuentra en los relaves.

4.3.2. Ingresos no gravables

Para el actual modelo los ingresos no gravables están representados por las ventas de oro que se realizan en cada periodo. Así, el oro producido es constante y corresponde a la cantidad procesada de relave anual multiplicada por la recuperación total de oro que da como resultado 8.949,74 gramos. El comportamiento del precio del oro se describe en la descripción de parámetros.

Tabla 4. Ingresos no gravables



PROYECCIÓN DE INGRESOS GRAVABLES

CONCEPTO	UNIDAD	0	1	2	3	4	5	6
Producción de oro anual (constante)	g		8.949,74	8.949,74	8.949,74	8.949,74	8.949,74	8.949,74
Total Anual Ingresos por ventas de oro	COP(\$)		\$ 2.001.877.623	\$ 2.211.042.834	\$ 2.442.400.558	\$ 2.697.954.765	\$ 2.979.849.258	
% Variación anual				10,45%	10,46%	10,46%	10,45%	

4.3.3. Egresos deducibles

Las variables que hacen parte de este literal se ajustan año a año por la inflación estimada, salvo los salarios que se ajusten por el incremento del salario mínimo para cada período. Los egresos deducibles están constituidos por:

- **Costo de materia prima:** El costo de la materia prima tiene dos componentes, el costo de los relaves y el costo de su transporte. El total anual se obtiene de multiplicar este valor por el volumen de procesamiento del período.
- **Insumos:** Los insumos están representados por todos aquellos elementos químicos, por las placas de cobre y por los canalones y los cajones de cascada necesarios en el proceso de extracción de oro y recuperación de mercurio de los relaves.
- **Recurso humano:** En este ítem se incluyen los salarios, prestaciones, aportes a la seguridad social y parafiscales de todas las personas que hacen permanente en el proceso de extracción del oro y de la recuperación del mercurio.
- **Seguridad industrial:** Se incluyen todos aquellos elementos necesarios de seguridad industrial para hacer seguro el proceso para los operarios.
- **Mantenimiento:** Como se explicó en la descripción de los parámetros, este representa el 0,5% del costo total de la maquinaria.
- **Pruebas de laboratorio:** Se incluye este apartado, dada la importancia que tienen las pruebas para medir diferentes aspectos a través del proceso. Dentro de estas pruebas se encuentran estudios de absorción atómica para metales, ensayos al fuego y descripción de mineralogía, entre otros.
- **Servicios públicos:** Los servicios públicos están representados por el agua y la energía eléctrica que son necesarios para el tratamiento de los relaves y su uso es proporcional a la cantidad de toneladas que de ellos se procese.
- **Depreciación:** Para el presente proyecto no se tiene en cuenta la depreciación, ya que la maquinaria e instalaciones se toman como costo de oportunidad.



- **Costos indirectos:** Los costos indirectos, como se explicó en la descripción de parámetros, corresponden a un 10% de los costos directos.

Tabla 5. Egresos deducibles.

PROYECCIÓN DE EGRESOS DEDUCIBLES								
CONCEPTO	UNIDAD	0	1	2	3	4	5	6
TOTAL EGRESOS DEDUCIBLES			\$ 1.758.179.687	\$ 1.822.506.317	\$ 1.889.209.945	\$ 1.948.933.365	\$ 2.010.570.373	
Costo Materia Prima			\$ 753.984.000	\$ 780.373.440	\$ 807.686.510	\$ 831.917.106	\$ 856.874.619	
Relaves			\$ 471.240.000	\$ 487.733.400	\$ 504.804.069	\$ 519.948.191	\$ 535.546.637	
Transporte			\$ 282.744.000	\$ 292.640.040	\$ 302.882.441	\$ 311.968.915	\$ 321.327.982	
Insumos			\$ 263.562.259	\$ 272.786.938	\$ 282.334.481	\$ 290.804.515	\$ 299.528.651	
Disposición final placas			\$ 66.150	\$ 68.465	\$ 70.862	\$ 72.987	\$ 75.177	
Recurso Humano			\$ 253.667.363	\$ 265.082.394	\$ 277.011.102	\$ 288.091.546	\$ 299.615.208	
Seguridad Industrial			\$ 13.816.356	\$ 14.299.929	\$ 14.800.426	\$ 15.244.439	\$ 15.701.772	
Mantenimiento			\$ 155.002.649	\$ 160.427.742	\$ 166.042.713	\$ 171.023.994	\$ 176.154.714	
Pruebas Laboratorio			\$ 74.785.609	\$ 77.403.106	\$ 80.112.214	\$ 82.515.581	\$ 84.991.048	
Servicios Públicos			\$ 83.460.784	\$ 86.381.911	\$ 89.405.278	\$ 92.087.436	\$ 94.850.060	
Depreciación								
Costos indirectos			\$ 159.834.517	\$ 165.682.392	\$ 171.746.359	\$ 177.175.760	\$ 182.779.125	

4.3.4. Impuestos

Se estimará el impuesto a la renta que a partir del año 2022 corresponde a un 35%. Es importante resaltar que el impuesto a la renta causado en la actual vigencia será pagado en el siguiente período.

Adicionalmente, se calculan las regalías generadas del 4% sobre el 80% del precio del oro para cada período.

4.3.5. Flujo de caja

Teniendo en cuenta las variables antes descritas se obtienen los flujos netos de efectivo. Para el año 0 el valor negativo corresponde a la inversión en el proyecto y el valor negativo del año 6 hace referencia al impuesto a la renta del año 5.

Los flujos del año 1 al 5 se obtienen de incluir los ingresos por las ventas de oro, restarle los egresos que se generan por el proceso productivo, descontarle el pago de impuestos y aplicando el costo de oportunidad. Finalmente, para el año 5 se realiza un supuesto de un valor de rescate de la maquinaria que corresponde a un 10% del valor inicial de esta.

Tabla 6. Flujo de caja.



CONCEPTO	0	1	2	3	4	5	6
(-) INVERSIÓN INICIAL	\$ (12.316.334)						
(+)INGRESOS GRAVABLES		\$ 2.001.877.623	\$ 2.211.042.834	\$ 2.442.400.558	\$ 2.697.954.765	\$ 2.979.849.258	
(-)EGRESOS DEDUCIBLES		\$ 1.822.239.771	\$ 1.893.259.688	\$ 1.967.366.763	\$ 2.035.267.918	\$ 2.105.925.549	
Costo operacionales		\$ 1.758.179.687	\$ 1.822.506.317	\$ 1.889.209.945	\$ 1.948.933.365	\$ 2.010.570.373	
Regalías		\$ 64.060.084	\$ 70.753.371	\$ 78.156.818	\$ 86.334.552	\$ 95.355.176	
(-)DEPRECIACIÓN							
(=)UTILIDAD ANTES DE IMPUESTOS	\$ (12.316.334)	\$ 179.637.852	\$ 317.783.146	\$ 475.033.795	\$ 662.686.847	\$ 873.923.709	
IMPUESTOS CAUSADOS		\$ 62.873.248	\$ 111.224.101	\$ 166.261.828	\$ 231.940.397	\$ 305.873.298	
(-)IMPUESTOS PAGADOS			\$ 62.873.248	\$ 111.224.101	\$ 166.261.828	\$ 231.940.397	\$ 305.873.298
(+)DEPRECIACIÓN							
(-)COSTO DE OPORTUNIDAD		\$ 42.000.000	\$ 43.470.000	\$ 44.991.450	\$ 46.341.194	\$ 47.731.429	
(+)VALOR DE RESCATE						\$ 59.308.110	
FLUJO NETO DE EFECTIVO	\$ (12.316.334)	\$ 137.637.852	\$ 211.439.898	\$ 318.818.244	\$ 450.083.826	\$ 653.559.993	\$ (305.873.298)
VALOR PRESENTE NETO	\$675.821.254						
TIR	1171%						

Como resultado de la evaluación financiera, en la Tabla 6 se puede observar que desde el primer año del proyecto el flujo neto de efectivo presenta valores que recuperan la inversión inicial y, además, generan ganancia. Lo anterior, apoyado en los indicadores financieros que se tomaron como referencia para soportar la rentabilidad de la implementación de las placas de cobre (VPN Y TIR).

5. Conclusiones

- La implementación de las placas de cobre logra reducir el mercurio presente en los relaves hasta en un 80%, lo que a su vez se traduce en una reducción del grado de contaminación al ambiente y una disminución en el riesgo que presenta este elemento a la salud humana.
- La incorporación de las placas de cobre a una planta de procesamiento de relaves es un proceso rentable, que además de traer beneficios al ambiente y a la salud humana, puede beneficiar económicamente al minero que decida llevar a cabo el proceso con un VPN positivo y una TIR muy superior a la tasa de descuento.
- El reprocesamiento de los relaves para la recuperación del oro asociado se puede ver facilitado con la técnica de las placas de cobre ya que a la hora de llevar a cabo el proceso de cianuración el mercurio tendrá una menor participación, aumentando la cantidad de oro recuperado.



6. Referencias

- ATSDR. (6 de Mayo de 2018). *Resúmenes de Salud Pública - Mercurio*. Obtenido de Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades:
https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs46.html#
- Bard, A. J., & Faulkner, L. R. (2001). *Electrochemical methods: Fundamentals and applications*. Obtenido de John Wiley and Sons:
[https://www2.chemistry.msu.edu/courses/cem837/Chapter%201 notes.pdf](https://www2.chemistry.msu.edu/courses/cem837/Chapter%201%20notes.pdf)
- Cortés Castillo, C. E. (2017). *Determinación de mercurio orgánico e inorgánico en muestras ambientales*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia - Facultad de Ciencias, Departamento de Química.
- EPA. (Noviembre de 2020). *Regional Screening Levels (RSLs) - Generic Tables*. Obtenido de
<https://www.epa.gov/risk/regional-screening-levels-rsls-generic-tables>
- Güiza, L. (27 de Agosto de 2013). *La pequeña minería en Colombia: Una actividad no tan pequeña*. Obtenido de Scielo.org: <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v80n181/v80n181a12.pdf>
- IDEAM. (2021). Recuperado el 01 de 04 de 2021, de
<http://www.ideam.gov.co/web/contaminacion-y-calidad-ambiental/acreditacion>
- Ingemmet. (01 de 12 de 2019). <https://www.ingemmet.gob.pe/>. Recuperado el 2020, de
<https://www.ingemmet.gob.pe/>
- Lagos, R., & Camus, J. (7 de Enero de 2017). *Educación Química*. Obtenido de El plateado: una actividad electroquímica para integrar: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eq.2016.11.004>
- Meza Orozco, J. d. (2017). *Evaluación financiera de proyectos*. Bogotá: ECOE Editores.
- Mintrabajo. (12 de Septiembre de 2019). *Ministerio del trabajo*. Obtenido de
<https://www.mintrabajo.gov.co/prensa/comunicados/2019/septiembre/sector-minero-genera-mas-de-150.000-empleos-directos-en-el-pais-vice-ministro-carlos-baena>
- ONU. (13 de Agosto de 2020). *El Convenio de Minamata sobre el Mercurio, tres años de protección de la salud humana y el medio ambiente*. Obtenido de <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/el-convenio-de-minamata-sobre-el-mercurio-tres-anos-de-proteccion>
- ONU, M. A. (2019). *Convenio de Minamata Sobre el Mercurio. Texto y Anexos*.
- Organización Mundial de la Salud. (31 de Marzo de 2017). *El mercurio y la salud*. Obtenido de
<https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/mercury-and-health>



Ortiz González, T. (2011). *Plateado electrolítico*. Obtenido de Ecuador: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo: <https://issuu.com/tatianajackelineortizgonzalez/docs/plateado>

Servicio Geológico Colombiano, M. d. (2018). *Guías metodológica para el mejoramiento productivo del beneficio de oro sin el uso de mercurio*. Bogotá.

UNEP. (2018). *UN Environment programme*. Obtenido de Mercury: <https://www.unep.org/explore-topics/chemicals-waste/what-we-do/mercury>

Veiga, M. (2018). Characterization of Artisanal Gold Processing in Colombia and Measures to Reduce/Eliminate Mercury Use. *University of Brithish Canda*.