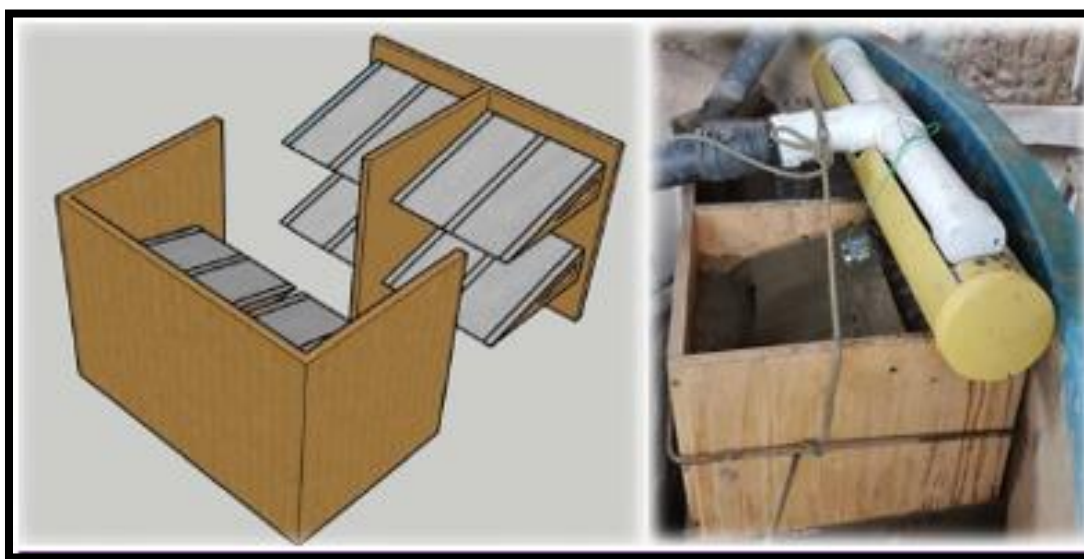


Promoviendo la recuperación y manejo responsable del mercurio en los relaves contaminados de minería de oro artesanal en Colombia

Reporte técnico de resultados de prueba pilotos de placas de cobre, fase I
Agosto - 2020



Financiado por:



En asociación con:



Implementado por:



Con el apoyo técnico de:



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.



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

Natalia Echavarría Gómez
Profesional de Apoyo Centro Nacional de Producción más Limpia

Agradecimientos a

Shun-Ping Chau
Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA)

Marcello Veiga
Profesor Emérito, Universidad de Columbia Británica



Contenido

1. Introducción	4
2. Objetivo principal de las pruebas	5
3. Descripción de la planta y relaves	5
3.1 Localización de la planta	5
3.2 Descripción del proceso de la planta	6
3.3 Descripción de los relaves	9
4. Descripción de las pruebas piloto	11
4.1 Preparación de las placas de cobre	11
4.2 Instalación de las placas de cobre en el proceso	14
4.3 Condiciones generales de operación de las pruebas	16
5. Resultados	18
5.1 Relave de Monda	18
5.2 Relave de Anza	21
5.3 Relave de Floresta	22
5.4 Comparación de resultados	23
6. Comentarios de los resultados	24
7. Acciones futuras	25
8. Referencias	25



1. Introducción

Las pruebas pilotos de campo para la recuperación de mercurio presentes en los relaves generados por minería de oro artesanal y de pequeña escala (ASGM, por sus siglas en Inglés), se ejecuta bajo el desarrollo del proyecto titulado: “*Promoviendo la recuperación y manejo responsable del mercurio en los relaves contaminados de minería de oro artesanal en Colombia*”, el cual es ejecutado por Pure Earth y financiado por el Departamento de Estado de los Estados Unidos. Como socio estratégico del proyecto para el apoyo técnico se suma, el Centro Nacional de Producción más Limpia y Tecnologías Ambientales (CNPMLTA).

El objetivo general del proyecto es reducir la cantidad de mercurio presente en relaves por el uso de este elemento en la minería de oro artesanal y de pequeña escala en Colombia. Los objetivos específicos son:

- Identificación de técnicas de recuperación de mercurio prometedoras y aumentar el entendimiento de criterios para la selección de una técnica de uso en el contexto de ASGM en Colombia.
- Desarrollar un modelo para la recuperación responsable y rentable de mercurio y oro de relaves, basados en experiencias previas en plantas de procesamiento experimental.
- Desarrollo de protocolos técnicos para manejar, almacenar y disponer de manera segura el mercurio recuperado o incautado de las actividades de ASGM, incluido los relaves contaminados y el mercurio capturado de la quema de amalgama.

El presente documento se desarrolla en el marco del segundo objetivo específico del proyecto, el cual presenta los resultados obtenidos de la prueba piloto en campo de la recuperación de mercurio presente en los relaves generados por la minería artesanal de oro en Colombia, usando la tecnología denominada “Placas de Cobre”, la cual fue una de las más promisorias identificadas en la primera fase del proyecto.



2. Objetivo principal de las pruebas

El objetivo principal de las pruebas piloto en campo corresponden a probar la efectividad de la tecnología denominada “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 pequeña minería.

3. Descripción de la planta y relaves

3.1 Localización de la planta

La planta de procesamiento de material de relaves donde se realizaron las pruebas piloto pertenece al título minero de la mina “Juan Díaz”, la cual está ubicada en el municipio de Yalí en el departamento Antioquia.



Figura 1. Ubicación geográfica de la planta piloto

Tomado de: <https://www.google.es/maps/preview>



Figura 2. Planta de procesamiento en Yali

Fuente: Pure Earth - 2020

3.2 Descripción del proceso de la planta

La planta Juan Díaz está equipada para realizar el beneficio tanto de oro libre como de oro asociado. La construcción de las instalaciones aprovecha la morfología del terreno para usar la gravedad en el paso de material de una etapa a otra, en la parte superior de la planta (ver Figura 2) se encuentran los equipos asociados a la recuperación de oro libre, los cuales, son métodos mecánicos y gravimétricos que no utilizan mercurio para el beneficio, y que incluyen trituradoras, molinos y mesa vibratoria, sin embargo, esta parte de la planta está actualmente en desuso.

Físicamente, en la parte central de las instalaciones está ubicado los equipos para la recuperación de oro asociado, los cuales son principalmente los tanques de cianuración, flotación, la columna de recuperación por carbón activado y la unidad de desorción electroquímica.

En la actualidad el proceso inicia con la recepción de los relaves, el espacio para esta actividad está ubicado físicamente en la base de las instalaciones (ver Figura 2), los relaves se humedecen con agua y arrastran hasta el filtro y bomba de sólidos, la cual, lleva la ahora denominada pulpa hasta el tanque de flotación o directamente a los tanques de cianuración, según sean las indicaciones de procesamiento.



Luego de que la cianuración ha sido finalizada pasa a la unidad de absorción con carbón activado y por último se filtra y pasa la unidad de desorción electroquímica, proceso el cual no es continuo, es decir, la desorción electroquímica se realiza por acumulación del tratamiento de varios relaves en un periodo de tiempo. Al final del proceso el relave es llevado a las piscina. La Figura 3 muestra es esquema del proceso de extracción de oro de la planta.

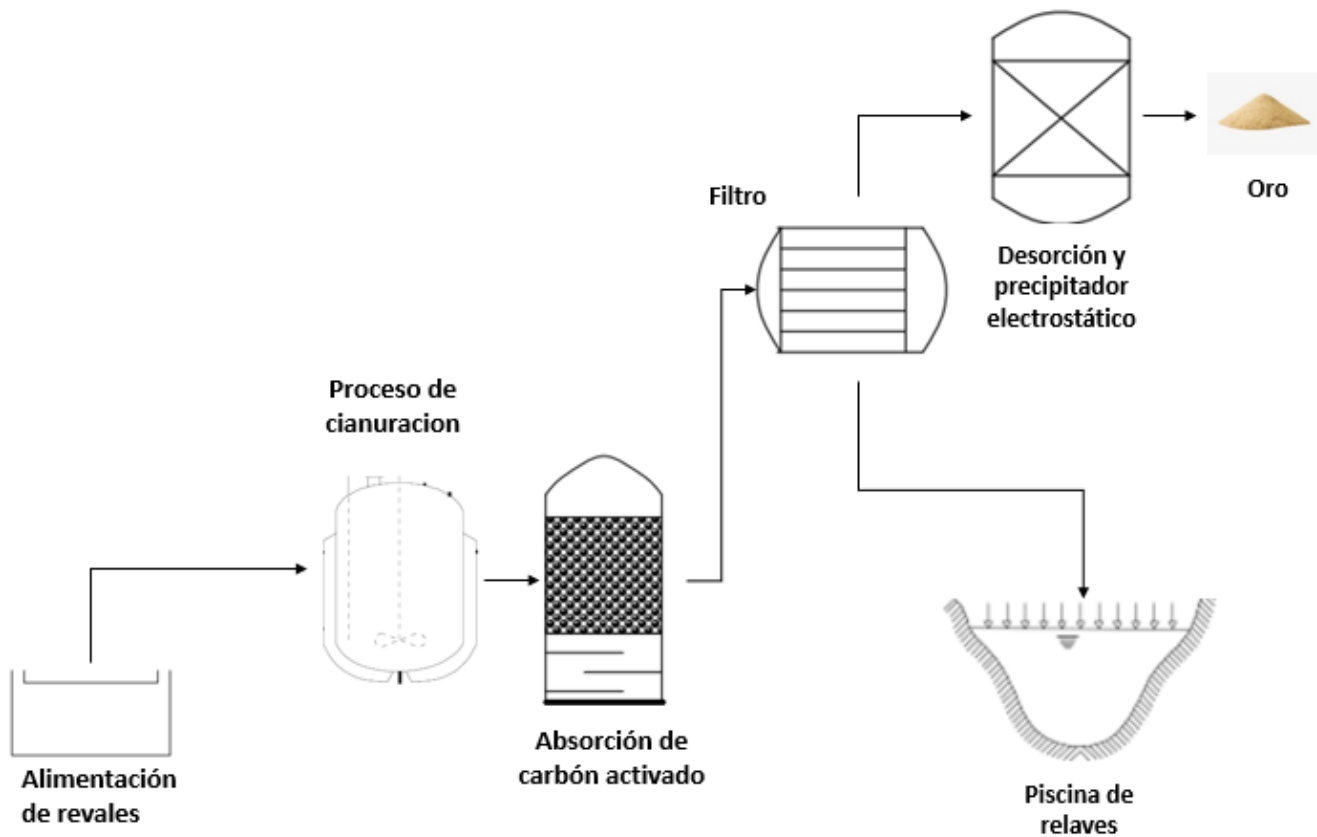


Figura 3. Proceso de la plata piloto

Fuente: Pure Earth – 2020



Algunas de las partes de la planta son mostradas en las siguientes fotografías.



Figura 4. Alimentación de relaves
Fuente: Pure Earth – 2020



Figura 5. Bombas de suelo
Fuente: Pure Earth – 2020



Figura 6. Piscina de relaves
Fuente: Pure Earth – 2020



3.3 Descripción de los relaves

Los relaves utilizados para las pruebas pilotos provienen de tres municipios de Antioquia, en donde se han desarrollado minería a pequeña escala y que contienen presencia de mercurio y oro residual, la edad de generación de estos relaves se obtiene por información de los mineros del área, pero no se tienen certeza del 100% de la edad real de los mismos.

Tabla 1. Descripción de los relaves

Denominación Relave	Cantidad procesada (ton)	Edad estimada
Monda	6,4	6 meses
Floresta	4,5	+10 años
Anza	5,3	8/10 años



Figura 7. Relaves utilizados en el proceso

Fuente: Pure Earth – 2020



La Figura 8 muestra la ubicación de los sitios de procedencia de los relaves utilizados en el proceso de recuperación de mercurio durante la prueba piloto.



Figura 8. Ubicación de los Relaves

Tomado de: <https://www.google.es/maps/preview>



4. Descripción de las pruebas piloto

4.1 Preparación de las placas de cobre

Con el fin de realizar las pruebas de recuperación de mercurio de los relaves se construyeron dos (2) sets de placas de cobre, cada una con seis placas ubicadas en forma de escalera con una pendiente aproximadamente de 30° de inclinación.

Cada una de las placas tienen un tamaño de 30 x 30 cm, lo que corresponde a un área total de contacto de 5.400 cm² de las seis placas con los relaves.

El principio clave en la captura del mercurio en esta tecnología está en la afinidad de la plata por el mercurio, por lo que es necesario realizar un plateado electroquímico de placas de cobre, el cual, es uno de los procesos más reconocidos de la industria y se considera una interesante actividad de enseñanza para la integración de la electroquímica, la química, la física y el arte (Lagos & Camus, 2017). El propósito principal del plateado es poder generar un área de contacto suficiente para que se forme una amalgama entre la plata sobrepuesta en la placa y el mercurio, disponible en forma elemental (Hg⁰), en el relave.

El proceso general de fabricación de las placas se describe en la Figura 9.

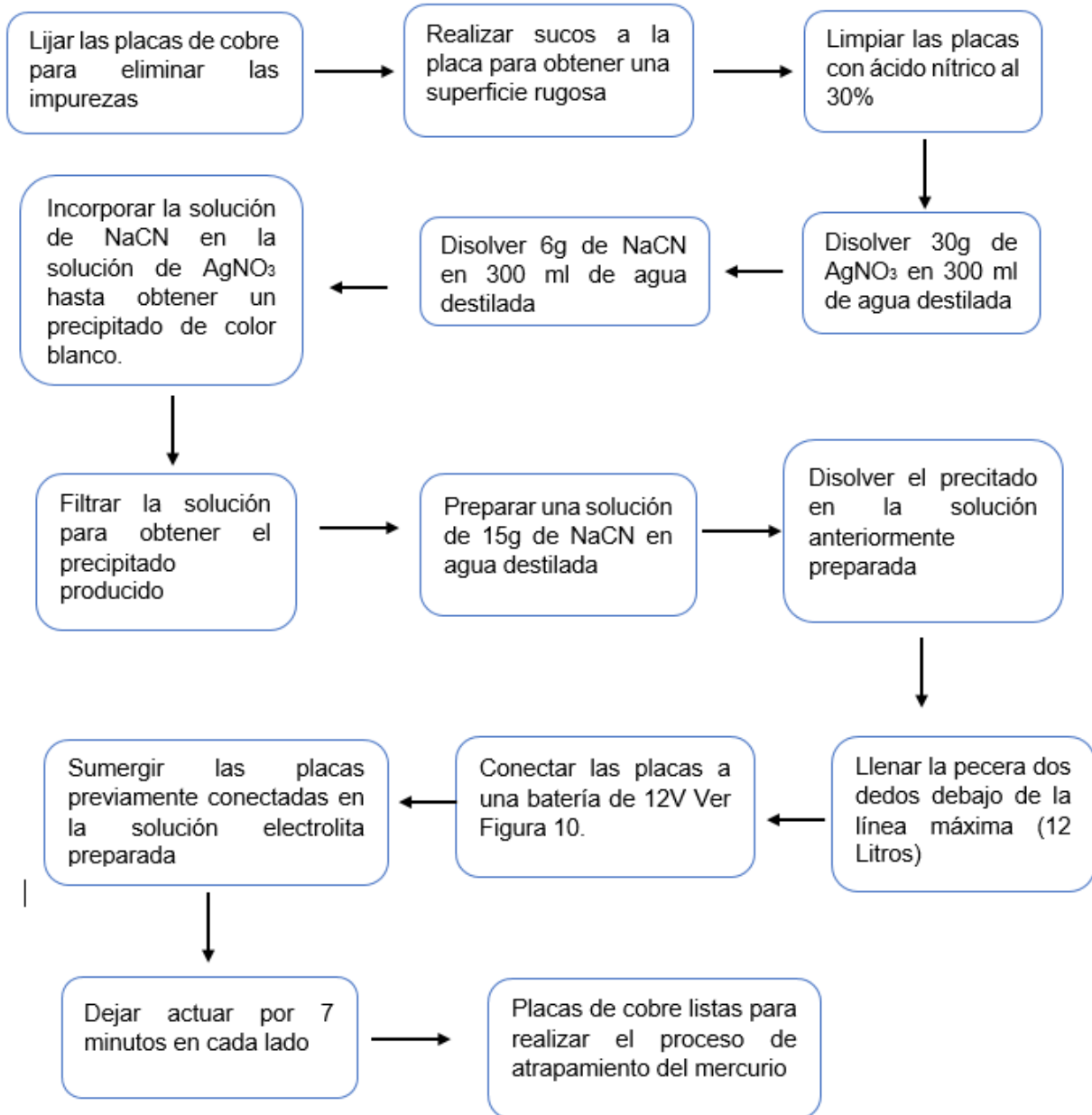


Figura 9. Procedimiento para la fabricación de las placas de cobre amalgamadas con plata

Algunas de las reacciones químicas que intervienen en el proceso son:

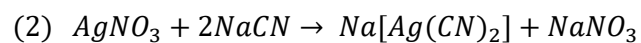
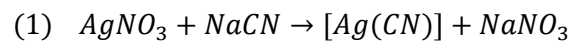




Figura 10. Montaje del proceso de electrolisis

Fuente: Pure Earth – 2020

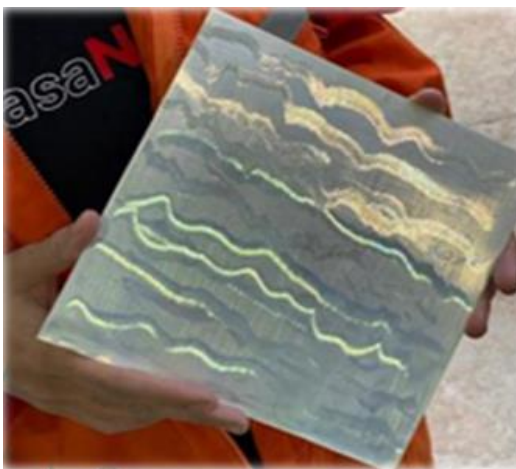


Figura 11. Resultados obtenidos placas de cobre plateadas

Fuente: Pure Earth – 2020



4.2 Instalación de las placas de cobre en el proceso

Teniendo en cuenta que el propósito principal del uso de la tecnología de las placas de cobre corresponde a eliminar el mercurio antes del proceso de beneficio del relave para la obtención del oro residual, uno de los sets de placas fue instalado justo antes del proceso de cianuración (punto A), el cual es el que desarrolla actualmente la planta Juan Díaz. Así mismo, para estimar la eficiencia del proceso se instaló el otro set de placas a la salida del proceso y antes del depósito en la relaveras (Punto B), tal como se muestra en la siguiente figura.

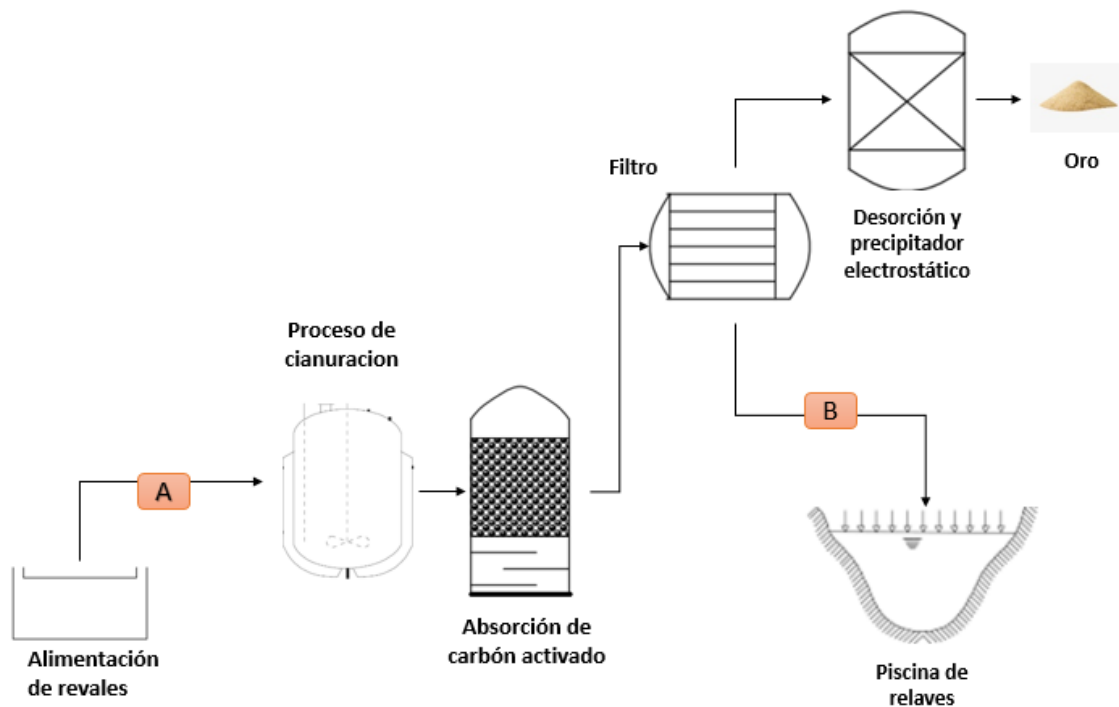


Figura 12. Ubicación de las placas de cobre en el proceso

Fuente: Pure Earth – 2020

Las placas deben ser instaladas sobre un soporte para garantizar el paso de la pulpa por las placas. La instalación del soporte de las placas en el punto A se realizó sobre la parte superior del tanque de cianuración en donde se adaptó un circuito de distribución de flujo en la entrada de las placas, con el fin que la caída de la solución del relave tuviera contacto sobre toda la extensión de las placas, tal como se observa en las siguientes fotografías.



Figura 13. Módulo de soporte de las placas de cobre y circuito de distribución de flujo

Fuente: Pure Earth – 2020



Figura 14. Ubicación del soporte en el Punto A. Antes del proceso de cianuración

Fuente: Pure Earth – 2020



La instalación del soporte de las placas en el punto B se realizó aprovechando la diferencia de altura del último proceso (filtro) en relación a las piscinas de colas. Igualmente se utilizó el mismo circuito de distribución de flujo en la entrada de las placas, con el fin que la caída de la solución del relave tuviera contacto sobre toda la extensión de las placas, talco como se observa en las siguientes fotografías.



Figura 15. Ubicación del soporte en el punto B. Después del proceso de cianuración

Fuente: Pure Earth – 2020

4.3 Condiciones generales de operación de las pruebas

Para cada una de las pruebas en campo se realizó una preparación de pulpa de relave (Disolución del relave con agua) entre el 25 % y 30% de sólidos, la cual fue bombeada al tanque inicial de cianuración, pasando en primer lugar por las placas.

Muestreo:

Durante el proceso se realizaron muestreos en tres (3) puntos estratégicos del proceso los cuales corresponden al inicio, intermedio y finales. Las condiciones del protocolo de muestreo fueron:

- Muestreo compuesto homogenizado



- Secado de la muestra, con el fin de obtener la menor variación de los datos en la lectura del equipo de fluorescencia de rayos X (XRF).
- Toma de 3 muestras replicadas por punto
- Cantidad por muestra de 300 gramos aproximadamente
- Muestra almacenada en bolsa con sello hermético.

Determinación de Mercurio y Oro:

Para cada una de las muestras se realizaron las siguientes lecturas:

- Mínimo de 20 lecturas de Mercurio (Hg) por muestra con el equipo XRF, marca Olympus de Referencia Delta.
- Las mediciones se realizaron en forma de distribución de cuadrícula por cada lado de la bolsa que contiene la muestra.
- El valor reportado de concentración de mercurio corresponde al promedio de las lecturas realizadas.
- A cada bolsa con la muestra se le tomó la lectura de vapores de mercurio con el equipo HERMES, el cual tiene un rango de detección entre 0 y 2.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.
- La misma muestra de lectura con el XRF es enviada a laboratorio acreditado para la confirmación del valor de Hg por Absorción Atómica en vapor frío y la cantidad de Oro presente por la prueba de fuego.



5. Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la operación de las placas para cada uno de los relaves.

5.1 Relave de Monda

La Tabla 2 muestra las condiciones generales del proceso para los relaves de Monda y en la Tabla 3 se muestran las concentraciones obtenidas de mercurio en cada una de las etapas del proceso de control, es decir la fase inicial, después del paso A y después del Paso B.

Tabla 2. Información general relave de Monda

General	Información
Edad	6 meses
Flujo (m ³ /hr)	6,4
Ton	6,34
Solidos %	28,7

Tabla 3. Concentraciones relave de Monda

	Relave Monda				
		Despues	% Reduccion	Despues	% Reduccion
	Inicial	Paso A	Paso A	Paso B	Total
Hg (ppm) (Lab)	74,9	58,2	22,30	19,6	73,83
Hg (ppm) (XRF)	62,37	17,70	71,62	10	83,97
Hg (ug/m3) Vapor	37,45	14,50	61,28	10,60	71,70
Au (gr/ton)	10,79	10,96		1,52	85,91

Los resultados obtenidos para el relave de Monda reportan una tendencia de reducción de la concentración de mercurio presente en los relaves en todos los tipos de medición y en cada una de las etapas del proceso ejecutado, lo que corresponde a las expectativas del uso y propósito de la técnica de placas de cobre.



Con el fin de evidenciar si las placas de cobre están haciendo la función de recuperación o remoción de mercurio de los relaves, se hicieron lecturas de las placas con el equipo XRF antes del proceso en donde las concentraciones de mercurio reportados fueron “cero” (0), es decir sin presencia de mercurio. Igualmente, se realizaron lecturas de las placas después del proceso con el relave de Monda en donde se evidenciaron las siguientes concentraciones de mercurio en diferentes partes de las placas. Los resultados de estas mediciones se muestran a continuación.

Tabla 4. Concentraciones obtenidas para las placas de cobre punto A

Placa Nro	Concentración promedio Hg (ppm) sobre las placas de cobre
1	56,2
2	183
3	118
4	68,8
5	118
6 *	1,717

*Este valor fue tomado sobre uno de los surcos de las placas de cobre y no sobre la superficie lisa como se hizo en las demás lecturas reportadas en esta tabla

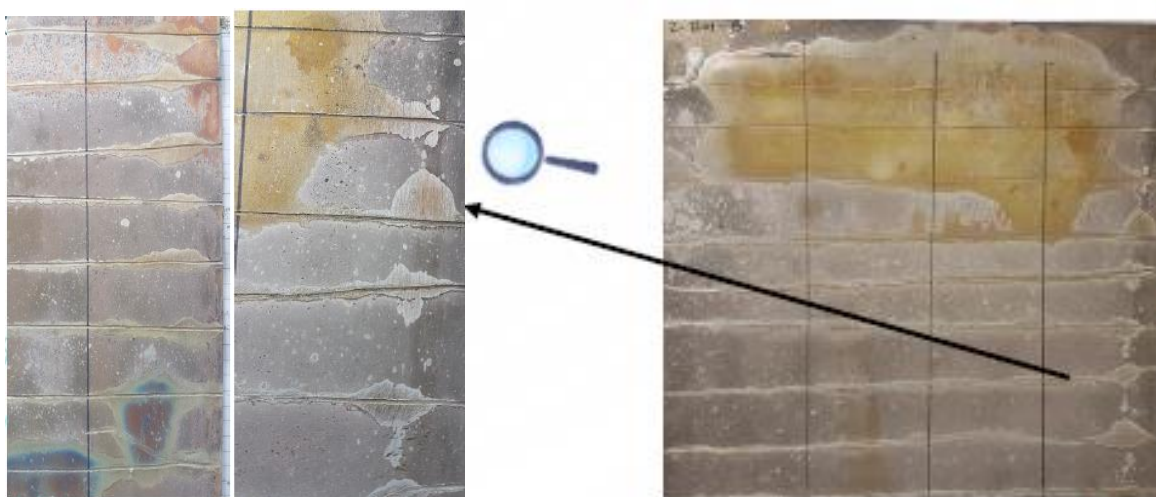


Figura 16. Placas de cobre punto A después del proceso



Al momento de realizar las mediciones sobre las placas, se evidencia que se encuentran una mayor concentración en los surcos de la placa, por lo cual se decidió realizar las mediciones de las placas del punto B directamente en los surcos en donde se tienen los siguientes resultados.

Tabla 5. Concentraciones obtenidas para las placas de cobre punto B

Placa Nro	Concentración promedio Hg (ppm) sobre los surcos de las placas de cobre
1	39,130
2	63,623
3	26,959
4	22,101

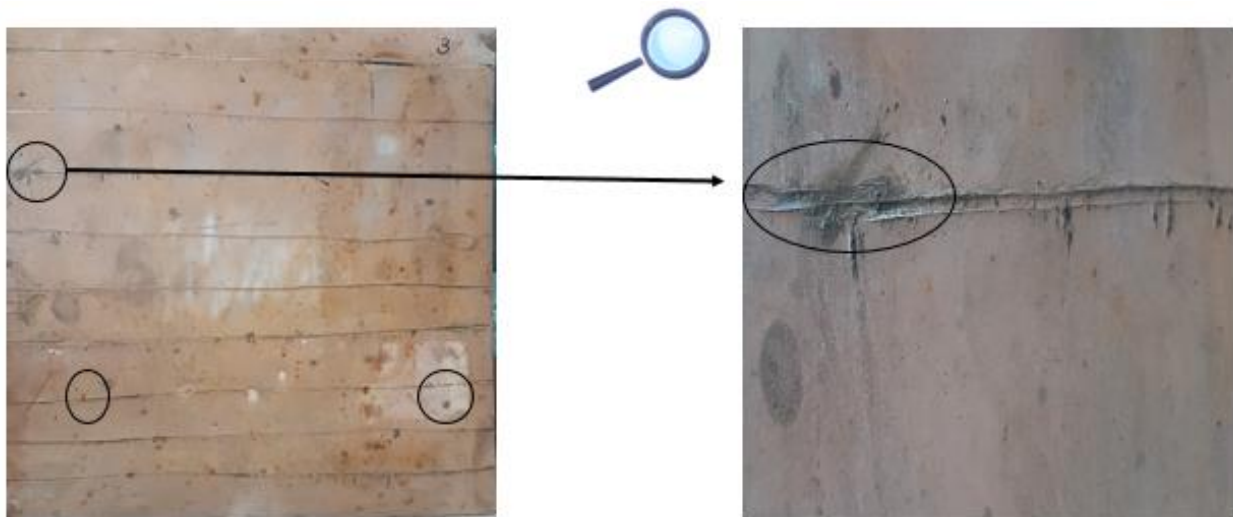


Figura 17. Placas de cobre punto B después del proceso



5.2 Relave de Anza

La Tabla 6 muestra las condiciones generales del proceso para el relave de Anza y en la Tabla 7 se muestran las concentraciones obtenidas de mercurio en cada una de las etapas del proceso de control, es decir la fase inicial, después del paso A y después del Paso B.

Tabla 6. Información general relave de Anza

General	Información
Edad	8/10 años
Flujo (m3/hr)	7,4
Ton	5,2
Solidos %	33

Tabla 7. Concentraciones relave de Anza

	Revale Anza				
		Despues	% Reduccion	Despues	% Reduccion
	Inicial	Paso A	Paso A	Paso B	Total
Hg (ppm) (Lab)	100	51,5	48,5	80	20
Hg (ppm) (XRF)	92,33	3,83	95,85	56,21	39,13
Hg (ug/m3) Vapor	27,55	12,10	56,08	0,95	96,55
Au (gr/ton)	12,84	10,4		2,33	81,85

Los valores reportados para el relave de Anza muestran una disminución de la concentración de mercurio en los pasos A y B en comparación a la concentración inicial. Sin embargo, las concentraciones en el Paso B reportan un valor superior a los reportados en paso A, lo cual requiere un análisis más detallado sobre condiciones externas de operación durante el proceso de obtención de oro que realiza la planta.

Por otro lado uno de los valores reportados por el laboratorio arroja 100 ppm. Este es el valor máxima reportado por el laboratorio acorde a la calibración que tenía el equipo en el momento del análisis, lo que representa para el estudio que esta muestra podría tener una concentración mayor a 100 ppm. Esta limitante, ya fue



identificada con el laboratorio y se tendrá controlada para cuando se ejecuten las fases II y III.

5.3 Relave de Floresta

La Tabla 8 muestra las condiciones generales del proceso para el relave de la Floresta y en la Tabla 9 se muestran las concentraciones obtenidas de mercurio en cada una de las etapas del proceso de control, es decir la fase inicial, después del paso A, sin embargo, por temas logísticos no fue posible realizar mediciones al final del proceso en el Paso B.

Tabla 8. Información general relave de Floresta

General	Información
Edad	10 años
Flujo (m3/hr)	7,6
Ton	4,5
Solidos %	32

Tabla 9. Concentraciones relave de Floresta

	Relave Floresta				
		Despues	% Reduccion	Despues	% Reduccion
	Inicial	Paso A	Paso A	Paso B	Total
Hg (ppm) (Lab)	100	100	NA	NA	NA
Hg (ppm) (XRF)	174,07	108,57	37,63	NA	NA
Hg (ug/m3) Vapor	7,70	15,30	-98,70	NA	NA
Au (gr/ton)	7,25	9,18		NA	NA

Los valores reportados para el relave de Floresta muestran que para las lecturas de los vapores de mercurio se presenta un incremento de casi 98% que no responde a las tendencias encontradas en los otros relaves. Este punto se tendrá en cuenta en próximas lecturas y buscar posible desviaciones en el proceso de la toma de muestra o lectura.



Igualmente que en el relaves de Anza, dos de las muestras reportan valores de concentración de mercurio 100 ppm realizadas por el laboratorio. Cabe recordar que este valor, corresponde al máximo reportado por el laboratorio acorde a la calibración que tenía el equipo en el momento del análisis, lo que representa para el estudio que esta muestra podría tener una concentración mayor a 100 ppm, por tal motivo no fue posible determina el % de reducción de mercurio en el paso A. Esta limitante, ya fue identificada con el laboratorio y se tendrá controlada para cuando se ejecuten las fases II y III.

5.4 Comparación de resultados

A continuación se muestra los resultados obtenidos en comparación por los relaves por cada uno de los tipos de mediciones de concentración de mercurio de los relaves.

Tabla 10. Comparación resultados de los Relaves

(LAB) - Hg (ppm)					
		Despues	% Reduccion	Despues	% Reduccion
Relave	Inicial	Paso A	Paso A	Paso B	Total
Monda	74,9	58,2	22,30	19,6	73,83
Floresta	100	100	NA	NA	NA
Anza	100	51,5	48,50	80	20,00

(XRF) - Hg total (ppm)					
		Despues	% Reduccion	Despues	% Reduccion
Relave	Inicial	Paso A	Paso A	Paso B	Total
Monda	62,37	17,70	71,62	10	83,97
Floresta	174,07	108,57	37,63	NA	NA
Anza	92,33	3,83	95,85	56,21	39,13

Hg Vapores (ug/m3)					
		Despues	% Reduccion	Despues	% Reduccion
Relave	Inicial	Paso A	Paso A	Paso B	Total
Monda	37,45	14,50	61,28	10,60	71,70
Floresta	7,7	15,3	-98,70	NA	NA
Anza	27,55	12,1	56,08	0,95	96,55



6. Comentarios de los resultados

- La prueba de escala piloto en la planta de Yalí demuestra una efectividad de la tecnología de placas de cobre para reducir el contenido de mercurio en los relaves de ASGM contaminados (39% - 84%). Sin embargo, falta desarrollar las pruebas de la fase II y III con el fin de establecer conclusiones finales.
- Aunque existe una consistencia de los datos de lectura de mercurio entre el XRF y el laboratorio de las muestras de los relaves Monda y Floresta, se evidencian variaciones para el relave de Anza, las cuales deben ser analizadas bajo más pruebas pilotos.
- Los valores reportados por el laboratorio de 100 ppm, corresponden al valor máximo reportado por el laboratorio acorde a la calibración que tenía el equipo en el momento del análisis, lo que representa para el estudio que las muestras podrían tener una concentración mayor a 100 ppm. Esta limitante, ya fue identificada con el laboratorio y se tendrá controlada para cuando se ejecuten las fases II y III.
- Es necesario recolectar más información con el fin de determinar la existencia de una relación directa entre la cantidad de mercurio removido por las placas de cobre versus la edad del relave.
- Es necesario mejorar el método de secado de muestras en campo para tomar estandarización de las lecturas de XRF, laboratorio y vapor de mercurio. El factor tiempo es determinante.
- Acorde con los resultados obtenidos hasta el momento, no se tiene evidencia que las placas de cobre afecten el contenido de oro presente en el relave.
- El pre-tratamiento de algunos relaves por parte de los mineros, puede estar afectando la efectividad del proceso y la vida útil de las placas.



7. Acciones futuras

- Pendiente desarrollo pruebas pilotos de la Fase II y III, apenas se pueda por temas de restricciones de movilidad debido a la situación de pandemia. (Fecha estimada desde septiembre en adelante)
- Se incluirán variables de control en campo para estimar la vida útil de las placas de cobre. Sin embargo, el proceso de lavado de las placas continúa como una opción dentro del proceso.
- Se realizarán ajustes al proceso del plateado de las placas probando estaño como parte de soporte en la placa de cobre.
- Se optimizará el módulo de soporte de las placas de cobre, de forma que sea más funcional y permita cambios rápidos en campo, aumentando el área superficial de contacto entre el relave y las placas.

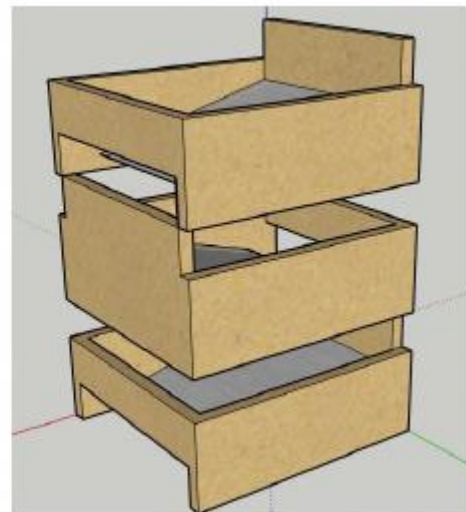
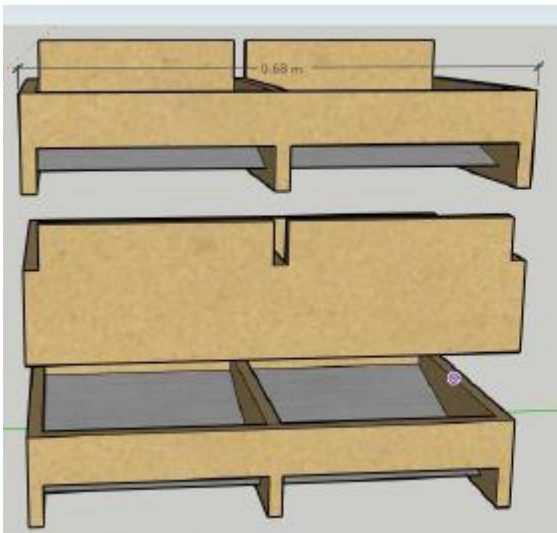


Figura 18. Prototipo módulo de soporte de las placas de cobre

8. Referencias

Lagos, R., & Camus, J. (2017). El plateado: una actividad electroquímica para integrar diversas ciencias con el arte, 84–90. <https://doi.org/10.1016/j.eq.2016.11.004>