

OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE LIXIVIACIÓN DE MINERAL ROM UTILIZANDO CELDAS DINÁMICAS EN YACIMIENTOS AURIFEROS MARGINALES CON ALTO CONTENIDO DE GRANULOMETRÍA FINA

Segundo Velásquez Miranda, Enrique Mego estela, Robert Montes Quispe

¹ Segundo Velásquez, Las Begonias 415, San Isidro, Lima, Perú (segundo.velasquez@buenaventura.pe)

² Enrique Mego, Las Begonias 415, San Isidro, Lima, Perú (enrique.mego@buenaventura.pe)

³ Robert Montes, Las Begonias 415, San Isidro, Lima, Perú (robert.montes@buenaventura.pe)

RESUMEN

La pila de lixiviación de minera Coimolache, después de 11 años de operación, actualmente cuenta solo con espacio para cargar mineral en el lift 18 a 150 m. de la geomembrana de base.

Esta altura restringe la recepción de leyes pregnant en la poza PLS a 31 días por la velocidad de percolación, que se ha determinado en 5 m/día, considerando una humedad retenida de 10%; sumado a ello la calidad del mineral acarreado de los tajos Ciénaga y Mirador presenta contenidos de fino de hasta 60% m-1/8 en promedio, que perjudican la percolación de la solución cianurada a través de la pila de mineral.

Por tal motivo, luego de recibir la aprobación de la DGM (Resolución N° 225-2019-MINEM-DGM-DTM/PB) se impermeabilizó al oeste de la pila en el lift 18 un área de 4.82ha con conexión directa hacia la poza PLS que a su vez alimenta a las plantas de producción, con el objetivo de reducir el tiempo de aporte de leyes frescas y consiguiente cumplimiento del *budget*.

Los resultados de esta metodología se documentaron con resultados positivos en:

- Incremento de la recuperación de Au a 79% de un 74% histórico.
- Cumplimiento del *budget* anual desde el 2020 a la actualidad.
- Reducción en la concentración de elementos cianicidas de la soluciones que percolan de la pila, reduciendo los ratios de consumo de la planta de tratamiento de efluentes.

Por lo explicado, se concluye que la metodología de implementar celdas dinámicas en el proceso de lixiviación en minera Coimolache es eficiente y por los resultados obtenidos se considerará en los planes de los siguientes años de operación.

1. Introducción

Minera Coimolache, desde el año 2011, procesa principalmente minerales oxidados con contenidos de oro y plata mediante el proceso de lixiviación en pilas estáticas, llegando a conformar hasta la fecha 18 bancos o lifts, midiendo cada banco 8 m de altura que hacen un total de 150 m con respecto a la geomembrana de base.

El mineral se riega con solución cianurada con concentraciones en el rango de 100 y 120 ppm de cianuro libre. A su paso por la pila, la solución lixivia y se carga de contenidos de oro y plata principalmente, así como cobre, zinc, mercurio, arsénico, entre otros elementos conocidos como cianicidas (por ser altos consumidores de cianuro), aumentando el ratio de consumo de este.

La solución cargada o *pregnant*, luego de pasar por la altura de la pila de mineral, se recepciona en la geomembrana de base, desde donde se drena hacia las zonas denominadas Hueco 1 o Hueco 2. El drenaje en una u otra zona depende de si el mineral se depositó en la zona este u oeste de la pila.

En cada zona existe una infraestructura instalada de pozas de grandes eventos (contingencia); Poza ILS para recepción de leyes medias de oro (≤ 0.15 ppm) y Poza PLS para altas leyes de oro (≥ 0.16 ppm). Asimismo; cabe destacar que la infraestructura de plantas para producción se encuentra en la zona Hueco 1: Planta ADR, que se alimenta de las pozas ILS y la Planta Merrill Crowe, que se alimenta de las pozas PLS. Para el transporte de soluciones de Hueco 2 a Hueco 1 se cuenta con una instalación de tuberías provistas de sistema de bombeo operadas desde el control room principal.

El producto final de las plantas son barras doré, obtenidos de la fundición de precipitados de zinc, que son retirados de unidad por el área de comercialización.

Minera Coimolache desarrolló la metodología de celdas dinámicas por la necesidad de mantener leyes *pregnant* de oro y plata en la poza PLS que permitan mantener la producción planeada. Este parámetro se ha visto afectado en los últimos años por la altura de la pila de lixiviación.

En este documento se detalla la metodología aplicada por Minera Coimolache para optimizar el tiempo de percolación de soluciones *pregnant* a las pozas de 31 a 4 días, mediante la impermeabilización de una plataforma de 4.82ha con geomembrana en el Lift 18.

2. Objetivos

Establecer una metodología para mantener la ley de corte de Au y Ag en la poza PLS para cumplir el *budget* de producción.

Optimizar el área disponible para descarga de mineral de la pila de Lixiviación

Reducir la lixiviación de Cu, Zn, Hg etc. (metales cianicidas) de los lifts inferiores.

2.1. Carguío y riego de mineral

El carguío de mineral a la pila lo gestiona el área de mina de los tajos Tantauatay, Mirador y Ciénaga en volquetes de 23 m³. El riego de mineral lo realiza el área de Planta bajo parámetros determinados por Laboratorio metalúrgico tales como:

- *Blending* de mineral (etapa de carguío).
- Ratio de cianuro de sodio y óxido de calcio.
- pH de Solución de riego
- Velocidad de percolación
- Tiempo de riego, entre otros.

Estos parámetros aseguran la producción diaria, mensual y anual; sin embargo, por la altura misma de la pila con respecto a la geomembrana, estos parámetros se ven afectados por lo siguiente:

- *Blending* de mineral: el % de finos en la pila restringe el ratio de riego al mineral obligando a regar por debajo de 12 Lh/m² para evitar *pondings* y canalizaciones que afecten a la recuperación de oro y plata.

- Velocidad de percolación: se liga al anterior pero su impacto directo es en el tiempo que la solución demora en percolar a la geomembrana de base y se haga efectivo el aporte de leyes *pregnant* a las pozas que alimentan a las plantas: **“a más altura de pila, más tiempo de percolación de leyes *pregnant*”**

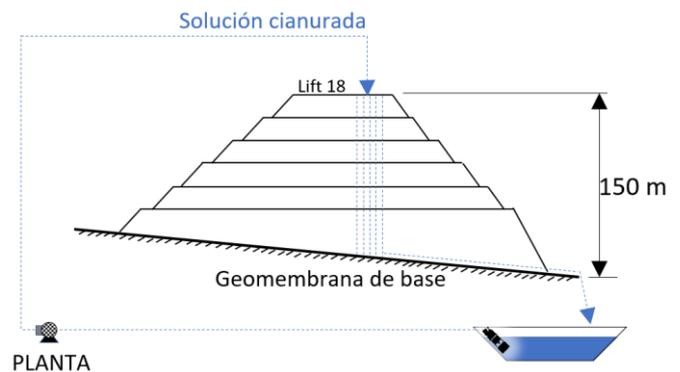


Gráfico 1: Percolación de soluciones cianuradas a través de la pila de mineral.

- Tiempo de riego: Laboratorio metalúrgico determinó que para obtener 74% de recuperación en oro y 14% de plata es necesario regar el mineral con solución cianurada por 55 días como mínimo.

3. Metodología

3.1. Metodología usada en otras operaciones mineras

3.1.1. Aglomeración de mineral

El objetivo es mejorar la permeabilidad de la pila para acelerar la velocidad de percolación; para esta condición es necesario implementar una planta de aglomeración en que el principal suministro es el cemento y siempre y cuando se identifique la presencia de algún tipo de arcilla.

3.1.2. Clasificación

El objetivo es separar el mineral fino del mineral grueso también para mejorar la velocidad de percolación y para esto es necesario implementar un circuito de fajas transportadoras y zarandas.

3.1.3. Aplicación de agentes químicos

El uso de aditivos para mejorar la humectación del mineral es una tecnología moderna que se basa en romper la tensión superficial del mineral para que el

reactivo químico en este caso cianuro de sodio penetre en toda la estructura del mineral. Mineral Coimolache ha evaluado esta tecnología

3.2. Desarrollo de la Metodología implementada en Minera Coimolache – Celdas dinámicas pila Tantahuatay.

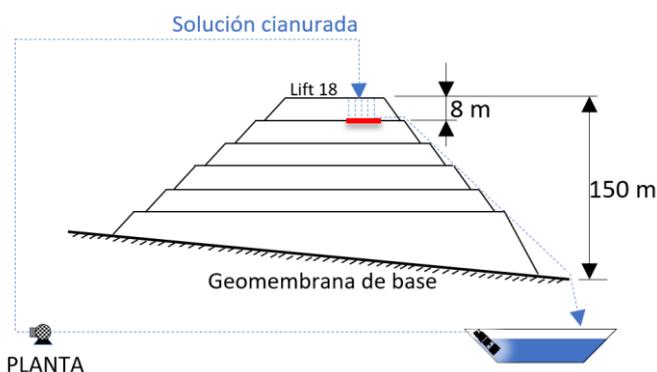


Gráfico 2: Configuración celda dinámica
 *Se diferencia con una línea roja la plataforma impermeabilizada con geomembrana.

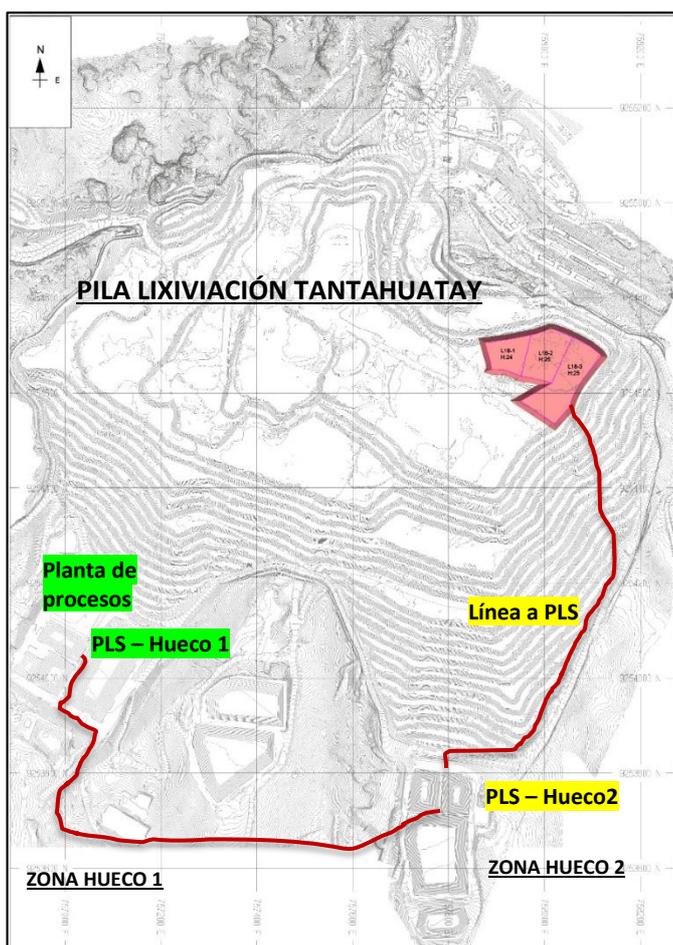


Gráfico 3: Ubicación celda dinámica en pila Tantahuatay – sistema de colección a poza PLS Hueco 1 / Hueco 2.



Foto 1: Línea HDPE 14” para descarga de celda dinámica

3.2.1. Celda dinámica lift 18 Pila Tantahuatay

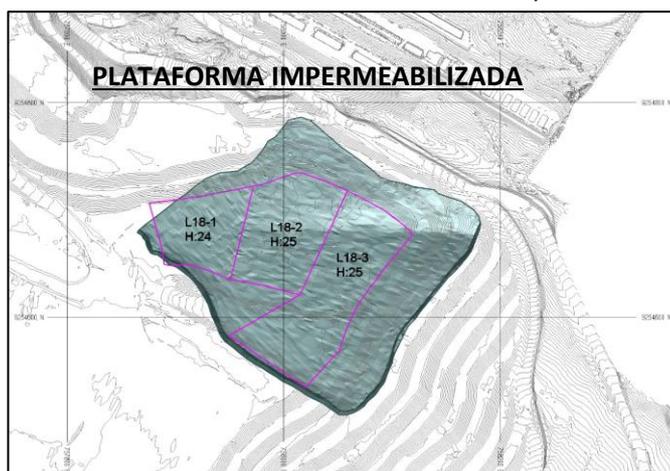


Gráfico 4: Configuración plataforma impermeabilizada para celda dinámica.

Para un manejo ordenado de la zona impermeabilizada, se ha dividido en 3 sectores con las siguientes áreas y capacidades para carga de mineral:

Sector	Área, Ha	Volumen, m3	Mineral, Tn
L18-1	0.53	58,272	32, 733
L18-2	0.79	70, 614	39, 230

L18-3	1.14	104, 721	58, 178
Total	2.46	233, 607	130, 141

Tabla 1: Características de los sectores de celda dinámica.

3.2.2. Principio de la celda dinámica: re-manejo

El proceso de re-manejo se aplica al mineral que se lixivió en la plataforma de celda dinámica con el objetivo de reemplazar por mineral nuevo. Con excavadoras que cargan a volquetes de 23 m³, después de 30 o 35 días de riego el mineral es trasladado (re-manejo) a otras zonas de la pila para continuar regándose con solución cianurada por espacio de 15 a 20 días más. Se ha identificado que el riego en re-manejo favorece a la recuperación de oro y plata por la oxigenación del mineral con el oxígeno del medio ambiente y rotura de canalizaciones al manipular el mineral durante el carguío y descarga en la nueva zona.

La planificación de la celda dinámica se considera desde el planeamiento anual; en este se desarrolla:

- Plan de descarga mensual a cargo del área de Mina
- Curva de recuperación a cargo de Planta de Procesos.

Al cruzar la información de ambos analizando la secuencia de descarga del mineral, altura de lift, ciclo y ratio de riego, entre otros se logra identificar los meses en que no habrá percolación de leyes frescas para procesamiento en Planta.

Esta información se toma como punto de partida para la programación de las fechas en que la celda dinámica debe entrar en operación con los siguientes ajustes:

- Geología; discrimina las leyes de oro y plata bajas y medias de las altas para cargar en la celda dinámica.
- Mina; planifica su operación en tajo (plataformas, rampas, accesos) para el acarreo a la pila de Lixiviación del mineral con las leyes identificadas por Geología.
- Planta; a través de Laboratorio metalúrgico evalúa el mineral para maximizar la recuperación del mineral cargado en la celda dinámica a través de pruebas metalúrgicas (*Blending*, permeabilidad, *DRx*, *DLT*,

Recuperación de oro y plata en columnas y botellas, entre otros).

3.2.3. Aporte de la celda dinámica

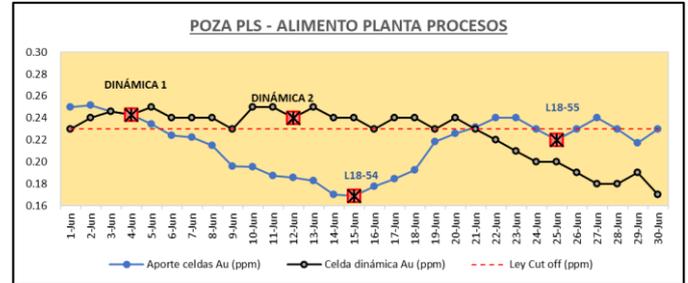


Gráfico 5: Percolación de celdas a la poza PLS

En el gráfico 5 se ejemplifica como la celda dinámica estratégicamente aporta leyes *pregnant* en los días que no se tiene percolación de leyes de celdas del lift 18 ubicadas fuera del área impermeabilizada. Las celdas L18-54 / L18-55 cargados en la pila a finales del mes de abril 2022 iniciaron su aporte de ley el 15 y 25 de junio respectivamente; como se observa en el gráfico, fue necesario el aporte de celdas del dinámico 1 (L18-1) y dinámico 2 (L18-2) para mantener la ley de corte necesaria para cumplir la producción mensual según el *budget*.

Cabe destacar que estas celdas se cargaron 08 días antes del aporte de ley *pregnant* (4 días de carga mineral / 4 días de riego) antes de que inicie su aporte de leyes en el mismo mes de junio.

Según la metodología estas celdas cierran su riego el 15 y 25 de julio; luego de esto el mineral será re-manejado.

4. Análisis de resultados de metodología implementada

4.1.1. Eficiencia celda Dinámica - % Recuperación

Se monitoreó el ciclo de una celda dinámica; después de 29 días de riego con 130 ppm de cianuro libre se obtuvo 70% de recuperación en oro y 10% de recuperación en plata.

CELDA	MALLA	FLOW RATE (LH/m ²)	Cn-(ppm)	DIAS LIX.	TM
L18-2	ROM	14	130	29	39,004

Tabla 3: Parámetros de operación celda L18-2

CELDA	CABEZA ANALIZADA, g/t			RECUPERACIÓN, %			REACTIVOS	
	Au	Ag	Cu	Au	Ag	Cu	Cn-	CaO
L18-2	0.79	8.30	925	70	10	0.2	0.22	1.12

Tabla 4: Balance lixiviación L18-2

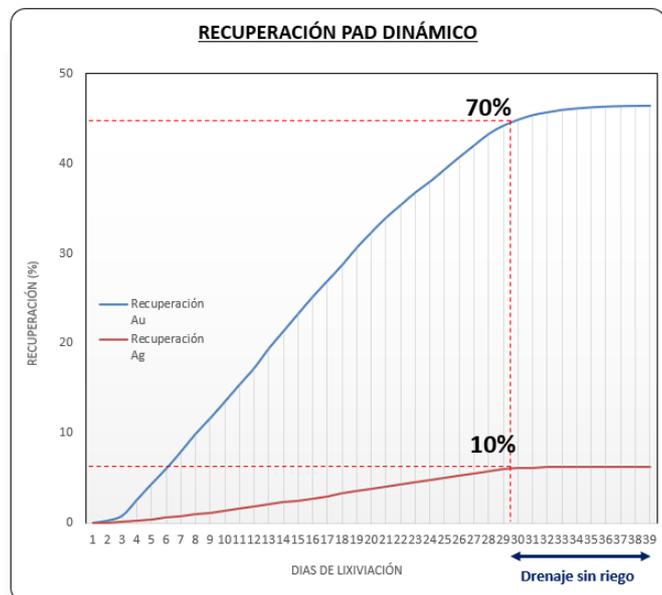


Gráfico 6: Operación celda dinámica al día 29 después de iniciado el riego.

De igual manera se monitoreo la celda después de re-manear; en 27 días se obtuvo 9% más de recuperación en oro y 6% de recuperación en plata.

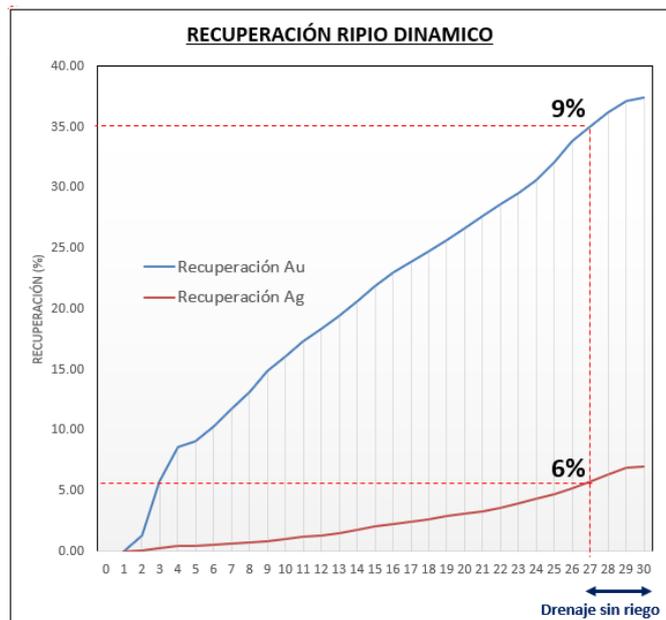


Gráfico 7: Recuperación de lixiviación de mineral re-manjado.

- En ambas etapas de cianuración, en Au se suman 79% de recuperación y 16% en Ag.

- El incremento de la recuperación de Au se atribuye a la oxigenación, rotura de canalizaciones durante el re-manejo.
- La cinética de recuperación de Ag es lenta, con más tiempo de riego se mejora su % de recuperación.
- Para lograr recuperaciones optimas, el mineral requiere de aproximadamente 60 días de riego continuo.

4.1.2. Budget 2020 – 2022 (mayo)

- Con la programación de ciclos de lixiviación (9, 8 y 6 a mayo del 2022) de los 3 sectores de celdas dinámicas se ha logrado cumplir con las metas de los Budget 2020, 2021 y lo que va del 2022.
- En el 2020 pese a pandemia por el covid 19 logramos producir 15% más en oro, 17% más en Plata y de la misma manera en 2021 logramos producir 19% más en oro y 45% más en plata. Similares resultados esperamos para el cierre del año 2022.

PILA	Total 2020	TOTAL 2021	TOTAL 2022 (Mayo)
THY, TM	5,691,905	4,886,410	1,140,491
Ley Au, gr/tn	0.49	0.43	0.42
Ley Ag, gr/tn	16.08	8.92	3.67
Oro, Oz	90,039	67,408	15,499
Plata, Oz	2,943,377	1,401,429	134,426
DINÁMICO, TM	970,184	1,200,613	550,373
Ley Au, gr/tn	0.58	0.53	0.54
Ley Ag, gr/tn	14.03	7.68	2.96
Oro, Oz	17,946	20,327	9,493
Plata, Oz	437,716	296,533	52,379
CN, TM	1,118,352	2,117,725	422,823
Ley Au, gr/tn	0.40	0.48	0.40
Ley Ag, gr/tn	7.04	7.51	0.92
Oro, Oz	14,480	32,882	5,427
Plata, Oz	253,221	511,051	12,475
Mineral TM	7,780,441	8,204,748	2,113,687
Oro, Oz Contenidas	122,465	120,617	30,419
Plata, Oz Contenidas	3,634,313	2,209,013	199,279
Rec. Calculada	Total	TOTAL	TOTAL
Rec. Calculado oro, 74%	90,624	89,257	22,510
Rec. Calculado plata, 16%	581,490	353,442	31,885
Producción de finos			
Oro, Oz	106,018	110,575	26,734
Plata, Oz	699,372	647,466	102,934
Δ Producción			
Δ Oro, %	15	19	16
Δ Plata, %	17	45	69
Programación C. Dinámica	9 CICLOS	8 CICLOS	6 CICLOS

Tabla 2: Cuadro resumen Budget 2020-2022

4.1.3. Análisis químico de soluciones

Con la operación de la celda dinámica se ha registrado menor concentración de metales como el aluminio, arsénico, cobre, entre otros. Esta reducción significativa se atribuye a que la solución cargada no percola a través de toda la pila (150 m), solo a través de los 8 m. del mineral apilado en la celda dinámica.

Esta nueva condición ha permitido la optimización en 2% de los reactivos de la Planta de tratamiento de Efluentes cianurados.

ANALITO, ppm	Al	As	Cu	Fe	Pb	Zn
PLS HUECO 1	0.81	7.23	8.85	1.10	0.02	5.90
PLS HUECO 2	0.41	2.11	1.50	0.87	0.01	0.18
Δ	-49.00	-70.83	-83.02	-21.26	-67.36	-96.95

Gráfico 7: Comparativo de concentración de metales en drenaje de celda dinámica Vs. Drenaje de volúmenes provenientes de zonas de ripios.

5. Evaluación económica

Costo celda dinámica	Inversión, \$ (000)
Corte y relleno de material (Incluye Zanjas de Anclaje)	80
Compactación del terreno	55
compra de Geomembrana de 2 mm	243
Instalación de Geomembrana	127
Producción e instalación de overliner	454
Tubería HDPE de 14" Ø	15
Instalación de tubería HDPE de 14" Ø	35
Instalación de tubería (sistema de colección de solución)	10
Gastos generales (30%)	31
Otros	80
TOTAL	1,411

AÑOS	UND	2019	2020	2021	2022
TOTAL – Re- manejo	\$	1,411	2,250	2,000	3,000
FCN		-1,411	24,502	37,401	18,353

Tasa de interés 10%

VPN = 65,562 (000)

(Para mayor detalle, remitirse al anexo: Evaluación económica).

El Valor Presente Neto calculado nos indica que el proyecto es viable puesto que nos da referencia del flujo de caja positivo que recibiremos al cierre del 2022.

N. Conclusiones

- La metodología implementada es efectiva para mantener la ley de corte de Au & Ag en la poza PLS y cumplir el *Budget* de producción.
- La metodología reporta un incremento de 5% en la recuperación de oro (de 74% a 79%) por el subproceso de re-manejo de mineral después de 30 días de lixiviación.
- La percolación de solución cianurada por la pila mejora, puesto que los finos del mineral no se compactan por la presión de lift superiores. Esta condición es mejorada también por los *blending* de mineral que determina el área de Laboratorio Metalúrgico antes del carguío de mineral en la pila.
- Reducción de la concentración de elementos cianídicos como el Cu, As, Al, etc. en 56% en promedio; se atribuye esta diferencia sustancial a que la solución rica no percola a través de toda la altura de la pila solo por los 8 m. de altura de la celda dinámica.
- Finalmente, el cálculo de VPN muestra la viabilidad del proyecto con un flujo de caja de \$65,562,331.

Agradecimientos

A la Gerencia en nombre del Ing. Alex Lobo Guillen por la confianza y facilidades para el desarrollo de esta metodología y al equipo de trabajo de las áreas de Geología, Mina y Planta de procesos por los esfuerzos invertidos en cada etapa de la investigación.

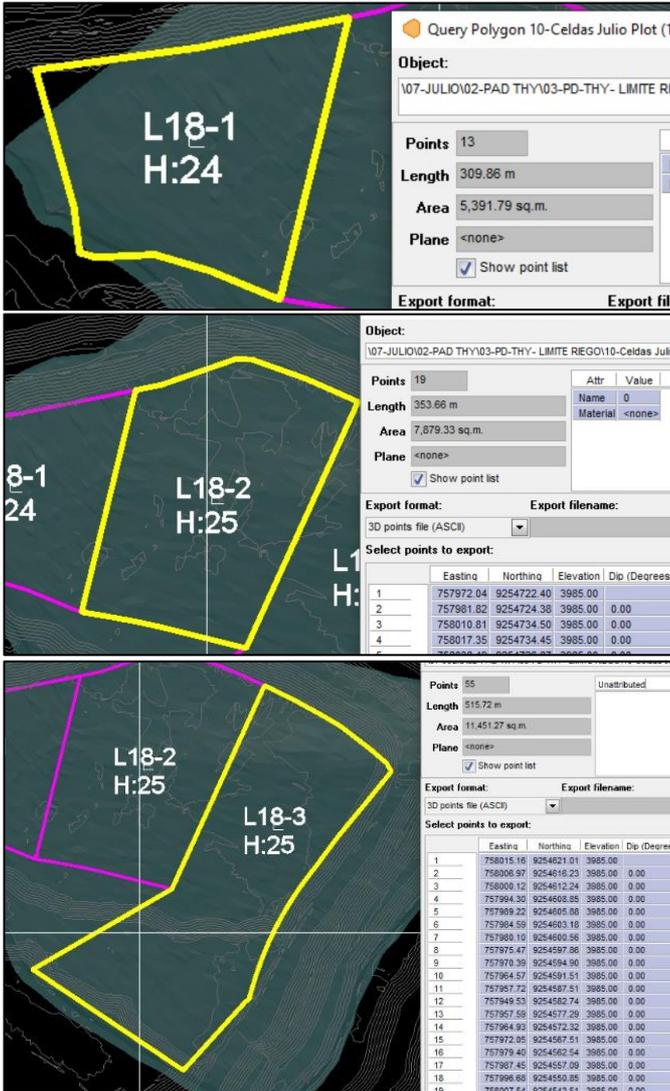
Referencias

Beckel, Jorge. (2000). El proceso hidrometalúrgico de lixiviación en pilas y el desarrollo de la minería cuprífera en Chile. Santiago de Chile.

Arias, T. Fernandez, D. Sánchez Y. Lasserra A. (2017). Influencia de la lixiviación en la recuperación de oro en la Mina Oro-Barita de Santiago de Cuba. Santiago de Cuba

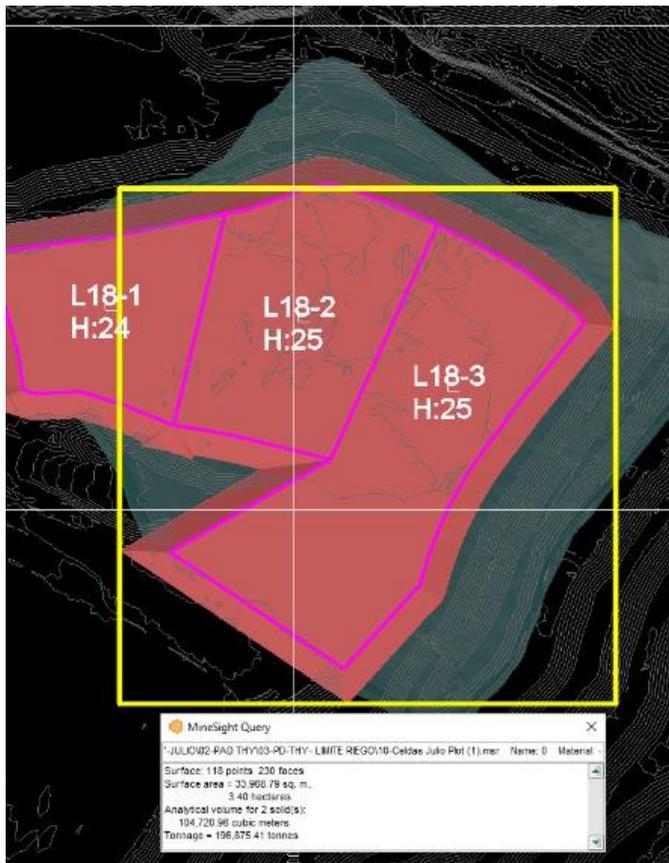
ANEXOS: ILUSTRACIONES

I. Área sectores de celdas dinámicas



II. Volúmenes disponibles en celdas dinámicas





ANEXOS: EVALUACIÓN ECONÓMICA

AÑOS	UND	2019	2020	2021	2022	Total
Datos de producción:						
Mineral	TM		7,780,441	8,204,748	8,591,336	24,576,525
Onzas cont. Oro	oz		122,465	120,617	106,137	349,220
Onzas cont. Plata	oz		3,634,313	2,209,013	1,745,125	7,588,451
Recuperación Oro (Sin celda dinámica)	oz		90,624	89,257	80,104	259,985
Recuperación Plata (Sin celda dinámica)	oz		581,490	353,442	363,248	1,298,180
Recuperación Oro (Con celda dinámica)	oz		106,018	110,575	92,761	309,354
Recuperación Plata (Con celda dinámica)	oz		699,372	647,466	424,474	1,771,313
Δ Oro	oz		15,394	21,318	12,657	49,369
Δ Plata	oz		117,882	294,024	61,227	473,133
Caja (Au 1600 \$/Oz - Ag 18 \$/Oz)	\$		26,752,132	39,401,397	21,352,566	87,506,096
COSTO CELDA DINÁMICA						
Corte y relleno de material (Incluye Zanjas c	\$	80,000				
Compactación del terreno	\$	55,000				
Compra de Geomembrana de 2 mm	\$	242,880				
Instalación de Geomembrana	\$	126,500				
Producción e instalación de over liner	\$	453,750				
Tubería HDPE de 18" Ø	\$	15,000				
Instalación de tubería HDPE de 18" Ø	\$	35,000				
Instalación de tubería (sistema de colección	\$	10,000				
Gastos generales (30%)	\$	313,005				
Otros	\$	80,000				
TOTAL - Costo remanejo	\$	1,411,135	2,250,000	2,000,000	3,000,000	
FCF	-	1,411,135	24,502,132	37,401,397	18,352,566	

Tasa de interés 10%

VPN = \$ 65,562,331

GLOSARIO

Solución pregnant

Solución cianurada que drena o percola de la pila de lixiviación con altos contenidos de oro y plata (metales de interés).

Percolación

Caudal de solución cianurada que libera la pila de lixiviación.

Ponding

Acumulación de solución cianurada en la superficie del mineral ocasionado por presencia de arcillas o exceso de finos del mineral.

Poza PLS

Poza **P**regant **L**eaching **S**olution, impermeabilizada para recepción de leyes altas que percola la pila de lixiviación.

Poza ILS

Poza **I**ntermediate **L**eaching **S**olution, impermeabilizada para recepción de leyes medias y bajas que percola la pila de lixiviación.

Poza grandes eventos

Poza impermeabilizada con capacidad para contener soluciones cianuradas ante el colapso (rebalse) de pozas PLS & ILS.

Geomembrana de base

Geomembrana dispuesta en la plataforma de la pila antes de cargar el mineral, la instalación de geomembrana se hace con estricto control de calidad puesto que no debe haber roturas que hagan filtrar soluciones cianuradas al medio ambiente.

Blending de mineral

Determinación de % de minerales que debe conformar una celda de mineral para mejorar sus condiciones, generalmente de permeabilidad.

Velocidad de percolación

Tiempo en que un volumen de agua pasa por un cuerpo mineralizado, en este caso el mineral que conforma la pila de lixiviación.

Ley de corte

Ley de oro y plata necesarios para el cumplimiento de la producción.

Ensayo DRX / DLT

DRx Difracción de rayos X para determinar el contenido y tipo de arcillas

DLT Diagnostic Leaching Solution para determinar el grado de liberación del metal de interés en el mineral.

Perfil profesional

Ingeniero Metalurgista (UNT), Magister en Administración Estratégica de Empresas (CENTRUM CATÓLICA), con más de 17 años de experiencia en Operación de Plantas minero-metalúrgicas. Orientado a la mejora de los procesos y control de costos.

Nombre del autor:

Segundo Velásquez Miranda

Cargo:

Superintendente de Planta

Empresa:

Minera Coimolache

Correo electrónico:

segundo.velasquez@buenaventura.pe

Teléfono / Celular:

964346590

Dirección:

Calle Las Begonias 415, San Isidro, Lima, Perú

Perfil profesional:

Ingeniero Metalurgista (UNT), MBA (ESEUNE), Maestro en Ciencias - Mención Desarrollo y Medio Ambiente (UNC), con más de 20 años de experiencia en Operación de Plantas minero-metalúrgicas y Tratamiento de aguas. Orientado a la mejora de los procesos y trabajo en equipo.

Nombre del coautor:

Enrique Mego Estela

Cargo:

Jefe de Procesos Planta

Empresa:

Minera Coimolache

Correo electrónico:

Enrique.mego@buenaventura.pe

Teléfono / Celular:

976861975

Dirección:

Calle Las Begonias 415, San Isidro, Lima, Perú

Perfil profesional

Ingeniero Metalurgista (UNSA) - Magister en Administración Estratégica de Empresas (CENTRUM CATÓLICA), con 14 años de experiencia en Operación de Plantas Hidro metalúrgicas e investigación de Procesos. Proactivo e innovador orientado a la reducción de costos

Nombre del coautor:

Robert Augusto Montes Quispe

Cargo:

Jefe de Planta ADR

Empresa:

Minera Coimolache

Correo electrónico:

Robert.montes@buenaventura.pe

Teléfono / Celular:

974207756

Dirección:

Calle Las Begonias 415, San Isidro, Lima, Perú