EVALUACIÓN DE COSTOS PARA DIFERENTES ESCENARIOS INCORPORANDO COBERTURAS IMPERMEABLES (RAINCOATS) EN LA OPERACIÓN DE PADS DE LIXIVIACIÓN

Daniel Pulcha, Ingeniero Hidrólogo Hidráulico, daniel.pulcha@anddes.com

Carlos Cesar, Gerente de Ingeniería, carlos.cesar@anddes.com

Denys Parra, Gerente General, denys.parra@anddes.com

ANDDES ASOCIADOS S.A.C.
(51-1) 592-1275

RESUMEN

Actualmente en algunas de las operaciones mineras que utilizan la tecnología de lixiviación en pilas y que se ubican en zonas lluviosas, se está optando por usar coberturas impermeables (raincoats) sobre la pila de mineral con la finalidad de reducir el ingreso del agua de lluvias al sistema; el uso de raincoats se extiende inclusive a aquellas áreas de la pila que aún se encuentran bajo riego. Las diferentes experiencias nos indican que el ingreso de las aguas de lluvia al sistema provoca por un lado, la dilución de la solución, haciendo menos eficiente el proceso de recuperación de metales, y por el otro, produciendo agua contaminada en exceso con solución que requiere recirculación o tratamiento antes de su descarga al ambiente. Lo anterior resulta en un incremento considerable de los costos de operación.

Este artículo presenta el análisis de diferentes escenarios de colocación de raincoats de un caso real de una pila de lixiviación en una región de alta precipitación (norte de Brasil), donde se procesan minerales de cobre. El balance de aguas ha sido realizado considerando diferentes porcentajes de coberturas, capacidad de la planta de tratamiento, capacidad de la poza de emergencia y capacidad de la poza de raincoats. Los resultados del balance de aguas han permitido determinar los flujos operativos a ser almacenados en la poza de emergencia y aquellos que requieren de purga del sistema y por lo tanto, de tratamiento antes de su vertimiento a los cursos naturales. Finalmente se presenta un análisis comparativo de costos de capital (Capex) y de operación (Opex) de los diferentes escenarios. La evaluación de costos indica que el uso de una mayor cantidad de raincoats en la pila, reduce el costo total durante la vida operativa de las instalaciones de lixiviación.

INTRODUCCIÓN

Hace algunos años el balance de aguas en un pad de lixiviación en zonas de alta precipitación, no consideraba el uso de raincoats; sin embargo, la experiencia indica que la instalación de raincoats permite minimizar el ingreso de agua al sistema y reduce los costos de operación a largo plazo. Asimismo, los raincoats ofrecen un modo eficaz y económico de separar y derivar los flujos de agua de lluvias hacia una poza de raincoats y luego al medio ambiente sin tratamiento previo, consiguiendo minimizar la dilución de la solución de proceso, reducir la necesidad de almacenamiento en la poza de emergencia y por lo tanto su tamaño, disminuir el tamaño de la planta de tratamiento y reducir el costo de tratamiento de aguas.

Para realizar el balance de aguas en este caso analizado de una pila de lixiviación en zona de alta precipitación ubicada en el norte de Brasil, la evaluación de la hidrología en la zona de estudio tomó en cuenta los datos de precipitaciones y evaporaciones de estaciones existentes. El balance de aguas considera la interconexión existente entre el pad de lixiviación, las pozas de procesos, la poza de emergencia (poza de grandes eventos de tormenta) y la poza de raincoats (poza de agua de lluvias). El balance de aguas ha sido desarrollado considerando:

- Análisis y elaboración de series de precipitación y evaporación.
- Base para diseñar las capacidades de almacenamiento de las pozas de procesos, de emergencia y de raincoats.
- Estimación de las demandas de agua para mantener el proceso de lixiviación.
- Estimacion de los excesos y la capacidad de la planta de tratamiento de aguas.

HIDROLOGÍA

El clima de la región donde se ubica el área de estudio es tropical, caluroso y húmedo durante todo el año. La información básica provino de los registros de estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio (Serra Pelada, Fazenda Rio Branco, Belo Horizonte, Fazenda Surubim, Fazenda Santa Elisa, Eldorado, Fazenda Caiçara, Serra dos Carajás N5, Boa Esperança, Projeto Tucumã, Xinguara y Sossego), obtenidas de la Agencia Nacional de Aguas (ANA) de Brasil y una estación climatológica, ubicada en las instalaciones del proyecto.

Precipitación

La inspección visual de los datos pluviométricos disponibles permitió emplear un análisis de consistencia de saltos y tendencias, determinando que los registros de las estaciones Boa Esperança, Fazenda Rio Branco, Projeto Tucumã, Serra dos Carajás N5 y Sossego poseen una distribución uniforme y datos consistentes.

Para estimar las precipitaciones mensuales típicas para el área de estudio se tomó los datos de las estaciones Sossego y Serra dos Carajás N5 como representativas del lugar en base a la proximidad geográfica y altitudinal. El registro de precipitaciones mensuales representativo de la zona de estudio se obtuvo en base al registro de la estación Serra dos Carajás N5 (1985 a 2003) y la estación Sossego (2004-2011) escalado al módulo pluviométrico anual promedio (1 691,9 mm). La Tabla 1 muestra la precipitación mensual promedio para el área de estudio.

Tabla 1. Precipitación Total Mensual (mm)

Mes	Máxima	Media	Mínima	% Anual
Ene	414,5	237,4	104,2	14%
Feb	440,2	269,0	152,7	16%
Mar	510,2	280,9	141,7	17%
Abr	608,2	219,5	38,6	13%
May	271,5	114,1	0,0	7%
Jun	101,0	24,9	0,0	1%
Jul	154,7	20,0	0,0	1%
Ago	86,4	24,1	0,0	1%
Set	131,5	54,2	3,6	3%
Oct	249,0	110,7	3,7	7%
Nov	249,7	139,8	34,2	8%
Dic	495,9	197,3	69,1	12%
Total	2415,4	1691,9	1057,8	100%

La precipitación mensual característica del área de estudio presenta dos periodos bien diferenciados, la época de lluvias y la época de sequía, donde alrededor del 93% de la precipitación anual ocurre en la temporada de lluvias, entre los meses de octubre a mayo.

Evaporación

Se obtuvo información de la Estación Climatológica Sossego (2005-2011), cuya evaporación media anual presentó un valor de 1725,3 mm.

La evaporación para el área del proyecto se definió en base a los datos de evaporación de la estación Sossego y se ha completado con los promedios para el periodo 1985-2004. La Tabla 2 muestra la evaporación mensual promedio para el área del proyecto.

Tabla 2. Evaporación Total Mensual (mm)

Mes	Máxima	Media	Mínima	% Anual
Ene	161,2	130,7	90,6	14%
Feb	158,3	125,3	93,3	16%
Mar	151,1	119,8	99,4	17%
Abr	219,1	134,4	38,7	13%
May	155,1	110,0	73,5	7%
Jun	148,9	124,9	100,2	1%
Jul	207,0	164,7	129,4	1%
Ago	244,7	193,4	137,1	1%
Set	249,3	194,1	165,0	3%
Oct	206,6	166,6	127,2	7%
Nov	148,4	119,0	100,9	8%
Dic	240,4	142,5	83,0	12%
Total	1939,1	1725,3	1454,5	100%

La evaporación mensual característica del área de estudio presenta dos periodos bien diferenciados, la época de lluvias y la época de sequía, donde alrededor del 66% de la evaporación anual ocurre en la temporada de lluvias, entre los meses de octubre a mayo.

Series de Precipitación y Evaporación

Se pudo implementar series de precipitación y evaporación puesto que se cuenta con registros prolongados los cuales permitieron llevar a cabo 27 series de simulaciones para el balance de aguas. Las series sintéticas se obtuvieron aplicando el método ISM (Index Sequential Method).

La Figura 1 muestra la variación de la precipitación y evaporación total mensual, que representa el promedio de los 27 años registrados para el área de estudio.

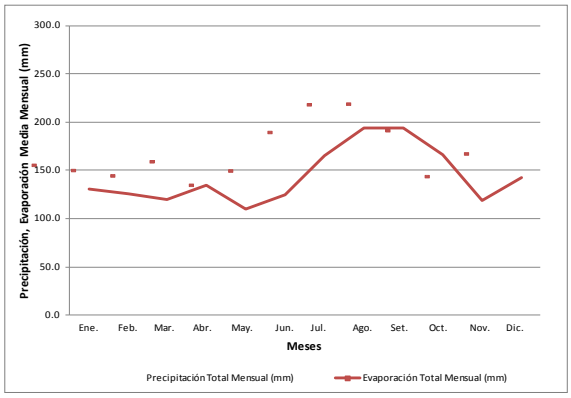

Figura 1. Evaporación Total Mensual (mm)

Eventos Hidrológicos Extremos

La evaluación de las precipitaciones máximas se realizaró en base a eventos extremos de la estación Serra dos Carajás N5. La serie de datos de precipitaciones máximas en 24 horas fueron ajustadas a diversos modelos probabilísticos (Normal, LogNormal, Pearson III, Log Pearson III y GEV1), y basados en los diversos índices estadísticos y criterios hidrológicos fue seleccionada, para dar uniformidad de criterio, la distribución GEV1 debido a que presentaba los mejores índices, según el ajuste de bondad de Smirnov Kolmogorov. Es preciso indicar que se realizó el ajuste de las precipitaciones máximas por el factor 1,14, utilizado para corregir los sesgos de subestimación de mediciones tomadas en intervalos fijos cada 24 horas recomendado por la World Meteorological Organization (WMO, 1994). La Tabla 3 muestra las precipitaciones máximas en 24 horas para diferentes periodos de retorno.

Tabla 3 . Frecuencia de Precipitaciones Máximas en 24 horas (mm)

Periodo de retorno	Precipitación Máxima en 24 horas
2	95,8
5	119,5
10	135,2
25	155,1
50	169,8
100	184,5
500	218,3

BALANCE DE AGUAS

Descripción del Balance de Aguas

El modelo de balance de aguas se desarrolló utilizando una hoja de cálculo que, como todos los modelos de balance de aguas en general, está basada en la siguiente ecuación:

Flujo entrante - Flujo Saliente = Cambio en el almacenamiento

Los flujos entrantes corresponden a la precipitación que cae sobre el área de la pila de lixiviación y al flujo de agua fresca de reposición. El flujo saliente lo componen las evaporaciones en el pad (desde las áreas activas bajo lixiviación, el resto de áreas inactivas, y por las pérdidas debidas al riego), las evaporaciones en las pozas y las salidas de los excesos del sistema pad-pozas previo tratamiento de efluentes (detoxificación).

Los cambios de almacenamiento están asociados con cambios del contenido de la humedad almacenada en los vacíos del mineral y las fluctuaciones de niveles de agua en las pozas. Los flujos de recirculación entre las pozas (PLS, rafinado y emergencia) y el área de lixiviación, son considerados como flujos internos (no generan entradas y salidas del sistema). Cabe mencionar que el balance de aguas empleará coberturas impermeables (raincoats) para minimizar el ingreso de agua al sistema.

Debe notarse que las variables dependientes del cálculo presente son el flujo de demanda de agua fresca y las salidas de agua del sistema pila-pozas con necesidades de tratamiento (detoxificación); en tal sentido estos flujos son establecidos para equilibrar las pérdidas en el sistema y mantener los niveles en las pozas dentro de los límites operativos y de contingencia al final de cada periodo mensual. La Figura 2 muestra el esquema del modelo de simulación del balance de aguas considerado.

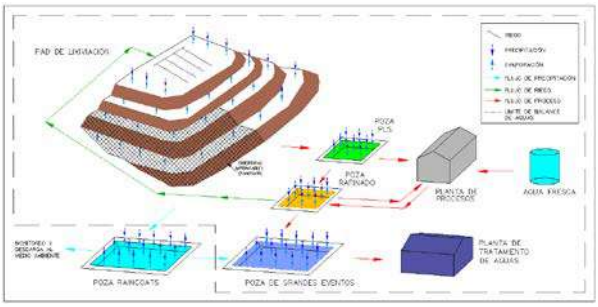

Figura 2. Criterios de Diseño Usados en el Balance de Aguas

Parámetros y Criterios de Simulación

El modelo de balance de aguas depende de los planes de producción previstos, del plan de apilamiento y de colocación de coberturas, de las propiedades del mineral (humedades características, densidad y ciclo de lixiviación requerido), del tipo de riego, de las precipitaciones, evaporaciones, de las dimensiones de las pozas y el almacenamiento inicial en ellas. Como el balance de aguas está en función a las condiciones de operación de la planta, los resultados que se obtengan son directamente dependientes de los parámetros de operación que se introduzca al modelo, por lo tanto, estos son susceptibles de cambios. A continuación se presenta los parámetros empleados relacionados a las condiciones mencionadas:

- Tasa de producción diaria (Año 1): 9 400 t/dia.
- Tasa de producción diaria (Año 2 a 12): 16 000 t/dia.
- Tasa de producción diaria (Año 13): 10 500 t/dia.
- Periodo de Operación: 13 años (156 meses).
- Densidad húmeda del mineral: 1,45 t/m³.
- Tasa de aplicación: 10 l/h/m².
- Tasa máxima de Duración de averías, tiempo de percolación libre: 12 horas.
- Altura de pila típica: 5,2 m.
- Ciclo de lixiviación: 120 días.
- Capacidad de poza PLS (02): 19 120 m³.
- Capacidad de poza de rafinado: 17 000 m³.
- Volumen mínimo de operación cada poza: 1 800 - 10 000 m³.
- Humedad inicial del mineral: 19%.
- Contenido de humedad residual: 25,6%.
- Absorción, retención de humedad: 6,6%.
- Factor de evaporación de pozas: 1,0.
- Factor de evaporación de área de lixiviación: 1,0.
- Factor de evaporación de área no lixiviada: 0,05 - 0,30.
- Pérdidas por goteo: 0,10%.
- Volumen al inicio de la simulación: 15 000 m³.
- Coberturas impermeables (raincoats): 30%, 50% y 80%.
- Mes de inicio de la simulación: Enero 2010.

La pila de lixiviación está compuesta por tres fases, en el plan considerado las fases 1, 2 y 3 duran periodos de 23, 55 y 78 meses, respectivamente.

Dado que la superficie expuesta a las lluvias está directamente relacionada con la extensión del pad, el plan de construcción del pad ha considerado la construcción por fases de 8,4; 26,1 y 35,5 Mt como capacidades independientes, para las fases 1, 2 y 3, respectivamente y la extensión de las fases ascenderá a 26,8; 48,2 y 54,7 hectáreas aproximadamente.

Las características del mineral tomadas en cuenta son las humedades naturales, residuales y de lixiviación así como la duración del ciclo de lixiviación (120 días). La retención (o absorción) de humedad del mineral, que representa la cantidad neta de humedad que quedará retenida dentro del apilamiento, entre el inicio y el fin del proceso de lixiviación, es la diferencia entre la humedad residual y la natural.

Del plan de producción dependen las estimaciones de la extensión del área bajo riego a lo largo de la vida del proyecto. El área bajo riego depende directamente del periodo de lixiviación, e inversamente de la densidad del mineral apilado y del espesor de las capas de apilamiento.

Se ha considerado el uso de un sistema de coberturas impermeables (raincoats) para minimizar el ingreso de agua al sistema, reduciendo la precipitación y evaporación en la pila de lixiviación.

Los raincoats ofrecen un modo más eficaz y económico de separar y derivar flujos de agua de lluvias hacia la poza de raincoats y luego al medio ambiente, minimizando la dilución de las soluciones de proceso, reduciendo el almacenamiento de la poza de emergencia y disminuyendo el costo del tratamiento de aguas. En la medida de lo posible, el flujo de agua de lluvia será almacenada directamente en la poza de raincoats, si el volumen de tormenta descargado en la poza tiene niveles de contaminación no permisible, el flujo contaminado debe ser enviado hacia la poza de emergencia. El almacenamiento de la poza de raincoats dependerá de la extensión de las coberturas impermeables en la pila, para tal efecto se ha considerado escenarios de cobertura de 30%, 50% y 80% de raincoats, determinándose así 3 valores alternativos para la capacidad de la poza de raincoats. Por razones operativas se ha establecido una eficiencia del 90% en la cobertura (raincoats), ya que durante la operación estarán expuestas a rasgaduras u otros defectos.

La simulación consiste en representar la ejecución de la lixiviación en la pila, desde donde la solución rica será dirigida a las pozas PLS (19 120 m^3 cada una) y a la extracción de metales valiosos en la planta de procesos. Luego la solución gastada será descargada en la poza de rafinado (17 000 m^3), y de allí, luego de la adición de reactivos, redirigida al circuito de lixiviación. A partir del inicio de operaciones, todas las pozas se encontrarán operativas, incluida la poza de emergencia, con lo cual se tendría una capacidad total conjunta de todas las pozas. Eventualmente, los excesos de solución de la poza de rafinado serán dirigidos hacia la poza de emergencia y/o enviados a la planta de tratamiento de efluentes.

Dimensionamiento de Pozas

Las consideraciones empleadas para dimensionar las pozas, han sido para proporcionar lo siguiente en cualquier momento de la vida útil del proyecto:

- Volumen mínimo de operación, definido por la profundidad mínima necesaria para la operación de las bombas (2 m en este caso);
- Volumen de contingencia ante averías en el sistema, para almacenar la percolación libre proveniente del pad durante el tiempo que toma la vuelta a operación del sistema de recirculación y aplicación de la solución;
- El mayor volumen para la contingencia por lluvias máximas, determinado por la mas desfavorable secuencia mensual de la temporada de lluvias, considerando las pozas de emergencia y de raincoats; y
- Volumen de la poza de raincoats considerando porcentajes de cobertura de raincoat sobre la pila de 30%, 50% y 80% de su área total a una eficiencia total de cobertura de 90%, una precipitación máxima en 24 horas para un período de retorno de 2 años y un monitoreo periódico de la poza de cada 2 horas.

El volumen de contingencia por lluvias extremas ha sido establecido de acuerdo con los criterios inferidos en el libro “Introduction to Evaluation, Design and Operation of Precious Metal Heap Leaching Projects” (Van Zyl, Hutchinson y Zyel 1 988), base de varias guías de diseño de pads de lixiviación. En la referencia mencionada se describen 2 criterios: el primero, añadiendo el volumen correspondiente de la tormenta de 24 horas y 100 años de periodo de retorno a las fluctuaciones de volúmenes de un año promedio, y el segundo, utilizado en las evaluaciones de balance de aguas de registros históricos o sintéticos de precipitaciones y evaporaciones mensuales totales.

Este último criterio pudo ser implementado puesto que se cuenta con registros prolongados los cuales han permitido llevar a cabo 27 series de simulaciones de balance de aguas de 156 meses de duración cada una. En climas húmedos este criterio es el crítico. Las series sintéticas se obtuvieron aplicando el método ISM (Index Sequential Method).

Por otra parte, se adoptó 12 horas como la duración de contingencia por averías o mal funcionamiento, considerándose aceptable y conservadora, debido a la capacidad de respuesta para restituir las operaciones.

El balance de aguas representó cuatro posibles escenarios. El escenario 1 consiste en el pad sin raincoats y los siguientes escenarios consisten en colocar las coberturas impermeables (raincoats) sobre un porcentaje del área de la pila y así progresivamente cubrir las fases 1, 2 y 3 hasta culminar con un porcentaje cubierto del área total del pad (80,1 hectáreas). Estos porcentajes de área cubierta serán de 30% (24 hectáreas), 50% (40,1 hectáreas) y 80% (64,1 hectáreas) para los escenarios 2, 3 y 4, respectivamente.

Resultados del Balance de Aguas

Las evaluaciones fueron analizadas en series de tiempo de percentiles de probabilidades de no excedencia de flujos o volúmenes máximos por cada mes a lo largo del periodo simulado. Por ejemplo el gráfico de 90% significa que el flujo o volumen indicado puede ser mayor que el mostrado sólo con un 10% de probabilidad. Las variables de salida mostradas son:

- Los volúmenes máximos totales para operación y contingencia;
- Demandas de agua fresco; y
- Necesidades de descargas de agua del sistema pad-pozas.

Debido a que el desarrollo de la pila de lixiviación se realizará de manera gradual, puede notarse que los resultados varían en la medida que la extensión de la pila se incrementa hasta su desarrollo final.

La tendencia del balance de aguas para los escenarios 1 y 2, es negativa durante los primeros años de operación, para posteriormente ser positiva en los años siguientes. Para los escenarios 3 y 4, es negativa durante todos los años de operación. Una tendencia negativa indica la predominancia de las pérdidas y la necesidad de reponer el agua para sostener el flujo de lixiviación. Una tendencia positiva indica que en el sistema predominará el ingreso capturado de las

lluvias, y por lo tanto el requerimiento de tener que evacuar agua del sistema pila-pozas; sin embargo pueden ocurrir temporadas secas prolongadas donde será necesario el ingreso de agua fresca al sistema.

El almacenamiento total estimado para los escenarios de simulación están limitados con las capacidades bajo prueba de 19 120 m^3 en cada poza PLS, 17 000 m^3 de la poza de rafinado y de 150 000 m^3 de la poza de emergencia. La Tabla 4 muestra los volúmenes de almacenamiento del balance de aguas en la situación hidrológica mas critica.

Tabla 4 . Volumen Total Almacenado en el Balance de Aguas (m^3)

Escenario	Volumen de Operación + Contingencia	Volumen de Poza de Emergencia
Sin raincoats	205 240	150 000
30% de raincoats	205 240	150 000
50% de raincoats	155 240	100 000
80% de raincoats	130 240	75 000

Las demandas de agua fresca que se requiere para operar adecuadamente la pila de lixiviación disminuyen a medida que se incrementa las coberturas impermeables sobre la pila, debido que en la zona de estudio existe grandes evaporaciones. Esta tendencia se genera porque las coberturas impermeables limitan las pérdidas de agua por evaporación y el ingreso de agua por precipitación al sistema. Las mayores demandas de agua se dan en épocas de estiaje, esto explica porque en años de precipitaciones bajas la lluvia capturada por en la pila no es suficiente para que pueda sostener las operaciones durante la temporada de estiaje del año. La Tabla 5 muestra las demandas de agua fresca que necesita el sistema en épocas de estiaje considerado como la situación hidrológica mas critica.

Tabla 5 . Demandas de Agua Fresca (m^3/h)

Escenario	Máximo	Médio	Mínimo
Sin raincoats	177,2	119,9	52,7
30% de raincoats	144,6	98,0	51,3
50% de raincoats	125,0	97,5	60,4
80% de raincoats	93,6	78,2	60,3

Las Figuras 3, 4, 5 y 6 muestran la variación en el tiempo de las demandas de agua para los escenarios simulados.

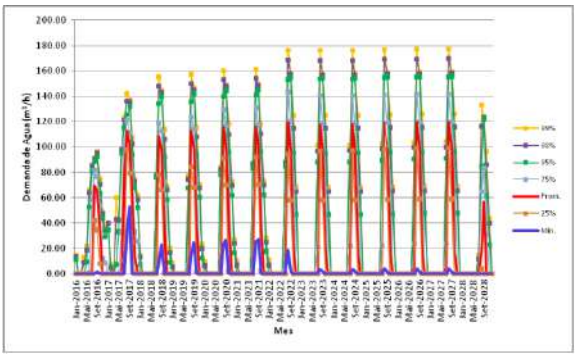

Figura 3. Demandas de Agua Fresca Escenario 1 (Sin raincoats)

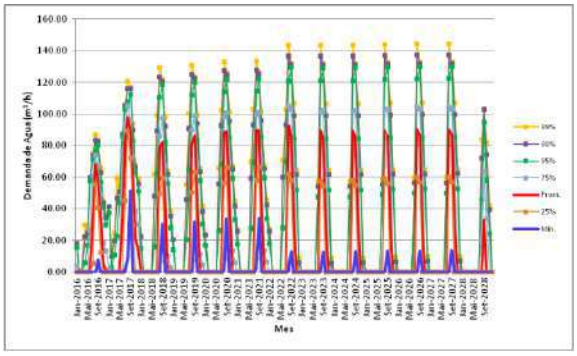

Figura 4. Demandas de Agua Fresca Escenario 2 (30% de raincoats)

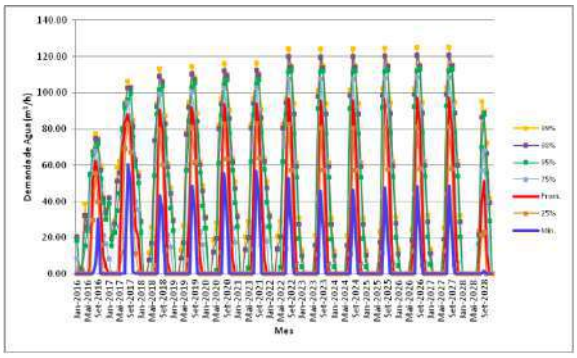

Figura 5. Demandas de Agua Fresca Escenario 3 (50% de raincoats)

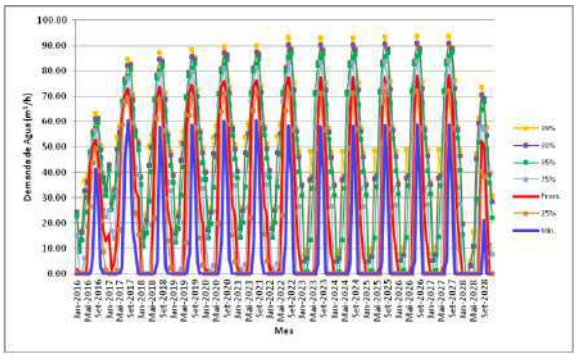

Figura 6. Demandas de Agua Fresca Escenario 4 (80% de raincoats)

Las descargas de agua de purga estimadas en el balance de aguas indican un incremento para cada año de operación conforme aumenta la producción en la pila. Las descargas de aguas de la poza de emergencia determinan la capacidad de la planta de tratamiento de aguas contaminadas, es por ello que al inicio de las operaciones de la pila se requiere una planta de tratamiento de menor capacidad y a medida que la pila incrementa su volumen se va a requerir una planta de tratamiento de mayor capacidad. Las Tablas 6, 7, 8 y 9 muestran las descargas de purga de agua del balance de aguas.

Tabla 6 . Descargas de Agua de Purga (m^3/h)
Escenario 1 (Sin raincoats)

Año	Máximo	Médio	Mínimo
año 1	41,5	0,0	0,0
año 2	116,9	0,0	0,0
año 3	366,1	123,9	0,0
año 4	364,5	125,5	0,0
año 5	362,2	123,8	0,0
año 6	361,5	123,1	0,0
año 7	476,5	122,9	0,0
año 8	538,3	216,4	59,9
año 9	538,2	216,7	59,9
año 10	537,8	215,9	59,6
año 11	537,4	214,1	59,3
año 12	537,3	213,8	59,1
año 13	566,1	247,8	84,1

Tabla 7 . Descargas de Agua de Purga (m^3/h)
Escenario 2 (30% raincoats)

Año	Máximo	Médio	Mínimo
año 1	0,0	0,0	0,0
año 2	66,9	0,0	0,0
año 3	260,1	36,9	0,0
año 4	258,8	60,9	0,0
año 5	256,8	58,7	0,0
año 6	256,2	58,1	0,0
año 7	284,9	57,9	0,0
año 8	379,9	133,2	7,8
año 9	379,9	133,2	7,8
año 10	379,5	132,9	7,7
año 11	379,2	132,6	7,5
año 12	379,1	132,5	7,4
año 13	403,1	150,0	20,8

Tabla 8 . Descargas de Agua de Purga (m^3/h)
Escenario 3 (50% raincoats)

Año	Máximo	Médio	Mínimo
año 1	0,0	0,0	0,0
año 2	46,6	0,0	0,0
año 3	189,4	13,3	0,0
año 4	188,3	28,7	0,0
año 5	186,6	21,6	0,0
año 6	186,0	15,9	0,0
año 7	191,6	15,0	0,0
año 8	274,4	88,5	0,0
año 9	274,3	88,5	0,0
año 10	274,0	88,2	0,0
año 11	273,7	87,1	0,0
año 12	273,6	86,2	0,0
año 13	294,4	103,9	6,6

Tabla 9 . Descargas de Agua de Purga (m^3/h)
Escenario 4 (80% raincoats)

Año	Máximo	Médio	Mínimo
año 1	0,0	0,0	0,0
año 2	0,0	0,0	0,0
año 3	33,8	0,0	0,0
año 4	53,3	0,0	0,0
año 5	51,3	0,0	0,0
año 6	49,8	0,0	0,0
año 7	49,4	0,0	0,0
año 8	89,1	0,0	0,0
año 9	89,0	0,0	0,0
año 10	88,8	0,0	0,0
año 11	88,6	0,0	0,0
año 12	88,5	0,0	0,0
año 13	118,5	0,0	0,0

Las Figuras 7, 8, 9 y 10 muestran la variación en el tiempo de las descargas de agua de purga para los escenarios simulados.

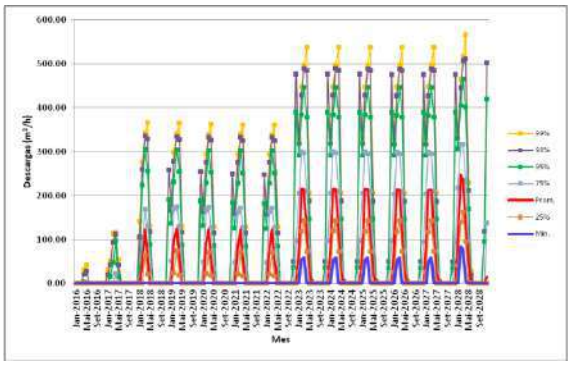

Figura 7. Descargas de Agua de Purga Escenario 1 (Sin raincoats)

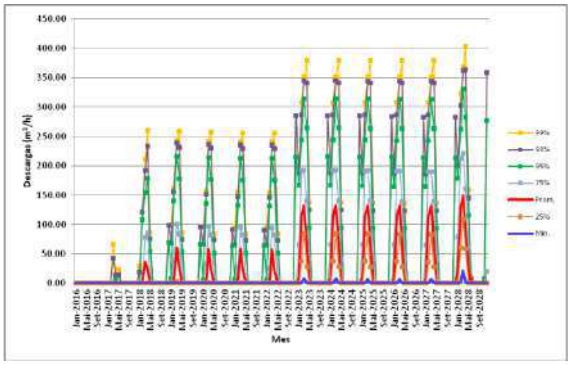

Figura 8. Descargas de Agua de Purga Escenario 2 (30% de raincoats)

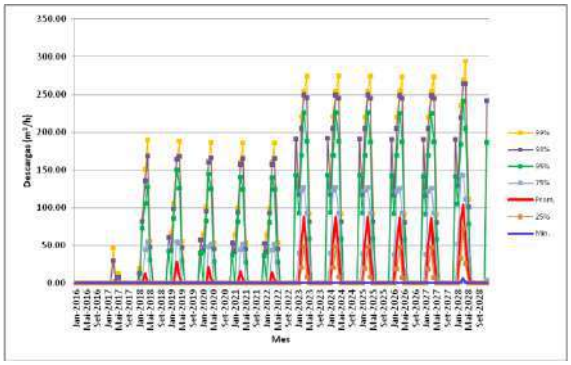

Figura 9. Descargas de Agua de Purga a Escenario 3 (50% de raincoats)

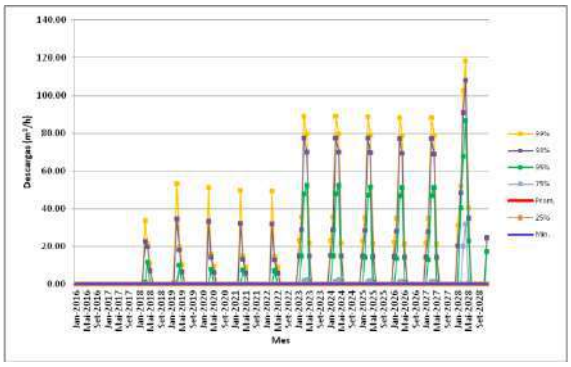

Figura 10. Descargas de Agua de Purga Escenario 4 (80% de raincoats)

El volumen almacenado en la poza de raincoats se estima considerando una tormenta de diseño de 95,8 mm para un período de retorno de 2 años, el área cubierta del pad y la eficiencia de los raincoats de 90%. El volumen de la poza de raincoats tiene un tiempo de descarga antes del monitoreo de 2 horas. La Tabla 10 muestra las capacidades de la poza de raincoats para los escenarios simulados.

Tabla 10. Volumen Almacenado en la Poza de raincoats (m^3)

Escenario	Volumen Almacenado
Sin raincoats	-
30% de raincoats	25 000
50% de raincoats	35 000
80% de raincoats	55 000

En resumen, el balance de aguas de la pila de lixiviación proporciona la relación que existe entre los volúmenes almacenados en las pozas de emergencia y de raincoats, así como la capacidad de la planta de tratamiento de aguas (detoxificación) para los escenarios simulados, tal como se presenta en la siguiente tabla de resumen.

Tabla 11. Resumen del Balance de Aguas

Escenario	Volumen Poza Grandes Eventos (m^3)	Volumen Poza de Raincotas (m^3)	Capacidad Planta de Tratamiento (m^3/h)
Sin raincoats	150 000	-	500
30% de raincoats	150 000	20 800	400
50% de raincoats	100 000	34 600	300
80% de raincoats	75 000	55 300	100

CASOS O ESCENARIOS ANALIZADOS

El balance de aguas se realizó considerando 4 escenarios (ver resultados en la Tabla 11). De acuerdo a los resultados obtenidos se estimaron los costos para cada escenario, para lo cual se tomaron las siguientes consideraciones:

- Costo de construcción de la poza de emergencia y poza raincoat. En este ítem se ha considerado el movimiento de tierras y materiales geosintéticos.

- Coberturas impermeables (sistema raincoat) por año. Corresponde a la geomembrana a ser utilizada como cobertura, se considera que se puede recuperar o reutilizar un 30%.
- Planta de tratamiento por etapas, indicándose el año de su adquisición de acuerdo a lo indicado en las Tablas 6, 7, 8 y 9.
- Estimado de volúmenes de descarga por año de acuerdo a lo indicado en las Tablas 6, 7, 8 y 9. El costo estimado de tratamiento utilizado fue de US$ 2,5 / m^3. El costo de una planta de tratamiento de 100 m^3/h ha sido estimado en US$ 10 millones como de capital diferido.

En la Tabla 12 se presentan los datos obtenidos de la máxima demanda de agua fresca, máxima descarga de purga del sistema y capacidad de la planta de tratamiento de aguas para cada escenario analizado.

Tabla 12. Datos del Balance de Aguas

Escenario	**Máxima Demanda de Agua (m^3/h)**	**Máxima Descarga de Purga (m^3/h)**	**Capacidad Planta de Tratamiento (m^3/h)**
Sin raincoats	177,2	566,1	500
30% de raincoats	144,6	403,1	400
50% de raincoats	125,0	294,4	300
80% de raincoats	93,6	118,5	100

En las Tablas 13 y 14 se muestran los costos estimados para cada escenario.

Tabla 13. Estimado de Costos para Escenarios 01 y 02

Descripción	**Sin raincoats (US$)**	**30% de raincoats (US$)**
Poza de Emergencia	**871,693.9**	**871,693.9**
Movimiento de Tierras	476,594	476,594
Geosintéticos	395,100	395,100
Poza Raincoat	**0.0**	**196,277.8**
Movimiento de Tierras	0	154,428
Geosintéticos	0	41,850
Planta de Tratamiento y Volúmenes de Descarga	**99,510,709**	**63,081,401**
AÑO 1	10,132,803	10,000,000
AÑO 2	25,668,089	13,196,280
AÑO 3	2,751,452	1,465,427
AÑO 4	2,841,524	1,710,882
AÑO 5	2,813,220	1,683,259
AÑO 6	2,801,875	1,671,587
AÑO 7	24,316,084	15,030,194
AÑO 8	4,639,211	3,003,026
AÑO 9	4,638,981	3,002,649
AÑO 10	4,632,626	2,997,761
AÑO 11	4,626,122	2,993,400
AÑO 12	4,623,577	2,991,900
AÑO 13	5,025,145	3,335,036
Sistema Raincoat	**0.0**	**5,724,547.9**
AÑO 1	0	271,496
AÑO 2	0	329,563
AÑO 3	0	356,723
AÑO 4	0	342,159
AÑO 5	0	346,289
AÑO 6	0	352,284
AÑO 7	0	583,166
AÑO 8	0	515,401
AÑO 9	0	517,681
AÑO 10	0	520,184
AÑO 11	0	525,091
AÑO 12	0	530,992
AÑO 13	0	533,518
Costo Total	**100,382,403**	**69,873,921**

Tabla 14. Estimado de Costos para Escenarios 03 y 04

Descripción	**50% de raincoats (US$)**	**80% de raincoats (US$)**
Poza de Emergencia	**444,262.5**	**384,521.4**
Movimiento de Tierras	254,812	224,321
Geosintéticos	189,450	160,200
Poza Raincoat	**275,844.4**	**473,246.2**
Movimiento de Tierras	210,144	368,981
Geosintéticos	65,700	104,265
Planta de Tratamiento	**54,752,288**	**23,611,956**

y Volúmenes de Descarga		
AÑO 1	10,000,000	0
AÑO 2	18,117,146	10,000,000
AÑO 3	1,014,572	121,970
AÑO 4	1,155,036	155,875
AÑO 5	1,129,640	141,629
AÑO 6	1,119,122	136,534
AÑO 7	9,375,086	10,135,304
AÑO 8	2,103,571	453,508
AÑO 9	2,103,223	453,488
AÑO 10	2,098,822	450,477
AÑO 11	2,094,921	447,110
AÑO 12	2,093,590	445,701
AÑO 13	2,347,560	670,360
Sistema Raincoat	**8,905,772.2**	**14,249,235.5**
AÑO 1	452,494	723,990
AÑO 2	549,272	878,835
AÑO 3	594,538	951,261
AÑO 4	570,265	912,424
AÑO 5	577,149	923,438
AÑO 6	587,140	939,425
AÑO 7	971,943	1,555,109
AÑO 8	859,002	1,374,404
AÑO 9	862,802	1,380,483
AÑO 10	866,974	1,387,158
AÑO 11	875,151	1,400,242
AÑO 12	884,986	1,415,978
AÑO 13	254,056	406,490
Costo Total	**64,378,167**	**38,718,959**

Tabla 15. Resumen de Costos

Escenario	Costo Total (US$)
Sin raincoats	100,382,403
30% de raincoats	69,873,921
50% de raincoats	64,378,167
80% de raincoats	38,718,959

CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos se concluye lo siguiente:

- Todos los meses se requiere el ingreso de agua fresca, aun en condiciones de años húmedos;
- Los costos de movimiento de tierras y geosintéticos para la construcción de la pozas (emergencia y raincoat), son muy bajos con respecto a los costos operativos.
- La conclusión de este análisis es que cuanto mayor es el porcentaje de cobertura impermeable (raincoats), menor resulta ser el costo total del proyecto.
- Si el costo de la planta o el tratamiento fuese superior a lo considerado, la diferencia es aún mayor, y siempre la mejor opción será cubrir una mayor área de pila.

RECOMENDACIONES

- Es recomendable vigilar que se mantengan los niveles mínimos en las pozas, regulando el ingreso de agua fresca en función de los volúmenes añadidos por las lluvias, puesto que uno de los supuestos del modelo aplicado ha sido esta forma de operación.
- Se recomienda una estrecha coordinación con los operadores de las estaciones meteorológicas de las instalaciones de la mina, para que éstos informen rápidamente acerca de los datos diarios de precipitaciones máximas, de manera tal que se pueda proporcionar adecuadamente el ingreso de agua fresca al sistema.
- En proyectos de lixiviación que se encuentren en zonas de altas precipitaciones se recomienda el uso de coberturas impermeables con la finalidad de minimizar la dilución de la solución de proceso, reducir la necesidad de almacenamiento en la poza de emergencia y por lo tanto su tamaño, disminuir el tamaño de la planta de tratamiento y reducir el costo de tratamiento de aguas.

REFERENCIAS

- Chow V.T., Maidment D.R. & Ways L.W., “Hidrología Aplicada”. Bogotá 1994
- Linsley, Kohler & Paulhus, “Hidrología para Ingenieros”. Bogotá, 1977
- Bell, F. C. (1969). “Generalized Rainfall-Duration-Frequency Relationships”. J. Hydraul Div. ASCE, 95(1), 311-327.
- Van Zyl, Hutchinson & Zyel (1988). “Introduction to Evaluation, Design and Operation of Precious Metal Heap Leaching Projects”, 352-353.