

# MANEJO, GESTIÓN, TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN FINAL DE RELAVES MINEROS GENERADOS EN EL PROYECTO RÍO BLANCO.

Damián Espín<sup>1</sup>, Jaime Jarrín<sup>2</sup> y Olga Maritza Escobar<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Centro de Posgrado, Universidad de las Fuerzas Armadas, Sangolquí, Ecuador.

<sup>2</sup>Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleo y Ambiental. Universidad Central del Ecuador. Quito, Ecuador.

<sup>3</sup>Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción, Universidad de las Fuerzas Armadas, Sangolquí, Ecuador.

\*Autora de correspondencia: omescobar@espe.edu.ec

Recibido: 02. de noviembre de 2017 / Aceptado: 15 de noviembre de 2017

## RESUMEN

Se han propuesto procedimientos, sistemas y técnicas de gestión, manejo, tratamiento y disposición final de los relaves generados durante la vida útil del Proyecto Minero Río Blanco. Se cuantificaron y cualificaron la generación de relaves para desarrollar una propuesta metodológica que brinde estrategias, procedimientos y técnicas de manejo, gestión, tratamiento y disposición final de los relaves considerando experiencias en proyectos mineros alrededor a nivel internacional. La evaluación definió que las principales técnicas de manejo, gestión y alternativas de tratamiento se deberán realizar durante la operación del depósito de relaves mineros, mientras que la ejecución de las alternativas de disposición final podrá realizarse durante la operación o a su vez al final de la vida útil del proyecto minero. Las técnicas de manejo in situ durante la operación facilitarán el transporte, almacenamiento del relave minero permitiendo que las alternativas de tratamiento estabilicen las altas concentraciones de metales pesados presentes en el relave (agua y sedimento) y finalmente las opciones de disposición final se realicen correctamente durante la operación o una vez al final de la vida útil del proyecto minero.

**Palabras clave:** Minería, Relave, Manejo, Gestión, Tratamiento, Disposición Final

## ABSTRACT

We proposed procedures, systems and management techniques, management, treatment and final disposal of the tailings generated during the useful life of the Rio Blanco Mining Project. We quantified and qualified the generation of tailings to develop a methodological proposal that provides strategies, procedures and techniques of management, management, treatment and final disposal of the tailings considering experiences in mining projects at the international level. The evaluation defined that the main management techniques, management and treatment alternatives should be carried out during the operation of the mine tailings deposit, while the execution of the final disposal alternatives could be carried out during the operation or at the end of the operation. the useful life of the mining project. In situ management techniques during the operation will facilitate the transport, storage of the mining tailings, allowing the treatment alternatives to stabilize the high concentrations of heavy metals present in the tailings (water and sediment) and finally the final disposal options are carried out. correctly during the operation or once at the end of the mining project's useful life.

**Keywords:** Mining, Mining Tailings, Management, Treatment, Final Disposition

## INTRODUCCIÓN

Todos los proyectos mineros de explotación de oro tanto de mediana y gran escala cuentan con depósitos de relaves que acumulan materiales sólidos finos que se descartan de las operaciones de separación y obtención de los valores metálicos de aprovechamiento. La composición de los sólidos sedimentados en los depósitos de relaves es muy variada y depende de las características del mineral y de los procesos (físicos, químicos y metalúrgicos) a los cuales ha sido sometido. Una piscina de relaves de beneficio de oro tendrá un contenido económico, que podrá ser recuperado con los procesos metalúrgicos adecuados y la tecnología apropiada para este fin. El contenido aurífero, en el relave minero, será el más bajo de acuerdo con la tecnificación utilizada durante los procesos metalúrgicos de beneficio, transporte, almacenamiento y operación del depósito en particular. (Tchernitchin, 2006).

Un depósito moderno tendrá mucho menos cantidad de oro que uno abandonado hace 20 años. Sin embargo, todo el resto de los compuestos presentes en el mineral procesado que no se hayan retirado específicamente en procesos especiales, estarán presentes en el relave; dado que la extracción del valor económico de un mineral requiere de procedimientos técnicos diversos. El proceso metalúrgico, comprende las etapas de: trituración, molienda, lixiviación o flotación y electro disposición, filtros donde se obtiene concentrado de mineral para su posterior refinación. Al final, como remanente del proceso de lixiviación o flotación quedan los relaves, sin aparente valor económico comercial. Los relaves contienen los materiales no recuperados por el proceso de beneficio, además de los reactivos utilizados en todo proceso de beneficio, principalmente, reactivos de lixiviación.

Los relaves provenientes del proceso metalúrgico tienen que ser almacenados, adecuadamente, aplicado tecnología ecológicamente racional, económicamente viable, a fin de proteger la integridad física de las personas, el ambiente y medio socio cultural circundante. (Reid, 2008). A pesar de ello los depósitos de relaves presentan impactos ambientales tanto en fase sólida (los sólidos sedimentados en profundidad) como en fase acuosa (las aguas de salida del depósito de relaves).

La minería en el Ecuador, desde hace muchos años, no ha sido vista como una fuente generadora de recursos para el Estado, por tal razón, no han existido inversiones importantes que impulsen el desarrollo de este sector. En la actualidad el Gobierno Nacional, ha visto la minería desde otra perspectiva, de tal manera se ha empezado a consolidar las bases para desarrollarla y convertirla en un pilar de la economía nacional; esta nueva visión del sector minero ha permitido desarrollar y emitir normativa apropiada para fomentar el beneficio de efectuar una minería sustentable (causando el menor impacto posible), responsable y económicamente rentable, a fin de generar importantes ingresos para el desarrollo del país. (Agencia de Regulación y Control Minero ARCOM, 2012).

## MATERIALES Y MÉTODOS

Las actividades exploratorias cuantificaron los recursos y reservas mineras existentes en el cuerpo mineralizado, La explotación del proyecto Río Blanco supone la extracción de

aproximadamente 2.147.448 toneladas de material, de las cuales se obtendrá, según los cálculos de la concesionaria, unas 605.000 onzas de oro (18.817 toneladas) y 4.307.000 de onzas de plata (134 toneladas) con un rédito superior a los 1.000 millones de dólares. El proyecto encaja dentro de la clasificación de mediana minería, debido a que extraerá y procesará 800 toneladas de material por día. (GRUPO JUNFIELD, 2013)

La generación de relaves producidos por el beneficio del mineral del proyecto Rio Blanco debe tener una eficiente gestión, manejo, tratamiento y disposición final en cumplimiento de la normativa ambiental y minera vigente en el país.

Los procesos y subprocesos metalúrgicos de beneficio determinan la generación del relave dentro del proyecto minero (GRUPO JUNFIELD, 2013), mismo que se indica a continuación en la Tabla No 1.

Tabla 1. Caracterización del relave en los subprocesos de beneficio. Fuente: (GRUPO JUNFIELD, 2013)

INDICADOR	UNIDAD	CANTIDAD
<b>Cantidad de mineral de tratamiento (330 días)</b>	t/d	800
	t/a	264.000
Ley de mineral: Au	g/t	7,23
Ley de mineral: Ag	g/t	50,00
<b>Producción concentrado gravimétrico</b>	t/a	3816,00
Contenido: Au	kg/a	520,56
Contenido: Ag	kg/a	3660,00
<b>Relave del concentrado gravimétrico (1)</b>	<b>t/a</b>	<b>3811,81</b>
<b>Producción de concentrado de flotación</b>	t/a	7344,00
Contenido: Au	kg/a	867,60
Contenido: Ag	kg/a	5.250,00
<b>Relave del concentrado de flotación (2)</b>	<b>t/a</b>	<b>7337,88</b>
<b>Producción de concentrado de Lixiviación</b>	kg/a	5.490,00
Contenido: Au	kg/a	178,73
Contenido: Ag	kg/a	1080,00
<b>Relave del concentrado de lixiviación (3)</b>	<b>kg/a</b>	<b>4231,27</b>
<b>RELAVE DE MATERIAL ESTERIL (4)</b>	<b>t/a</b>	<b>228840,00</b>
<b>TOTAL DE RELAVE GENERADO PROCESO (1)+(2)+(3)+(4)</b>	<b>t/a</b>	<b>239.993,92</b>

Los procedimientos, sistemas y técnicas de manejo, gestión, tratamiento y disposición final que se considerarán para la propuesta final dependerán del levantamiento de información en el proyecto minero, basándose en el resultado de los modelos de balance de masa y agua del proceso de beneficio del mineral, además del resultado del análisis físico químico del agua y

sedimento que constituye el relave y la identificación de la infraestructura instalada y disponible que permitan desarrollar una propuesta metodología que contará con los procedimientos para la eficiente gestión de los relaves, técnicas de manejo y sistemas de tratamiento y disposición final adecuada.

Dentro del desarrollo de la propuesta se tiene como referencia la implementación de los siguientes criterios metodológicos para los procedimientos de gestión, técnicas de manejo y sistemas de tratamiento y disposición final, se tiene previsto:

#### GESTIÓN DE RELAVES.

- Procedimientos estandarizados.
- Estrategias para la optimización del uso de agua.

#### MANEJO DE RELAVES.

- Implementación de obras de control.
- Técnicas de recirculación de las aguas sedimentadas.
- Implementar un Plan de Monitoreo y Seguimiento para el transporte, almacenamiento, tratamiento y disposición de relaves.

#### TRATAMIENTO DE RELAVES.

- Alternativas tratamiento de aguas cianuradas resultantes del proceso de beneficio y sedimentación en los depósitos de relave. (No se considera tratamiento de aguas acidas debido a que el depósito mineral es de baja sulfuración)
- Técnica de fitorremediación de relaves para estabilizar y retener metales pesados en las raíces de las plantas utilizadas en esta técnica.

#### DISPOSICIÓN FINAL DE LOS RELAVES.

- Relleno hidráulico de relaves secos en las galerías existentes por la explotación del proyecto minero Río Blanco.
- Utilización de los relaves para fabricación de ladrillos, depende análisis físico químico del sedimento.
- Cierre técnico del depósito de relaves.

### **RESULTADOS**

#### GESTIÓN DE RELAVES

La Gestión Ambiental se refiere a todos los aspectos de la función gerencial (incluyendo la planificación) que desarrollen, implementen y mantengan la política ambiental (Dávila, 2004); entendiéndose que la política es el conjunto de directrices que debe adoptar la empresa para consolidar la integración y sustentabilidad del proceso productivo para con el medioambiente, sin perjuicio de ninguna de las partes involucradas.

En el caso particular del proyecto minero Río Blanco se definieron procedimientos y estrategias de gestión que permitirán garantizar un correcto funcionamiento, operación, ejecución y mantenimiento de las actividades que se desarrollen en el tranque o depósito de relaves.

- Procedimientos estandarizados para la construcción de la relavera en el proyecto minero (Figura 1)



Figura 1. Procedimiento para la construcción de diques de relaves (Espin, 2017)

- Estrategias para la optimización del uso de agua en el proceso metalúrgico para la obtención del mineral de interés.

## MANEJO DE RELAVES

Los principales problemas ambientales de la industria minera aurífera están asociados con el manejo de los relaves debido a la contaminación potencial del agua superficial y subterránea. Es así como se necesita de técnicas de manejo adecuadas que permitan principalmente reducir la infiltración de los relaves mediante obras civiles de control, además de recubrimientos para rellenos de tierra (geomembrana).

A pesar de que las especificaciones técnicas de la construcción y operación de un tranque de relaves mineros sean satisfactorias a través del tiempo, no se puede dejar de considerar los efectos a largo plazo sobre el ambiente, salud, seguridad y bienestar de los operadores (Pinillos, 2015).

El control operacional en el depósito de relaves del proyecto minero Río Blanco requiere de la implementación de propuestas técnicas de manejo adecuadas a la realidad del proyecto para prevenir efectos adversos y nocivos que pueda ocasionar el transporte, almacenamiento, tratamiento y disposición final de los relaves.

Implementación de obras civiles de control: El control adecuado de las aguas sedimentadas de la piscina de relaves resultantes del almacenamiento requiere obras civiles previas al inicio de construcciones asociadas a la ampliación o mantenimiento de las piscinas y/o depósitos de relave, a fin de garantizar un óptimo almacenamiento, transporte y tratamiento del agua sedimentada (Figura 2).

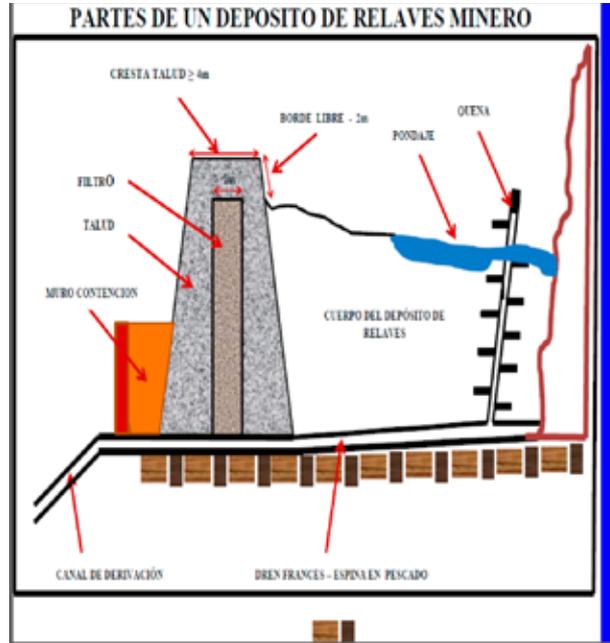


Figura 2. Composición de un Depósito de relaves. (Pinillos, 2015)

**Técnica de recirculación de las aguas sedimentadas:** El criterio de circulación de aguas sedimentadas se fundamentará en la recirculación del agua resultante de la piscina del relave para garantizar el reingreso en el proceso metalúrgico de la planta de beneficio del proyecto minero.

Para el efecto la empresa deberá realizar y ejecutar análisis físico- químico, metalúrgicos y balance de masas semestrales, para constatar que la recirculación del agua sedimentada dentro del proceso metalúrgico no está afectando el rendimiento de los subprocesos de beneficio.

**Plan de Monitoreo y Seguimiento:** La implementación de un plan de monitoreo y seguimiento para el transporte, almacenamiento, tratamiento y disposición de relaves. Dentro de este plan se realizarán muestreos periódicos (trimestrales y/o semestrales) de calidad de napas subterráneas y acuíferas en la piscina y en el dique de la relavera, a fin de determinar las características físico – químicas de suelo, sedimentos y agua residual. Además, los muestreos de calidad determinarán las condiciones hidráulicas y de estabilidad del depósito y dique de la relavera. Todas estas consideraciones permitirán tomar las medidas y acciones correspondientes, según el caso (Rojas, 2010).

Los parámetros que se considerarán para el monitoreo serán los siguientes tanto para agua residual de relavera y sedimento de relave, se detallan en las siguientes tablas.

## TRATAMIENTO DE RELAVES.

Las actividades extractivas y metalúrgicas dentro del proyecto minero Rio Blanco se ejecutarán con un porcentaje alto de recirculación de agua (70%), además, de que en el proceso de beneficio se efectuara con subprocesos metalúrgicos que generan un relave seco (GRUPO JUNFIELD, 2013). Dando como resultado una mínima acumulación de agua sedimentada en el

Ensayo	Metodos Referencia-Laboratorio	Unidades
Cloruros	APHA 4500 Cl-C	mg/l
Conductividad	APHA 2510 B	µs/cm
Dureza Total*	APHA 2340 C	mg/l CaCO3
pH	APHA 4500 H+B	Unid. pH
Sulfatos*	APHA 4500 SO4 E	mg/l
Demanda Bioquímica de Oxígeno 5	APHA 5210 D	mg/l
Demanda Química de Oxígeno	APHA 5220 D	mg/l
Oxígeno Disuelto	APHA 4500 O G	mg/l
Sólidos Totales	APHA 2540 B	mg/l
Nitrógeno Total*	HACH 8075	mg/l NTK
Arsénico	APHA 3120 B	mg/l
Mercurio	APHA 3120 B	mg/l
Plomo	APHA 3120 B	mg/l
Zinc*	APHA 3120 B	mg/l
Cobre*	APHA 3120 B	mg/l
Aceites y Grasas	EPA 418.1	mg/l
Hidrocarburos Totales (TPH)	EPA 418.1	mg/l
Fenoles	APHA 5530 C	mg/l
Hierro*	APHA 3120 B	mg/l
Nitritos*	APHA 4500-NO2 B	mg/l
Nitratos*	HACH 8171	mg/l NO3
Nitrógeno Amoniacal	HACH 8038	mg/l
Sólidos Disueltos*	APHA 2510 B	mg/l
Sólidos Suspendidos*	HACH 8006	mg/l
Niquel	APHA 3120 B	mg/l
Cianuro Libre*	APHA 4500 CN-E	mg/l

Tabla 2. Parámetros de análisis que se considerarán para el agua residual de la relavera. Fuente: (Espín 2016)

Ensayo	Metodos Referencia	Unidades
Aceites y Grasas	EPA 418.1	mg/kg
Cianuro Total	HACH 8027	mg/kg
Cobre	APHA 3120 B	mg/kg
Conductividad	APHA 2510 B	µs/cm
Hidrocarburos Aromaticos Policiclicos	EPA 3550 C-8310-3600	mg/kg
Arsenico	APHA 3120 B	mg/kg
Boro	APHA 3120 B	mg/kg
Cadmio	APHA 3120 B	mg/kg
Cobalto	APHA 3120 B	mg/kg
Cobre	APHA 3120 B	mg/kg
Cromo	APHA 3120 B	mg/kg
Estaño	APHA 3120 B	mg/kg
Mercurio	APHA 3120 B	mg/kg
Molibdeno	APHA 3120 B	mg/kg
Niquel	APHA 3120 B	mg/kg
Plomo	APHA 3120 B	mg/kg
Selenio	APHA 3120 B	mg/kg
Vanadio	APHA 3120 B	mg/kg
Zinc	APHA 3120 B	mg/kg
Benceno	EPA 8260 C/ EPA 5035	mg/kg
Etilbenceno	EPA 8260 C/ EPA 5036	mg/kg
Tolueno	EPA 8260 C/ EPA 5037	mg/kg
Xileno	EPA 8260 C/ EPA 5038	mg/kg

Tabla 3. Parámetros de análisis que se considerarán para el sedimento de la relavera. Fuente: (Espín 2016)

depósito de relaves; misma que como primera opción será recirculada. Además; como medida de remediación y depuración complementario, para estas aguas sedimentadas, se deberá contar con una instalación adecuada y tecnológicamente equipada para desarrollar el tratamiento de las aguas sedimentadas del depósito de relaves.

Adicionalmente, se podrían implementar técnicas de fitorremediación para estabilizar y retener metales pesados en las raíces de las plantas utilizadas en esta técnica. Esta propuesta se deberá implementar en el cierre definitivo del depósito de relaves

#### **Alternativas de tratamiento de aguas cianuradas resultantes del proceso de beneficio:**

En la industria minera se han manejado varios métodos de tratamientos para la descontaminación de aguas ácidas y cianuradas resultantes del proceso metalúrgico de beneficio; todos basados en la oxidación del cianuro a cianato, mucho menos tóxico y posteriormente disociable en dióxido de carbono y nitrógeno.

Dentro de los métodos de depuración del cianuro se pueden señalar:

- Degradación natural
- Oxidación química
- Biodegradación

**Técnica de fitorremediación de relaves para estabilizar y retener metales pesados:** Una vez ejecutado el cierre técnico del depósito de relaves mediante la compactación y estabilización hidráulica del material resultante del beneficio del mineral en el proyecto minero con un almacenamiento estimado de 2,05 millones de metros cúbicos para una vida útil en 11,6 años; se deberán realizar actividades técnicas que permitan la inocuidad de los relaves mineros a mediano y largo plazo; es así que la aplicación de la técnica de fitorremediación para estabilizar y retener metales pesados presentes en los relaves es una opción socioeconómica y ambientalmente factible.

El proceso de cianuración es usado frecuentemente para la lixiviación y posterior obtención de minerales de oro y plata. Por lo que Logsdon, Hagelstein y Mudder (2001), afirman que “Los relaves mineros producidos mediante el método de cianuración contienen sustancias tóxicas como el arsénico, plomo, cadmio, cianuro, selenio y zinc que, al tener contacto con el agua y el subsuelo, altera su composición natural.

La fitorremediación es una tecnología alternativa y sostenible; que consiste en el uso de especies forestales para reducir, degradar o inmovilizar compuestos orgánicos e inorgánicos considerados como contaminantes (naturales o sintéticos), del suelo, el agua o del aire.

Para el efecto, se han identificado especies con la capacidad de almacenar metales pesados en alta concentración presentes en suelos contaminados y potencialmente tóxicos, como Cd, Pb, Zn, Cu, Fe, Ni, Se y otros metales pesados que se oxidan con facilidad. (Baldwin, 2007)

Mediante investigaciones experimentales de campo han visto factible la aplicación de técnicas de fitorremediación para el tratamiento de los relaves mineros generados en sus empresas, como alternativa para depurar y tratar los suelos contaminados por relaves; o a su vez como una técnica para evitar la contaminación de los depósitos de relave posterior a su cierre técnico. Es así como, un estudio evaluó el uso de especies forestales de la sierra peruana (*Myoporum laetum*, *Polylepis racemosa* y *Buddleja coriacea*) para el tratamiento de relaves mineros. Se evaluó el desarrollo de las especies plantadas en relave minero durante 27 semanas y se hizo un análisis fisicoquímico al relave para determinar el pH y la concentración de elementos químicos.

Las especies forestales demostraron tener gran tolerancia a suelos contaminados y se obtuvo una remoción de los elementos químicos: antimonio (Sb), arsénico (As), cadmio (Cd), cobre (Cu), plata (Ag) y plomo (Pb) (Paredes, 2015). Tal como se detalla en la siguiente tabla No 4.

Tabla 4. Resultados del Análisis de metales pesados y pH.

PÁRAMETRO	CALIDAD DE RELAVE MINERO (mg/kg)	LÍMITE PERMISIBLE USO AGRÍCOLA NORMATIVA ECUATORIANA y CANADIENSE (mg/kg)	VALORACION DE LA CALIDAD DEL RELAVE UNA VEZ APLICADA LA TÉCNICA DE FITOREMEDIACION (mg/kg).		
			<i>Myoporum laetum</i>	<i>Polylepis racemosa</i>	<i>Buddleja coriacea</i>
<b>Antimonio (Sb)</b>	298.1	20 <sup>(1)</sup>	89.54	73.48	74.85
<b>Arsénico (As)</b>	2202.0	12 <sup>(2)</sup>	1348.9	999.71	1344.98
<b>Cadmio (Cd)</b>	36.52	2 <sup>(2)</sup>	32.80	31.96	32.15
<b>Cobre(Cu)</b>	5460.5	63 <sup>(2)</sup>	864.86	723.52	741.54
<b>Plata(Ag)</b>	61.6	20 <sup>(1)</sup>	45.95	30.43	38.192
<b>Plomo (Pb)</b>	2933.5	60 <sup>(1)</sup>	1081.87	938.72	946.79
<b>pH</b>	2.50	6 a 8 <sup>(2)</sup>	6.58	6.55	6.63

<sup>(1)</sup> Tomado de Canadian Soil Quality Guidelines for de protection of Environmental and Human Health (CCME, 2007).

<sup>(2)</sup> Tomado del Acuerdo Ministerial 097-A publicado en el Registro Oficial No. 387. Fuente: Paredes 2015

Adicionalmente, en la investigación de Lizarbe (2016) evaluó el crecimiento de *H. annuus* L. (girasol), especie bioacumuladora de metales pesados, mediante la adición de acondicionadores orgánicos e inorgánicos al relave minero a fin de lograr la fitoextracción de plomo, zinc y cadmio.

#### DISPOSICIÓN FINAL DE LOS RELAVES

La correcta gestión ambiental de la empresa en la disposición final de relaves mineros permitirá almacenar adecuadamente los relaves provenientes del proceso metalúrgico, aplicando tecnología ecológicamente racional, económicamente viable, para proteger la integridad física de las personas, el ambiente y el aspecto sociocultural circundante.

**Relleno hidráulico de relaves secos en las galerías existentes por la explotación del proyecto minero Río Blanco:** El proyecto minero tiene una escala de minado de 800 t/d, el volumen promedio diario de espacio vacío es 300 m<sup>3</sup> del que aproximadamente 240 m<sup>3</sup> deben ser llenados el mismo día. (GRUPO JUNFIELD, 2013) El espacio vacío se forma luego del minado de las vetas mayores a 5 metros, para ejecutar el llenado se debe cumplir con ciertos principios técnicos de diseño, mismos que se detallan a continuación:

- a. Cumplimiento estricto de los requisitos del contrato (empresa ejecutora), además de las normas, reglamentos y especificaciones
- b. nacionales pertinentes, y que se garantice la calidad del diseño.
- c. Aprovechamiento del depósito de relaves y las canteras existentes en la zona de influencia del proyecto, para así optimizar las obras de ingeniería que se ejecutarán y minimizar los gastos en la inversión del relleno.

- d. Constatar que los equipos de relleno utilizados tengan la capacidad y preparación necesaria.
- e. Garantizar la seguridad y estabilidad del sistema de llenado en el periodo de la vida útil del proyecto minero. (Hace referencia a la vida útil de la mina y planta de beneficio)
- f. Ejecutar actividades de llenado priorizando la protección del ambiente y la conservación del agua. (En el proceso de compactación del relave con cemento se usará agua recirculada)
- g. Proceso sea simple, confiable y de fácil manejo
- h. Garantizar que la inversión total del sistema de llenado este acorde al presupuesto anual que maneja la empresa, a fin de evitar pérdidas o cierres forzados del sistema de llenado.

**Utilización de los relaves para fabricación de ladrillos y baldosas:** La obtención de ladrillos y baldosa utilizando como agregado de construcción los relaves mineros polimetálicos resultantes de los subprocesos metalúrgicos (flotación), es una técnica de disposición final de relaves mineros que en el país no ha sido utilizada; sin evidenciarse investigaciones realizadas.

Ventajosamente la industria minera peruana tiene años de adelanto en aspectos técnicos referentes a la explotación, beneficio, manejo, gestión y disposición final de relaves mineros; y para el efecto se cuenta con una investigación realizada que estableció las técnicas de fijación y micro encapsulación de los metales pesados en los relaves mineros, con el propósito de estabilizar los metales peligrosos y contaminantes que se encuentran en los relaves, anulando así el proceso natural de disponibilidad y movilidad de los metales pesados que se caracterizan por causar contaminación cuando están en estado inestable y por lo tanto migran hacia al medio físico, suelo y agua. (Romero A., 2010)

**Cierre técnico del depósito de relaves:** El cierre técnico del depósito de relaves debe considerar todas las alternativas propuesta en el manejo y tratamiento a fin de lograr el desarrollo de proyectos agrícolas mediante la aplicación de técnicas de estabilización de los depósitos llenos para evitar deslizamientos y controlar filtraciones para que a mediano y largo plazo se logre aplicar un programa de revegetación mediante la colocación de capas de grava, arcilla y geomembranas; y una vez que se valide la condición idoneidad del suelo se pueda sembrar especies endémicas. La aplicación, post cierre de la relavera, preliminar de la técnica de fitorremediación descrita anteriormente, es fundamental para lograr el cierre técnico adecuado.

Las consideraciones técnicas para el óptimo cierre en un depósito de relaves son las siguientes:

- Sismicidad
- Procesos y efectos de la erosión
- Medidas para la estabilización de la superficie.

## DISCUSIÓN

La evaluación cuantitativa basada en los reportes técnicos y los estudios de factibilidad de la empresa minera identifican que la explotación diaria (minado) será de un promedio de 800 toneladas de material que ingresará a la planta de beneficio acompañada de un volumen promedio de agua de 3024 m<sup>3</sup>/d para generar un promedio de relave minero de 727,25 toneladas/d.

Los análisis y balances de masa realizados por la empresa minera y la interpretación de los resultados de lixiviación proyectan un alto rendimiento para la obtención de los minerales de interés (Au y Ag), asimismo se reportan altos valores de metales pesados en el sedimento (relave) resultante de las pruebas de lixiviación.

Los datos obtenidos de la caracterización, cuantificación y cualificación de los procesos de minado, metalúrgicos de beneficio y generación de relaves mineros fundamentan la base conceptual para una propuesta adecuada de gestión, manejo, tratamiento y disposición final de relaves mineros considerando el contexto y realidad donde se ejecuta el proyecto minero contando con un respaldo y sustento técnico de trabajos, investigaciones académicas y experiencias en proyectos mineros internacionales.

El contexto geográfico y la realidad del proyecto minero Río Blanco permite que se tome como referencia el estudio realizado por Paredes (2015) y el realizado por Lizarbe (2016) para que según sea el caso, se considere la aplicación de estas técnicas de fitorremediación con las especies antes descritas, a sabiendas que la utilización de esta alternativa simplemente brinda resultados preliminares para la eliminación de los metales pesados y estabilización del pH en relave minero de los depósitos, sin lograr alcanzar el cumplimiento de los límites máximos permisibles establecidos en la normativa nacional e internacional vigente.

## CONCLUSIONES

- Las propuestas de gestión señalan estrategias claras que deberán ser consideradas durante la fase operativa, de almacenamiento, adecuación y cierre del depósito de relaves.
- Las técnicas de manejo detalladas en la propuesta consideran la implementación de obras civiles de contención, drenaje, y sistema de bombeo para recirculación de aguas sedimentadas desde la piscina de relaves. Adicionalmente, el monitoreo y seguimiento propuesto facilitar las medidas correctivas, de mitigación y planes de acción emergentes que se deberán ejecutar durante la operación, transporte, almacenamiento y cierre del depósito de relaves.
- Las alternativas de tratamiento propuestas permiten tener opciones acordes a la ingeniería y técnicas metalúrgicas de beneficio que se ejecutarán en el proyecto minero, para estabilizar y reducir la oxidación de los metales pesados presentes en el relave minero (sedimento + agua). La alternativa de tratamiento de agua residuales del depósito de relaves permitirá alcanzar los límites permisibles establecidos en la normativa vigente; mientras tanto que la técnica de fitorremediación de relaves mineros sirve como una técnica preliminar para remover y estabilizar parcialmente la cantidad de metales pesados y pH, respectivamente, presente en los relaves mineros, permitiendo así evitar un bioacumulación de contaminantes en el suelo y agua, durante la operación o posterior al cierre técnico del depósito de relaves.
- Dentro de la disposición final de relaves mineros se han considerado opciones que garanticen la inocuidad, estabilidad física e hidráulica de los relaves, una vez que el depósito o tranque de relaves haya llegado al límite de su vida útil. La disposición en la mina subterránea utilizando cemento amerita un análisis de costos y estudios de prefactibilidad; en cuanto a la utilización del relave minero como agregado de material de construcción de debe realizar a detalle lo especificado en la mencionada propuesta para garantizar la inocuidad del relave minera una vez que sea transformado en ladrillo o baldosa. Finalmente, en cuanto al cierre técnico de la presa o depósito de relaves la consideración del proceso de erosión y las medidas de estabilización del suelo en la presa y en el área circundante es importante para garantizar que el cierre sea sostenible a medio y largo plazo (5 a 20 años).

## REFERENCIAS

- Agencia de Regulación y Control Minero ARCOM, 2012. Proyecto de seguimiento, control y fiscalización de actividades mineras a gran escala. Quito, ARCOM, p. 120.
- Baldwin, P., 2007. Phytoremediation of arsenic by two hyperaccumulators in a hydroponic environment.. *Microchemical Journal*, 85(2), pp. 297-300.
- CCME (Canadian Council of Ministers of the Environment), 2007. Summary Tables of Canadian soil quality guidelines for the protection of environmental and human health.. Quebec, Canadian Government, p. 6.
- Chico Ruiz, J., 2012. Capacidad remediadora de la raíz de girasol, *Helianthus annuus*, cuando es sometida a diferentes concentraciones de plomo.. *REBIOL*, 32(2), pp. 13-19.
- Dávila, J., 2004. Instrumentos de Gestión Ambiental.. Lima, UNSA, p. 18.
- Delgadillo López, A. E., 2012. Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. *SciELO México*, 14(2), pp. 597- 612.
- ELIPE, 2012. Informe semestral de producción Planta de beneficio Svetlana 1 Junio 2011 - Diciembre 2011. Quito, ELIPE, p.70.
- Fajardo, J. (2010). Estudio de Métodos Químicos de Remoción de Cianuro presente en residuos de Cianuración provenientes del Proceso de Extracción de Oro de veta en el departamento de Nariño. *Revista Luna Azul*(31), 8-16.
- GRUPO JUNEFIELD, 2013. Estudio de Factibilidad Proyecto Minero Río Blanco. Quito, JUNEFIELD GROUP, p. 305.
- Lizarbe Asmat, K., 2016. Fitoextracción De Plomo, Zinc y Cadmio de Relaves Mineros Utilizando *Helianthus annuus* L. (Girasol). *Infinitum*, 6(2), pp. 74-79.
- Mulas Fernández, R., 2015. Fitorremediación de Suelos.. Valladolid, Universidad de Valladolid, p. 88.
- Paredes, J. (2015). Evaluación de la aplicabilidad de especies forestales de la serranía peruana en fitorremediación de relaves mineros. *ECIPerú*, 42-46.
- Pillajo, E., 2008. Evaluación del potencial aurífero del Ecuador.. Quito, FUNGEOMINE, p. 12.
- Pinillos, J., 2015. Tecnologías ecológicamente racionales para el manejo de las aguas en los depósitos de relaves mineros.. Lima, UNFV, p. 30.
- Rojas, A., 2010. Gestión Ambiental de los residuos sólidos (relaves) generado como producto del beneficio de minerales en la planta concentradora de minerales Huari-uncp La Oroya.. Trujillo, UNT, p. 57.
- Reid, C. (2008). Life cycle assessment of mine tailings management in Canada. *ELSEVIER.*, 17(4), pp. 471 - 479.
- Romero, A., 2010. Reuso de relaves mineros como insumo para la elaboración de agregados de construcción para fabricar ladrillos y baldosas.. *INDUSTRIAL DATA*, 13(2), pp. 75-82.
- Ruales, J., 2012. Determinación de tratamientos para la destrucción de cianuro en efluentes líquidos provenientes de la piscina de relaves sólidos de la Planta Svetlana.. Quito, Universidad Internacional SEK, p. 117.
- Torrejón, J. A. V., 2015. Mecanismo de Producción más limpia: El Reuso de aguas residuales en la actividad minera.. *VOX JURIS*, 30(2), pp. 263-278.