

## **COSTOS DE CIERRE EN DEPÓSITOS DE DESMONTES Y PRESAS DE RELAVES GENERADORES DE ACIDEZ**

Oswaldo Aduvire <sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Profesor de FCI-Minas. Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) eaduvire@pucp.pe

<sup>2</sup> Practice Leader de Geoambiente de SRK Consulting (Peru) S.A. oaduvire@srk.com.pe

### **RESUMEN**

La extracción de mineral y el proceso de beneficio generan residuos mineros como Desmontes y Relaves que por lo general se almacenan en depósitos ubicados en superficie, esta ocupación de terrenos y el requerimiento de una adecuada gestión ambiental hacen que en el diseño de estos depósitos se consideren requerimientos técnicos, económicos, legales, ambientales y sociales. Durante la vida operativa de los depósitos de residuos mineros se implementan controles para reducir los impactos sobre el medio ambiente y en las comunidades del entorno, a través de los programas de monitoreos continuos considerados en las certificaciones ambientales de obligado cumplimiento, como son los estudios de impacto ambiental, pero, una vez culminada la operación minera se pone en marcha la etapa de cierre en donde se procede a rehabilitar el lugar de emplazamiento de estos depósitos que almacenan residuos mineros como desmontes de mina y relaves.

Para elegir la alternativa de cierre de estos depósitos se tiene en cuenta una serie de factores como el lugar de emplazamiento, las propiedades físicas y químicas de los residuos mineros, el método de construcción del depósito y principalmente el comportamiento geoquímico de los residuos a largo plazo, para ello, es importante estimar la probabilidad de alteración de los residuos mineros en contacto con agua y oxígeno, así como, la capacidad de generación de acidez y lixiviación de metales, entre otros.

El esquema de cierre de los depósitos debe asegurar la estabilidad física, química, hidrológica y biológica en el postcierre. Uno de los mayores problemas para lograr la estabilidad de los residuos mineros como desmontes y relaves con potencial de generación de acidez es el contacto con oxígeno y agua; por tanto, para alcanzar la estabilidad química, se recurre al empleo de barreras y coberturas impermeables o semipermeables. Cada alternativa comprende una serie de actividades de cierre, que inducen a determinados costos de ejecución, lo que genera diferentes costos directos e indirectos en el presupuesto de cierre.

En este trabajo se presenta las variaciones de los costos de cierre para diferentes depósitos de residuos mineros, identificando las variables con mayor sensibilidad e influencia sobre los presupuestos de cierre de minas, como el fin de optimizar su gestión desde su concepción hasta la rehabilitación, empleando las mejores técnicas disponibles en sus diseños, construcción, operación y cierre.

**Palabras Clave: Costos de cierre. Rehabilitación de desmontes. Rehabilitación de presas de relaves**

### **Abstract**

Mineral extraction and the beneficiation process generate mining waste such as waste rock and tailings that are generally stored in surface deposits. This occupation of land and the requirement for proper environmental management mean that technical, economic, legal, environmental and social requirements are considered in the design of these deposits. During the operating life of the mining waste deposits, controls are implemented to reduce the impact on the environment and surrounding communities through continuous monitoring programs included in the mandatory environmental certifications, such as environmental impact studies, but once the mining operation is completed, the closure stage begins, when the site of these deposits, which store mining waste such as mine waste and tailings, is rehabilitated.

In order to choose the closure alternative for these deposits, a series of factors are taken into account, such as the location of the site, the physical and chemical properties of the mining waste, the construction method of the deposit and mainly the geochemical behavior of the waste in the long term, for which it is important to estimate the probability of alteration of the mining waste in contact with water and oxygen, as well as the capacity to generate acidity and leaching of metals, among others.

The closure scheme of the deposits must ensure physical, chemical, hydrological and biological stability post-closure. One of the biggest problems in achieving stability of mining waste such as waste rock and tailings with the potential to generate acidity is contact with oxygen and water; therefore, to achieve chemical stability, the use of impermeable or semi-permeable barriers and coverings is used. Each alternative includes a series of closure activities, which induce certain execution costs, generating different direct and indirect costs in the closure budget.

This paper presents the variations of closure costs for different mine waste deposits, identifying the variables with greater sensitivity and influence on mine closure budgets, in order to optimize their management from conception to rehabilitation, using the best available techniques in their design, construction, operation and closure.

**Key words: Closure costs. Landfill rehabilitation. Tailings dam rehabilitation.**

## 1. Introducción

La minería como actividad dedicada a la extracción de recursos que alberga un yacimiento, tiene, en cada caso un período de vida limitado, marcado por un conjunto de variables como: reservas explotables, ritmos de producción, demandas, precios y otros. Tras finalizar el ciclo productivo ya sea de un sector o de toda la mina, se debe poner en marcha el Plan de Cierre. Este plan va desde el desmantelamiento y demolición de aquellas instalaciones que no vayan a cumplir ninguna función y puedan suponer la alteración o deterioro del entorno, hasta el reacondicionamiento de estructuras y recuperación de terrenos afectados por la operación minera, con vistas a eliminar el riesgo de accidentes y de contaminación, así como de buscar un nuevo uso sostenido del lugar.

El cierre de instalaciones mineras es un conjunto de acciones y medidas que se llevan a cabo para proteger a las personas y el medio ambiente, por lo que, deben llevarse a cabo con las mejores técnicas disponibles, utilizando tecnología limpia con materiales del lugar que permitan la recuperación de la zona en el menor tiempo posible.

En este trabajo se revisaron los presupuestos de cierre de varias operaciones mineras subterráneas y a cielo abierto consideradas de mediana y gran minería en Perú, cuyos procesos de beneficio son mediante lixiviación en PAD y concentración de minerales, por ello, los residuos mineros considerados en el estudio son relaves y desmonte de mina, que generalmente se almacenan en depósitos emplazados en superficie. En todos los casos, se hace una revisión detallada del costo de las actividades de cierre de los depósitos de residuos mineros, principalmente la actividad de estabilidad química con el fin de reducir los riesgos de inestabilidad y contaminación del medio ambiente.

Los presupuesto de cierre que se han revisado cuentan con diseños de ingeniería a nivel conceptual y de factibilidad considerados en los planes de cierre que aprueba la autoridad y tienen en cuenta los requerimientos legales vigentes, por tanto, las actividades de cierre deben garantizar la estabilidad física, química, hidrológica y biológica en las superficies rehabilitadas.

En la revisión a mayor detalle de los costos de rehabilitación se comparan los costos de las actividades de cierre de los depósitos de residuos mineros como relaves y desmontes de mina, identificando las variables con mayor sensibilidad e influencia sobre los presupuestos de cierre, como es el potencial de acidez de los residuos mineros sólidos, apoyados en los estudios de caracterización geoquímica que indican su comportamiento a largo plazo como materiales que generan o no generan acidez.

## 2. Metodología.

Para elegir la alternativa de cierre de un depósito de residuos mineros se tiene en cuenta una serie de factores como el emplazamiento de los depósitos, las propiedades físicas y químicas del residuos, el método de construcción del depósito y principalmente el comportamiento de los residuos a largo plazo, para ello, es importante estimar la probabilidad de alteración de los mismos en contacto con agua y oxígeno, así como, la capacidad de generación de acidez y lixiviación de metales, entre otros.

Uno de los mayores problemas ambientales de los residuos mineros como desmontes y relaves con potencial de generación de acidez es el contacto con oxígeno y agua, por tanto, para alcanzar la estabilidad química en el cierre de los depósitos de residuos mineros se recurre al empleo de barreras o coberturas impermeables (Fig. 1), que van a estar conformadas por una capa impermeable de arcilla o GCL colocada sobre los residuos, sobre la que se coloca una capa de material drenante para evacuar el agua de infiltración que atraviesa la capa de suelo orgánico que soporta la vegetación.

	TIPO DE CAPA	MATERIALES
	Vegetación	Hierba y matorral (Talud superficie = 5 a 20 %)
0,6 m	Capa de almacenamiento	Suelo de grano fino $k=1 \times 10^{-6}$ a $8 \times 10^{-9}$ m/seg
0,3 m	Capa de drenaje	Arena
0,3 m	Capa de protección	Suelo compactado (fino)
0,3 m	Capa de sellado	Arcilla $k=1 \times 10^{-8}$ m/seg
		Residuos

Figure 1. Conformación de una cobertura impermeable para cierre de depósitos de desmontes y relaves generadores de acidez.

Para el diseño de las coberturas se tiene en cuenta, por un lado, datos meteorológicos del lugar que pueden ser medidos en campo o tomados de estaciones meteorológicas ubicadas cerca del emplazamiento de los depósitos de residuos, y por otro, las propiedades de los materiales de cada una de las capas que van a conformar la cobertura, como resultado se obtiene mediante simulación los espesores de las capas de la cobertura y la calidad de los materiales a emplear en las coberturas.

En la revisión de los presupuesto de cierre, en todos los casos se ha identificado que los diseños alcanzan una ingeniería de cierre a nivel conceptual y de factibilidad, alcance recomendado en la normativa vigente y considerada en los planes de cierre que aprueba la autoridad, por lo que los costos se han adecuado y actualizado al año de estudio, cuyos resultados se presentaran en porcentajes por considerar que experimentarán cambios cuando se desarrollen las ingenierías de detalle para ejecutar los cierres definitivos.

Por tanto, los presupuestos revisados forman parte de instrumentos de gestión ambiental preventivos como son los planes de cierre de mina que han sido elaborados según requerimiento técnico y legal vigente que se ejecutarán en el futuro o al final de la vida operativa de mina. Por ello, se debe tener en cuenta que cuando se realice la ingeniería de cierre a nivel de construcción o detalle, los presupuestos estimados experimentaran incrementos.

Para estimar los presupuestos de los planes de cierre se tiene en cuenta la vida de la mina, la medición o cubicación de instalaciones y componentes, junto con el análisis de los precios unitarios de cada actividad de cierre (desmantelamiento, demolición, estabilidad física, química, hídrica y otros), se estiman los costos directos de cierre de cada componente minero (mina, planta, PAD, depósitos de desmontes y relaves, otros). En todos los casos en el dimensionado de estas actividades se tiene en cuenta la legislación de cierre vigente para Perú y se consideran determinados criterios de cierre para alcanzar la estabilidad física, química, hídrica y biológica de las áreas que ocuparon los componentes e instalaciones de la operación minera, en especial para los componentes principales, algunos de estos criterios para cierre, se citan a continuación:

**Estabilidad Física**, taludes con factores de seguridad (FS) mayor a 1.2 y 1.5 para condiciones estáticas y para condiciones pseudo-estáticas sismos de periodos de recurrencia mayor a 500 años.

**Estabilidad Geoquímica**, estimación del potencial de generación de acidez mediante ensayos ABA, ensayos NAG, pruebas SPLP y SFE, estudios de mineralogía por DRX y cuantificación de metales lixiviables, además de pruebas cinéticas, dando como resultado la identificación de residuos minero generadores de acidez, por ello, la aplicación de coberturas impermeables en el cierre de los depósitos de desmontes y relaves.

**Estabilidad Hidrológica**, para el dimensionado de los dispositivos de manejo de las aguas dentro de fuera de las áreas rehabilitadas, eventos de máxima precipitación para periodos de recurrencia igual o mayor a 200 años.

**Revegetación**, concluido los trabajos de reconfiguración final de los taludes se procede a colocar la cobertura vegetal en las áreas rehabilitadas con una densidad similar a las áreas sin alteración, con la finalidad de alcanzar la integración paisajística en el menor tiempo posible. Para llevar a cabo los trabajos de revegetación final se suelen considerar dos tareas principales consistentes en la fertilización del terreno y la siembra de especies vegetales.

Para optimizar el manejo de agua sobre las superficies rehabilitada, se elige instalar coberturas con vegetación autóctona con especies autosostenibles, porque la revegetación con especies introducidas no es lo más

recomendable porque estas necesitan mantenimiento y la aplicación de enmiendas continuamente.

### 3. Resultados y discusión.

#### 3.1. Costo de cierre en operaciones mineras con procesos de lixiviación.

Una vez concluido el ciclo minero hay que rehabilitar las áreas que ocuparon los componentes e instalaciones de la operación minera, para ello, se desarrolla la ingeniería de cierre y se estima un presupuesto que considera la ejecución de las actividades de cierre para las etapas de cierre final y postcierre.

Durante el desarrollo de los planes de cierre, la evaluación de la estabilidad física, química y biológica de los componentes demandan una mayor dedicación en esfuerzo, tiempo y dinero, por considerar que es el punto de partida sobre el que se fundamenta la formulación de las distintas alternativas de cierre, además de tener gran influencia sobre la recuperación y estabilización del medio físico del lugar.

En la Fig. 2 se presenta el reparto porcentual de los costos directos de los componentes principales y de los componentes menores agrupados en Infraestructura, que forman el presupuesto de cierre de una operación minera a cielo abierto con proceso de beneficio vía lixiviación y residuos mineros (Desmontes de Mina) clasificados como Potencialmente generadores de acidez (PAG).

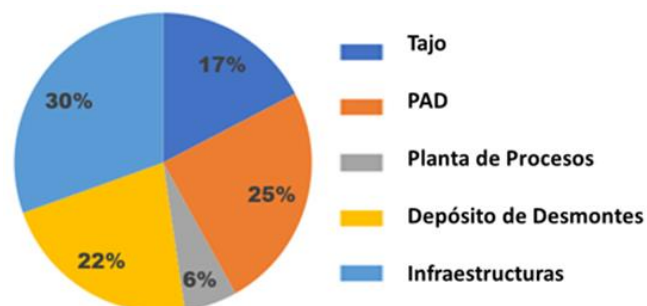


Figure 2. Conformación del costo directo total de Cierre de una operación minera.

Los presupuestos de los planes de cierre de mina revisados se han estimado con diseños a nivel de ingeniería de factibilidad para atender requerimientos legales vigentes, por tanto, las actividades de cierre deben garantizar la estabilidad física, química, hidrológica y biológica en las superficies rehabilitadas.

Los componentes principales que representan mayor monto del presupuesto de cierre son el PAD y el Depósito de Desmonte.

En la Fig.3 se puede ver a detalle los repartos porcentuales de los costos de cierre por componentes para cinco planes de cierre de mina revisados, destacando la gran variación de estos montos y manteniendo la tendencia de los costos de cierre de depósitos de residuos

como los más significativos, principalmente cuando se trata de depósitos de desmontes ácido generadores.

También se observa en algunos casos específicos montos significativos del costo de la estabilidad física, inducida principalmente cuando se recurre al relleno parcial del tajo para asegurar la estabilidad del mismo.

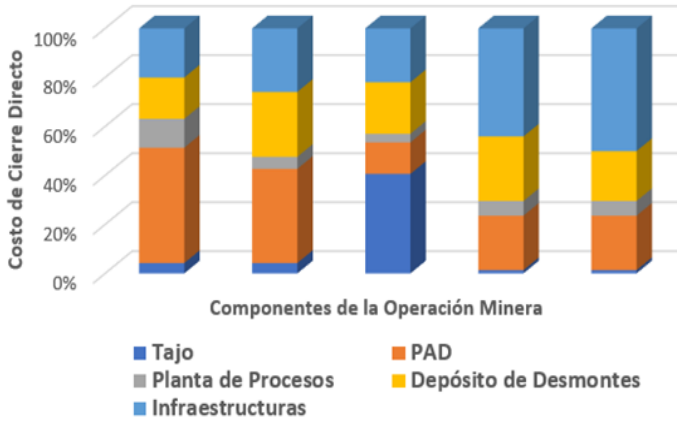


Figure 3. Costo de cierre por componentes de varias operaciones mineras a cielo abierto.

En la Fig.4 se presenta las variaciones de los costos de cierre por actividades de cierre para cinco operaciones mineras a cielo abierto con desmontes potencialmente generadores de acides (PAG), identificando la estabilidad química como la actividad con mayor sensibilidad e influencia sobre el costo directo de cierre del depósito de desmontes, por requerir una barrera o cobertura impermeable que evite el contacto de los desmonte reactivos con oxigeno atmosférico y agua en épocas de lluvia.

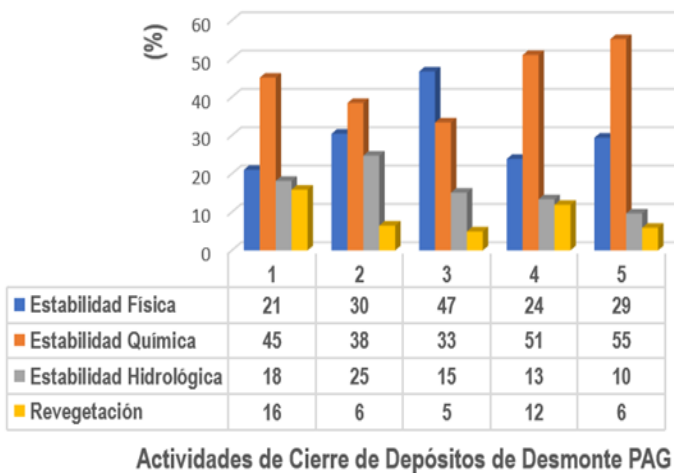


Figure 4. Aporte porcentual del costo de cada actividad de cierre para las cinco operaciones mineras a cielo abierto.

En este estudio se ha obtenido un costo medio de cierre de 127, 414 US\$/ha para depósitos de desmonte PAG de operaciones mineras a cielo abierto con procesos de lixiviación.

### 3.2. Costo de cierre en operaciones mineras con procesos de concentración de minerales

Para esta parte se revisaron los presupuestos de cierre de ocho operaciones mineras ubicadas a cotas superiores a 3500 m.s.n.m., consideradas de mediana y gran minería en Perú, cuyos procesos de beneficio es por concentración de minerales, por tanto, los relaves que generan se almacenan en depósitos o presas de relaves. En todos los casos, los estudios de caracterización geoquímica de los relaves indican que son generadores de acidez (PAG), por tanto, en el cierre uno de los principales objetivos es asegurar la estabilidad química de los depósitos o presas de relaves, para reducir los riesgos de inestabilidad y contaminación del medioambiente.

Para elegir la alternativa de cierre de un depósito de relaves se tiene en cuenta una serie de factores como el emplazamiento de depósito, las propiedades físicas y químicas del relave, el método de construcción del depósito y principalmente el comportamiento de los relaves a largo plazo, para ello, es importante estimar la probabilidad de alteración de los relaves en contacto con agua y oxígeno, así como, la capacidad de generación de acidez y lixiviación de metales, entre otros.

Uno de los mayores problemas ambientales de los relaves con potencial de generación de acidez es el contacto con oxígeno y agua, por tanto, para alcanzar la estabilidad química se recurre al empleo de barreras o coberturas impermeables, que van a estar conformadas por una capa impermeable de arcilla o GCL colocada sobre los relaves, sobre la que se coloca una capa de material drenante que evacua el agua de infiltración que atraviesa la capa de suelo orgánico que soporta la vegetación.

Para el diseño de la cobertura impermeable se tiene en cuenta, por un lado, datos meteorológicos que pueden ser medidos en campo o tomados de estaciones meteorológicas ubicadas cerca del emplazamiento del depósito de relaves, y por otro, las propiedades de los materiales de cada una de las capas que van a conformar la cobertura, como resultado obtenemos mediante simulación los espesores de las capas de la cobertura y la calidad de los materiales.

La estimación del presupuesto de cierre de las presas de relaves en todos los casos se ha realizado sobre una ingeniería de cierre a nivel de factibilidad. Por tanto, se debe tener en cuenta que cuando se realice la ingeniería de cierre a nivel de construcción o detalle, los presupuestos estimados experimentarían incrementos.

En la revisión de los costos directos de las ocho operaciones mineras en Perú que cuentan con planes de cierre a nivel de factibilidad aprobados por la autoridad, se ha identificado que el costo de la estabilidad química representa entre el 46% al 78% del costo directo de cierre de depósito de relaves, destacando de forma significativa



respecto a las actividades de estabilidad física, estabilidad hidrológica y revegetación (ver Fig. 5).

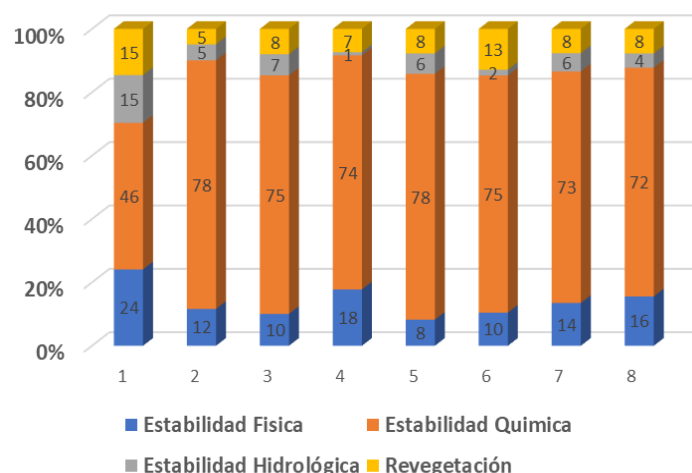


Figura 5. Actividades de cierre que forman parte del costo directo de los depósitos de relaves de explotaciones mineras subterráneas.

Teniendo en cuenta las condiciones del lugar de emplazamiento de las presas de relaves y los criterios de diseño en las ingenierías de cierre de cada depósito, en la Fig. 6 se puede observar la relación entre los costos de cierre de las presas de relaves en función a la extensión del terreno superficial que ocupan en hectáreas (ha). La función con mayor ajuste a esta relación es una función polinómica de grado 2, en donde, según se incrementa el área de ocupación del depósito de relaves el costo de cierre tiende a reducirse, de esta forma, en el estudio se ha obtenido un costo medio de cierre de los depósitos de relaves de 155,107 US\$/ha.

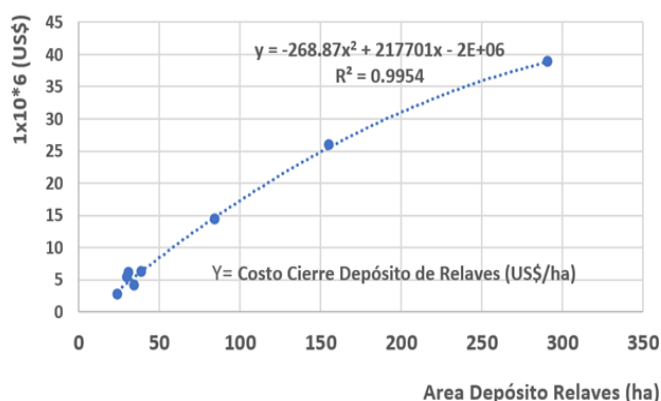


Figura 6. Costo de cierre de depósitos de relaves en función al área.

#### 4. Costos directos e indirectos en cierre de minas

Las actividades de cierre de componentes mineros consideradas en el estudio, como costo directo son: estabilidad física, estabilidad química, estabilidad hidrológica, revegetación. En lo que respecta a los costos

indirectos (Cuadro 1) incluye gastos generales, utilidad, supervisión, administración, movilización y desmovilización, diseños de ingeniería, estudios básicos para planes de cierre, como: hidrológico, geotécnico, hidrogeológico, geoquímico, suelos, vegetación y otros.

El Presupuesto de Cierre de Mina en Operaciones Mineras está formado por el Costo de Cierre Final (Costo Directo + Costo Indirecto) que se ejecuta al final del ciclo minero, el Costo del Post-cierre correspondiente al monitoreo y mantenimiento una ejecutado el cierre de mina. También se considera el Costo de Cierre Progresivo que se ejecuta durante la vida operativa de la mina, pero, este costo no se considera para el Cálculo de la Fianza.

Para el caso de Operaciones Mineras a Cielo Abierto con Procesos de Lixiviación y Desmontes PAG, el valor medio porcentual del costo directo representa el 58% del presupuesto de cierre y el costo indirecto alcanza el 28%, mientras que para Explotaciones Mineras Subterráneas con Procesos de Concentración de Minerales y Relaves PAG el costo directo alcanza el 76% en y el costo indirecto 23% del presupuesto de cierre final de los componentes de la operación minera.

En cuanto a los costos de las actividades de monitoreo y mantenimiento postcierre por un período mínimo de 5 años, el costo de postcierre para operaciones a cielo abierto es mayor respecto al laboreo subterráneo, posiblemente porque las áreas a rehabilitar son mayores y hay que atender el seguimiento y control con un número mayor de puntos de monitoreo.

En todos los casos estudiados no hay tratamiento de efluentes residuales en el postcierre, pero, en los casos de cierre de operaciones mineras con tratamiento de agua, los costos de postcierre suelen incrementarse en forma proporcional al volumen de la descarga y el tiempo de tratamiento.

	COSTO DE CIERRE FINAL (US\$)		COSTO DE POST-CIERRE (US\$)
	Costo Directo	Costo Indirecto	
Operaciones Mineras a Cielo Abierto con Procesos de Lixiviación y Desmontes PAG	57.90 %	27.50 %	14.7 %
Explotaciones Mineras Subterráneas con Procesos de Concentración de Minerales y Relaves PAG	75.92 %	22.95 %	1.13 %

Cuadro 1. Reparto porcentual del presupuesto de cierre de operaciones mineras.

#### 5. Conclusiones

En planes de cierre de minas que contemplan el cierre de depósitos de residuos mineros como desmontes y relaves con una alta probabilidad de generar acidez, el presupuesto de cierre se verá influenciado principalmente por la actividad de estabilidad química, ya que para este tipo de cierre se suele recurrir al empleo

de coberturas impermeables a fin de evitar el contacto del relave con oxígeno atmosférico y agua de lluvia, para lo cual se requiere disponibilidad de materiales naturales como arcillas y otros en cantidades y calidades que difícilmente se encuentran en los entornos de los trabajos de cierre.

En Operaciones Mineras a Cielo Abierto con Procesos de Lixiviación y Desmontes PAG, el valor medio porcentual del costo de la actividad de estabilización química representa entre el 33% y 55% del costo directo del presupuesto de cierre, mientras que para Explotaciones Mineras Subterráneas con Procesos de Concentración de Minerales y Relaves PAG el costo de la actividad de estabilización química representa entre el 46% y 78% del costo directo del presupuesto de cierre final de la operación minera.

En los planes de cierre de explotaciones mineras que generan residuos mineros con potencial de generar acidez, el tipo de cierre recomendado es el empleo de coberturas impermeables con materiales naturales o geosintéticos a fin de evitar el contacto de los desmontes y relaves con oxígeno atmosférico y agua de lluvia, esto hace que la estabilidad química tenga un costo mayor y significativo respecto al presupuesto de cierre de todas las instalaciones de una operación minera.

Los diseños para cierre de depósitos de residuos mineros reactivos (PAG) requiere barreras o coberturas conformadas con materiales naturales como arcillas para las capas impermeables y otros suelos con granulometrías que permita cierto nivel de percolación para las capas de drenaje lateral que deben extraerse en canteras ubicadas a distintas distancias, en caso de no existir suelos de granulometría fina en la zona, se recurre al empleo de materiales sintéticos como geomembranas para la capa impermeable, en ambos casos la colocación de coberturas impermeables incrementan los presupuestos de cierre.

## **6. Recomendaciones**

La propuesta de cierre debe consolidarse sobre un estudio de riesgos que permita identificar los componentes y las actividades de cierre con mayor riesgo a fin de priorizar las actuación de rehabilitación, previa evaluación de acciones de aprovechamiento y recuperación de los materiales y residuos mineros, para reducir su volumen y generar subproductos con recuperación económica cuando sea posible, aspecto que en los últimos años se conoce como la economía circular de los residuos mineros.

Desarrollar proyectos mineros sostenibles, identificando y programando actividades de recuperación y rehabilitación desde la apertura hasta el cierre de la operación minera, además de la ejecución de procesos innovadores que permiten considerar a los residuos mineros (relaves, desmontes y otros materiales excavados sin aprovechamiento) como recursos

potenciales a través de estudios de valorización y aprovechamiento de subproductos. Este planteamiento fomenta el uso racional de los recursos naturales mediante técnicas más eficientes que incrementan el número de aplicaciones de los recursos y reducen el volumen final de residuos, al mismo tiempo estas actuaciones constituyen una oportunidad de negocio de subproductos y materiales secundarios, además de mejorar el control ambiental lo que constituye una vía hacia la reducción de los costos de tratamiento y de clausura al final del ciclo minero.

Los estudios básicos como geotecnia, geoquímica, hidrogeología, suelos y vegetación deben ser la base en los estudios de alternativas y en el dimensionado de las actividades de cierre para lograr la estabilidad física y química de las áreas que ocuparon los componentes del plan de cierre de cada operación minera, Además, ayuda a elegir el esquema de cierre más apropiado para cada labor a cerrar, así como a gestionar mejor los recursos.

El cometido principal de la determinación del potencial de acidez de los residuos mineros, es evaluar la capacidad de generación ácida a largo plazo y tomar medidas preventivas y de control para reducir este riesgo. Estas medidas de control van desde el aislamiento o supresión de uno más de las variables que posibilitan la generación ácida, como son: agua, aire, sulfuros y actividad bacteriana, hasta el encapsulado total de los materiales excavados que contienen sulfuros, esto va a facilitar la gestión de los residuos mineros durante la etapa de operación y diseñar la mejor alternativa de cierre, para alcanzar la integración ecológica en el postcierre. Además de reducir los períodos de recuperación de los ecosistemas alterados.

Considerando que un plan de cierre es un conjunto de acciones y medidas que se realizan para proteger a las personas y el medio ambiente, durante y después de finalizada la actividad minera, para ello, se requiere tener estudios básicos actualizados para condiciones de cierre, a fin de cumplir como mínimo con los siguientes cometidos: lograr la estabilidad física, química, hidrológica y biológica de terrenos e instalaciones; permitir la recuperación ambiental de los ecosistemas alterados en el menor tiempo; controlar la emisión de residuos y descargas de efluentes contaminantes; permitir el aprovechamiento y reciclado de equipos e instalaciones; reducir los impactos ambientales antes, durante y después de cierre; permitir nuevos usos en los terrenos que ocuparon las instalaciones mineras; minimizar los requerimientos de mantenimiento y control de los trabajos de cierre; mantener un equilibrio entre la actividad minera y el medio ambiente, finalmente esto repercute en la mejora de la imagen de la minería frente a los vecinos, la comunidad y la opinión pública.

### **Referencias.**

Aduvire, O. 2006. Drenaje Acido de Mina: caracterización, control y tratamiento. Instituto

- Geológico y Minera de España, Ed. IGME. Madrid, España. Código: SID-63187. Publicación Electrónica 136pp.
- Aduvire, O., Escribano, M., García-Bermudez, P., López-Jimeno, C., Mataix, C. y Vaquero, I. 2006. Manual de construcción y restauración de escombreras. Ed. U. D. Proyectos ETSIM-UPM. 633pp. ISBN: 84-96140-20-2.
- Aduvire, O. y Loza, N. 2018. Mejoras en la caracterización y tratamiento de efluentes ácidos de mina. 6° Congreso Internacional en Gestión del Agua en Minería y 2° Congreso Internacional de Agua en Procesos Industriales. WATER CONGRESS 2018, Santiago, Chile.
- Aduvire, O. 2021. Geochemical stability of tailings dams at closure. 7<sup>a</sup> International Conference on Tailings Management. TAILINGS 2021. Santiago, Chile.
- Aduvire, O., Montesinos, M. and Loza, N. 2021. Efficient methodologies in the treatment of acid water from mines with recovery of byproducts. 14th IMWA Congress Wales. Proceeding IMWA 2021. International Mine Water Association. Cardiff, Wales, United Kingdom. ISBN 978-3-00-069673-2.
- Aduvire, O. and Cahuana, L. 2022. Mine closure planning and mining environmental liabilities 20 years after closure legislation in Peru. 4° International Congress on Planning for Mine Closure. PLANNING FOR CLOSURE 2022, Santiago, Chile.
- Aubertin, M., Aachib, M. y Authier, K. 2000. Evaluation of diffusive gas flux through covers with a GCL. Geotextiles and Geomembranes, 18, 215-233.
- Alejo, J., Valer, F., Pérez, J., Canales, L., & Bustinza, V. 2014. Manejo de pastos naturales altoandinos. PACCPERÚ.
- Aubertin, M., Ricard, J. y Chapuis, R. 1998. A predictive model for water retention curve: Application to tailings from hard-rock mines. Canadian Geotechnical Journal, 35, 55-69.
- Beingolea, H. 1972. Comparativo de doce variedades de trébol rojo asociado con dactylis, en Allpachaka a 3 500 msnm. Ayacucho, Perú.
- Giráldez, J., Laguna, A. y Jiménez, F. 2005. Posibilidades de las barreras capilares para reducir el riesgo de contaminación en suelos. Simposio sobre Zona No Saturada del Suelo. Vol. 8, 3-8.
- ICMM 2019. Integrated mining closure: Good Practice Guide. Ed. International Council on Mining and Metals. 2nd Edition. London, United Kingdom.
- ICMM. 2020. Tool for Closure User Guide– Closure maturity framework. Ed. International Council on Mining and Metals. 2nd Edition. London, United Kingdom.
- ICMM. 2021. Global Industry Standard on Tailings Management – Conformance protocols. Ed. International Council on Mining and Metals. 2nd Edition. London, United Kingdom.
- ICMM. 2021. Good practice guide - Tailings Management. Ed. International Council on Mining and Metals. 2nd Edition. London, United Kingdom.
- MINEM 2006. Guía para la elaboración de planes de cierre de minas. Ed. Dirección General de Asuntos Ambientales Mineros. Lima, Perú.
- Wates, J.A., Rykaart, E.M. 1999. The Performance of Natural Soil Covers in Rehabilitating Opencast Mines and Waste Dumps in South Africa. Water Research Commission Report 575/1/99, ISBN No. 1868456139.
- World Bank Group 2022. Mine closure: A Toolbox for Governments. Ed. International Council on Mining and Metals. United States.

Artículo recibido: 05.09.2022

Artículo aceptado: 13.11.2022

## APPLYING A FLEXIBLE MODEL FOR ANALYSIS OF STRESS-STRAIN PROBLEM IN ROOM AND PILLAR MINING

Navarro-Torres, Vidal Félix<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Vale Institute of Technology (ITV). Ouro Preto – MG – Brasil. (vidal.torres@itv.org)

### Abstract

In room and pillar (R&P) mining, the procedures adopted to design mine panels are based on the safety factor (SF) of pillars. For this reason, is so important to study the geological and geomechanical behavior of the area to be mined. The use of a mathematical model allows identifying problematic areas and to test different configurations in a safe manner. This paper shows the development and application of a flexible and automatic routine to quantify the safety in R&P mining in terms of SF and room convergence (RC). The commercial software package FLAC3D was used to implement a computational routine in FISH language capable of representing in a fast and accurate way the main characteristics of the geomechanical conditions, lithology and geometrical features of a R&P mining project