

Emerging technologies for tailings disposal: opportunities for Colombian practice

Lorena N. Beltrán-Rodríguez ^a, Joan M. Larrahondo ^a & Diego Cobos ^b

^a Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. lorena.beltran@javeriana.edu.co, jlarrahondo@javeriana.edu.co,

^b Dynami Geoconsulting, Medellín, Colombia. cobos@dynamigc.com

Received: July 27th, 2017. Received in revised form: March 19th, 2018. Accepted: April 15th, 2018.

Abstract

While Colombia is a country with long mining tradition, expertise and regulation on large-scale mining-waste disposal facilities are scarce. This article describes the current state of the practice of mining waste management in Colombia, particularly tailings, as well as the opportunities and limitations towards the adoption of modern technologies. The traditional practices for tailings management around the world were reviewed, as well as its technical and regulatory aspects in Colombia. In addition, recent technical literature was studied relating emerging technologies for tailings management, focusing on thickening, filtration, cemented-paste backfilling, “piggy-backing”, and submarine tailings disposal. Furthermore, the Colombian regulatory and technological environment was analyzed considering the possible implementation of modern technologies. It is concluded that such emerging technologies minimize mining-project footprints compared to conventional disposal structures, though submarine disposal should currently be avoided. Colombia urgently requires to educate skilled professionals able to tackle the modern massive management of mining waste.

Keywords: tailings; waste rock; tailings dams; tailings storage facilities; thickened tailings; tailings paste; piggy-backing; submarine tailings disposal; acid drainage.

Tecnologías emergentes para disposición de relaves: oportunidades en Colombia

Resumen

Aunque Colombia es un país de amplia tradición minera, las experiencias y reglamentación sobre grandes estructuras de disposición de residuos mineros son escasas. Este artículo describe las prácticas actuales de manejo de residuos mineros en Colombia, particularmente relaves, al igual que las oportunidades y limitaciones para la adopción de tecnologías modernas. Para este manuscrito, se revisaron las prácticas mundiales tradicionales y los aspectos técnico-normativos en Colombia. Adicionalmente, se estudió bibliografía reciente sobre tecnologías emergentes para manejo de relaves, particularmente espesamiento, filtrado, retrolonado, realce y disposición submarina. Finalmente, se analizó la situación normativa y tecnológica en Colombia de cara a la posible adopción de tecnologías modernas. Se concluye que las tecnologías emergentes minimizan el gran pasivo que dejan las estructuras convencionales, aunque actualmente la disposición submarina debe evitarse. En cualquier caso, el país requiere prontamente desarrollar capital humano con competencias para abordar el manejo moderno y masivo de residuos mineros.

Palabras clave: relaves; estériles; presas de relaves; estructuras de almacenamiento de relaves; relaves espesados; pasta de relaves; realce de presas; disposición submarina; drenaje ácido.

1. Introducción

Los minerales continúan siendo un recurso fundamental a escala global. Para satisfacer la creciente demanda mundial e incluso para lograr reducir las emisiones de carbono

asociadas con las metas de desarrollo sostenible fijadas en 2015 por la Organización de Naciones Unidas y el Acuerdo de París sobre cambio climático, la actividad minera requiere continuidad y crecimiento [1]. En efecto, la implementación a gran escala de “tecnologías limpias” requiere

How to cite: Beltrán-Rodríguez, L.N., Larrahondo, J.M. and Cobos, D., Tecnologías emergentes para disposición de relaves: oportunidades en Colombia. Boletín de Ciencias de la Tierra, 44, pp. 5-20, Julio, 2018.

infraestructura y fabricación de equipos que demandan enormes cantidades de minerales, por ejemplo, aquéllos que contienen elementos de tierras raras.

Todos los tipos de explotación minera tienen en común la extracción y concentración (beneficio) de uno o varios minerales provenientes de la corteza terrestre. Para tal fin, la molienda constituye una de las actividades más importantes y a la vez más costosas del proceso de beneficio de un mineral. Como resultado de la molienda y beneficio, posterior a extraer los metales objetivo, se producen partículas residuo, desde muy finas (tamaño arcilla y limo) hasta tamaño arena fina [2]. El conjunto de estas partículas se denomina “relaves” o “colas”.

Dado que, incluso en yacimientos con relativamente alta concentración de metal objetivo, la cantidad de roca “estéril” sobrepasa significativamente la cantidad de mineral valioso, las cantidades de residuos sólidos producidos son grandes. Por ejemplo, el contenido de cobre en un yacimiento típico de buen grado solamente alcanza 0.25% [2], y en yacimientos de oro, apenas es recuperable aproximadamente 1 g de metal por tonelada de roca [3].

La actividad extractiva minero-energética produce entonces residuos sólidos, principalmente relaves y roca “estéril”, los cuales convencionalmente se disponen sobre superficie en zonas topográficamente convenientes y en ocasiones mediante estructuras de contención tipo presa. Estas prácticas implican grandes áreas de intervención y, en el largo plazo, pasivos ambientales y sociales posteriores al cierre de la mina, más cuando, bajo ciertas circunstancias, la interacción de los residuos con el agua y el medio ambiente pueden llegar a liberar contaminantes.

Actualmente existen tecnologías modernas que buscan optimizar las condiciones de disposición final de los residuos, reduciendo el impacto sobre su entorno. Estas tecnologías emergentes incluyen espesado de relaves, filtrado de relaves, retrolenado de galerías con pasta de relaves, realces (“piggy-backing”) y disposición submarina, siendo esta última una tecnología muy controversial y de hecho restringida en múltiples países [4]. Los anteriores métodos han venido desarrollándose en países mineros con tradición de grandes estructuras de contención. En Colombia, se tiene poca experiencia y conocimiento tanto en grandes estructuras de contención como en nuevas tecnologías y prácticamente se carece de reglamentación relacionada. No obstante, algunos nuevos proyectos mineros de diferente escala ya están implementando o planean implementar algunos de estos métodos, por lo cual es fundamental conocer las ventajas, desventajas y posible aplicabilidad de los mismos. Una gestión integral de los residuos mineros con enfoque hacia la protección del medio ambiente trae grandes beneficios económicos y sociales [5].

El objetivo de este artículo es describir las prácticas actuales de manejo de residuos mineros en Colombia, particularmente relaves, al igual que las oportunidades y limitaciones para la adopción de tecnologías modernas de disposición final.

2. Contexto y antecedentes

2.1. Relaves y roca “estéril”

La roca denominada “estéril” constituye uno de los residuos más voluminosos en la industria minera. Cuando se

explota el mineral con métodos de minería subterránea, los residuos gruesos de roca se originan a menudo en la excavación del eje de la mina, los pozos mineros y otras áreas. La producción de residuos de roca es muy diferente en distintas minas debido a la geometría del yacimiento, al programa de desarrollo de la explotación y a la capacidad de extracción de la mina subterránea. En todo caso, la cantidad de residuos de roca en una mina a cielo abierto generalmente es mayor que en una mina subterránea [5].

Por su parte, los relaves o “colas” son los principales residuos del proceso de beneficio de minerales. Estos residuos están compuestos fundamentalmente por el mismo material presente in-situ en el yacimiento, al cual previamente se le ha extraído la fracción con mineral valioso. Los relaves conforman así una “pulpa” de partículas finas que se produce en las plantas de concentración húmeda de especies minerales y “estériles” que han experimentado una o varias etapas del circuito de molienda fina [6]. Los relaves son materiales que difieren considerablemente de los suelos naturales en cuanto a sus propiedades índice, por ejemplo, gravedad específica normalmente mayor que 3.0 [7,8] y susceptibilidad a lixiviación y drenaje ácido o alcalino [9-11].

La producción y la disposición controlada de relaves y “estériles” se han convertido en factores clave para el desarrollo sostenible de la industria minera. Estadísticas recientes muestran que, por ejemplo, en China se vierten más de 500 millones de toneladas de relaves cada año y la tasa de reaprovechamiento es de menos del 7% de la tasa de producción. El método más común de disposición de relaves es bombeo de lechada hacia una estructura de contención de relaves, o “Tailings Storage Facility” (TSF) [5]. Actualmente, en la industria minera y de disposición, se prefiere utilizar el término “TSF” en lugar de “presa de relaves” [3].

2.2. Estructuras de contención

Hasta hace solo algunas décadas, era común en Chile y en otros países de tradición minera disponer relaves derivados de las operaciones minero-metalúrgicas vertiéndolos informalmente sobre cuerpos de agua, valles o incluso al mar [6]. Cuando estos sitios no eran accesibles, se solía acumular los relaves en áreas de contención amuralladas con terraplenes levantados con los mismos relaves. Sin embargo, una vez se agotaba el yacimiento, estos depósitos eran abandonados. El desarrollo de esta tecnología tipo “presa de relaves” tuvo lugar sobre una base principalmente empírica y mayormente relacionada con las prácticas de construcción y equipo disponible en la época.

Durante las décadas de 1950 y 1960, desde Norteamérica se empezaron a aplicar y refinar principios fundamentales de ingeniería de presas sobre presas de relaves. Las fallas de origen sísmico de varias presas de relaves en Chile recibieron gran atención y demostraron ser un factor clave en las primeras investigaciones del fenómeno de la licuación sísmica. Por ejemplo, la falla por licuación de la presa El Cobre (1965) ocurrida durante el sismo de La Ligua, provocó que los relaves viajaran 12 km aguas abajo destruyendo completamente la municipalidad de El Cobre y dejando un saldo de 200 muertos.

La preocupación por posible contaminación del agua subterránea y las medidas para reducirla se abordaron entre las décadas de 1970 y 1980, particularmente en relación con relaves de uranio. En efecto, durante este tiempo el foco de atención se volcó no solo sobre la estabilidad geotécnica de las estructuras de contención, sino también sobre posibles efectos químicos y transporte de contaminantes. Como consecuencia, alrededor de 1990 se reconoció que los depósitos de relaves, aún aquéllos geotécnicamente estables, no pueden abandonarse sin considerar posibles efectos de largo plazo sobre el ambiente, la salud y la seguridad [12].

Como ejemplos de grandes estructuras modernas para manejo de relaves se encuentran la presa de relaves de Antamina en Perú y las estructuras en los estados de Ontario y British Columbia en Canadá [13,14]. La presa de Antamina (Fig. 1) es una presa de enrocado con cara de concreto, de 135 m de altura y capacidad para almacenar 570×10^6 Ton de material durante su vida útil. La cara aguas arriba de la presa adicionalmente está protegida por geomembrana de polietileno de alta densidad para evitar posibles filtraciones desde el embalse de relaves. Como obras complementarias del proyecto existen túneles de drenaje, inyecciones de concreto y canales colectores de agua de lluvia, y comprende instrumentación para monitoreo de asentamientos, cambios de niveles de agua y filtraciones [15].

En British Columbia y Alberta, Canadá, desde hace varios años se viene desarrollando minería a cielo abierto de cobre y arenas bituminosas a gran escala. Respectivamente, la producción de residuos es cercana a 150,000 y 250,000 toneladas diarias [14], exigiendo el almacenamiento seguro de estos enormes volúmenes de relaves. La explotación de arenas bituminosas por parte de las firmas Syncrude y Suncor es la más grande con operaciones de producción de crudo sintético.

No obstante, estadísticamente las presas de contención de relaves tienen aproximadamente 100 veces más probabilidad de falla que las presas de contención de agua [17,18]. En la Tabla 1 se presenta un resumen de algunas fallas significativas de presas de relaves en el mundo, compiladas de un total de 103 de fallas registradas entre 1960 y 2016 en la base de datos WISE [19].



Figura 1. Presa de relaves Antamina, Perú, vista desde aguas arriba.
Fuente: [16]

3. Manejo de relaves en Colombia

3.1. Generalidades

La información disponible sobre el manejo de relaves (colas) en Colombia es escasa y dispersa, por lo cual un diagnóstico completo y preciso sobre el tema es un desafío. La minería en Colombia ha ganado participación importante dentro de la actividad económica del país durante las últimas cuatro décadas [20]. En efecto, el sector de explotación de minas y canteras pasó de representar el 1.6% del PIB en 1975 a representar el 11.3% del mismo en 2012. Sin embargo, gran parte de este crecimiento sectorial se debe en realidad a la extracción de petróleo y no específicamente a la explotación de minerales. La explotación de hidrocarburos duplicó su participación en el PIB, de 4.5% a 8.2%, entre 2000 y 2013, mientras que el resto del sector aumentó su participación de 1.5% a 2.5% del PIB durante el mismo periodo. La demanda creciente de minerales por parte de economías emergentes de Asia, particularmente India y China, explica en parte este crecimiento [21]. Esta demanda creciente se espera que se mantenga hacia futuro de acuerdo a los pronósticos de crecimiento del PIB mundial hacia 2030, junto con una tendencia al alza en los precios de los principales minerales.

Ahora bien, al comparar el peso de la minería, sin hidrocarburos, dentro del PIB de países mineros como Perú, Chile, Australia y Suráfrica, la importancia en el PIB de este sector en Colombia es evidentemente baja. Mientras que en Australia la minería, sin hidrocarburos, representa cerca del 25% del PIB, en Chile alcanza el 15% y en Perú y Suráfrica se encuentra cerca del 10%.

El plan nacional para el desarrollo minero, visión año 2019 [22], resalta que el desempeño del sector minero en el país desde mediados de los años 90 registra un importante crecimiento en volumen, valor de producción y exportaciones, con lo cual su aporte a la economía colombiana se ha sostenido e incluso ha compensado la baja registrada en la producción de hidrocarburos. Lo anterior se sustenta fundamentalmente en el desarrollo del sector minero del carbón y en menor proporción en minerales preciosos y ferroníquel. Según la Unidad de Planeación Minero Energética [22], actualmente al menos 15 departamentos colombianos han desarrollado programas de promoción y fomento minero y han gestionado recursos para su financiación. Entre ellos, Antioquia, Bolívar, Boyacá, Cauca, Nariño y Putumayo cuentan con planes de desarrollo minero. Otros municipios como Santacruz de Guachaves (Nariño) y Yumbo (Valle del Cauca) cuentan con planes de desarrollo minero a nivel local.

La problemática de contaminación por residuos de mercurio provenientes de la minería extractiva de oro, específicamente la que se desarrolla de manera informal, es tal vez la más preocupante [23]. A esta problemática se suman los problemas sociales de una población minera generalmente vulnerable que desconoce los riesgos que acarrea la manipulación del mercurio. En este sentido, dentro de las operaciones de beneficio y transformación en las minas, se destaca la disposición informal e inadecuada de las

Tabla 1.

Algunas fallas notables de presas de relaves en el mundo.

Fecha	Nombre / Localización	Mineral	Tipo de Falla	Consecuencias
28/03/1965	Cerro Negro, Chile	Cobre	Licueación e inestabilidad de taludes inducidas por sismo	50,000 Ton de relaves fluyeron 5 km aguas abajo
19/07/1985	Stava, Trento, Italia	Fluorita	Márgenes de seguridad insuficientes; construcción deficiente de tubería de decantación	Flujo de relaves 4.2 km aguas abajo a velocidad de 90 km/h; 268 personas muertas y 62 edificaciones destruidas. 200,000 m ³ de relaves liberados.
1985	Huangmeishan, China	Hierro	Infiltraciones de la presa e inestabilidad de taludes	19 personas muertas
22/02/1994	Harmony, Merriespruit, Suráfrica	Oro	Ruptura por rebose después de fuertes lluvias	Los relaves fluyeron 4 km aguas abajo; 17 personas muertas; grandes pérdidas materiales en un municipio residencial. 600,000 m ³ de relaves movilizados.
25/04/1998	Los Frailes, Aznalcóllar, España	Zinc, cobre, plomo, plata	Falla del terreno de cimentación	Miles de hectáreas de cultivos cubiertos de relaves
04/08/2014	Mount Polley, British Columbia, Canada	Cobre, Oro	Falla del terreno de cimentación	Flujo de relaves hacia lagos adyacentes; 7.3 millones de m ³ de relaves movilizados.
05/11/2015	Fundão, Distrito de Mariana, Brasil	Hierro	Falla de la presa sobre su estribo izquierdo. Una capa de relaves finos presente dentro del embalse de relaves gruesos produjo una zona débil a lo largo de la cual inició la falla. Los relaves finos ingresaron indeseadamente al embalse de gruesos a través de un canal tipo vertedero de excesos [24].	Flujo total combinado de 62 millones de m ³ de relaves. La ola de relaves inundó la ciudad de Bento Rodrigues; al menos 17 personas muertas y dos desaparecidas; 158 viviendas destruidas; contaminación del océano Atlántico, del Río Gualaxo y del Río Doce.

Fuente: adaptado de [19]

escorias, colas y otros residuos con posibilidad de estar contaminados con compuestos peligrosos, además de la generación de polvos minerales. La UPME, en su plan nacional para el desarrollo minero tiene como visión general principal para el año 2019: “En ese año la industria minera colombiana será una de las más importantes de Latinoamérica y habrá ampliado significativamente su participación en la economía nacional” [22]. Sin embargo, dentro del plan en general no se detallan políticas ni nuevos procesos de innovación tecnológica para la extracción de minerales y disposición final de relaves, particularmente considerando el incremento de volúmenes de producción.

3.2. Marco normativo

Mediante el Artículo 199 del Código de Minas (Ley 685 de 2001), los Ministerios de Minas & Energía y Medio Ambiente, adoptaron tres Guías Minero Ambientales aplicables a todas las fases del ciclo minero: exploración, explotación, beneficio y transformación de minerales. El numeral 5.4 de la Guía Minero Ambiental No. 2 (explotación) contempla el cierre y abandono de minas y presenta un serie de objetivos, medidas de control y consideraciones para el monitoreo del cierre de operaciones y la contención de colas de proceso (ver Tabla 2).

Dentro de la misma Guía No. 2 se presentan las fichas de manejo para los componentes ambientales afectados y para las actividades específicas de construcción y montaje y obras de trabajo de explotación. Específicamente, para el manejo

de “estériles” la ficha CME 07-15 indica que los estériles generados en la actividad minera y en las excavaciones para infraestructura deben disponerse en sitios especiales, debidamente protegidos de la dispersión y el arrastre y su ubicación debe estar definida desde la planeación [25].

Además, deberán evaluarse las alteraciones que puedan producirse sobre el medio natural, por los cambios en el régimen de escorrentía superficial, la pérdida de suelo, las alteraciones geomorfológicas, la eliminación de hábitats animales, la aceleración y aumento de procesos erosivos y la integración de las estructuras al entorno, una vez se hayan restaurado los terrenos.

Por otra parte, la Guía No. 3 del Código de Minas (Beneficio y Transformación) presenta las fichas de manejo para los componentes ambientales afectados en dichas actividades, susceptibles de generar impacto. El numeral 7.7 establece una ficha particular para el manejo de residuos industriales (BTM 07-07) que especifica que los lodos provenientes de los procesos de separación de minerales serán tratados según los siguientes aspectos [26]: 1) caracterización química y geoquímica de lodos y relaves mediante mineralogía, contaminantes lixiviables, generación de ácidos potenciales, gravedad específica, entre otros; 2) tratamiento de relaves en sitios alejados de cuerpos de agua natural y en estructuras especiales que eviten su infiltración al suelo y a aguas subterráneas; 3) mecanismos de recobro de lodos in situ, en lugar de la extracción seguida del beneficio en superficie, a fin de reducir los impactos ambientales; 4) canalización y uso de materiales impermeables que eviten

Tabla 2.
Aspectos de cierre relacionados con contención de relaves.

Aspectos	Objetivos	Medidas de control	Consideraciones para monitoreo
Estabilidad Física			
Polvo	Estabilizar superficies	Seleccionar el sitio adecuado	Monitoreo visual de zanjas, bermas, etc.
Erosión	Prevenir fallas y deslizamientos	Establecer coberturas (vegetación, escolleras o agua) resistentes a la erosión	Monitoreo de procesos erosivos
Muros o diques de embalses	Controlar material particulado y sedimentos	Diseñar embalses y diques	Monitoreo de vegetación (cobertura vegetal)
Drenaje		Establecer el método de disposición de los relaves (colas) del proceso	Monitoreo de grietas en la corona de taludes, indicios de nuevas fallas, filtraciones o fugas, tuberías, protuberancias en taludes, formación de lodos o fango en la cima
		Recubrir y reforestar	Muestreo de drenajes (sólidos en suspensión).
		Controlar drenaje	Monitoreo y evaluación de tasas críticas de sedimentación, aumento de filtración o aparición de deformaciones internas
		Establecer zanjas, bermas o cercas para controlar accesos de vehículos motorizados	Medición de tasas de descarga y comparación con diseño (flujo)
Estabilidad Química			
Lixiviación de metales pesados	Mantener calidad de agua	Usar materiales químicamente estables para construir muros de diques y embalses	
Drenaje Ácido	Controlar reacciones químicas	Pretratar relaves (colas) del proceso	Muestreo y análisis de drenajes de escorrentía, lixiviados y filtrados de efluentes de las pilas de relaves (colas) de proceso
Reactivos residuales de molienda	Controlar migración y dispersión	Usar coberturas para controlar reacciones químicas	
Estructura de piscinas o diques	Recolectar y tratar residuos	Establecer pantanos o humedales	
		Desviar drenajes	
		Recolectar y tratar efluentes	
Uso del Territorio			
Productividad Impactos visuales	Recuperar el territorio para uso apropiado	Redefinir, cubrir y reforestar Inundar y formar pantanos	Monitoreo e inspección frecuente

Fuente: adaptado de [25]

escapes de los embalses, plataformas y estructuras de tuberías y canales, por las cuales circulará el agua de las colas; 5) minimización del drenaje ácido mediante separación de las colas de sulfuro de alto grado en ambientes de poco oxígeno para minimizar la oxidación; 6) contención hermética de largo plazo (100 a 200 o incluso más años), por la posible gran cantidad de metales pesados; 7) embalses provistos de estructuras de rebose para evitar el desborde por lluvias y/o derrames, y en zonas donde exista actividad sísmica, adopción de medidas de estabilidad; 8) plan de manejo de piscinas de relaves que considere el encapsulamiento de los residuos que generen ácido con materiales que tengan potencial de neutralización, o la adición de álcalis dentro de las colas; 9) destrucción de cianuro para disposición final de aguas y cobertura de los embalses de colas con barreras visuales de vegetación, para prevenir erosión y lixiviación; 10) programas de respuesta inmediata frente riesgos originados en el embalse de relaves, junto con sistema de control y vigilancia durante y después del funcionamiento del embalse; 11) siendo los relaves un pasivo potencial, algunos remanentes químicos pueden aprovecharse nuevos procesos industriales de separación.

A pesar de que en las dos fichas anteriores es claro el enfoque normativo que cubre el manejo y disposición de relaves en Colombia mediante presas y embalses, desafortunadamente no se contemplan tecnologías emergentes de disposición, ya existentes en el mundo.

3.3. Manejo de relaves en proyectos recientes

Actualmente, un número de proyectos mineros de mediana y gran escala en Colombia se encuentran en etapa operativa o de diseño, con proyección de manejo de cantidades significativas de relaves. A continuación se resumen los proyectos más importantes y sus características, con base en información pública.

Proyecto minero La Colosa: es un proyecto minero a cielo abierto, en etapas de estudios y diseños, para la extracción de oro ubicado en Cajamarca (Tolima). En este proyecto se prevé que los residuos se dispongan en un “tanque” de relaves o dique de colas al interior de una cuenca adaptada, cercana al tajo de extracción, contenidos por una presa formada por roca estéril proveniente de la propia extracción [27]. El tanque será impermeabilizado e

implementará monitoreo, supervisión y control permanente, inclusive posterior al cierre del proyecto. El tipo de presa a construir aún no es información de dominio público.

Según la ONG inglesa Colombia Solidarity Campaign, la capacidad del dique de colas que requerirá el proyecto La Colosa será 1420 millones de toneladas y sería uno de los diques de colas más grandes del mundo [28]. El tipo de relaves a disponer en este proyecto será convencional, es decir, sin espesamiento, filtración ni aditivos.

No obstante, aparentemente las características técnicas específicas de esta infraestructura, asociada al proceso, solo se definirán hasta que la compañía (AngloGold Ashanti) culmine el estudio de prefactibilidad y sea aprobado el estudio de impacto ambiental por la autoridad correspondiente.

Las etapas de exploración y de estudios de prefactibilidad vienen caracterizando la geología, hidrogeología, mineralogía, y geoquímica de los materiales y los posibles agentes generadores de drenaje ácido. Para prevenir y controlar la generación de drenajes mineros, el proyecto viene desarrollando un programa llamado AGMP (Advanced Geochemical Management Program), con la participación de laboratorios nacionales e internacionales.

La ejecución y desarrollo del proyecto minero La Colosa se encuentran detenidos después de una consulta popular en el municipio de Cajamarca en marzo de 2017.

Proyecto minero Gramalote: es un proyecto futuro de minería de oro a cielo abierto, denominado de interés nacional y uno de los más grandes de Antioquia [29]. Se estima que este proyecto requerirá la conformación de un depósito de relaves y estériles con una capacidad aproximada de 267 millones de toneladas. La presa de colas estará ubicada en el valle de la quebrada La Palestina y la configuración final de la presa tendrá un área aproximada de 313 Há. La presa contendrá las colas provenientes de la planta de procesos, en un total aproximado de 210 millones de toneladas de relaves producidos durante los 11 años previstos de vida útil de la mina.

Durante la operación normal de la planta, un 96% de las colas se generarán en el circuito de flotación y el 4% restante en los procesos de detoxificación. La gran parte de las colas de flotación se someterán a un proceso de ciclónado para separar la fracción gruesa (“underflow”) de la fracción fina (“overflow”). La primera se utilizará para la construcción de la presa y su contrafuerte de arena, mientras que la segunda será dispuesta en el embalse de colas. La fracción gruesa será depositada mediante tuberías desde la zona de relleno (cresta) de la presa, en donde se extenderá y compactará mecánicamente para formar una estructura densa [29].

La presa de relaves será construida secuencialmente durante la vida de la mina. Inicialmente se construirá una presa de arranque de 40 m de altura sobre una sección angosta del valle de la quebrada La Palestina, para la contención de colas y agua, tal que se pueda iniciar la operación de la planta de procesos. Los materiales de relleno para la presa de arranque serán saprolito y suelo residual, por lo cual no se prevé necesario importar ningún material de relleno para su construcción. Posteriormente, una vez opere la planta de

procesos, a medida que se generen las colas de flotación se incrementará la capacidad de almacenamiento de relaves mediante realces de la presa siguiendo el método de construcción aguas abajo (“downstream”). La longitud total de esta presa será cercana a 1 km.

En el diseño general del depósito se tuvieron en cuenta, entre otras, las siguientes consideraciones: 1) se determinó que el suelo de cimentación de la presa y el basamento rocoso cuentan con baja permeabilidad (10^{-7} a 10^{-9} m/s), por lo cual no se implementará impermeabilización del lecho de la presa de colas; 2) las infiltraciones a través del cuerpo de la presa se manejarán mediante un sistema de recolección y recirculación; 3) el sistema de drenes se contempla únicamente bajo la huella de la presa, a lo largo de drenajes naturales y el fondo de la quebrada Palestina, por lo cual en el área ocupada por los relaves no van a instalarse drenajes; 4) el control, recolección y remoción de la fracción líquida de las colas generadas durante las operaciones, permitirá su reaprovechamiento en el proceso minero; 5) se implementará un plan de instrumentación para monitoreo de la presa y estructuras asociadas; 6) no se importarán materiales de relleno para la presa de arranque ni para la presa principal y contrafuertes.

Proyecto minero Santa Rosa: el proyecto aurífero Santa Rosa (Fig. 2), de 33,000 Há, corresponde a extracción subterránea, y está localizado en el Batolito Antioqueño cerca del municipio de Santa Rosa de Osos, a 70 kilómetros al norte de Medellín. El proyecto pertenece a la multinacional Red Eagle Mining. De acuerdo con el plan de la mina Santa Rosa, se producirán 1,05 millones de toneladas de relaves durante la vida útil de la mina [30]. Se espera que aproximadamente el 40% de esta cantidad se utilice para retrolenado de las obras subterráneas y el resto se dispondrá en un área denominada “Dry Waste Management Facility” (DWMF) al norte del sitio de proyecto.

Este proyecto es el primero en Colombia en producir relaves de tipo filtrado, es decir, con contenido de agua significativamente reducido mediante tecnología de filtro-prensa y chorro de aire. El contenido de agua de las colas es cercano a 16%, lo cual actualmente permite transportarlas en camión hasta el DWMF, el cual corresponde a terraplenes conformados con relleno compactado. La estructura terminada progresivamente se va recubriendo con capa vegetal.

Con respecto a la roca “estéril”, una parte se utiliza para la construcción de la infraestructura interna del proyecto y el mantenimiento de vías. Otra parte se co-dispone con los relaves en el DWMF. En la Fig. 3 se presenta la configuración proyectada inicial y final de DWMF según los estudios de la mina.

Proyecto minero Quinchía-Miraflores: el proyecto Quinchía se localiza en el departamento de Risaralda y comprende dos yacimientos de mineral: Dosquebradas (oro, plata y cobre) y Miraflores (oro). La licencia minera fue adquirida por la empresa Seafield Resources Ltd. [31]. Miraflores se sitúa en la cordillera occidental sobre una topografía montañosa y con drenajes activos. Su evolución geológica es compleja y está asociada a fuerte tectonismo producto del sistema de fallas de Romeral.

Se estima que el proyecto produzca unas 717,000 toneladas de roca estéril producto del desarrollo subterráneo. La cantidad de relleno necesario para retrolleado durante la operación será de 2'726.000 toneladas, por lo que la diferencia se obtendrá localmente a partir de residuos de fosas. Durante el primer año de operación, la mayor parte de la roca estéril se almacenará en superficie; sin embargo, una vez empiece la operación de cierre, los residuos serán dispuestos como material de retrolleado.

La planta concentradora producirá dos tipos de residuos: relaves por flotación y lixiviados de relaves. La fracción más grande (8.7 millones de toneladas ó 95,5%) corresponderá a los relaves por flotación, mientras que la fracción restante (0.42 millones de toneladas) serán lixiviados, los cuales requerirán almacenamiento en embalse separado.



Figura 2. Proyecto minero Santa Rosa
Fuente: [32]

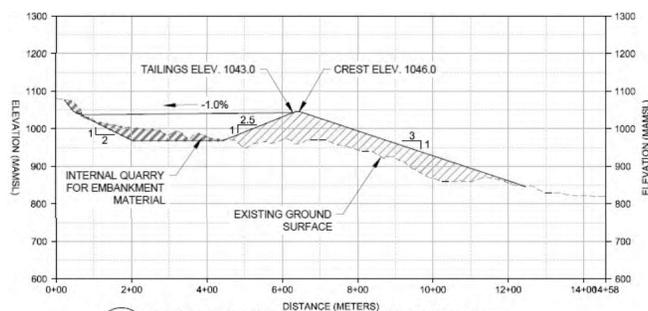


Figura 4. Proyecto minero Quinchía-Miraflores. Perfil de diseño de presa de relaves por flotación,
Fuente: [31]

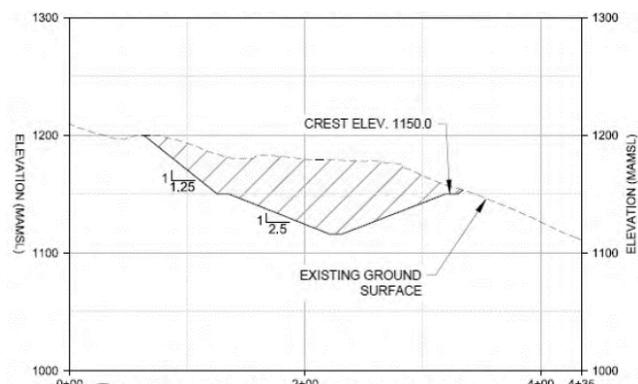


Figura 5. Proyecto minero Quinchía-Miraflores. Perfil de embalse de disposición de lixiviviados de relaves.
Fuente: [31]

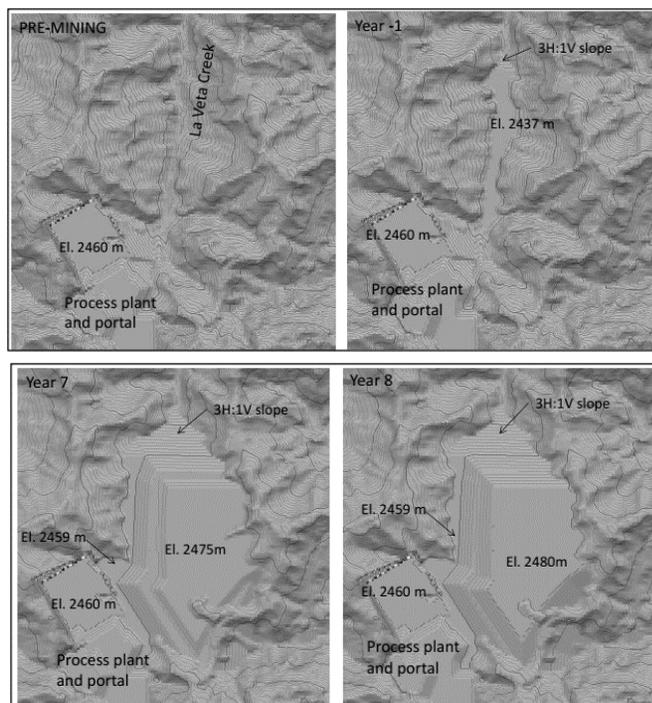


Figura 3. Proyecto minero Santa Rosa. Configuración proyectada del “Dry Waste Management Facility” (DWMF)
Fuente: [30]

En la Fig. 4 se presenta un perfil de la estructura de contención de relaves por flotación, la cual será construida mediante el método aguas abajo [31]. La construcción iniciará con una presa de arranque conformada en roca estéril de 96 m de altura y alcanzará una altura total de 134 m. La cara aguas arriba implementará un sistema de revestimiento con geomembrana HDPE junto con una capa de arcilla de baja permeabilidad.

Por su parte, la base no se recubrirá ya que, de acuerdo con los estudios geotécnicos del área, se ha identificado una arcilla natural suficientemente impermeable que servirá como barrera.

El diseño propuesto para la estructura de disposición de lixiviviados de relaves se presenta en la Fig. 5. La base del embalse se protegerá completamente con una capa de arcilla compactada de baja permeabilidad y geomembrana HDPE.

Minería informal: La minería informal en Colombia se ha convertido no solo en una preocupación de tipo económico, sino también ambiental, ecológico y social, ya que se desarrolla de manera esencialmente antitécnica, sin vigilancia ni regulación por parte de las entidades gubernamentales.

La minería informal requiere que se adopten las políticas pertinentes para el control de la ilegalidad, como por ejemplo fomentar y apoyar a las asociaciones de mineros artesanales, con el fin de que se puedan mejorar sus prácticas de salud

ocupacional y las técnicas de exploración y explotación conforme a la normativa vigente.

En la minería a pequeña escala, la problemática general es que los niveles de desarrollo tecnológico son muy bajos, inexistentes o deficientes, lo cual no permite aprovechar eficaz ni eficientemente el recurso minero, ni disponer apropiadamente los residuos derivados. Por lo anterior, el Ministerio de Minas creó en el 2007 el proyecto “Mejoramiento de la productividad y competitividad del sector minero colombiano” a través del cual se pretende mejorar la rentabilidad social de la industria minera, basada en técnicas de proyectos mineros de pequeña y mediana escala de producción, mediante una estructura fundamental de asociatividad y fortalecimiento técnico, empresarial, social y ambiental de los grupos asociativos [33]. Dentro de las líneas de enfoque del proyecto se encuentran el desarrollo y productividad minera, que tiene como objetivo “impulsar y financiar proyectos mineros sostenibles para mejorar las condiciones técnicas, económicas y sociales de la actividad minera a pequeña escala”.

Por lo tanto, la formalización de la actividad minera en Colombia no hace referencia únicamente a la obtención de un permiso o título para exploración y explotación, sino también a la definición de estructuras empresariales y asociativas, de tal forma que a las mismas incluso se le facilite el acceso a créditos para introducir tecnologías con estándares internacionales y buenas prácticas [33].

4. Tecnologías emergentes para manejo de relaves

La búsqueda de métodos alternativos de disposición y aprovechamiento de relaves está relacionada con la falta de espacio disponible para contenerlos de manera tradicional, con la resistencia natural de la ciudadanía a vivir cerca de estructuras tipo presa, siendo estas últimas las más comunes, y con la necesidad de mejorar la recuperación de agua y la disminución del impacto ambiental.

En este sentido, recientemente se vienen desarrollando tecnologías alternativas, principalmente: espesamiento y/o filtrado de relaves, retrolenado de minas con pasta de relaves, realces de estructuras ya existentes, y disposición formal submarina [4]. A continuación se resumen las principales características técnicas de estas tecnologías emergentes.

4.1. Espesamiento y/o filtrado de relaves

En 1975 el ingeniero canadiense Eli I. Robinsky, para la mina Kidd Creek en Canadá, desarrolló el concepto de un sistema de disposición de relaves que no requiere dique, presa u otra estructura para su contención. El sistema aprovecha la mayor viscosidad que muestra la pulpa del relave si se aumenta intencionalmente su concentración de sólidos. Robinsky propuso una curva para relacionar la pendiente en reposo del relave en función del contenido de sólidos de la pulpa. Dicha curva mostró que, para concentraciones del orden de 53% en peso, la pendiente en reposo es 2%, mientras que para concentraciones del 65%, la

pendiente aumenta hasta 6% [6]. Se concluyó que pueden disponerse los relaves en forma de un “cono” vertido desde un punto de descarga central, y la pendiente del cono corresponde a su respectiva concentración de sólidos.

El espesado de relaves se logra con ayuda de estructuras tipo tanque denominadas “espesadores” cuya función principal es separar la fase agua de la fase de relaves saturados bajo el principio de sedimentación por gravedad, tal que los sólidos viajan hacia el fondo y el agua queda arriba. Un espesador normalmente es metálico y comprende un tanque de acero al carbón, que generalmente tiene forma de embudo, y cuya profundidad varía dependiendo de la cantidad de líquidos que se desee recuperar (Fig. 6). Dentro de los componentes de los espesadores se encuentran agitadores y rastras, un eje principal, motor, un puente de metal para el mantenimiento y ubicación de los sistemas electromecánicos y una caja reductora [34]. Así mismo, los espesadores cuentan con instrumentos que indican el torque, ya que a medida que se van sedimentando los sólidos el torque va aumentando. Dicho torque se mide y controla mediante instrumentos que se levantan cuando el espesador está sobrecargado. Las rastras tienen aletas que realizan el trabajo de arrastrar los sólidos hacia el centro.

Si el objetivo de disposición es, por ejemplo, depositar relaves sobre un valle plano desde la ladera que limita dicho valle, se puede iniciar el vertido de los relaves espesados desde pequeña altura, en un punto central del valle, con una pulpa relativamente diluida. Posteriormente, se puede elevar el punto de descarga simultáneamente con el aumento en la concentración a fin de disponer las capas siguientes.

La operación anterior suele denominarse de “descarga central espesada” (CTD). El punto de descarga puede desplazarse lateralmente con el objeto de formar un depósito de base ovoidal (ver Fig. 7).

Aunque el concepto se desarrolló en 1975, no fue sino hasta mediados de los años 1990 cuando se implementó formalmente la tecnología. A pesar de que este tipo de depósito no requiere la construcción de un dique para limitar el área comprometida, sí se recomienda la construcción de un terraplén relativamente bajo, alejado del borde exterior del depósito, con el fin de contener el agua liberada por los relaves, la cual eventualmente puede captarse, bombearse y recircularse.

En particular, la industria de la alúmina fue la que lideró la transición industrial hacia relaves espesados. A mediados los años 1980, esta industria se fijó una meta de convertir los almacenamientos existentes de relaves en almacenamientos “secos” para lograr beneficios ambientales. Lo anterior fue posible en un período relativamente corto gracias a la nueva generación de espesadores disponible. Así, hoy día la manera de operar en la industria de alúmina mundial involucra relaves espesados a una alta concentración de sólidos antes de la descarga.

En cuanto a la industria minera en general, no fue sino hasta la primera década del siglo XXI que la tecnología de espesamiento avanzó hasta hacer factible el concepto de disposición superficial con alta densidad.

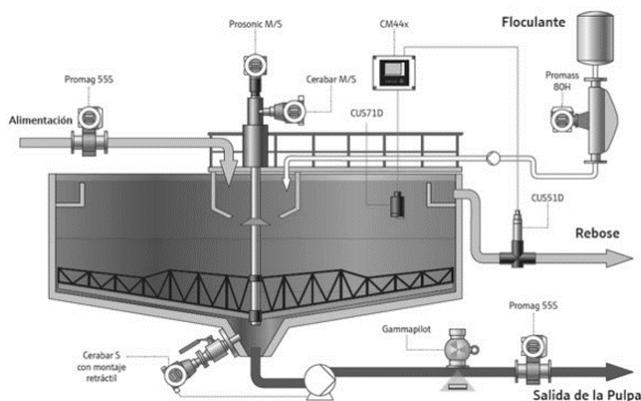


Figura 6. Sección transversal de un espesador convencional
Fuente: [34]

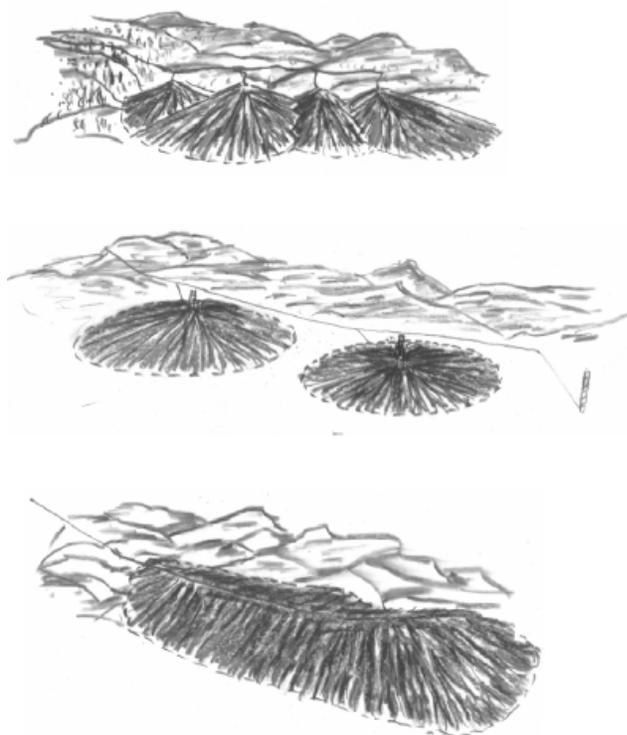


Figura 7. Disposición de relaves espesados, método Robinsky.
Fuente: [6]

Por otra parte, los relaves filtrados guardan similitudes con los relaves espesados, con la diferencia de que el material contiene aún menos agua debido a un proceso similar al que se emplea para filtrar lodos concentrados, específicamente con filtros-prensa, vacío [6] o chorro de aire a presión. En ocasiones, a la disposición de relaves filtrados se le denomina de "apilamiento en seco".

Los relaves filtrados son primero espesados antes del proceso de filtrado, de manera que se obtenga el contenido de agua adecuado para su disposición final, la cual normalmente es mediante conformación de rellenos

compactados. Sin embargo, la pluviosidad y evaporación del sitio, el tiempo y área de desecación y la flexibilidad operacional pueden limitar la aplicación del filtrado de relaves [35].

En Latinoamérica, los primeros intentos de implementar y disponer relaves filtrados tuvieron lugar en operaciones de bajo rendimiento en regiones como el desierto de Atacama en Chile, donde la retención de agua es de gran importancia. En Colombia, el primer proyecto que los implementó fue Santa Rosa en Antioquia (ver Numeral 3.3).

4.2. Retrolenado de minas

Una "pasta de relaves" es una mezcla densa y viscosa de relaves y agua, que a diferencia de las suspensiones, no se segrega en reposo [36]. La pasta tiene consistencia de trabajo similar a la del concreto húmedo, y de hecho varias de las técnicas de caracterización geotécnica de pastas tienen su origen en la industria del concreto. La mayor ventaja de las pastas de relaves es que pueden transportarse eficientemente en tuberías sin los problemas de segregación o sedimentación que ocurren normalmente en las pulpas de relaves. Además, una vez depositados, los relaves se dejan secar y luego acopiar, minimizando así la huella del sitio de disposición [6]. La tecnología de pasta se originó en la industria de la minería de metales hace más de 30 años.

La aplicación de un aditivo espesante o cementante para la fabricación de pasta y relaves espesados es relativamente nueva [37], pero las operaciones de este tipo de relaves están popularizándose rápidamente. Más aún, el uso de agentes espesantes o cementantes para producir pasta con el fin de retrolenar minas tiene un potencial atractivo como alternativa a la disposición convencional. Particularmente, la tecnología para disponer relaves como relleno cementado en obras subterráneas está en pleno desarrollo en la actualidad [38].

El retrolenado de minas es por lo tanto un proceso mediante el cual los residuos mineros, combinados con pequeñas cantidades de cemento y/o roca estéril, se disponen hidráulicamente al interior de galerías ("stopes") con el fin de estabilizar el macizo rocoso, permitir la extracción completa del mineral adyacente y reducir la huella de disposición de residuos en superficie. Para facilitar el transporte de la pasta al interior de las galerías, el retrolenado típicamente implica usar grandes volúmenes de agua para mantener la pasta con consistencia fluida. Adicionalmente, el proceso de retrolenado normalmente requiere la construcción de barricadas estructurales ("mamparos") para bloquear el túnel de acceso a base de la galería ("stope drawpoint"; Fig. 8). De esta manera, el diseño de la disposición por retrolenado de pasta requiere calcular los esfuerzos que soportará la barricada durante y después del llenado [39].

Susceptibilidad química de pastas cementadas: Benzaazoua et al. (2002) muestran que las propiedades mecánicas y reológicas de la pasta cementada de relaves para retrolenado dependen de las propiedades físicas, químicas y mineralógicas de los relaves de la mina, los tipos de aditivos y sus proporciones [40].

También se conoce que algunos residuos mineros pueden generar drenaje ácido o alcalino en presencia de agua y oxígeno, por lo cual la presencia de sulfuros dentro de la pasta cementada, así como los sulfatos solubles, tiene efectos perjudiciales sobre la resistencia del relleno de pasta debido a ataque con ácido sulfúrico [41]. Estas alteraciones químicas no se limitan a un efecto de oxidación de la superficie y pueden progresar a lo largo de toda la masa de relleno. Específicamente, en análisis de núcleos extraídos de pastas curadas, se han evidenciado fracturas acompañadas de trazas de oxidación, típicas de desgaste químico [41]. Adicionalmente, la presencia de sulfuros en los relaves causa disolución de las fases cálcicas de los hidratos de cemento, deteriorando la pasta cementada. Por lo tanto, el desafío para asegurar la viabilidad y operatividad segura de la tecnología de pasta cementada es que el relleno sea capaz de estabilizar galerías subterráneas sin perder resistencia a largo plazo por alteración química [40].

La Fig. 9 muestra los componentes principales que afectan la calidad, trabajabilidad y curado de una pasta de relaves para relleno: composición química del cementante y los relaves, granulometría, densidad y contenido de sólidos y química del agua de mezcla.

Benzaazoua et al., 2002 utilizaron seis tipos de cementantes para producir diferentes mezclas de pasta de relleno con cuatro diferentes relaves sulfurados provenientes de minas canadienses [40]. Posteriormente, sometieron cada mezcla a ensayos de compresión simple. Estos autores encontraron que el contenido de sulfato del agua de mezcla afecta el proceso de hidratación, dependiendo del tipo de cementante y el tiempo de curado.

Además, se demostró que la química del cementante combinada con la química del agua de mezcla afectan la formación de hidratos primarios y secundarios durante el fraguado de la pasta.

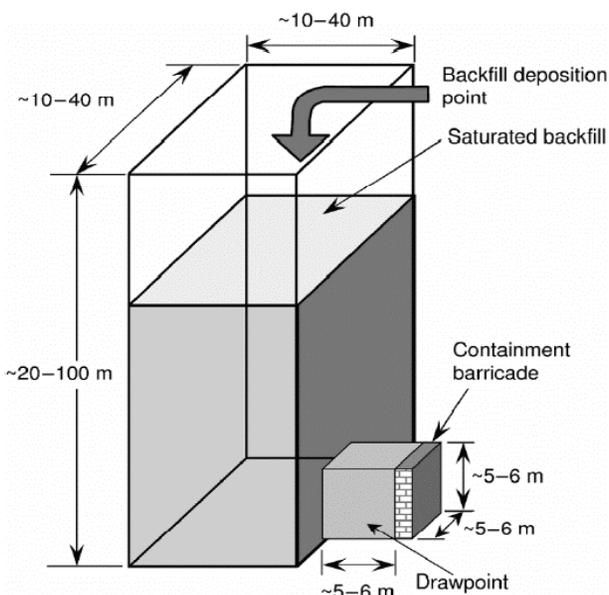


Figura 8. Configuración típica del stope y drawpoint
Fuente: [39]

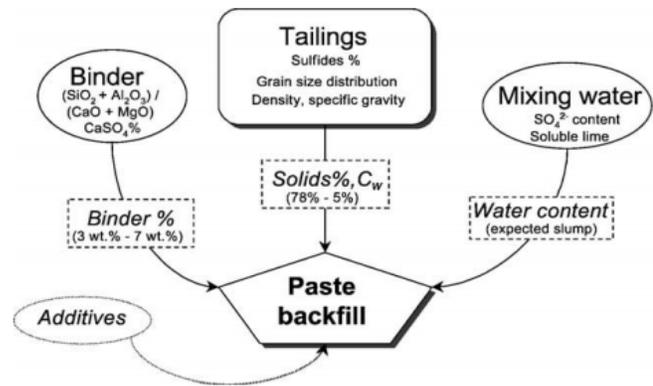


Figura 9. Componentes de una pasta cementada para retroleno de minas.
Fuente: [39]

En efecto, la calidad de la matriz de la pasta es función directa de la naturaleza de los hidratos precipitados. Este estudio resalta la complejidad de los materiales de pasta de relleno para la cual el aumento en resistencia depende de la calidad de sus tres principales componentes: relaves, cementante y agua de mezcla.

Comportamiento mecánico de pastas cementadas: Actualmente no existe una solución definitiva a los problemas de distribución de esfuerzos totales y cálculo de esfuerzos sobre una barricada estructural para contención de pasta cementada [39]. En pastas de relaves finos, la tasa de aumento de esfuerzo sobre la barricada depende de la tasa de llenado, la tasa de consolidación del material y la tasa de hidratación del cemento. La viscosidad, densidad y contenido de sólidos de la pasta también son factores determinantes en el uso de este relleno.

Por lo tanto, el tema aún constituye un riesgo significativo para la seguridad de operaciones mineras. Este riesgo se ha materializado a través de fallas de barricada reportadas recientes, por ejemplo entre Diciembre de 2003 y Diciembre de 2004 cuando hubo al menos siete fallas en todo el mundo, y en 2006 cuando hubo al menos cinco [42]. Estos reportes no dan detalles específicos de la falla ni nombre de las minas, pero sí mencionan que las fallas ocurrieron en operaciones de dos minas diferentes en Australia y que no causaron pérdidas humanas.

Los esfuerzos totales sobre la barricada durante el retroleno están influenciados por la interacción entre el relleno y las paredes de la galería. Rankine (2004) presenta análisis de esfuerzos sobre la barricada teniendo en cuenta los cambios graduales en resistencia y rigidez del material debido a la hidratación del cemento, demostrando que el acople adecuado típico de hidratación de cemento con tasas de llenado influye en la distribución de los esfuerzos resultantes [43].

Por otra parte, mediante simulaciones con elementos finitos [44] es posible examinar los factores que influyen en el "arqueo" de rellenos cementados, tanto para un escenario de vertido instantáneo como considerando el proceso de llenado. Estos autores muestran que el comportamiento de una galería es complejo, destacando que, si la tasa de llenado

es muy alta en relación con la tasa de consolidación de la pasta, no se produce arqueamiento, y el esfuerzo vertical es igual al esfuerzo total por peso propio. Por otra parte, en ausencia de consolidación, la tensión total horizontal es igual a la tensión total vertical, lo cual tiene implicaciones serias para las cargas de barricada. Los autores también hacen hincapié en la necesidad de acoplar el proceso de hidratación del cemento en modelos del proceso de relleno con relaves cementados.

Helinski et al. (2010) presentan un modelo constitutivo para describir el comportamiento de la pasta cementada, acoplado los procesos de consolidación e hidratación del cemento [39]. Para este fin, consideran el proceso de “auto-deseccación” de la pasta, entendido como la reducción de presión de agua intersticial en el material de relleno debido a la pérdida neta de volumen de agua en el proceso de hidratación. Sin embargo, estos autores indican que la tarea de determinar la tasa a la cual el agua se consume es muy compleja y se hace especialmente difícil de cuantificar debido a que en la hidratación del cemento participan al menos ocho reacciones químicas diferentes, cada una consumiendo cantidades diferentes de agua y a su vez cada una generando un volumen de hidrato de reacción diferente. Además, cada reacción comienza a una tasa e instante diferente y normalmente no todo el contenido total de cemento en la mezcla puede reaccionar.

Lo anterior demuestra que la eventual adopción de la tecnología de pasta cementada de relaves en un proyecto minero es una decisión que implica una caracterización avanzada y rigurosa del relave, el agua de mezcla y el cemento a utilizar, al igual que el análisis de la durabilidad de la pasta, su comportamiento e interacción mecánico-química con las galerías a retrellenar.

4.3. Realce de estructuras existentes (“piggy-backing”)

La disposición mediante realce de estructuras existentes, o incluso clausuradas, para contención y manejo de relaves (“piggy-backing”) es una técnica orientada a aumentar la capacidad de retención de relaves de dichas estructuras, en lo posible sin aumentar su huella en planta. Por lo tanto, consiste en ampliar las estructuras existentes principalmente hacia “arriba” en lugar de hacia “afuera” [45]. Esta estrategia de disposición se justifica normalmente en la extensa huella que ocupan las estructuras ya existentes y en la dificultad cada vez mayor de obtener licencia para la construcción de nuevas áreas de disposición. De las técnicas comunes de construcción de presas de relaves, aguas arriba, aguas abajo y línea central [46,47], los realces normalmente implementan el método aguas arriba. Este método consiste en elevar paulatinamente la presa mediante construcción de bermas bajas encima y detrás del dique del nivel existente (Fig. 10). A diferencia del método aguas arriba, el método aguas abajo consiste en vaciar y reconformar la fracción tamaño arena del relave, generalmente ciclada, sobre el talud aguas abajo del muro, mientras que el relave fino (“lamas”) se deposita hacia aguas arriba. Necesariamente, el método aguas abajo aumenta gradualmente la huella de la estructura. Finalmente, el método de línea central busca depositar la fracción arena hacia el costado aguas abajo y los finos hacia el lado aguas arriba, tal que la nueva cresta siga el mismo eje de la presa de arranque original.

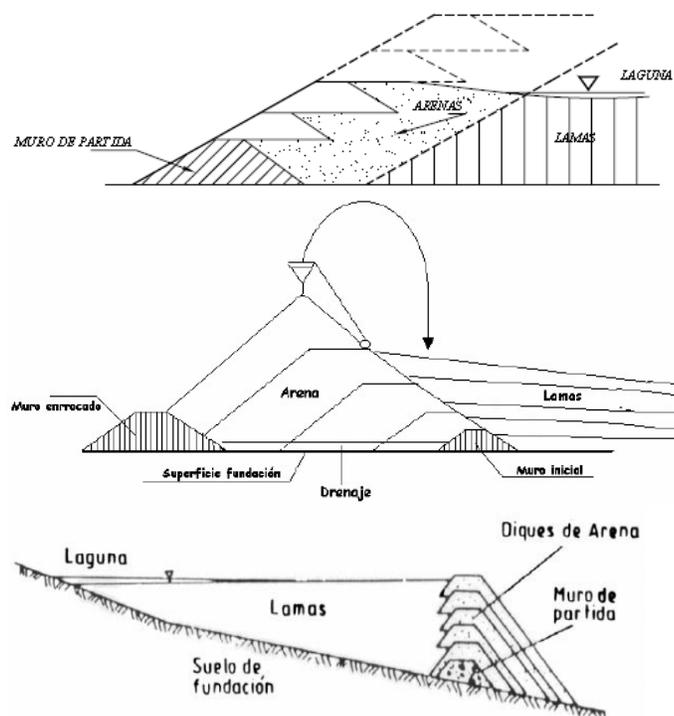


Figura 10 Métodos constructivos de presas de relaves: aguas arriba, aguas abajo, línea central.

Fuente: [6]

Independientemente de la técnica de construcción del realce, el objetivo es desarrollar en la estructura un “anillo exterior” estable y consolidado para contener el material saturado interior. Para mejorar la estabilidad del dique/anillo exterior, normalmente se implementan filtros de desagüe alrededor del perímetro los cuales controlan el nivel de agua infiltrada a través del dique perimetral.

La técnica de realce presenta múltiples retos que dificultan su implementación y aplicación. Primero, esta práctica no está legalmente permitida en países mineros ubicados en zonas sísmicas, como Chile, especialmente después del terremoto de El Cobre de 1965. Por otra parte, algunas estructuras de relaves clausuradas pueden simplemente carecer de obras de drenaje subsuperficial a nivel cimentación, o dichos drenajes pueden localizarse a un nivel más alto que el nivel original del terreno, lo cual los vuelve inoperantes.

Todo realce requiere obras de drenaje para mantener el nivel freático bajo la presa, facilitando así su consolidación y mejorando la estabilidad de sus taludes [45], particularmente teniendo en cuenta la posible incertidumbre en el comportamiento de la presa existente a realzar. Las obras de drenaje típicamente se construyen usando arena limpia, grava uniforme, tubería perforada y geotextil. El transporte de este material a la parte superior de una presa existente a realzar puede además ser dispendioso y costoso, y puede incluso causar retrasos en las operaciones normales de las instalaciones.

4.4. Disposición submarina

La disposición submarina de relaves consiste en verter los residuos de las minas en el mar por medio de una tubería sumergida, también denominada “emisario submarino”. La minería tiene larga historia de vertimiento de residuos en el mar, siendo los métodos más rudimentarios los de eliminación “superficial” que implican el vertido directo de residuos en un entorno cercano a la costa.

La práctica de disposición submarina se justifica frecuentemente en las siguientes causas [10,48]:

- Actividad sísmica: en zonas de alta actividad sísmica, la integridad de las estructuras tradicionales de contención de relaves no está garantizada, con riesgo de vertimiento súbito y catastrófico de relaves.
- Escasez de terreno: la construcción de un depósito tradicional de relaves normalmente requiere gran cantidad de terreno disponible, a menudo un área mayor que la huella de la propia mina.
- Drenaje ácido: dado que una de las causas del drenaje ácido de rocas y relaves es la exposición de minerales de sulfuro ante el oxígeno [9], la eliminación de la fuente de oxígeno debería ser eficaz para retrasar o eliminar el drenaje ácido. Por lo tanto, se argumenta que la disposición de relaves bajo el mar, en ambiente anóxico, es efectiva para estabilizar geoquímicamente los sulfuros, y eliminar o mitigar el drenaje ácido. La Fig. 11 presenta un modelo esquemático de un yacimiento mineral con sulfuros, indicando las zonas donde sulfuros, óxidos y sulfatos/cloruros dominan la asociación mineral. Esta zonificación sin embargo es solo una simplificación de los diferentes grupos minerales que pueden coexistir. A la izquierda se resalta la zona en donde se supone que se pueden disponer los relaves (mar profundo en condiciones redox de tipo reductoras) y su régimen geoquímico dominante.
- Estética: se argumenta que los impactos estéticos de las estructuras convencionales de manejo de relaves se evitan en gran medida a través de la disposición submarina. En particular, se evita ocupar grandes extensiones de terreno, el proceso no da lugar a paisajes elevados artificialmente, y ni el polvo ni los olores afectan las comunidades cercanas al proyecto.

En particular, en regiones del Pacífico Occidental, varias empresas mineras afirman que la disposición submarina de relaves (“submarine tailings disposal”, STD) es la solución óptima para manejo de estos residuos.

Estas empresas argumentan que, en dicha región del mundo, la contención de residuos sobre tierra firme es muy arriesgada dadas las experiencias de sismos y la alta precipitación de la zona. Adicionalmente, las islas montañosas carecen de espacio para el almacenamiento de relaves, y son regiones donde el terreno se requiere con urgencia para actividades agrícolas.

A pesar de los anteriores argumentos, científicamente se sabe relativamente poco sobre el medio ambiente subacuático (especialmente el profundo) y los procesos ecológicos que

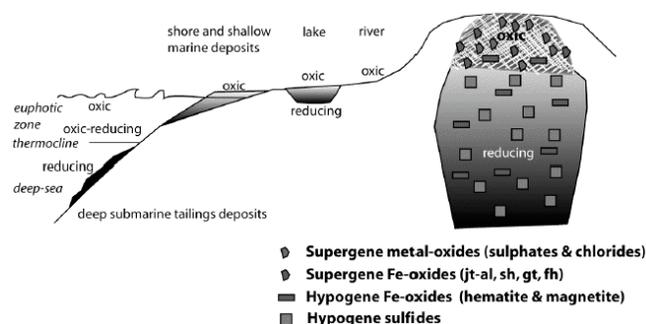


Figura 11. Modelo esquemático de un yacimiento mineral con sulfuros y área de posible disposición submarina.

Fuente: [10]

tienen lugar a tales profundidades. Además, existe amplia evidencia de las desventajas y riesgos de la disposición submarina de relaves [10], principalmente:

- Asfixia de organismos bénticos y alteración física y química del hábitat del fondo marino
- Reducción del número de especies y biodiversidad de las comunidades marinas
- Riesgo de liberación de compuestos tóxicos de los residuos al agua de mar
- Bio-acumulación de metales pesados a lo largo de la cadena alimenticia, y en última instancia hasta llegar al pescado para el consumo humano
- Huella de mayor amplitud en el fondo del mar que en tierra firme
- Movilidad de los residuos a diversas regiones de los ecosistemas marinos debido a surgencia y corrientes submarinas

Por otra parte, se conoce que en las tuberías de transporte de relaves se producen fugas, tanto en tierra firme como en el mar, ya que los residuos son muy abrasivos [49]. Este problema no es exclusivo de tuberías antiguas, sino también de las recientes. En el mar, los emisarios además son vulnerables a deslizamientos de tierra, tormentas y tsunamis. La ruptura de un tubo de transporte submarino de relaves tiene graves impactos en zonas poco profundas y ricas en arrecifes de coral.

A pesar de lo anterior, el vertido submarino de relaves a poca profundidad ha ocurrido recientemente con consecuencias serias, como los casos de la mina Placer Dome’s Marcopper en Filipinas (1975-1991), la mina Newmont’s Minahasa Raya en Indonesia (iniciado en 1996) y la mina Misima en Papua-Nueva Guinea (1988-1993) en la cual unos 50 millones de toneladas se vertieron sobre un arrecife de coral cercano a la costa [49].

Desde la década de 1970, se han implementado sistemas de disposición submarina de relaves que los depositan a profundidades intermedias, como las minas Copper Island en Canadá y Atlas en Filipinas. Estos sistemas también han causado impactos sobre el medio ambiente debido a que los relaves no se localizaron de acuerdo con las predicciones de los consultores, sino que incluso lograron volver a la superficie a causa de corrientes marinas.

Por otra parte, ha habido esfuerzos para desarrollar sistemas de disposición más “sofisticada” de relaves en profundidad con el objeto de depositarlos a profundidades suficientes para evitar la mezcla con la columna superficial de agua [48]. Para este fin, típicamente se procesan los relaves en una suspensión de aireada que posteriormente se canaliza hacia sitio de disposición. Adicionalmente, se suelen usar compuestos químicos para flocular las partículas de relave, evitando la flotación y mezcla con agua de mar, para así aumentar la densidad del material y la tasa de consolidación en el lugar escogido para depositación.

El Protocolo de Londres sobre prevención de la contaminación marina por disposición de residuos es el principal instrumento internacional para la protección de los océanos de la contaminación antropogénica. Actualmente, 42 países han ratificado el Protocolo de Londres, incluyendo países de amplia tradición minera, tales como Australia, Canadá, China y Suecia. Sin embargo, países como Nueva Guinea y Estados Unidos no han firmado el convenio, aunque Estados Unidos en 1991 creó la norma de calidad de agua conocida como “Clean Water Act” [10], la cual especifica una política de “cero vertimientos” hacia las aguas marinas, es decir, no es aceptable ningún tipo de disposición de residuos de mina en el medio marino. Lo anterior efectivamente ha prohibido las prácticas de disposición submarina de relaves en EEUU.

Por su parte, en Australia el vertimiento de residuos en el mar está regulado por la Ley de Protección del Medio Ambiente (1981) y sus normas asociadas. Esta ley prohíbe la disposición de residuos considerados demasiado perjudiciales para el medio ambiente marino y regula la disposición de algunos residuos permitidos, de menor impacto. Australia es también signatario del Protocolo de Londres. Sin embargo, se puede argumentar que en Australia no existe una prohibición explícita de la disposición submarina de relaves. Adicionalmente, el Manual del Gobierno de Australia sobre gestión de residuos indica que, a pesar de que la disposición submarina de relaves no es explícitamente ilegal en Australia, cualquier proyecto encaminado a implementar este método estará sujeto un escrutinio robusto y a un proceso de aprobación muy complejo [48].

En Canadá, el Reglamento de Efluentes explícitamente prohíbe el vertido de residuos en medio marino. Previo a estas regulaciones, emitidas en 2002, la eliminación de relaves bajo el mar era legalmente posible.

Finalmente, el documento guía de la Comisión Europea de Mejores Técnicas Disponibles [50], orientado hacia la gestión de relaves y roca estéril provenientes de actividades mineras, establece que la disposición submarina de relaves puede ser un método aceptable de gestión de residuos cuando hay potencial de generación de drenaje ácido de relaves y roca.

De acuerdo con las reglamentaciones y políticas mundiales en cuanto a la regulación de disposición submarina de relaves, es clara la posición mayoritaria de no permitir la disposición de relaves en medio marino. Sin embargo, aún se posiciona como una oportunidad

investigativa para entender tanto los efectos sobre la ecología de mar profundo como para revisar el tema de drenaje ácido.

5. Oportunidades en Colombia

Aunque Colombia es un país de amplia historia y tradición minera, no es un país de grandes estructuras de disposición y manejo de relaves o colas ni roca “estéril”. Sin embargo, Colombia no puede ser ajena a la problemática de la disposición moderna de los relaves o colas, la cual presenta desafíos significativos porque, aunque el país muestra una economía en crecimiento, las innovaciones tecnológicas son escasas y el recurso humano especializado para el manejo de estos residuos es limitado. Por lo tanto, los nuevos proyectos de minería a gran escala en el país (ver Numeral 3.3) requieren no solamente importar y adaptar la experiencia de especialistas extranjeros sino, de manera imperativa y urgente, desarrollar localmente el capital humano de ingeniería que conciba, diseñe, construya, opere, mantenga y cierre estas estructuras. En este sentido, el conocimiento necesario no solamente incluye los temas técnicos de disposición y estabilidad, sino la sostenibilidad ambiental y social de estos proyectos.

En cuanto a las tecnologías emergentes para el manejo de relaves, con ellas se busca minimizar el pasivo que dejan las estructuras convencionales de disposición, mediante la reducción del área superficial, en el ánimo de impulsar la viabilidad de un proyecto minero. Las condiciones topográficas de las principales zonas mineras de Colombia permiten una amplia gama de condiciones, desde valles y llanuras hasta zonas de alta montaña, normalmente complejas. Por lo tanto, siempre que las condiciones lo permitan, es fundamental orientar la disposición de relaves hacia conseguir la mínima huella posible. De esta manera, el espesamiento y/o filtrado controlado de relaves constituyen métodos efectivos de disposición, particularmente para zonas montañosas donde el espacio disponible para proyectar estructuras de contención es muy escaso.

En este sentido, la disposición al interior de los mismos espacios resultantes de la actividad extractiva también adquiere un significado muy importante, tanto en minería a cielo abierto como subterránea. Los relaves, durante o después de su producción, deberían entonces retornarse a los propios pits o galerías subterráneas, siempre y cuando se garantice su estabilidad y que no se degraden las condiciones hidrogeológicas locales. Así, las tecnologías de retrolleado con pasta de relaves surgen como prácticas deseables para la restauración del entorno. Igualmente, estas técnicas permitirían la gestión de los residuos sólidos mineros con la posibilidad adicional de rehabilitar las áreas restauradas con bosques, actividades recreativas y eventualmente agricultura. Por supuesto, el principal reto consiste en garantizar la estabilidad geotécnica y química del relleno, por ejemplo en términos de seguridad operativa de los trabajadores y posible drenaje ácido.

Otra posible alternativa para el manejo de pits mineros clausurados, que no se encuentren muy alejados de áreas urbanas (como es el caso de algunas minas de oro en

Antioquia cercanas a Medellín, o minas de agregados pétreos cercanas a Bogotá), es su reaprovechamiento como sitio de disposición de residuos sólidos urbanos. Por supuesto, los retos principales de esta alternativa incluyen la impermeabilización y estabilidad geotécnica del terreno de cimentación y el manejo de lixiviados provenientes de los residuos. Igualmente, se puede estudiar la viabilidad de reaprovechar benéficamente los residuos mineros para la infraestructura de la propia mina o, en proyectos cercanos a centros urbanos, como material de construcción tipo relleno. El impacto de estas alternativas se puede medir tanto en términos económicos como de sostenibilidad ambiental.

En cuanto a la disposición de relaves en medio submarino, la información disponible para Colombia es prácticamente inexistente, aunque es claro que históricamente numerosas malas prácticas mineras han dejado huella en múltiples cuerpos de agua. Dado que Colombia no es un país tecnológicamente avanzado en este tema, es fundamental desarrollar políticas y/o unirse a protocolos internacionales de tal forma que se impida el vertimiento de los residuos mineros al océano, al menos hasta que la evidencia científica no aclare los impactos que esta práctica puede tener sobre el lecho marino.

En general, el planteamiento de políticas públicas e institucionales debería enfocarse a estrategias para buscar desarrollo e investigaciones alrededor de las diferentes tecnologías de disposición, tanto tradicionales como emergentes. Específicamente, se requieren planes de mediano y largo plazo con acciones objetivas para atacar los grandes retos que impone la disposición de relaves para el país desde las perspectivas ambientales, económicas, sociales y tecnológicas.

Por ejemplo, los contratos con multinacionales mineras podrían incluir cláusulas que exijan productos de desarrollo tecnológico para disposición de relaves y transferencia de conocimiento, y acordar estrategias para que la industria nacional pueda igualmente suplir estos requerimientos. Si bien en el país las empresas multinacionales están incorporando nuevas tecnologías para la disposición de relaves, las entidades gubernamentales y de control encargadas no necesariamente están al día con respecto a dichos avances técnicos. Más aún, la ausencia de políticas claras y exigencias específicas para el manejo de los residuos limita el control responsable de estos procesos.

Finalmente, la producción minera actual en Colombia tiene la necesidad de investigar sobre modelación de depósitos minerales, geomecánica de macizos rocosos ante la presencia de excavaciones múltiples o rellenos (en condiciones subterráneas o a cielo abierto), simulación y modelación de explotaciones asociadas al planeamiento minero y el amplio tema del cierre de minas. Con respecto a la exploración, se tiene evidencia de que la falta de modelos geológicos apropiados no permite estimar de manera global el nivel de reservas mineras del país, los potenciales minerales por explotar y la planeación estratégica minera por parte de los organismos de gobierno [51]. Lo anterior redundaría en el atraso en cuanto a políticas de explotación

minera de minerales de alto valor agregado y capaces de intervenir en cadenas productivas.

6. Conclusiones

Colombia es un país de tradición minera, pero no cuenta con amplia experiencia en el diseño y gestión de grandes estructuras de disposición de relaves ni roca estéril, tanto desde el punto de vista técnico como normativo. Adicionalmente, los avances tecnológicos en este campo son escasos y el recurso humano especializado para el manejo de estos residuos es limitado. Más aún, la gran problemática socio-ambiental asociada con minería informal es extremadamente preocupante.

Actualmente, un número de proyectos mineros de mediana y gran escala en Colombia se encuentran en etapa de diseño u operativa, con proyección de manejo de cantidades significativas de relaves. Para estos proyectos, el país ha generado guías minero ambientales aplicables a todas las fases del ciclo minero. Sin embargo, dado que las presas convencionales de contención de relaves tienen estadísticamente 100 veces más probabilidad de falla que las presas de contención de agua, existe gran preocupación por el desempeño de posibles grandes estructuras de disposición de relaves en el futuro.

Las tecnologías emergentes mundiales para el manejo de relaves buscan minimizar la huella que dejan las estructuras convencionales de disposición, especialmente mediante la reducción del área superficial. Entre dichas tecnologías resaltan el espesamiento y/o filtrado de relaves, el retrolleado de minas con pasta de relaves, el realce de estructuras ya existentes, y la disposición submarina.

Las principales oportunidades en Colombia para la adopción de tecnologías modernas de disposición final comprenden que el espesamiento, filtrado y/o retrolleado controlado de relaves minimizarían la huella minera en zonas montañosas, en donde se encuentran la mayoría de títulos mineros del país. Sin embargo, el principal reto para la implementación del retrolleado consiste en garantizar la estabilidad geotécnica y química del propio relleno. En todo caso, la validación de toda tecnología requiere instrumentación robusta y monitoreo juicioso, tanto geotécnico como de calidad del agua.

Se concluye también que el caso particular del vertimiento de residuos mineros al océano debe evitarse, al menos hasta que la evidencia científica no aclare los impactos que esta práctica tiene sobre los diferentes niveles del lecho marino. Científicamente se sabe relativamente poco sobre el medio ambiente subacuático, especialmente el profundo, y los procesos ecológicos que tienen lugar a tales profundidades. Además, normalmente los relaves no se localizan de acuerdo con las predicciones de los consultores, sino que incluso logran volver a la superficie a causa de corrientes marinas. El Protocolo de Londres sobre prevención de la contaminación marina por disposición de residuos, ratificado por 42 países, y el “Clean Water Act” en Estados Unidos constituyen marcos de referencia

internacionales que Colombia debería considerar acatar y suscribir.

Como principal limitación para implementar tecnologías emergentes en Colombia, se tiene que el país requiere desarrollar en el corto plazo el capital humano de ingeniería con las competencias para abordar el manejo moderno masivo de residuos mineros, con visión tanto de disposición y estabilidad como de sostenibilidad ambiental y social. En este sentido, el planteamiento de políticas públicas e institucionales debería enfocarse a estrategias para buscar desarrollo, investigación e innovaciones alrededor de las diferentes tecnologías de disposición, tanto tradicionales como emergentes.

Agradecimientos

Los autores agradecen las valiosas discusiones con el Profesor Andy Fourie de University of Western Australia, que permitieron enriquecer este artículo. Igualmente, agradecen al Geólogo John A. Sánchez por sus comentarios sobre el manuscrito, y a Juan S. Larrahondo C. por su apoyo en la edición del artículo para publicación.

Referencias

- [1] Ali, S.H., Giurco, D., Arndt, N., Nickless, E., Brown, G., Demetriades, A. et al., Mineral supply for sustainable development requires resource governance. *Nature* [online]. 543(7645), pp. 367-372, 2017. Available at: <http://www.nature.com/doi/10.1038/nature21359>
- [2] Environmental Law Alliance Worldwide (ELAW). Guía para evaluar EIAs de proyectos mineros [online]. 2010. Available at: www.elaw.org
- [3] Fourie, A.B., Notas del curso de verano "Integrated Tailings Management." Bogotá, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana; 2016.
- [4] Fourie, A.B., No more tailings dams! Are these realistic alternatives? In: *Tailings 2015*. Santiago, Chile: GECAMIN; 2015.
- [5] Lu, Z. and Cai, M., Disposal methods on solid wastes from mines in transition from open-pit to underground mining. *Procedia Environmental Sciences*. 16, pp. 715-721, 2012. DOI: 10.1016/j.proenv.2012.10.098
- [6] SERNAGEOMIN. Guía técnica de operación y control de depósitos de relaves. 2007.
- [7] Dimitrova, R.S. and Yanful, E.K., Factors affecting the shear strength of mine tailings/clay mixtures with varying clay content and clay mineralogy. *Engineering Geology*, Elsevier B.V. [online]. 125, pp. 11-25, 2012. Available at: DOI: 10.1016/j.enggeo.2011.10.013
- [8] Dimitrova, R.S. and Yanful, E.K., Undrained strength of deposited mine tailings beds: effect of water content, effective stress and time of consolidation. *Geotechnical and Geological Engineering*. 29(5), pp. 935-951, 2011. DOI: 10.1007/s10706-011-9428-7
- [9] Robertson, S. and Kirsten Inc., Draft acid rock drainage technical guide, [online]. Vol. 1, Vancouver, BC, Canada, 1989. Available at: <http://www.empr.gov.bc.ca/Mining/Geoscience/PublicationsCatalogue/MiscellaneousPublications/Documents/DraftAcidRockDrainageTechGuideVol.1.pdf>
- [10] Dold, B., Submarine Tailings Disposal (STD)—A review. *Minerals* [online]. 4(3), pp. 642-666, 2014. Available at: <http://www.mdpi.com/2075-163X/4/3/642>
- [11] Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Drenaje ácido de mina. Generación y tratamiento, 1984, 140 P.
- [12] Ministerio de Energía y Minas del Perú. Guía ambiental para el manejo de relaves mineros, 1995.
- [13] Golder Associates. Galería de proyectos. <http://www.golder.com.pe>. 2016.
- [14] Klohn, E.J., Tailings dams in Canada. *Geotechnical News*. 1997.
- [15] Compañía Minera Antamina. Componentes de la mina. <http://www.antamina.com/>. 2016.
- [16] Callahan, P., Antamina field trip (Comunicación personal). Atlanta, GA; 2011.
- [17] International Commission on Large Dams (ICOLD). Tailings dams - Risk of dangerous occurrences (Bulletin 121). Paris, 2001.
- [18] Azam, S. and Li, Q., Tailings dam failures: a review of the last one hundred years. *Geotechnical News*. 28(4), pp. 50-53, 2010.
- [19] WISE. Chronology of major tailings dam failures. [Online]. Available at: <http://www.wise-uranium.org/mdaf.html>. 2016.
- [20] Escobar, A. y Martínez, H., El sector minero colombiano actual. En: *Insumos para el desarrollo del Plan Nacional de Ordenamiento Minero*. 2014, pp. 1-29.
- [21] Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín y Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). Definición de los escenarios y estrategias para el sector minero colombiano con una visión a 20 años, 2014.
- [22] Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME). Plan nacional para el desarrollo minero: visión al año 2019 [online]. Republica de Colombia; 2006, 125 P. Available at: http://www.upme.gov.co/Docs/PNDM_2019_Final.pdf
- [23] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Política ambiental para la gestión integral de residuos o desechos peligrosos [online]. 2005, 122 P. Available at: https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialUrbana/pdf/sustancias_químicas_y_residuos_peligrosos/Politica_Residuos_peligrosos.pdf
- [24] Morgenstern, N., Vick, S.G., Watts, B.D. and Viotti, C., The Fundão tailings dam investigation [online]. 2016. Available at: <http://fundaoinvestigation.com/>
- [25] Ministerio de Minas & Energía y Ministerio de Ambiente. Guía Minero Ambiental 2-Explotación. 2001, 112 P.
- [26] Ministerio de Ambiente. Guía Minero Ambiental 3-Beneficio y transformación. Republica de Colombia, 2002, pp. 1-109.
- [27] Anglo Gold Ashanti. Resumen: nuestra posición. Informe de Colombia Solidarity Campaign, La Colosa, crónica de una muerte anunciada. 2014.
- [28] Colombia Solidarity Campaign. La Colosa: una muerte anunciada [online]. London: BM Colombia Solidarity Campaign, 2013, 116 P. Available at: https://www.colombiasolidarity.org.uk/attachments/article/610/LA_COLOSA_Una_Muerte_Anunciada.pdf
- [29] Anglo Gold Ashanti. Estudio de impacto ambiental 2015 - Proyecto minero Gramalote. 2015.
- [30] Red Eagle, Golder, A., Amended NI 43-101 Technical report feasibility study of Santa Rosa Gold. 2014.
- [31] Wilson, S., Olin, E., Tinucci, J., Swanson, B., Poeck, J. and Willow, M., NI 43-101 Technical report-preliminary economic assessment Miraflores property. 2013, pp. 1-296.
- [32] Cobos, D., Visita técnica proyecto minero Santa Rosa (Comunicación personal), 2016.
- [33] Ministerio de Minas y Energía. Política nacional para la formalización de la minería en Colombia. Republica de Colombia, 2014, pp. 1-111.
- [34] Tecnología Minera. Espesadores. [en línea]. Disponible en: <http://www.tecnologiaminera.com/tm/novedad.php?id=98>
- [35] Golder Associates. Experiencias de operación de depósitos de relaves espesados y filtrados. [en línea]. Disponible en: http://www.iimp.org.pe/pptjm/jm20131017_relaves.pdf. 2013. p. 1-54.
- [36] Verburg, R.B.M., Use of paste technology for tailings disposal: potential environmental benefits and requirements for geochemical characterization. In: *IMWA Symposium 2001*. 2001, 13 P.

- [37] Slottee, J.S., Update on the application of paste thickeners for tailings disposal - mine paste backfill. In: International Seminar on Paste and Thickened Tailings Paste and Thickened Tailings-Paste 2004. 2004, pp. 1-7.
- [38] Jewell, R., The evolution of paste and thickened tailings. Australian Centre for Geomechanics Newsletter, 35(December), pp. 1-3, 2010.
- [39] Helinski, M., Fahey, M. and Fourie, A., Coupled two-dimensional finite element modelling of mine backfilling with cemented tailings. Canadian Geotechnical Journal. 47(11), pp. 1187-1200, 2010. DOI: 10.1139/T10-020
- [40] Benzaazoua, M., Belem, T. and Bussi re, B., Chemical factors that influence the performance of mine sulphidic paste backfill. Cement and Concrete Research. 32(7), pp. 1133-1144, 2002. DOI: 10.1016/S0008-8846(02)00752-4
- [41] Benzaazoua, M., Ouellet, J., Servant, S., Newman, P. and Verburg, R., Cementitious backfill with high sulfur content: physical, chemical, and mineralogical characterization. Cement and Concrete Research. 29(5), pp. 719-725, 1999. DOI: 10.1016/S0008-8846(99)00023-X
- [42] Revell, M. and Sainsbury, D.P., Paste bulkhead failures. International Symposium on Mine Fill-Minefill 2007, Montreal, Quebec, 2007.
- [43] Rankine, R.M.A., The geotechnical characterisation and stability analysis of BHP Billiton's Cannington Mine paste fill. Ph.D. Thesis, James Cook University, Australia, 2004.
- [44] Fahey, M., Helinski, M. and Fourie, A., Some aspects of the mechanics of arching in backfilled stopes. Canadian Geotechnical Journal. 46(11), pp. 1322-1336, 2009. DOI: 10.1139/T09-063
- [45] Gewanlal, C. and Robinson, B., A geosynthetic alternative to traditional sand filter drains in a piggy-back tailings storage facility. South African Institution of Civil Engineers. (April), pp. 64-68, 2012.
- [46] Blight, G.E., Geotechnical engineering for mine waste storage facilities. CRC Press/Taylor & Francis Group; 2010, 634 P. DOI: 10.1201/9780203859407
- [47] Vick, S.G., Planning, design, and analysis of tailings dams. BiTech Publishers, 1990.
- [48] Cornwall, N., Submarine tailings disposal in Norway's fjords: is it the best option?. MSc. Thesis, IIIIEE, 2013.
- [49] Coumans, C., Introduction: submarine tailings disposal. STD Toolkit. [online]. 2002. Available at: https://miningwatch.ca/sites/default/files/01.STDtoolkit.intr_.pdf
- [50] European Commission. Reference document on best available techniques for management of tailings and waste-rock in mining activities [online]. 2009. Available at: http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/mmr_adopted_0109.pdf
- [51] COLCIENCIAS. Ciencia, tecnología e innovación para el desarrollo minero de colombia [online]. 2014. Available at: http://www1.upme.gov.co/sites/default/files/forum_topic/3655/files/ciencia_y_tecnologia_para_la_mineria.pdf

L.N. Beltrán-Rodríguez, is received in Civil Engineering degree from Universidad Nacional de Colombia (Bogotá), and MSc. in Civil Engineering from Pontificia Universidad Javeriana, Colombia. Her graduate research involved physical and numerical modeling of tailings flow via instrumented flume experiments and CFD simulations. Her professional experience focuses on geotechnical engineering, particularly subsurface field exploration, geotechnical building foundation design, slope stability analyses, and landslide hazard and risk mapping.
ORCID: 0000-0003-0136-2241

J.M. Larrahondo, is received both Ph.D. and MSc, of Science in Civil Engineering from the Georgia Institute of Technology, as well as a Civil Engineering degree from Universidad Nacional de Colombia. His research interests include environmental geotechnics; geotechnical behavior, engineered disposal, and beneficial reuse of municipal, mining, and energy waste; gassy soils; engineered geomaterials for geotechnical applications; and in-situ soil testing via direct-push methods. His professional experience includes geotechnical dam design, slope stability, and landslide hazard and risk mapping. He frequently serves as peer reviewer for international journals. He is currently the leader of Pontificia Universidad Javeriana's CECATA research group.
ORCID: 0000-0002-3681-3383

D. Cobos, holds PhD. and MSc. in Geotechnical Engineering from the University of California at Berkeley. He specializes in mining waste management, foundation analysis, risk mitigation, and forensic engineering. His professional experience includes tenures at URS Corp. (currently AECOM), Golder Associates, Geotecnolog a, and recently he heads Dynami Geoconsulting in Colombia. He is an adjunct faculty at Pontificia Universidad Javeriana and Escuela Colombiana de Ingeniería.
ORCID: 0000-0003-3118-2268