

Manejo estratégico de la producción de residuos estériles de minería sustentable, utilizando prácticas mineras eco-eficientes en Colombia

Strategic management of the production of sterile wastes of sustainable mining, using eco-efficient mining practices in Colombia

Gestão estratégica da produção de resíduos estéreis de mineração sustentável utilizando práticas de mineração eco-eficientes na Colômbia

Efraín Casadiego Quintero¹, Andrés Giovanni Gutiérrez Bayona², Miguel Ángel Herrera Lopez³ & ⁴ Martha Liliana Villanueva Paez

¹Geólogo, Magister en Geología, ²Ingeniero Civil, Magister en Geotecnia, ³Ingeniero Civil, ⁴Ingeniero Civil.

^{1,2,3,4}Fundación Universitaria Agraria de Colombia.

¹casadiego.efrain@uniagraria.edu.co, ²gutierrez.andres@uniagraria.edu.co, ³herrera.miguel@uniagraria.edu.co, ⁴paez.liliana@uniagraria.edu.co

Resumen

La minería es considerada una de las actividades económicas que más produce contaminación a las fuentes hídricas y suelos, además de ser la explotación de un recurso finito en el cual se generan residuos estériles que terminan como escombros o vertidos en ríos. La responsabilidad y conciencia que han tomado las empresas y universidades sobre los daños causados ha hecho que se innove e invierta en tecnología que mejore la extracción y genere un sistema donde se pueda producir materiales sin usar químicos como cianuro y mercurio. En este artículo se presenta un trabajo realizado en la mina “Sociedad Minera la Elsy en Vetas, Santander” en conjunto con un grupo de investigación para diseñar un sistema sustentable efectivo de extracción y se muestra el estudio realizado a los residuos estériles para utilizarlos como agregados para construcción.

Palabras clave: minería sustentable, residuo estéril, sistema sostenible, agregados, oro.

Abstract

Mining is considered one of the economic activities that most produces pollution to water sources and soils, in addition to being the exploitation of a finite resource in which they generate sterile residues that end up as rubble or discharges in rivers. The responsibility and awareness that companies and universities have taken on the damage caused has made it innovate and invest in technology that improves extraction and generates a system where materials can be produced without using chemicals such as cyanide and mercury. This article presents a work carried out in the mine “Sociedad Minera la Elsy en Vetas, Santander” in conjunction with a research group to design a sustainable effective extraction system and shows the study carried out on sterile waste for use them as aggregates for construction.

Key-words: sustainable mining, sterile residue, sustainable system, aggregates, gold.

Resumo

A mineração é considerada uma das atividades econômicas que produz a maior poluição para fontes de água e solos, além de ser a exploração de um recurso finito em que geram resíduos estéreis que acabam por detritos ou descargas em rios. A responsabilidade e a conscientização que as empresas e as universidades assumiram sobre os danos causados fizeram com que ela fosse inovada e investida em tecnologia que melhore a extração e gere um sistema onde você possa produzir

materiais sem usar produtos químicos como cianeto e mercúrio. Este artigo apresenta um trabalho realizado na mina “Elsy Mineral Society em Vetas, Santander”, em conjunto com um grupo de pesquisa para projetar um sistema efetivo de extração sustentável e mostra o estudo realizado sobre o desperdício estéril a ser usado como agregados para construção.

Palavras chave: mineração sustentável, resíduos estéreis, sistema sustentável, agregados, ouro.

Introducción

La humanidad vive una época donde los cambios rápidos en el clima, la preocupación por la contaminación de las fuentes hídricas y el aumento de su consumo, le sigue el paso al incremento de la población que contrasta con sobre explotación de los recursos naturales. La minería de oro es una de las explotaciones de yacimientos que genera más contaminación, generada por los químicos (cianuro y mercurio) que se utilizan durante el proceso de extracción del mineral de interés de la roca y los ácidos generados, que posteriormente van a parar a las fuentes hídricas (Díaz-Arriaga, 2014).

El manejo de los residuos generados antes, durante y después del proceso de extracción no es controlado y terminan siendo escombros en lugares no adecuados o vertido en ríos (Lébre, Corder & Golev, 2017). Esa clase de manejo puede generar enfermedades a largo plazo en las personas cercanas a estos ríos y los escombros amontonados pueden generar problemas de estabilidad por deslizamiento o volcamiento.

Los autores proponen que los elementos claves para incentivar a las empresas mineras a generar una minería sostenible es con procesos que les genere una mayor extracción del mineral de interés y reutilización de los residuos estériles (Laurence, 2011). También es importante tener en cuenta el aspecto cultural, social y político. El mayor problema para generar innovación en la minería sostenible es

la poca inversión en tecnología y la capacitación de las empresas mineras.

El objetivo de este artículo es revisar una metodología para realizar minería de oro sustentable, donde se optimice la producción y se le dé un uso a los residuos estériles (escoria) que algunos casos son abandonados como escombros o vertido en los ríos.

Minería sostenible y uso de nuevas tecnologías

En la minería sostenible de oro y la generación de residuos estériles, son importantes cuatro procesos: la extracción en la mina, la selección del material grueso, el proceso trituración-selección y el procesamiento metalúrgico (Lébre, Corder & Golev, 2017). Durante cada una de estas etapas se revisa la litología, mineralogía y granulometría de la roca. Es importante evaluar la recuperación de los minerales de valor por medio de métodos que no utilicen químicos o aumenten la generación de ácidos como el Cu, Pb, y Zn (Dudka & Adriano, 1997). Las empresas mineras que realizan minería sostenible reemplazaron el cianuro y mercurio para extraer los minerales con innovación en tecnología que funciona a partir de selección eficiente, trituración del material, diferenciación granulométrica, gravedad, propiedades físicas “magnéticas y eléctricas” y un sistema hidráulico (Lottermoser, 2011). Para profundizar en esta metodología se describirá un caso de estudio en Vetas, Santander, con coordenadas X: 1132426; Y: 1300934 donde se aplican los procesos mencionados (Figura 1).

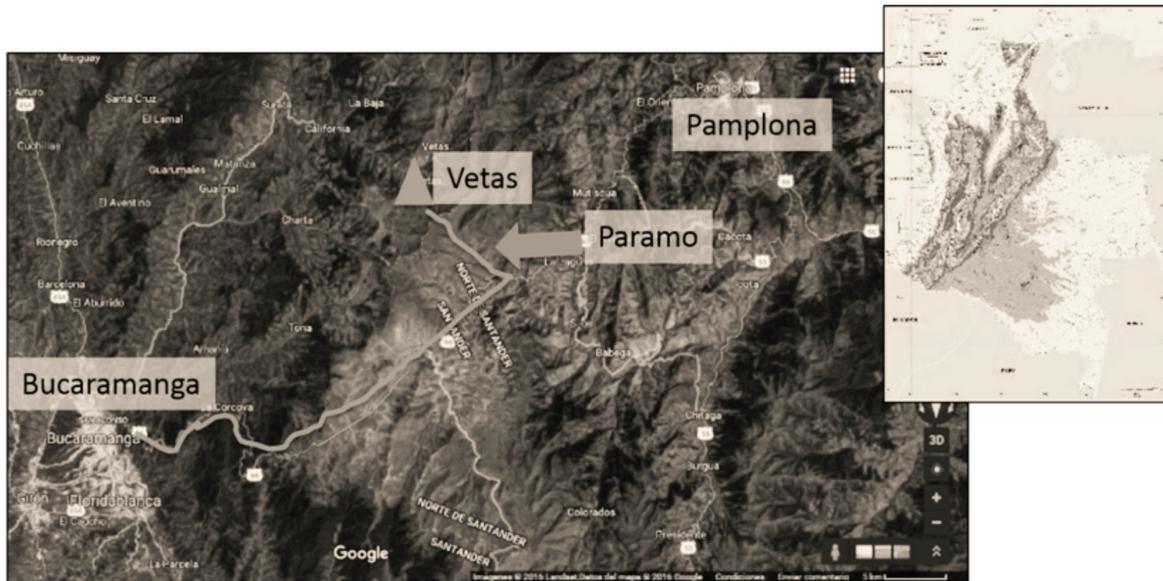


Figura 1. Ubicación del caso de estudio, Vetas, Santander.

Fuente: Google Map y modificado de: www.gimnasiovirtual.edu.co

Materiales y métodos

Debido a la variación del tamaño del residuo estéril desde bloques mayores a 20 cm hasta tamaño arcilla es necesario utilizar varias técnicas para medir el tamaño y la composición de la misma. Para la selección del material tamaño bloque, el cual se considera como estéril, se utiliza una malla 20x20 (Figura 2), los bloques están constituidos por el gneis de Bucaramanga, el cual es una roca masiva, tenaz, compacta, bandeada (García Ramírez & Uribe Portilla, E., 2006),

con tamaños mayores a 20 cm. Las partículas de oro se encuentran dentro de filones cuarzosos con sulfuros asociados en algunos casos con pirita. Estos filones tienen baja resistencia mecánica y terminan fracturándose en tamaños menores de 20 cm de diámetro en el momento de que la roca se dinamita. Los filones generalmente se encuentran dentro de una roca encajante, la cual está compuesta por la roca gneis (Figura 3) que es un material estéril o con poco porcentaje de oro económicamente viable.



Figura 2. Malla de selección 20x20 cm para el paso del material con mayor porcentaje de oro.

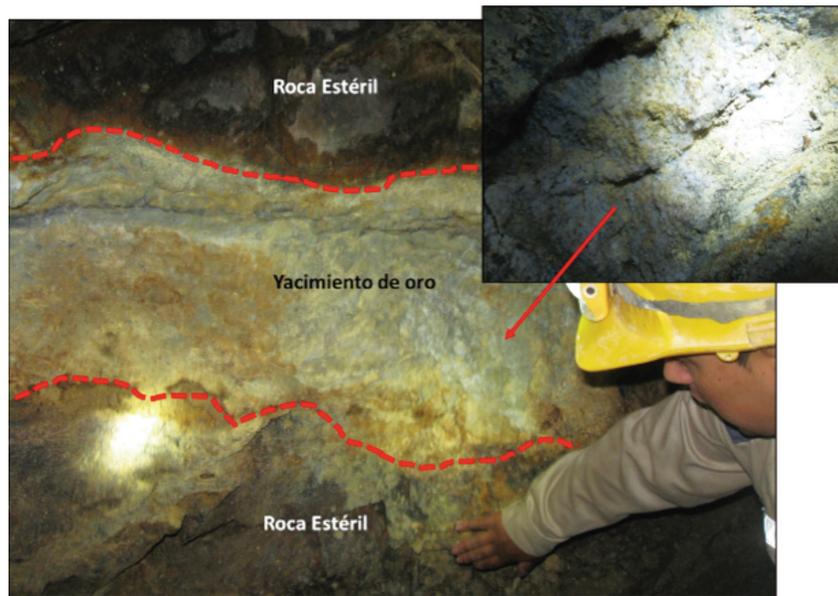


Figura 3. Yacimiento de oro y roca estéril.

En este artículo se proponen cuatro procesos para lograr una minería sustentable con el ejemplo de un estudio de caso. A continuación, nombraremos cada uno de los procesos:

El proceso de extracción en la mina.

Como se indicó anteriormente el proceso de extracción y prospección se trata de acuerdo con la norma del Código de Minas (Decreto - Ley 2655 de 1988) sobre la explotación minera. La roca estéril formada por gneis se encuentra rodeando los filones de

cuarzo con sulfuros y principal yacimiento de oro (Figura 3 y 4), se hizo la descripción de cada litología y estructura debido que es importante conocer el contacto entre las dos rocas, la cual algunas veces se acuña o tienen contacto planar (Figura 5). Además, se calculó el volumen del yacimiento y se obtuvo el índice de fractura. Obsérvese en la Figura 4 como la roca estéril presenta una menor intensidad de fractura con respecto a la roca con yacimiento de oro.

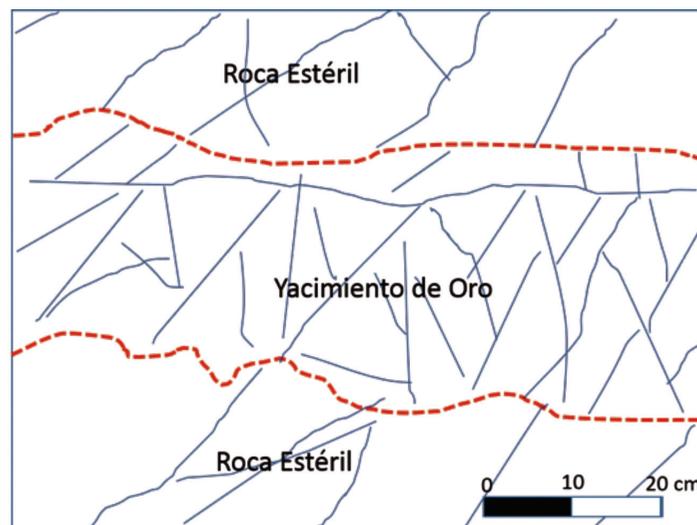


Figura 4. Contacto entre roca estéril e índice de fractura.

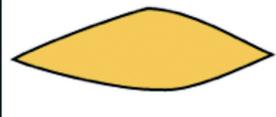
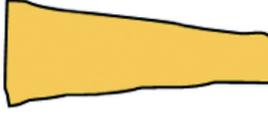
TIPOS DE CONTACTO	
Cuña	Planar
	

Figura 5. Tipos de contacto del yacimiento.

Selección del material grueso

El almacenamiento del material grueso se localiza en dos partes de la mina, cerca de la malla de selección y aglomerado entre las laderas y en gaviones (Figura 6). La selección del material grueso se realizó teniendo en cuenta la litología encontrada en el área y la variación del tipo de roca. Para realizar el dato estadístico se tomaron 10 muestras al azar de una población de 50 bloques. Los bloques fueron medidos en campo, posteriormente se revisa su clasificación composicional propuesta por Subcomisión para la Sistemática de las Rocas Ígneas de la IUGS (Le Bas & Streckeisen, 1991) según (Le Maitre, 2002).



Figura 6. Ubicación del material grueso.

En el proceso de selección del material grueso se revisa cual tiene mayor contenido de cuarzo y presenta una textura masiva, característica importante para la utilización del residuo estéril como agregado de construcción.

Proceso de trituración-selección

El proceso de trituración-selección incluye 5 fases metodológicas y actividades específicos en cada paso que se muestran en la figura 7.

Fase 1-Trituración del material menor de 20 cm. Es este estudio el objetivo es mostrar la metodología de una mina de oro sustentable, con lo cual se busca mostrar los beneficios de la innovación en la

producción y el uso que puede tener los residuos estériles según sus características químicas y físicas. Los materiales que miden menos de 20 cm son triturados tamaño grava y luego pasan por un molino californiano, que tritura el material convirtiéndolo tamaño arena a limo-arcilloso.

Fase 2- Deposito y lavado en batea. Después de que el material es triturado, es lavado y pasa sobre unos tapetes especiales para captar el material fino, el que queda en el tapete es lavado en una pila y posteriormente se pasa por una batea de forma manual. Las partículas de oro generalmente se quedan en el centro, este material se lleva a metalúrgica para fundir la pieza de oro.

Fase 3. Mesas vibratorias. El material que no queda en los tapetes pasa a unas mesas vibratorias, el material es lavado y separa el material muy fino de la arena.

Fase 4. Sistema hidráulico. Se diseñó un sistema hidráulico que permite que el mineral más fino flote y los minerales pesados decanten (Bui *et al*, 2017; Casadiego-Quintero & Monroy, 2016). Los minerales finos se extraen con burbujas generadas con espumantes, el material grueso se recoge, si en el momento extraer tiene una concentración del mineral con valor económico para explotación, este se funde (Annels, 1991), si no se guarda en costales hasta que sea económicamente viable su fundición.

Fase 5. Clasificación de minerales. Después de realizar la separación del material muy fino del grueso, se maximiza la recuperación de los minerales por medio del método de preconcentración lo cual puede dar un aumento en el tonelaje de roca residual (Norgate & Haque, 2013). En esta fase se utilizó un *Analizador DRX BTX de sobremesa*, para conocer los minerales que se encuentran en el depósito y por medio de la preconcentración recuperar compuesto mineral de alto grado o recoger el compuesto estéril (escoria). La clasificación macroscópica se realiza por medio de la revisión textural y

conteo mineralógico. La clasificación del material fino se realizó por medio del tamizador conforme a la norma ASTM E11-09, ISO 565 e ISO 3310-1, posteriormente se analizó su composición por medio de binoculares en el laboratorio.

Caso de Estudio

La minería sostenible se ha convertido en un importante objetivo para varias empresas que quieren mejorar su producción, sin afectar el medio ambiente. En Colombia la minería ilegal y sin prácticas ambientales han desbastado bosques, contaminado ríos, secado acuíferos y muchos casos generado enfermedades para trabajadores y personas cercanas al área de explotación, tal como reporto el INDERENA en 1995. Las entidades adscritas al Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) como ANLA, IDEAM, INVEMAR y las CARs son las encargadas de vigilar e impulsar las buenas prácticas ambientales de la minería siguiendo la Ley 99 de 1993 (FEDESARROLLO, 2014). En este artículo describiremos el avance en minería sostenible por medio del trabajo en conjunto del grupo de investigación de 'Ingeniería Civil y Fenómenos Ambientales', asociado a la universidad (UNIAGRARIA) y la Mina la Elsy localizada en el municipio de Vetas, Santander, está mina ha invertido en innovación e investigación.

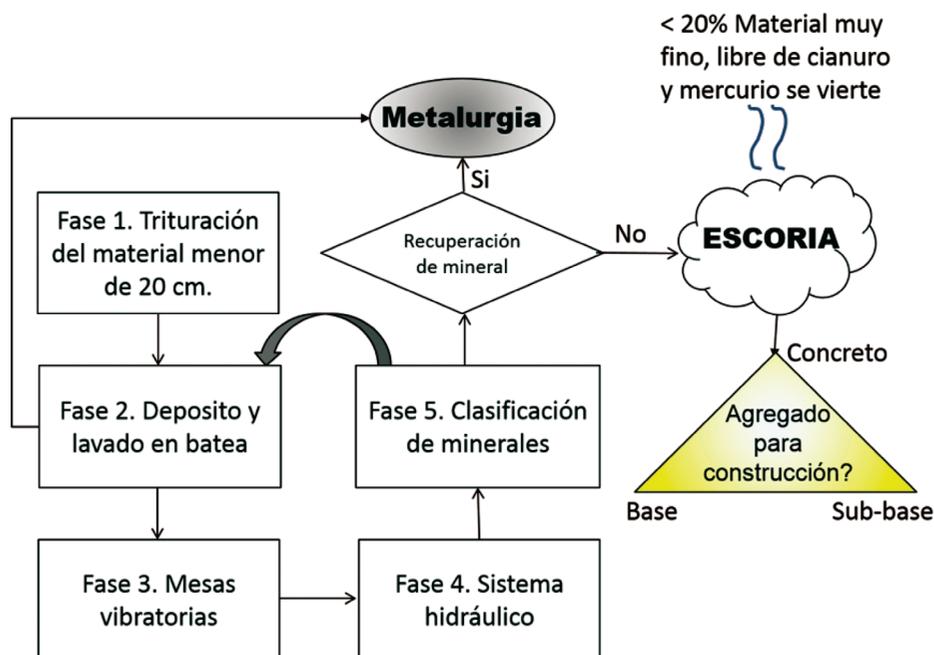


Figura 7. Cinco pasos del proceso de extracción y generación de residuos minerales.

Resultados

Los autores a continuación presentan los resultados del método propuesto para el manejo de minería sustentable en un caso de estudio. La escalera para el aumento de la recuperación del mineral (Figura 8), plantea cual sería el proceso que se podría utilizar para obtener una mejor extracción del mineral de interés, como en este caso del oro y la importancia de la clasificación y caracterización del residuo estéril (escoria) para definir su reutilización.



Figura 8. Escalera para el manejo de una mina de oro sustentable.

Esta escalera está planteada desde un pre-diseño de la explotación del mineral de interés, para eso es necesario que en la fase de exploración se conozcan las propiedades físicas, químicas y mecánicas de la roca, además de la morfología del área de explotación y el factor ambiental e hídrico (Fonseca *et al*, 2013).

Mejorar la extracción del mineral

La parte inicial de la escalera es “Mejorar la extracción del mineral”, debido a que lo más importante es la producción, y disminuir la generación de residuos. En este caso si mejora la extracción del mismo volumen de mineral los residuos estériles serán menores. La minería sustentable lo logra por medio de una buena selección de la roca gruesa enriquecida en mineral, en el caso de la mina la Elsy se sabe que la roca enriquecida tiene menos resistencia mecánica y se fractura en un tamaño menor a

20 cm. El material que es triturado y queda tamaño arena media a limo-arcilla pasa por una batea, posteriormente debido a que el oro tiene una mayor densidad que los otros minerales que componen la roca (principalmente cuarzo, horblenda, feldespato y micas), mayor parte de las partículas quedan en el centro de la batea y se recupera.

Recircular el proceso para aumentar la oportunidad de recobro

En segundo lugar, se tiene “La recirculación del proceso para aumentar la oportunidad del recobro”. Lo que ocurre es que no todo el material que es triturado, es retenido por los tapetes de fibra para ser seleccionado por la batea y pasan por las mesas vibratorias donde los granos y partículas más livianas son separados por medio de un sistema hidráulico y vibratorio, este material tiene baja probabilidad de contener minerales de oro. Los granos y partículas con mayor densidad se recirculan y pasan de nuevo por el bateo, el material que no es seleccionado es empacado en costales, después almacenados para ser tratados fuera de la mina donde puede ser tratado con otras técnicas como el bioprocesamiento, o con un biorreactor (Sánchez-Andrea *et al*, 2014), también puede ser vendido más económico. El material que tiene baja densidad sigue el proceso para ser estudiada su composición y granulometría.

Evitar uso de extractores químicos

Para poder utilizar los residuos estériles en un recurso o producto diferente es importante que no esté mezclado con ningún químico, esto haría más difícil su uso, debido que se tendría que invertir recursos. En el caso de la Mina la Elsy no se utiliza ni cianuro, ni mercurio, esto conlleva a que bajen los costos de producción por la compra de estos químicos.

Selección del material

El proceso de selección como se mencionó en la metodología, se hace para el material grueso mayor a 20 cm, por medio de una verificación macroscópica de la composición y clasificación de la roca. La roca gruesa que no paso por la malla de 20 cm, generalmente es roca ígnea tipo gneis, ha este material se le hizo una análisis petrográfico y se encontró que entre el 60 al 70% era cuarzo,

10-20% feldespatos, 5 al 10% horblenda y <5% micas u otros. Este material por su alto contenido en cuarzo se puede utilizar como sub-base para vías o para construir gaviones, como se observa en la Figura 6.

El material fino que no es seleccionado por su bajo contenido de oro, se le realiza una prueba cualitativa de difracción de rayos x, esto con el fin de conocer su composición y descartar que tenga contaminantes generados por ácidos en el momento del proceso producción y conocer su composición de cuarzo y arcilla principalmente. Los sedimentos se separan en dos: las arenas medias a finas se analizaron para conocer la distribución granulométrica;

los limos y arcillas se depositan en una pila donde se analiza su composición con la difracción de rayos X. La composición del material fino dio alto contenido de cuarzo, moderadamente micas y arcilla tipo ilita y esmética.

Caracterización del residuo

Las propiedades de los residuos estériles que se revisaron fueron principalmente la composición, resistencia y solidez de los agregados frente a la acción de soluciones de sulfato de magnesio. Se pudo definir por las pruebas que el material según la norma (I.N.V. E – 220 – 2013) cumple como agregado de afirmante y para sub-bases granulares (Páez & Herrera, 2016).

Tabla 1. Resultado de solidez de los agregados frente a la acción de soluciones de sulfato de magnesio.

TAMAÑO TAMIZ	GRADACION DE LA MUESTRA ORIGINAL,%	MASA DE LAS FRACCIONES ANTES DEL ENSAYO, g	% QUE PASA EL TAMIZ DESIGNADO DESPUES DEL ENSAYO	PERDIDA PONDERADA %
Ensayo de solidez sobre el agregado fino				
Muestra 1				
600µm (N°30) a 300 µm (N°50)	47,6	100	4,2	1,9
1.18µm (N°16) a 600 µm (N°30)	16,3	100	4,4	0,7
2.36µm (N°8) a 1.18 µm (N°16)	3,4	100	3,4	0,1
	67,3			2,7
Muestra 2				
600µm (N°30) a 300 µm (N°50)	51,7	100	4,5	2,3
1.18µm (N°16) a 600 µm (N°30)	23,3	100	6,4	1,4
2.36µm (N°8) a 1.18 µm (N°16)	3,5	100	6,4	0,2
	78,5			3,9
Promedio agregado fino				
3,3				
Ensayo de solidez sobre el agregado grueso				
Muestra 1				
19 mm (3/4") a 12.5 mm (1/2") 12.5 mm (1/2") a 9.5 mm (3/8")	14,7	1000	38,2	5,6
Muestra 2				
19 mm (3/4") a 12.5 mm (1/2") 12.5 mm (1/2") a 9.5 mm (3/8")	14,7	1000	26,9	3,9
Promedio agregado Grueso 4,8				

Fuente: Páez & Herrera, (2016).

Utilizando la información recolectada en campo y datos históricos internacionales (Chaize, 2012; Kelly & Matos, 2014) y nacionales (Suarez, 2013), de las miles de toneladas explotadas al año y los billones de pesos en regalías recolectas desde 1850 hasta la proyección de 2220 (Tabla 1). Esta

proyección se obtuvo mediante la comparación del mineral de interés obtenido con un método sustentable y con uno no sustentable. En la prueba de la mina la Elsy se pudo corroborar que se puede obtener entre el 10 al 20% de mayor recuperación con un método sustentable.

Tabla 2. Data de inventario usado en el estudio

Años	Minería no Sustentable (t/año en miles) modificado de USGS, 2010 & Miningfeed, (2012)	Minería Sustentable (t/año en miles)	Regalías no Sustentable (billones de pesos) modificado de Suárez (2013)	Regalías Sustentable (billones de pesos) (Fuente autor)
1900	2	3	0,243	0,263
1940	5	7	0,343	0,363
1960	10	12	0,286	0,3
1970	15	16	0,62	0,68
2000	17	17,5	1,736	1,866
2050	15	16	1,973	2,1
2100	7	10	1,27	1,47
2150	3	5	0,5	0,7
2200	0	1,8	0	0,23
2220	0	0	0	0

Discusión

Realizando un análisis de los resultados obtenidos en la mina la Elsy y revisando el historial internacional y nacional sobre la producción minera que se encuentra en la literatura y páginas web, se pueden mostrar dos resultados importantes: Lo primero es que la preocupación mundial por cuidar el medio ambiente debido a los daños generados en el caso de la minería de oro a la contaminación de fuentes hídricas, además de la constante explotación de canteras para generar material de construcción y por razones obvias el agotamiento de estos dos recursos finitos (oro y canteras) que llevaran a tener que afrontar prescindir de ellos por el alto precio

en 20 años (Sachs, 2015), debido a la disminución de los yacimientos y en 170 años tal vez no hayan yacimientos (Suarez, 2013). Lo segundo es que observando la mejora en el aumento de la extracción de oro de la mina la Elsy, innovando en el sistema de producción e invirtiendo en tecnología, se puede estimar un mayor aprovechamiento de los recursos no renovables y alargamiento en su explotación (Figura 9). Esto conlleva a invertir menos en la recuperación ambiental, que las minas tengan una mayor vida útil y que debido al aumento de producción también aumente el cobro de las regalías y el tiempo en que éstas pueden ser recaudados (si una mina cierra por multas ambientales o finalización de su vida útil no hay forma de cobrar más regalías).



Figura 9. Grafico estadístico de la relación de minería sostenible (S) vs no sostenible (nS).

Con la prevención en el uso de químicos tóxicos los autores de este trabajo quieren mostrar que es posible motivar a las empresas mineras, al estado y centros de investigación que al invertir en innovación no se generan gastos, si no que al contrario beneficios ambientales, sociales y económicos. Es claro que a medida que avanza la tecnología se espera deje de utilizarse químicos para extraer el mineral. Un paradigma que es difícil de cambiar es la mentalidad de las empresas mineras que temen

no recuperar la inversión, debido a que hay que dar un salto grande en la relación entre las universidades, centros de investigación y la comunidad minera. El impacto ambiental de una mina sustentable es menor de la que no se tiene, esto debido a que la sustentable siempre va invertir en mejorar, con lo que se espera que el futuro el daño sea cada vez menor (Figura 10). Este impacto también va disminuir a medida que disminuya la demanda por el costo.

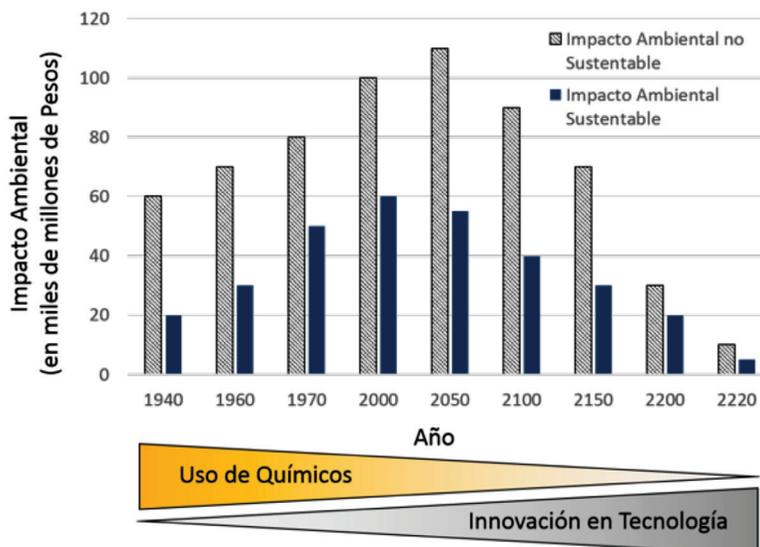


Figura 10. Impacto ambiental sustentable vs no sustentable.

También son importantes los subproductos obtenidos de los residuos estériles que pueden ser utilizados como en el ejemplo de la mina la Elsy, para subbases en la construcción. Para esto es importante resaltar que cada mina es diferente, tiene necesidades diferentes y debe tener un estudio diferente. Las principales diferencias son su localización, tipo de yacimiento (oro, níquel, carbón, esmeraldas etc.), el aspecto social y cultural.

Conclusiones

Mientras se considera la minería como un problema ambiental debido al daño que genera cuando no es sostenible y sustentable, hay empresas mineras que quieren cambiar esa proyección, innovando en un desarrollo sostenible, haciendo convenios con universidades y centros de investigación que mejoren la producción y además cuiden el medio ambiente. La minería sustentable depende de que las empresas mineras cambien la forma como hacen la explotación mineral, por eso en este artículo se da a conocer un ejemplo de una mina de oro, donde se diseñó un sistema de minería sostenible que estará evolucionando a medida se vea la necesidad.

El diseño de un sistema para una mina es único, debido a diferentes características que esta tenga como ubicación, aspectos sociales, culturales y ambientales. Es importante para el desarrollo de una minería sustentable se le dé manejo a los residuos por medio de la mejora a la extracción mineral, la recirculación del proceso, evitando los extractores químicos (cianuro y mercurio), selección del material y la caracterización del residuos, estos procesos ayudaran al aumento de la recuperación del mineral de interés y facilita que el residuo estéril (escoria) puede ser tratado como un sub-producto.

Es importante destacar el ejemplo de la mina La Elsy, en la cual se observó que a medida que se invirtió en innovación y tecnología dejaron de utilizar cianuro y mercurio, disminuyó la producción de ácidos minerales y mejoró la extracción del mineral, con un mayor recobro. Si este tipo de sistema fuera aplicado a otras minas, el tiempo finito de la

explotación minera aumentaría, se producirían menos residuos, aumentando el ingreso económico para las empresas mineras y las regalías para el estado.

Agradecimientos

Este artículo hace parte del trabajo realizado por el Grupo de Investigación de Ingeniería Civil y Fenómenos Ambientales (GIICFA) de la Fundación Universitaria Agraria de Colombia. Los autores agradecen a la Fundación Universitaria Agraria de Colombia por el préstamo de su laboratorio de Mecánica de Rocas, también al señor Israel Arias gerente de la Mina la Elsy por permitirnos tomar las muestras y conocer el sistema utilizado para extracción mineral. Nosotros también agradecemos a los revisores anónimos por ayudarnos con sus comentarios y sugerencias.

Literatura citada

1. Annels, A. E. (1991). Mineral deposit evaluation: A practical approach. Chapman & Hall.
2. Bui, N. T., Kawamura, A., Kim, K. W., Prathumratana, L., Kim, T. H., Yoon, S. H. & Truonge, N. T. (2017). Proposal of an indicator-based sustainability assessment framework for the mining sector of APEC economies. *Resources Policy*, 52, 405-417. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.05.005>
3. Casadiego-Quintero, E. & Monroy, E.R. (2016). Aprendizaje por competencias en la ingeniería civil: aplicada a la reducción del consumo de agua en el área rural. Recuperado de: <http://bit.ly/2ur3jr8>
4. Chaize, T. (2012). Miningfeed. Recuperado de: <http://www.miningfeeds.com/2012/07/25/world-gold-production-2012/>
5. Diaz-Arriaga, F. (2014). Mercurio en la minería del oro: impacto en las fuentes hídricas destinadas para consumo humano. *Revista Salud Pública*, 16(6), 947-957.
6. Dudka, S. & Adriano, D. (1997). Environmental Impacts of Metal Ore Mining and Processing: A Review. *Journal of Environmental Quality*, 26(3). Recuperado de: <https://dl.sciencesocieties.org/publications/jeq/abstracts/26/3/JEQ0260030590>
7. FEDESARROLLO – Fundación para la Educación Superior y el Desarrollo. (2014). Marco Legal de Minería y Medio Ambiente. Bogotá. Recuperado de: <http://www.fedesarrollo.org.co/wp-content/uploads/Fedesarrollo-Informe-Miner%C3%ADa-y-medio-Ambiente-final-final-080714.pdf>

8. Fonseca, A., McAllister, M. L. & Fitzpatrick, P. (2013). Measuring what? A comparative anatomy of five mining sustainability frameworks. *Minerals Engineering*, 46, 180-186. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.04.008>
9. García Ramírez, C. A. & Uribe Portilla, E. (2006). Caracterización geológica y mineralógica del yacimiento La Tosca (vetas, santander, colombia): implicaciones para el procesamiento mineral de las menas auroar-gentíferas. *Boletín de Geología*, 28(2).
10. Kelly, T. D. & Matos, G. R. (2014). Historical Statistics for Mineral and Material Commodities in the United States. Recuperado de: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/historical-statistics/>
11. Laurence, D. (2011). Establishing a sustainable mining operation: an overview. *Journal of Cleaner Production*, 19(2), 278-284. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.08.019>
12. Le Bas, M. J. & Streckeisen, A. L. (1991). The IUGS systematics of igneous rocks. *Journal of the Geological Society*, 148(5), 825-833. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.148.5.0825>
13. Le Maitre, R. (2002). Igneous Rocks. A Classification and Glossary of Terms. Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. *Geological Magazine*, 140(3), 367-367. <https://doi.org/10.1017/S0016756803388028>
14. Lèbre, É., Corder, G. & Golev, A. (2017). Sustainable practices in the management of mining waste: A focus on the mineral resource. *Minerals Engineering*, 107, 34-42. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2016.12.004>
15. Lottermoser, B. G. (2011). Recycling, reuse and rehabilitation of mine wastes. *Elements*, 405-410. <http://dx.doi.org/10.2113/gselements.7.6.405>
16. Norgate, T. & Haque, N. (2013). The greenhouse gas impact of IPCC and ore-sorting technologies. *Minerals Engineering*, 42, 13-21. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2012.11.012>
17. Páez, M. L. & Herrera, M. (2016). Caracterización físico mecánica de los residuos estériles extraídos de la mina la Elsy ubicada en el Municipio de Vetas- Santander con el fin de implementarlo como agregado en pavimentos y concreto hidráulico. (Tesis de Pregrado). Fundación Universitaria Agraria de Colombia.
18. Sachs, G. (2015). Goldman Sachs: “Las reservas de oro, diamantes y zinc se acabarán en 20 años” Recuperado de: <https://actualidad.rt.com/economia/170757-goldnam-sachs-reservas-oro-diamantes-acaban>
19. Sánchez-Andrea, I., Sanz, J. L., Bijmans, M. F. & Stams, A. J. (2014). Sulfate reduction at low pH to remediate acid mine drainage. *Journal of hazardous materials*, 269, 98-109. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.12.032>
20. Suarez, A. (2013). La minería colonial del siglo XXI “No todo lo que brilla es Oro”. Colombia: Aurora. pp.160.
21. Ucar, D., Bekmezci, O. K., Kaksonen, A. H. & Sahinkaya, E. (2011). Sequential precipitation of Cu and Fe using a three-stage sulfidogenic fluidized-bed reactor system. *Minerals Engineering*, 24(11), 1100-1105. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.02.005>

Conflicto de Intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses

Recibido: Enero 11 de 2017
Aceptado: Febrero 28 de 2017