

VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE LA REUTILIZACIÓN DE RESIDUOS ESTÉRILES MINEROS DEL MUNICIPIO DE MARMATO - CALDAS.

TECHNICAL-ECONOMIC VIABILITY OF THE REUSE OF STERILE MINING WASTE FROM THE MUNICIPALITY OF MARMATO - CALDAS



VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE LA REUTILIZACIÓN DE RESIDUOS ESTÉRILES MINEROS DEL MUNICIPIO DE MARMATO - CALDAS

TECHNICAL-ECONOMIC VIABILITY OF THE REUSE OF STERILE MINING WASTE FROM THE MUNICIPALITY OF MARMATO - CALDAS

Juan Guillermo Londoño Loaiza¹, Rosa Camila Parra Mora², Milanka Francisca Ramirez Mujica³, Stefano Jean Paul Mujica Winchonlong⁴

Resumen

La minería de oro en el municipio de Marmato – Caldas, Colombia, se hace a gran escala y pequeña escala. Una empresa multinacional lleva a cabo la minería a gran escala, la cual cuenta con la tecnología para procesar todo el material extraído de los socavones mineros. Mientras, la minería pequeña utiliza métodos artesanales para la excavación y extracción del material de la mina, etapa en la cual se genera residuos estériles, material que no tiene contenido viable de oro, los cuales son desechados sin ningún control ni planeación en las laderas aledañas. Los residuos estériles generan inestabilidad en la ladera, contaminación de las quebradas aledañas y riesgo de deslizamiento. El presente proyecto se enfoca en estudiar alternativas ambientales para la reutilización de los residuos estériles que permita mitigar el impacto ambiental y generar una actividad económica adicional. Se han propuesto tres alternativas para procesar los estériles, analizando la viabilidad económica y la caracterización fisicoquímica de los residuos. Se propone utilizar los estériles como agregado para pavimento de vías terciarias aledañas, como arcilla adsorbente de metales pesados de aguas residuales mineras, y para la recuperación de minerales. Los resultados de viabilidad para cada alternativa corresponden a un flujo de 5 Ton/hr con un precio de venta de \$COP100.000/m³; 5 Ton/hr con un precio de venta de \$COP 365.632/Ton; y 7.15 Ton/h con un precio de venta de \$COP 1.528,98/Kg respectivamente.

Abstract

Gold mining in the municipality of Marmato - Caldas, Colombia, is done on a large and small scale. Large-scale mining is carried out by a multinational company, which has the technology to process all the material extracted from mining holes. Meanwhile, small-scale mining uses artisanal

¹ Ingeniero Mecánico, SENNOVA-SENA, Investigador experto, jlondono@sena.edu.co, ORCID ID 0000-0002-0947-593X

² Ingeniería Química, Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, Estudiante, rcparram@unal.edu.co, ORCID ID 0000-0002-2283-6592

³ Ingeniería Ambiental, Universidad Técnica Federico Santa María - Chile, Estudiante, milanka.ramirez@gmail.com, ORCID ID 0000-0002-5063-9289

⁴ Ingeniería Mecánica Eléctrica, Universidad de Piura - Perú, Estudiante, stefano_20-12_98@hotmail.com, ORCID ID 0000-0001-8741-203X



methods for the excavation and extraction of material from the mine, a stage in which sterile waste is generated, material that has no viable gold content, which is disposed of without any control or planning on the surrounding slopes. The sterile waste generates instability on the slope, contamination of the surrounding streams and the risk of landslides. This project focuses on studying environmental alternatives for the reuse of sterile waste that allows mitigating the environmental impact and generating additional economic activity. Three alternatives have been proposed to process the sterile ones, analysing the economic viability and the physicochemical characterization of the waste. It is proposed to use the sterile ones as aggregate for paving nearby tertiary roads, as adsorbing clay for heavy metals from mining wastewater, and for mineral recovery. The feasibility results for each alternative correspond to a flow of 5 Ton / hr with a sale price of \$ COP100,000 / m³; 5 Ton / hr with a sale price of \$ COP 365,632 / Ton; and 7.15 Ton / h with a sale price of \$ COP 1,528.98 / Kg respectively.

Palabras clave: Minería de oro, residuos estériles, Marmato, contaminación, minería sostenible

Keywords: Gold mining, sterile waste, Marmato, pollution, sustainable mining

1. Introducción.

La reutilización de residuos mineros ha sido estudiada e implementada en varias operaciones mineras, específicamente enfocadas en la utilización de residuos estériles que aún no han sido contaminados con químicos del proceso minero. En relación con estudios similares, se encontró, que la Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales & Corpocaldas, (2013) realizaron una caracterización similar de los residuos estériles mineros de Marmato, en la cual se evidencia la posibilidad de utilizar los residuos estériles para la pavimentación de vías terciarias bajo pruebas piloto y observación de su comportamiento, definiendo que se tratan de materiales locales. A nivel nacional, Casadiego Quintero et al., (2017), hacen una caracterización de residuos estériles mineros de la mina “Sociedad minera la Elsy” en Vetas, Santander. La caracterización corresponde a los residuos mineros mayores a 20cm: 60 al 70% era cuarzo; 10-20% feldespato, 5 al 10% hornablenda y <5% micas u otros.

Además, se ha encontrado que los residuos estériles se podrían utilizar como arcilla para depuración de aguas residuales industriales. Andrade et al., (2005) evaluaron la eficacia de las arcillas especiales para la remoción de metales pesados de aguas residuales, se muestrearon y caracterizaron varios tipos de arcillas y las aguas de tres efluentes residuales industriales. Los componentes mayoritarios de las arcillas fueron: sepiolita: montmorillonita (76%); bentonita magnésica: vermiculita (74,4%); bentonita aluminica: esmectita (69,1%) y paligorskita (80%). Concluyeron que la adsorción depende del pH, del contenido de metales y del contenido de sólidos



en suspensión en las aguas. En el ámbito SENA, Arias Torres et al., (2021) hacen una caracterización de los relaves mineros del bajo cauca antioqueño. El Centro de Formación Minero Ambiental (CFMA) del Bagre, SENA Antioquia está llevando a cabo proyectos de I+D+i para la reutilización de estos residuos mineros en productos de la construcción.

En la actualidad, la minería de oro de Marmato presenta problemas socioambientales con los residuos estériles mineros, los cuales son arrojados sin ningún control ni ninguna planeación a las laderas aledañas. Estos residuos causan inestabilidad de las laderas, contaminación de las fuentes hídricas y generan problemas sociales para la planeación territorial del municipio. De esta forma, con la necesidad de mejorar las condiciones socioambientales de la minería de oro en el municipio de Marmato, Caldas, el Grupo de Investigación, Diseño y Desarrollo Aplicado (GRINDDA) del Centro de Procesos Industriales y Construcción (CPIC) del SENA Caldas, está articulado con la Gobernación de Caldas y la Alcaldía de Marmato para proponer soluciones viables a la problemática de los residuos estériles mineros. Se han propuesto los siguientes objetivos para el alcance de la primera fase del proyecto.

- O.E.1: Investigar alternativas para la reutilización de residuos estériles mineros para identificar los contenidos, características fisicoquímicas, y ensayos de laboratorios de los materiales utilizados en productos de la construcción.
- O.E.2: Realizar la caracterización de los desechos estériles mineros de Marmato con los ensayos de laboratorio definidos en el primer objetivo específico.
- O.E.3: Investigar métodos de recuperación de residuos estériles en los procesos de minería de oro para determinar el método óptimo en las operaciones mineras de Marmato.
- O.E.4: Determinar la viabilidad técnico-económica de la reutilización de residuos mineros estériles del municipio de Marmato en productos de la construcción.

Dado que la actividad minera es un eje económico para la región, no se puede evitar la extracción de minerales, sino que se requiere de un manejo sostenible de los residuos estériles, y de esta forma mitigar el impacto ambiental de la actividad minera. Además, la reutilización de los desechos estériles podría generar una actividad económica adicional, para fabricar otros productos. El presente proyecto contribuye en construir el inicio del camino hacia una minería sostenible en Marmato, el cual se articula con las siguientes agendas gubernamentales que respaldan el desarrollo de proyectos de I+D+i en la minería de oro del municipio de Marmato:

- Agenda Minero Ambiental por Marmato - Alcaldía de Marmato. Iniciativa de la gobernación de Caldas y la alcaldía de Marmato con entidades relacionadas tales como: CORPOCALDAS, SENA, Ministerio de Minas, que trabajan en el mejoramiento de la minería pequeña y artesanal del municipio de Marmato.
- Agenda departamental de Caldas de competitividad e innovación. Las minas y canteras representan el 1.2% del PIB del departamento de Caldas, lo que genera regalías importantes



para el municipio de Marmato – Caldas. Es necesario investigar propuestas para el manejo de los desechos sólidos mineros que contribuyan con el desarrollo de una minería sostenible mitigando el impacto ambiental.

- Plan de desarrollo municipal - Marmato 2020 – 2023.
- Plan de Acción de CORPOCALDAS 2020-2023.

2. Metodología.

La metodología del proyecto abarca la viabilidad técnica y la viabilidad económica de la reutilización de los residuos estériles mineros de Marmato en otros productos. Se ha utilizado una metodología descriptiva para la definición de las tres alternativas: i) productos de la construcción, ii) arcilla para la adsorción de metales pesados de aguas residuales mineras, y iii) recuperación de minerales como pirita / azufre para su comercialización. Además, se ha utilizado una investigación experimental para la caracterización fisicoquímica de los residuos estériles mineros. Las siguientes secciones muestran el desarrollo de la parte técnica, la parte económica, y la caracterización de los residuos estériles.

2.1 Análisis técnico

El desarrollo técnico incluye la definición de los requerimientos de las tres alternativas y la caracterización fisicoquímica de las muestras de los residuos estériles mineros de la siguiente forma.

2.1.1 Productos de la construcción.

La aplicabilidad de los residuos estériles se enfoca en cuatro áreas de la industria de la construcción, primero, agregado de pavimento de vías terciarias. Como segunda alternativa se expone la fabricación de baldosas cerámicas esmaltadas, en tercer lugar, la fabricación de mobiliario urbano, y por último, la fabricación de lajas como fachaleta. En seguida se presentan las propiedades fisicoquímicas que deben satisfacerse, de acuerdo con cada aplicación. La información fue recopilada y adaptada con base en (Öztürk et al., 2021), (Yarahmadi et al., 2019), (Mamlouk & Zaniewski, 2011), (Sydney, 2010) y (Lee et al., 2008). Las propiedades para materiales de construcción de vías y mobiliario se consolidan en la tabla 1 debido a su similitud y contacto con mezclas de concreto.

Tabla 1 Propiedades para materiales de construcción de vías terciarias (Afirmado) y mobiliario urbano

Propiedad		
Física	Química	Mecánica
Densidad	Higroscopicidad	Condiciones de Carga
Tamaño de partícula	Resistencia a la corrosión	Relación tensión - deformación
Peso unitario	Resistencia a la oxidación	Dureza

Dilatación térmica		Elasticidad
		Plasticidad
		Rigidez
		Resistencia a la abrasión y al desgaste

De igual forma se consolidaron las propiedades para materiales cerámicos y lasjas debido a su carácter ornamental en la tabla 2.

Tabla 2 Propiedades para materiales de construcción de baldosas cerámica esmaltadas y lasjas

Propiedad		
Física	Química	Mecánica
Densidad	Higroscopicidad	Dureza
Tamaño de partícula	Resistencia a la oxidación u oxidación nula	Relación tensión – deformación
Peso unitario		Rigidez
Resistencia al calentamiento		Resistencia a la abrasión y al desgaste
Porosidad		Elasticidad
Aislante (baja conductividad térmica y eléctrica)		Plasticidad
Refractario (Alto punto de fusión)		

Proceso requerido para preparar los estériles

Para la adecuación de residuos estériles en cualquier producto mencionado, debe realizarse previamente una reducción de tamaño de partícula, dado que estos se encuentran en un tamaño aproximado de 20 cm. En la tabla 3 se especifican los equipos requeridos para cada adecuación y el tamaño de partícula al cual se pretende llevarlos. No se mencionan tratamientos químicos o de remoción de compuestos dado que primero debe evaluarse la cinética de oxidación de los sulfuros de hierro y a su vez determinar si es viable y necesario extraerlos.

Tabla 3 Especificaciones de pretratamiento de los estériles

Aplicación	Equipos				Tamaño de partícula (mm)	Referencia
	Trituradora primaria	Zaranda vibratoria	Trituradora secundaria	Lavador de arena		
Vías terciarias	X	X	X	X	0.075-37.5	(Agudelo Trujillo et al., 2014) (Vias, 2018)
Mobiliario urbano	X	X	X	X	0.15 – 9.5 2.36 – 63	(Vias, 2018)
Baldosas cerámicas	X	X	X		<200	(Abad Jaramillo & Trokhimtchouk, 2013)
Lajas	X	X	X		-	(Abad Jaramillo & Trokhimtchouk, 2013) (Lee et al., 2008)

2.1.2 Arcilla para adsorción de metales pesados

Los residuos estériles mineros de Marmato pueden tener un contenido significativo de arcilla, el cual se va a determinar con la caracterización del contenido de elementos químicos. Se propone

entonces utilizar los residuos como arcilla adsorbente de metales pesados de aguas residuales mineras. La propuesta es que sean utilizados mediante columnas de adsorción mediante filtros en las estaciones disminuyendo la concentración de metales pesados en relaves de las propias mineras de Marmato (Andrade et al., 2005). Primero se propone estudiar la capacidad de los minerales para adsorber las sustancias nocivas, para ello es necesario realizar una caracterización de la arcilla para observar su capacidad adsorbente y entender si necesita una mejora mediante la adición de ácidos y/o $ZnCl_2$ (Adeyemo et al., 2017).

Definición de arcilla: Se consideran arcillas todas las fracciones con un tamaño de grano inferior a 1/16 (0.0625 mm). (Zea-Osorio, 2005). En la tabla 4 se definen los tipos de arcillas, sus frecuentes aplicaciones en la industria y características como su fórmula química, densidad y dureza.

Tabla 4 tipos de arcillas, sus frecuentes aplicaciones en la industria (Adeyemo et al., 2017).

Bentonita		
Descripción	Usos	Propiedades
Es un filosilicato de aluminio absorbente que es esencialmente una arcilla impura que consiste principalmente en montmorillonita, Existen diferentes tipos de bentonita cada una con el nombre del elemento dominante respectivo (Na, Ca, K, Al)	La bentonita se ha utilizado para eliminar varias especies químicas: <ul style="list-style-type: none"> - Aminas - Pigmentos orgánicos - Cationes (Ni, Zn) - Fenol y cetonas anfitriones pesticidas - Clorofila Contaminantes no iónicos	$SiO_3 \cdot H_2O$ Densidad: 0,7 – 0,9 g/cm ³ Dureza: 0.8-1.8 (Mohs) (SESUVECA del Perú S.A.C, n.d.) (Garcés, n.d.)
Caolinita		
Se trata de un mineral tipo silicato estratificado, con una lámina de tetraedros unida a través de átomos de oxígeno en una lámina de octaedros de alúmina. Conocidas como caolín. La caolinita es una arcilla que no se hincha	La caolinita es la arcilla menos reactiva. Sin embargo, su alta dependencia del pH mejora o inhibe la adsorción de metales de acuerdo con el pH del medio ambiente y esta adsorción de metales suele ir acompañada de la liberación de iones de hidrógeno (H) de los sitios de los bordes del mineral.	$Al_2 Si_2 O_5(OH)_4$ Densidad: 2.6 g/cm ³ Dureza: 2 (Mohs)
Montmorillonita		
La montmorillonita, un miembro de la familia de las esmectitas, tiene una red cristalina expansiva como 2:1. El grupo de las esmectitas se refiere a una familia de arcillas no metálicas principalmente compuesto de silicato de aluminio, calcio, sodio hidratado, un grupo de minerales arcillosos monoclinico	Para ser utilizado como componente principal en agentes no explosivos para dividir roca en canteras de piedra natural para limitar la cantidad de residuos, o para la demolición de estructuras de hormigón donde el uso de cargas explosivas es inaceptable	Asas $(Na,Ca)_0,3 (Al,Mg)_2 Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$ Densidad: 1,7-2 g/cm ³ Dureza: 1-2 (Mohs)
Sepiolita / Paligorskita		
Son minerales arcillosos naturales que constan de hidro silicato de magnesio que pertenece al grupo de silicatos. Son minerales arcillosos fibrosos Cuando se dispersan en agua, estos cristales alargados son inertes y no se hinchan y forman una red aleatoria capaz de atrapar líquido y proporcionar excelentes propiedades de espesamiento, (Andrade et al., 2005);	Debido a su estructura natural hueca similar a un ladrillo, tienen un gran potencial para la retención de micro contaminantes incluyendo cationes y colorantes de metales pesados. Se ha utilizado sepiolita para adsorber: azul de metileno (MB)4,40-bipiridilo, Bencidina Tetrahidropirano, Tetrahidrofurano 1,4-dioxano)	Sepiolita $Mg_4Si_6O_{15}(OH)_2 \cdot 6H_2O$ Densidad: 2 g/cm ³ Dureza: 2 (Mohs) Paligorskita $(Mg_2Al_2) Si_8O_{20}(OH)_2 \cdot 4H_2O$ Densidad: 2.15 – 2.35 g/cm ³ Dureza: 2 - 2.5 (Mohs)

En la tabla 5 se encuentra una recopilación bibliográfica de los diferentes tipos de arcillas y su capacidad de adsorción respecto a ciertos elementos químicos relevantes para la presente investigación.

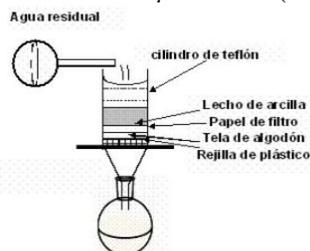
Tabla 5 tipos de arcillas y su capacidad de adsorción respecto a ciertos elementos químicos (Bentahar et al., 2016), (Lenoble et al., 2002), (Uddin, 2017).

Adsorbato	Adsorbente	Capacidad de adsorción (mg/g)
Cobre (cu)	Arcilla natural	44.84
	Bentonita funcionalizada	45.80
	Arcillas mauritanas	47.60
	Montmorillonita modificada	48.30
	Bentonita inmovilizada	54.07
	Esméctica	42.43
Plomo (pb)	Sodic-montmorillonite	121.95
	Arcilla illitic turca	238.98
	Goetita	109.20
	Bentonita funcionalizada amina	110.00
	Bentonita tratada	110.00
Zinc (zn)	Caolín	250.00
	Montmorillonita	154.60
	Bentonita	98.04
	Bentonita modificada por sulfato	104.17
	Ca-bentonita	149.00
Mercurio (hg)	Aepe-hectorite	54.70
	Compuestos poliméricos/organosmectitos	157.30
	Bentonita funcionalizada amina	102.70
	Bentonita funcionalizada carboxilato	113.00
	Montmorillonita	385.50
Arsénico (as)	Illita	0.52
	Montmorillonite	0.64
	Kaolinita	0.86
Cianuro (CN-)	Illita	35.23
	Montmorillonita	17.83
	Caolinita	15.49
	Hidrotalcita	60.00

Proceso de filtrado mediante arcillas

Para evaluar la eficacia de dichas arcillas como adsorbentes de metales pesados, Andrade et al., (2005), utilizaron tipos de aguas residuales. Las muestras de aguas fueron tomadas en recipientes estériles, introduciendo el recipiente boca abajo en el sentido contrario a la circulación de la corriente del efluente residual y dejándolo llenar de modo que el agua rebosase. Las arcillas son dispuestas en lechos de 3 cm de espesor, manteniendo un tiempo de contacto entre el agua y la arcilla de 3 horas. La figura 1 muestra el esquema del diseño experimental.

Figura 1 Esquema del diseño experimental (Andrade et al., 2005).





Pruebas de laboratorio requeridas

Caracterización mineralógica de la arcilla (Aldana Arcila, 2014).

- Fluorescencia de Rayos X (FRX): determinar los elementos principales y menores
- Difracción de Rayos X (DRX): determinar la estructura atómica y molecular de un cristal
- Espectroscopía Infrarroja de Transformada de Fourier (FTIR): La espectroscopia por infrarrojo es una técnica utilizada para el reconocimiento mineral arcilloso y no arcilloso, así como materia orgánica presente en las muestras que no poseen estructura cristalina
- Brunauer-Emmett-Teller (adsorción BET): implica la determinación de la cantidad de gas adsorptivo necesario para cubrir las superficies de poros internas accesibles y las externas con una monocapa completa de adsorbato.

2.1.3 Recuperación de minerales

Se propone estudiar la factibilidad de recuperar minerales como la Plata, Azufre, Zinc y Hierro, entre otros, puesto que los minerales metálicos principales son del grupo de los sulfuros y corresponden a pirita, calcopirita, galena, blenda o esfalerita, marmatita que es una blenda rica en hierro, además oro y plata como elementos nativos, presentes en el medio estudiado.

La pirita se compone principalmente de hierro y azufre, su uso más común en la actualidad es en la elaboración del vidrio ámbar, este mineral se mezcla con otros elementos de vidrio para producir este aspecto amarillo-marrón dorado, los beneficios de su uso radican en la reducción de los rayos UV y la protección contra la luz azul. Otros de sus usos, son la fabricación de pastillas de freno de vehículos y maquinarias, debido a su naturaleza resistente pero abrasiva, en la fabricación de las teselas como componente de los espejos y también como un componente en la fabricación de paneles fotovoltaicos de bajo costo, cuando se utiliza junto con el sulfuro de cobre.

Método de recuperación de pirita

Las piritas se tratan mediante procesos de flotación. Esto implica que el concentrado se encuentra molido a un tamaño muy fino con un contenido de humedad que depende de la energía gastada en la etapa del secado. El método que se plantea usar es la flotación bulk. Aquí se presentan algunos conceptos para entender esta metodología.

- Mecanismos de flotación de minerales sulfurados: el cual depende de propiedades de minerales. Se usan componentes para la adhesión del reactivo al mineral como las burbujas de aire, agentes espumantes. Los reactivos más importantes son los colectores, activadores, depresores.
- Fases: En la pulpa del biodigestor de flotación bulk, se encuentra la fase sólida (mineral), líquida y gaseosa (agua).
- Reactivos para flotación: Modifican superficie de minerales para que estos sean hidrofóbicos y floten a la superficie de la pulpa



- Colectores: Hacen repeler al agua y aseguran la acción de burbujas. Estos actúan sobre la superficie del mineral. Se adhieren por absorción. Se planta usar xantatos como colectores.
- Espumante: actúa en la interfase aire-agua por adsorción. Estos espumantes son análogos a colectores porque actúan con la relación sólido-líquido, mientras que los espumantes actúan como líquido-gas.
- Modificadores: Estos reactivos controlan el efecto de los colectores, es decir pueden volverlo más o menos hidrofóbico.

Se tienen como modificadores a los activadores, los cuales hacen que haya más interacción mineral-colector; se tienen depresores que reducen la interacción mineral-colector y depresores que reducen la interacción mineral-colector.

- Flotación bulk: es un tipo de circuito simple de flotación para separación donde se hace flotar de dos a más metales en un solo concentrado.

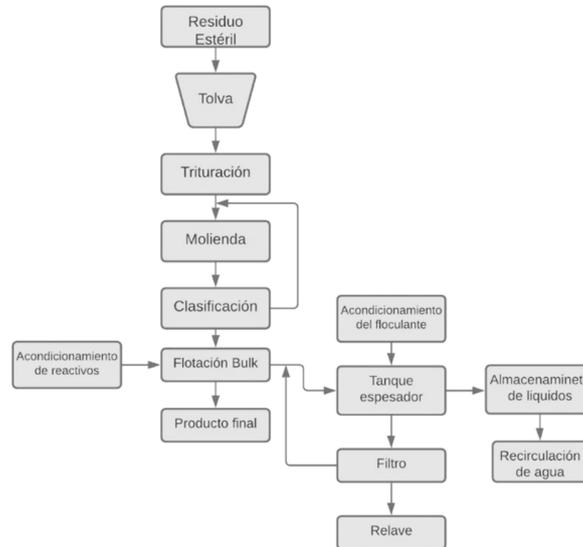
Se plantea entonces una serie de tres pasos, donde el objetivo del primero es hacer la molienda del material estéril como pretratamiento, luego, se planta hacer la flotación, primero es hacer la separación del sulfuro o pirita del material estéril y por último hacer la separación del sulfuro de azufre.

Residuos de flotación

En todo proceso de flotación se utilizan una mezcla de reactivos, quienes permitirán obtener un porcentaje determinado de mineral. Al terminar el ciclo de flotación, esta mezcla de reactivos se acumula con otros minerales o sulfuros que no formaban parte del producto requerido de la flotación, estos residuos son llamados comúnmente como lodos. Los lodos de flotación contienen una mezcla de reactivos que en la mayoría de los casos tienden a ser contaminantes cuando son vertidos directamente a relaves sin un previo tratamiento y/o análisis químico. Para el proceso de flotación de pirita se usa el xantato etílico de potasio (Z3) como colector, y el aceite de pino como espumante, por lo que se tiene que realizar una evaluación química para determinar la cantidad su grado de contaminación y el rango permitido de su uso.

Tratar los lodos mediante un tanque de sedimentación o espesadores, donde se descontamina el agua por decantación, y pasar el lodo sobrante por un filtro compactador, esto correspondería a uno de los métodos activos de descontaminación. Los espesadores se usan para recuperar agua de proceso reutilizable inmediatamente, así como para extraer finos y otros materiales. Esto espesadores requieren de unos reactivos llamados floculantes, estos se utilizan en la industria minera para tratar el agua utilizada en los procesos de extracción y flotación de minerales. Su principio de funcionamiento es hacer que las finas partículas suspendidas de agregados formen flóculos más grandes, de modo que los sólidos pueden separarse del agua más fácilmente. Los floculantes se utilizan para limpiar el agua del proceso de flotación a fin de reducir el consumo de reactivos y mejorar la recuperación. La figura 2 muestra el proceso para la extracción de la pirita.

Figura 2 Flujo del proceso para la extracción de pirita (Elaboración propia)



2.1.4 Recolección de muestras

Se realizó una visita de campo al municipio de Marmato – Caldas, con el fin de recolectar muestras de los residuos estériles mineros. Inicialmente, se elaboró el protocolo de recolección de muestras teniendo en cuenta la naturaleza del terreno, herramientas, materiales y elementos de protección personal. Luego, se llevó a cabo la recolección de las muestras de los residuos estériles mineros en los sectores conocidos como “El Relleno” y “Cien Pesos”. Estos sectores tienen áreas aproximadas de 7 Ha y 19 Ha respectivamente. La figura 3 muestra tres imágenes, de izquierda a derecha, la primera muestra el área aproximada de 7 Ha. del sector de “El Relleno” en una toma en Google maps, la segunda muestra el área aproximada de 19 Ha del sector de “Cien Pesos” en una toma en Google maps, y la tercera imagen muestra la disposición de las rocas estériles en la ladera adyacente a los socavones mineros en el sector de “Cien Pesos”. Esta última evidencia la disponibilidad inadecuada de los estériles en la ladera con riesgos latentes de deslizamiento.

Figura 3 Sectores de disposición de residuos estériles mineros en Marmato (fuente propia, 2021)



Se recolectaron tres muestras, dos del sector de “El Relleno” y una tercera del sector de “Cien Pesos”. Las dos primeras muestras se recolectaron de la mina “Nápoles”, una en la entrada al socavón y la segunda en el punto de disposición de los estériles. La tercera muestra se recolectó en el punto de disposición de los estériles de la mina “La Golondrina”. La tabla 6 muestra la información de recolección de las tres muestras. Luego, las muestras fueron llevadas al laboratorio de suelos del Centro de Procesos Industriales y Construcción (CPIC) del SENA Caldas para realizar las pruebas técnicas definidas.

Tabla 6 Recolección de muestra en Marmato. Fuente propio (2021)

Muestra	Condiciones ambientales		Hora (24 h)	Cordenadas del punto		Profundidad de la toma de muestra (cm)	Topografía del terreno		Uso actual del terreno	Drenaje del terreno	
	Temperatura	% humedad		X	Y		llano	Fuente/inclinado		Bien drenado	No drenado
1	25,1	63	12:10	N 05° 28,518	W 075° 36,128	40 cm	X		Minería		X
2	30,11	69	12:51	N 05° 28,517	W 075° 36,124	Superficial		X	minería		X
3	30,9	60	15:15	N 05° 28,804	W 075° 35,978	Superficial		X	minería		X

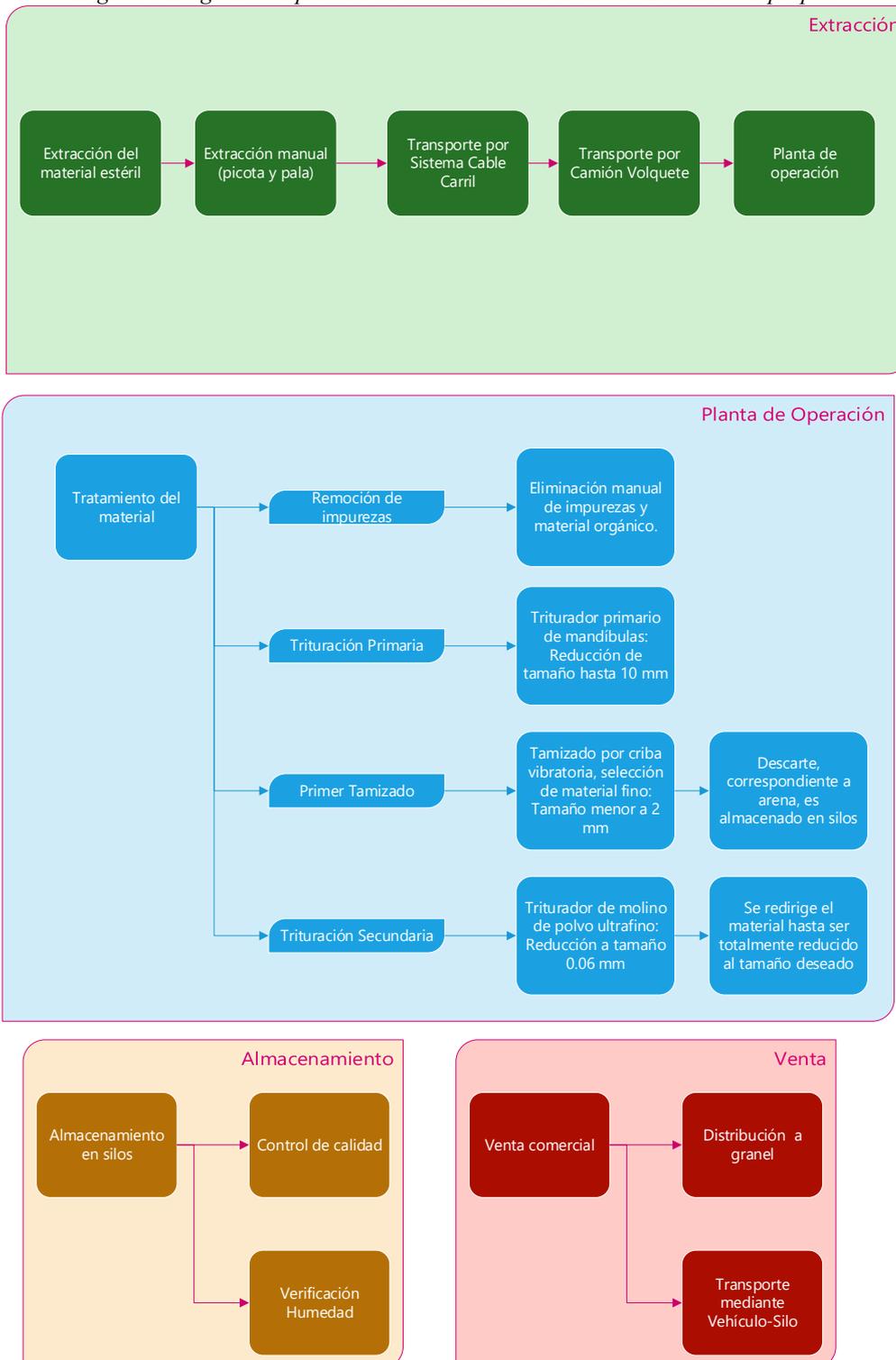
1.1 Análisis económico

El análisis económico se hace para las cada una de las tres alternativas de recuperación de los residuos estériles mineros. Se analizan los costos de inversión (CAPEX) para el proceso de recuperación de los residuos estériles, así como los costos operativos (OPEX) del funcionamiento de la planta de tratamiento de estos. Además, se hace una proyección a cinco años para determinar el Valor Presente Neto (VPN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR) para determinar la viabilidad económica de las propuestas. La figura 4 muestra el diagrama de valorización de los residuos estériles mineros, empezando por la etapa de extracción, la planta de operación, el almacenamiento y venta final del producto.

Para la etapa de extracción se observan condiciones desfavorables, debido a que los estériles se encuentran dispuesto en barrancos y quebradas sin control estructural, ni medidas de seguridad que contengan posibles derrumbes. Se aconseja descartar el uso de maquinaria pesada como volquetas y retroexcavadoras, debido a que su uso sólo podría ser posible previo aseguramiento estructural de los rellenos, lo que aumentaría considerablemente los costos del proyecto. Se considera la opción de utilizar el sistema de cable carril, considerando una cantidad mínima de operarios en la parte superior del relleno, manteniendo una extracción con equipo simple de picotas y palas. De acuerdo con las tres alternativas, el sistema de extracción y transporte es igual para todos. La diferencia varía en las etapas siguientes.

- Alternativa de productos de la construcción. Requiere además de la primera etapa de trituración, la etapa de clasificación granulométrica.

Figura 4 Diagrama de proceso de valorización de estériles. Elaboración propia.



- Alternativa de arcilla adsorbente. Requiere de una segunda etapa de trituración para reducir los estériles a granulometrías de arcilla.
- Alternativa de recuperación de minerales. Requiere de una segunda etapa de trituración para ajustar la granulometría, de una etapa de flotación para obtener la pirita, y de una etapa de descontaminación de lodos.

2. Resultados

Los resultados del proyecto abarcan la caracterización fisicoquímica de las muestras de los residuos estériles mineros y los modelos económicos de la viabilidad de cada una de las tres alternativas para la reutilización de los residuos estériles. A continuación, se presentan los resultados obtenidos con su respectiva discusión.

2.1 Caracterización fisicoquímica de los residuos estériles mineros

Se procedió con las pruebas en el laboratorio de suelos del Centro CPIC del SENA – Caldas. Analizando las muestras recolectadas, los estériles de Marmato corresponden a las muestras 2 y 3, mientras que la muestra 1 es de los suelos de entrada a la mina, pero no corresponde al material que se dispone en las laderas. De esta forma, se procedió con los ensayos de laboratorio para las muestras 2 y 3. La tabla 7 muestra los resultados obtenidos.

Tabla 7 Resultados ensayos técnicos de laboratorio. Fuente propia (2021)

Resultados pruebas de laboratorio										
Propiedad			Muestra 2				Muestra 3			
			Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4
Humedad según INV E- 122-13 (%)			17.75	16.96			15.96	15.77		
Granulometría Gruesos (%)	Granulometría INV E 213-13 (%)	Gruesos	37.47	35.58			36.60	38.37		
Granulometría Finos (%)		Finos	62.53	64.42			63.04	61.63		
Arenas (%)	Textura y tipo de suelo (franco arcillo arenoso) (%)	Arenas	79.01	66.66	77.93	78.94	74.70	68.29	72.34	73.56
Arcillas (%)		Arcillas	20.99	22.07	21.36		25.30	27.66	26.44	
pH			5.42	4.88	5.29	5.35	7.30	7.33	7.20	7.26
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)			3.38	4.38	3.30	3.34	2.23	2.86	2.26	2.54
Densidad real (g/ml)			2.59	2.55			2.82	2.54		
Densidad aparente (g/ml)			1.67	1.72			1.77	1.67		
Porosidad (%)			35.52	32.54			37.23	34.25		

Las muestras de los residuos estériles de Marmato cumplen con la granulometría para ser utilizados como agregado para pavimento de vías terciarias. La muestra del sector de “El Relleno” es más

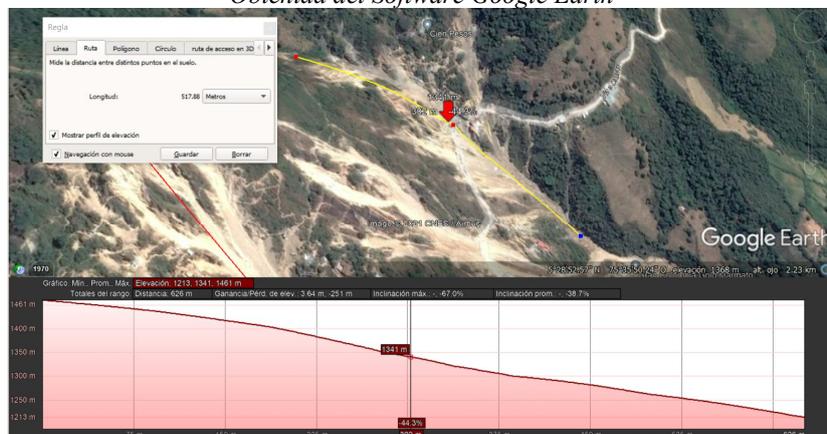
ácido con un pH en promedio de 5.24, mientras, la muestra del sector de “Cien Pesos” tiene un pH en promedio de 7.27. Eso se debe a que la muestra del relleno tiene un porcentaje mayor de hierro y aluminio, elementos que acidifican los suelos.

2.2 Viabilidad económica

El proceso para reutilizar los residuos estériles en un producto comercial consta de cuatro etapas: i) extracción, ii) planta de operación, iii) almacenamiento y iv) venta. La etapa de extracción consta de un sistema cable carril para recuperar el material estéril desde los puntos de disposición de los estériles hasta la vía vehicular. Desde el punto de acopio de material del relleno se utiliza un vehículo de carga “camión volqueta” para el transporte hasta la planta de operación. Luego se encuentra la etapa de la planta de operación que es donde se realiza el procesamiento del mineral. Finalmente, la etapa de almacenamiento y la etapa de venta comercial, considerando una distribución a granel del producto.

i) Extracción. Debido a la geografía fragmentada de la zona y las altas pendientes donde se encuentran los rellenos de estériles, se propone la utilización del cable carril minero para el acarreo del material, este consta de dos bases de concreto armado fijado en el suelo, con un cable guía (de acero) y un sistema de poleas, junto a un motor que controla el cable motriz del sistema. La instalación de los transportadores aéreos consta básicamente de dos torres terminales las cuales sirven de soporte para el cable carril y este a su vez soporta la cabina de carga. Si la distancia entre estas torres es mayor a 1 Km exige la utilización de torres tensoras intermedias (Julcapoma & Raico, 2015). Se calculan los perfiles de elevación de los sectores del relleno y cien pesos, con inclinación promedio de 49.4° y $36,7^\circ$, con una longitud de 437 m y 626 m para el relleno y el sector de cien pesos respectivamente. La figura 5 muestra el perfil de elevación y longitud del sector de cien pesos.

Figura 5 Perfil de elevación relleno cien pesos. Extensión de 626m, con ángulo de inclinación promedio de -36.7% . Obtenida del Software Google Earth



Los costos de la implementación del sistema cable carril será considerado en base a la investigación realizada en la Universidad EAFIT, Medellín (Mejía-Vargas, 2011), donde se realiza un reajuste en base a la inflación hasta el presente septiembre del 2021. Las tablas 8 y 9 muestran los costos de inversión en el sistema cable carril.

Tabla 8 Costos Componentes Sistema de Transporte Cable Carril (Mejía-Vargas, 2011).

Costo componentes				
Componente	Costo	Cantidad	Valor	Reajuste hasta 2021
Cable carril	\$10.324 x m	437	\$ 4.511.588	\$ 6.408.464
Cable motriz	\$3.364 x m	437	\$ 1.470.068	\$ 2.088.151
Sistema motriz	\$ 8.500.000	1	\$ 8.500.000	\$ 12.073.786
Torres	\$ 800.000	4	\$ 3.200.000	\$ 4.545.425
Vehículo	\$ 800.000	2	\$ 1.600.000	\$ 2.272.713
Anclaje	\$ 250.000	2	\$ 500.000	\$ 710.223
Mano de obra (construcción)				
Personal	Costo/hora	Horas	Valor	Reajuste hasta 2021
Soldador	\$ 6.800	192	\$ 1.305.600	\$ 1.854.533
Ayudante	\$ 4.300	192	\$ 825.600	\$ 1.172.720
Mano de obra (obra civil)				
Personal	Costo/hora	Horas	Valor	Reajuste hasta 2021
Maestro de obra	\$ 7.850	192	\$ 1.507.200	\$ 2.140.895
Ayudante	\$ 5.800	192	\$ 1.113.600	\$ 1.581.808

Tabla 9 Costo total instalación Sistema Carril (Mejía-Vargas, 2011).

Costo componentes	\$ 28.098.761
Mano de obra (construcción)	\$ 3.027.253
Mano de obra (obra civil)	\$ 3.722.703
Otros	\$ 19.886.235
Costo total instalación sistema cable carril	\$ 54.734.953

ii) Transporte hasta la planta de operación

En primera instancia se debe evaluar la posibilidad de que el sistema de transporte por cable carril pueda tener como estación de destino la planta de operación, de no ser así, es necesario considerar el transporte desde el lugar de extracción hasta la planta del proceso de operación. Se propone utilizar el arriendo de una volqueta liviana por servicios de carga. El cálculo esta realizado en base a un presupuesto de distancia de viaje de 5 km. para una capacidad de volqueta de 8 Ton., considerando un valor cotizado de \$COP150.000 por viaje de 15 min.; por lo que el valor a pagar por carga completa es de \$COP18.750 Ton/h.

2.2.1 Modelo económico productos de la construcción

El modelo desarrollado está compuesto por 6 hojas de cálculo donde se realizan los procedimientos matemáticos para obtener los apartados mostrados a continuación:

1. Balances de Materia
2. Costos de Inversión
3. Costos Operativos
4. Valor Presente Neto, Tasa Interna de Retorno, Punto de Equilibrio
5. Análisis de Sensibilidad en función del flujo de operación y los valores presentes neto
6. Análisis de Sensibilidad en función del tiempo y los valores presentes neto

Los apartados se encuentran entrelazados y pretenden ser una herramienta de estimación para hallar el flujo óptimo de operación, el precio de venta unitario y la proyección en el tiempo de los flujos de efectivo y los valores presentes. El proceso productivo cuenta con 3 etapas de operación, alimentación (extracción del residuo), trituración primaria (reducción de tamaño de partícula) y concentración gravimétrica (separación de material particulado en serie gruesa y serie fina). Los elementos y equipos seleccionados para cada etapa son dependientes del flujo de alimentación, este oscila en un intervalo de [0,5 -10] Toneladas por hora. La tabla 10 muestra los precios de venta del producto obtenido de los residuos estériles según su nivel de compactación.

Tabla 10 Precio de venta agregado según % de compactación (CYPE Ingenieros S.A., 2021).

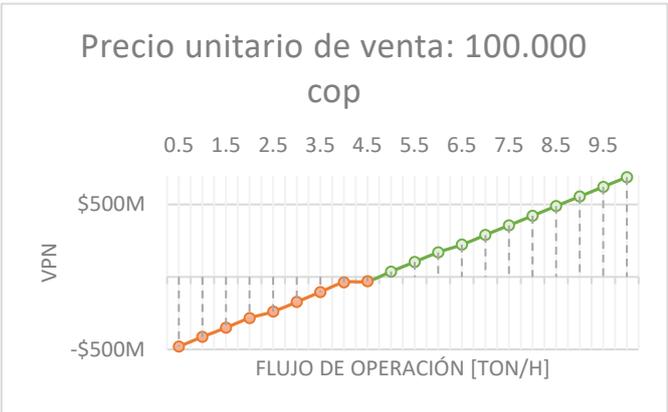
Material de Relleno	Grado de Compactación respecto a la densidad seca máxima obtenida en el ensayo Proctor Modificado					
	95%	96%	97%	98%	99%	100%
	Costo \$COP/m ³					
Grava 20/30 mm	\$ 51.880,72	\$ 52.007,17	\$ 52.133,63	\$ 52.274,12	\$ 52.400,58	\$ 52.527,03
Grava de Cantera de piedra caliza, 40/70 mm	\$ 99.558,70	\$ 99.685,15	\$ 99.811,61	\$ 99.952,11	\$ 100.078,56	\$ 100.205,01
Grava de cantera de piedra granítica 40/70 mm	\$ 109.688,43	\$ 109.814,88	\$ 109.941,34	\$ 110.081,84	\$ 110.208,30	\$ 110.334,75
Zahorra natural caliza	\$ 60.843,03	\$ 60.969,48	\$ 61.095,94	\$ 61.236,43	\$ 61.362,89	\$ 61.489,34
Zahorra natural granítica	\$ 66.904,17	\$ 67.030,62	\$ 67.157,08	\$ 67.297,57	\$ 67.424,03	\$ 67.550,48
Zahorra artificial caliza	\$ 64.975,65	\$ 65.102,10	\$ 65.228,56	\$ 65.369,06	\$ 65.495,52	\$ 65.621,97
Zahorra artificial granítica	\$ 70.485,77	\$ 70.612,22	\$ 70.738,68	\$ 70.879,18	\$ 71.005,64	\$ 71.132,09

Durante la simulación se obtuvo una favorabilidad del proyecto dentro del rango de 80.000 – 150.000 pesos colombianos como precio unitario del producto. Aclarase que los límites de precio estimados son 40.000 pesos colombianos siendo este el inferior y 150.000 pesos colombianos el superior. En seguida se presentan los valores obtenidos en el análisis de sensibilidad en función del flujo de operación y los valores presentes netos para cuatro escenarios favorables, de estos se destaca el tercer escenario para un flujo de operación de 5 toneladas por hora y un precio unitario de venta de 100.000 pesos colombianos, la cual se muestra en la tabla 11.

Tabla 11 Simulación 3. Precio venta \$COP100.000

Precio	\$ 100.000,00	
Flujo [Ton/h]	VPN	Inversión
0,5	-\$ 480.119.672,93	\$ 65.909.039,53
1	-\$ 413.570.305,20	\$ 65.909.039,53
1,5	-\$ 350.422.005,39	\$ 66.702.439,51
2	-\$ 283.872.637,66	\$ 66.702.439,51
2,5	-\$ 239.178.256,50	\$ 70.062.778,91
3	-\$ 172.628.888,77	\$ 70.062.778,91
3,5	-\$ 104.353.592,98	\$ 70.963.140,91
4	-\$ 37.804.225,25	\$ 70.963.140,91
4,5	-\$ 29.652.120,02	\$ 93.918.970,11
5	\$ 36.897.247,71	\$ 93.918.970,11
5,5	\$ 103.446.615,44	\$ 93.918.970,11
6	\$ 169.995.983,16	\$ 93.918.970,11
6,5	\$ 222.747.327,23	\$ 96.239.247,51
7	\$ 289.296.694,96	\$ 96.239.247,51
7,5	\$ 355.846.062,69	\$ 96.239.247,51
8	\$ 422.395.430,42	\$ 96.239.247,51
8,5	\$ 488.944.798,15	\$ 96.239.247,51
9	\$ 555.494.165,88	\$ 96.239.247,51
9,5	\$ 622.043.533,61	\$ 96.239.247,51
10	\$ 688.592.901,34	\$ 96.239.247,51

Precio unitario de venta: 100.000
cop



2.2.2 Modelo económico arcilla adsorbente

Se varían las condiciones de la capacidad de operación de la planta y el precio de venta de la arcilla comercial, buscando encontrar el punto de equilibrio donde el VPN comienza a ser positivo. La tabla 12 muestra el flujo de material y el precio de venta de la arcilla para obtener un VPN positivo.

Tabla 12 Precio de venta Arcilla, con VPN igual a cero. Elaboración propia

Capacidad de planta [Ton/h]	Precio unitario de venta [\$/Ton]
4	\$ 457.040
5	\$ 365.632
6	\$ 304.693
7	\$ 261.166
8	\$ 228.520



2.2.3 Modelo económico recuperación de minerales

Años	1	2	3	4	5
Material procesado (Ton/día)	7.15	7.15	7.15	7.15	7.15
Precio de venta unitario	1,528.97	1,530.50	1,532.03	1,533.56	1,535.10

3. Conclusiones

Las conclusiones del proyecto abarcan los objetivos planteados inicialmente y lo que se ha evidenciado en la práctica del desarrollo del proyecto de la siguiente forma.

- La muestra del sector de “El Relleno” es más ácida que la muestra del sector de “Cien Pesos” con un pH de 5.24 en comparación con un pH de 7.27. Esto se debe un porcentaje mayor de Hierro y aluminio, elementos que acidifican los suelos. Un suelo ácido dificulta la utilización de los residuos estériles como material agrícola, ya que el aluminio es un elemento tóxico para la vegetación.
- Las muestras tomadas de Marmato no presentan elementos tóxicos como cianuro o mercurio, elementos que son comúnmente encontrados en residuos mineros. Esto facilita los experimentos a nivel laboratorio.
- La viabilidad económica de las tres alternativas está sujeta al precio de venta de los estériles procesados y el flujo de material hacia la planta de proceso. Como punto sobresaliente es la cantidad de material que se debe extraer de los rellenos de los residuos, la cual varía entre 5 Ton/hr y 7.15 Ton/hr para que las tres alternativas sean económicamente viables. Esto es considerando una viabilidad puramente económica. Sin embargo, se debe también considerar el alivio ambiental que se tendría en la reutilización de los residuos estériles, ya que esto es también el alcance de las entidades gubernamentales en sus planes de desarrollo.
- La reutilización de residuos estériles mineros ha sido estudiado e implementado en varias operaciones mineras a nivel nacional e internacional. En el caso particular de Marmato, estos residuos no se han utilizado aún para el desarrollo de otros productos. Sin embargo, con la vigilancia científico-tecnológica de trabajos similares, se ha evidenciado que los residuos estériles se pueden utilizar para el desarrollo de otros productos. Para lograr utilizar estos materiales se requiere de pruebas experimentales a nivel laboratorio para evaluar la eficacia y el desempeño de los nuevos productos en base a los residuos estériles mineros. El proyecto se ha formulado para continuar en una segunda fase con pruebas experimentales a nivel laboratorio en las instalaciones del Centro de Procesos Industriales y Construcción (CPIC) del SENA Caldas para el año 2022.
- La caracterización de las muestras de los residuos estériles mineros muestra que el material cumple con los requisitos de granulometría para ser utilizados como agregado para el pavimento



de vías terciarias. Además, el material presenta un porcentaje aproximado de 80% grueso y 20% fino, lo que permitiría utilizar también el material fino como arcilla adsorbente de metales pesados de aguas residuales mineras. La evaluación de la eficacia de adsorción de la arcilla será evaluada a nivel laboratorio en la segunda fase del proyecto en el año 2022.

4. Referencias.

- Abad Jaramillo, M. P., & Trokhimtchouk, T. (2013). Universidad internacional del ecuador. In *Universitas Nusantara PGRI Kediri*. Universidad Internacional del Ecuador.
- Adeyemo, A. A., Adeoye, I. O., & Bello, O. S. (2017). Adsorption of dyes using different types of clay: a review. *Applied Water Science*, 7(2), 543–568. <https://doi.org/10.1007/s13201-015-0322-y>
- Agudelo Trujillo, J. A., Hernández Riveros, S. A., & Rey Ramirez, D. F. (2014). *Documentación del proceso de extracción, producción de agregados pétreos, extensión mezcla asfálticas en obra y ensayos de laboratorio en la empresa Ecobras, Villavicencio, Meta*. Universidad Cooperativa de Colombia.
- Aldana Arcila, E. J. (2014). Remoción de aluminio en aguas residuales industriales usando especies macrófitas: una aplicación para el pasto vetiver [Universidad Católica de Manizales]. In *Universidad Católica de Manizales Facultad de Ingeniería y Arquitectura Ingeniería Ambiental Manizales*. [http://repositorio.ucm.edu.co:8080/jspui/bitstream/handle/10839/782/Erika Juliana Aldana Arcila.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.ucm.edu.co:8080/jspui/bitstream/handle/10839/782/Erika%20Juliana%20Aldana%20Arcila.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Andrade, L., Covelo, E. ., & Vega, F. . (2005). Uso de Arcillas Especiales para Depuración de Aguas Residuales. *Información Tecnológica*, 16(1), 3–10. [https://sena-primo.hosted.exlibrisgroup.com/primo-explore/fulldisplay?docid=TN_scielo_sS0718_07642005000100002&context=PC&vid=SENA&lang=es_ES&search_scope=sena_completo&adaptor=primo_central_multiple_fe&tab=sena_completo&query=any,contains,Use de Arcillas](https://sena-primo.hosted.exlibrisgroup.com/primo-explore/fulldisplay?docid=TN_scielo_sS0718_07642005000100002&context=PC&vid=SENA&lang=es_ES&search_scope=sena_completo&adaptor=primo_central_multiple_fe&tab=sena_completo&query=any,contains,Use%20de%20Arcillas)
- Arias Torres, S. M., Córdova Castro, J. D., & Gómez Botero, A. A. (2021). Alternativas de aprovechamiento de residuos de la industria minera de El Bajo Cauca Antioqueño en el sector de la construcción. *Revista EIA*.
- Bentahar, Y., Hurel, C., Draoui, K., Khairoun, S., & Marmier, N. (2016). Adsorptive properties of Moroccan clays for the removal of arsenic(V) from aqueous solution. *Applied Clay Science*, 119, 385–392. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.11.008>
- Casadiago Quintero, E., Gutiérrez Bayona, A. G., Herrera Lopez, M. Á., & Páez Rojas, M. L. (2017). Manejo estratégico de la producción de residuos estériles de minería sustentable, utilizando prácticas mineras eco-eficientes en Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 8(2), 107–118. <https://doi.org/10.22490/21456453.2035>
- CYPE Ingenieros S.A. (2021). *Generador de precios. Espacios urbanos. Colombia*. http://www.colombia.generadordeprecios.info/espacios_urbanos/Firmes_y_pisos_urbanos/Bases_y_subbases/Granulares/Base_granular_0_0_0_3.html
- Julcapoma, J. E., & Raico, J. M. (2015). *Estudio del sistema de transporte por cable carril y su optimización en la concesión Juana, Hualgayoc, Cajamarca*. Universidad Privada del



Norte.

- Lee, M. Y., Ko, C. H., Chang, F. C., Lo, S. L., Lin, J. D., Shan, M. Y., & Lee, J. C. (2008). Artificial stone slab production using waste glass, stone fragments and vacuum vibratory compaction. *Cement and Concrete Composites*, 30(7), 583–587.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.03.004>
- Lenoble, V., Bouras, O., Deluchat, V., Serpaud, B., & Bollinger, J. C. (2002). Arsenic adsorption onto pillared clays and iron oxides. *Journal of Colloid and Interface Science*, 255(1), 52–58. <https://doi.org/10.1006/jcis.2002.8646>
- Mamlouk, M. S., & Zaniewski, J. P. (2011). *Materials for Civil and Construction Engineers*.
- Mejía-Vargas, A. F. (2011). *Diseño y construcción de un sistema de transporte de carga por medio de cables para topografía de gran pendiente*. (Vol. 53). Universidad EAFIT.
- Öztürk, Ç., Akpınar, S., & Tarhan, M. (2021). Investigation of the usability of Sille stone as additive in floor tiles. *Journal of the Australian Ceramic Society*, 57(2), 567–577.
<https://doi.org/10.1007/s41779-021-00562-9>
- Sydney, L. M. (2010). *Construction databook* (2nd ed.). Mc Grw Hill.
- Uddin, M. K. (2017). A review on the adsorption of heavy metals by clay minerals, with special focus on the past decade. *Chemical Engineering Journal*, 308, 438–462.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.09.029>
- Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales, & Corpocaldas. (2013). *Alternativas de aprovechamiento del material pétreo resultante de la actividad minera en Marmato*.
- Yarahmadi, R., Bagherpour, R., Taherian, S. G., & Sousa, L. M. O. (2019). A new quality factor for the building stone industry: a case study of stone blocks, slabs, and tiles. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(1), 533–542.
<https://doi.org/10.1007/s10064-017-1040-5>
- Zea-Osorio, N. (2005). *Caracterización de las arcillas para la fabricación de ladrillos artesanales*. Universidad de San Carlos de Guatemala.