UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

BOLETIN DE CIENCIAS DE LA TIERRA
http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/rbct

Identification, analysis and evaluation of risks associated with gold mining in Marmato, Caldas

Andrea Jimena Motta-Pascuas, Mario Alfonso Ustariz-Durán & Oswaldo Ordoñez-Carmona

Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. ajmottap@unal.edu.co, ing.marioustariz@gmail.com, oordonezc@unal.edu.co

Received: October 19th, 2017. Received in revised form: January 16th, 2018. Accepted: May 16th, 2018

Abstract
In the municipality of Marmato, region in which the mining tradition of gold has been present for over 450 years, the weak planning and the lack presence of the State, has caused an mining environmental crisis that goes from the uncontrolled and chaotic opening of UPM across the municipality, until overlapping titles and the vulnerability of some areas as a result of improper disposal of sterile material throughout its slopes. As a consequence of such a scenario, the research conducted in the Marmato Mining District (DMM) in order to identify, analyze and evaluate the risks associated with gold mining in 240 UPM with reference to the methodology described in the Manual for Risk Assessment of Abandoned Mining Operations or Paralyzed (FMA/P), where we present calculations and standard features like the Rigour of the Consequences (SC) related to the damage that can be generated by the presence of the risk over a receptor, be it a human being or the environment, as well as the calculation of the Probability Index (IP) which is obtained by a two variables matricial combination. One of those variables is linked to the time in which the receptor is exposed to the risk. Added to the estimation of these variables, it is necessary a delimitation of each scenario which is why we define risk scenarios by security (ERS) and by contamination (ERC) in order to prioritize them at the Mining Distict. The main conclusion we got is that there's a high probability of occurrence of a landslide or avalanche on the top of the DMM and a possible way to find a solution is formulating infrastructure projects to exploit the sterile material collected from the UPM.

Keywords: mining risks; gold mining tradition; Marmato mining district.

Identificación, análisis y evaluación de riesgos asociados a la actividad minera de oro en el Municipio de Marmato, Caldas

Resumen
En el municipio de Marmato, una región cuya tradición minera de oro ha estado presente por más de 450 años, la falta de planificación y presencia del estado ha ocasionado una crisis minero-ambiental que va desde la explotación descontrolada y caótica de las Unidades Productivas Mineras (UPM) en todo el municipio, hasta la superposición de títulos y la vulnerabilidad de algunas zonas, ocasionada por la la disposición inadecuada de material estéril a lo largo y ancho de sus laderas. Consecuencia de tal panorama, surge la investigación realizada en el Distrito Minero de Marmato (DMM) con el fin de identificar, analizar y evaluar los riesgos asociados a la actividad minera aurífera en las 240 UPM localizadas en este municipio, tomando como referencia la metodología descrita en el Manual de evaluación de riesgos de las faenas mineras abandonadas o paralizadas (FMA/P), en la cual se presentan los cálculos y estandarización de parámetros como la Severidad de las Consecuencias (SC) relacionado al daño que puede generar la generación de un riesgo sobre un receptor bien sea personas o medio ambiente, así como también el cálculo del parámetro de Índice de Probabilidad (IP) el cual es obtenido a través de una combinación matricial de dos variables, una de las cuales tiene que ver con el tiempo en el cual dicho receptor se encuentra propenso a este riesgo, adicional al cálculo de estas variables es necesario alinear o delimitar cada uno de los escenarios por lo que se definen los escenarios de riesgos por seguridad (ERS) y por contaminación (ERC) para establecer una priorización de los mismos en el distrito minero, obteniendo como gran conclusión que la generación de movimiento en masa o avalanchas en la parte alta del DMM es eminente y una solución a ello es la generación de proyectos de infraestructura donde se pueda generar una utilidad al material estéril de las UPM.

Palabras clave: riesgos mineros; tradición minera aurífera; unidad productiva minera; distrito minero de Marmato; índice de probabilidad de ocurrencia; severidad de las consecuencias; colas.

How to cite: Motta-Pascuas, A.J., Ustariz-Durán, M.A. and Ordoñez-Carmona, O., Identificación, análisis y evaluación de riesgos asociados a la actividad minera de oro en el Municipio de Marmato, Caldas. Boletín de Ciencias de la Tierra, 44, pp. 21-30, Julio, 2018.

© The authors; licensee Universidad Nacional de Colombia.

1. Introducción

Las causas de los problemas de seguridad en el sector minero en Colombia se debe a las malas prácticas mineras inconscientes y desconocimiento de los controles tanto ambientales como de seguridad, enfocándose tan solo en el conocimiento empírico, son el reflejo de la alta tasa de accidentalidad y mortalidad en las labores mineras. Prueba de tal panorama se refleja en las cifras reportadas por la Agencia Nacional de Minería (ANM), en donde se destacan datos de 898 emergencias y 1.080 fatalidades provocadas por esta actividad, en el periodo de 2005-2016 [1].

Uno de los lugares de Colombia en donde se escenifica este tipo de conflicto es el municipio de Marmato, una población multiétnica donde conviven 8.848 habitantes [2], situada en el noroccidente del departamento de Caldas, en el flanco este de la cordillera occidental y en la vertiente occidental del río Cauca; debido a que en el pesebre de oro de Colombia, como se le conoce al municipio, la base de la economía se ha enmarcado en la explotación minera aurífera, la cual históricamente se ha desarrollado de manera artesanal con sistemas muy poco tecnificados desde la época de la Colonia; lo que ha provocado graves problemas de contaminación hídrica causada por el vertimiento de colas y utilización de químicos en el proceso de beneficio exponiendo a la comunidad marmateña que toman el agua de las quebradas. Del mismo modo, esta explotación ha provocado problemas de erosión causantes de deslizamientos, agrietamientos y hundimientos de la infraestructura civil del municipio, entre otros impactos.

Como consecuencia de tal realidad surgió la necesidad de formular acciones concretas para minimizar los riesgos, disminuir el número de emergencias mineras y la severidad de las mismas, buscando salvaguardar la vida e integridad física del personal que labora o recorre las explotaciones mineras.

La metodología empleada para el trabajo de identificación, análisis y evaluación de riesgos asociados a la actividad minera de oro en el municipio de Marmato fue tomada del Manual de evaluación de riesgos de las faenas mineras abandonadas o paralizadas (FMA/P); la cual se ajustó a las condiciones específicas de la actividad minera del municipio, con el fin de incluir las 240 UPM ubicadas en el Distrito Minero de Marmato (DMM), que corresponde al centro aurífero más importante del Departamento de Caldas.

2. Generalidades

2.1. Localización

Marmato está localizado en el flanco oriental de la cordillera occidental y en la vertiente occidental del río Cauca (Imagen 1). Este municipio es la puerta de entrada al Departamento de Caldas por el Noroccidente y se encuentra topográficamente en la zona occidental del relieve conocido como el macizo de los mellizos.

Sus coordenadas geográficas son 5°29’ Norte y 75°36’ Oeste. Está ubicado a una altura de 1.310 msnm y es el municipio más pequeño del departamento de Caldas presentando una extensión de 41 Km^2.

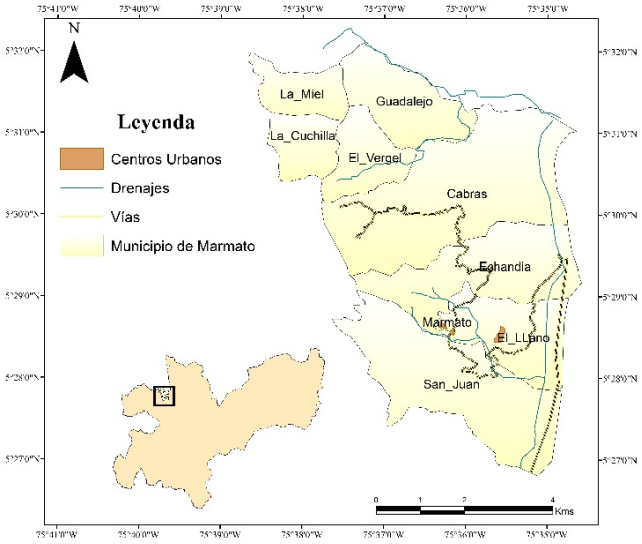

Imagen 1. Localización municipio de Marmato, Caldas.
Fuente: Propia

2.2. Marco geológico

2.1.1. Geología regional

El Distrito Minero de Marmato se encuentra localizado en el terreno geológico Calima [3] limitado por el sistema de fallas Cauca-Romeral, que de Sur a Norte deforma todas las unidades geológicas a lo largo del valle del río Cauca y acota como mínimo dos ambientes geodinámicos diferentes, uno al Este (Cordillera Central), de afinidad continental caracterizado por rocas metamórficas e ígneas plutónicas, mientras que al Oeste (Cordillera Occidental) rocas de afinidad oceánica, caracterizadas por rocas vulcano-sedimentarias del mencionado sistema de fallas [3,4].

Las unidades geológicas más antiguas corresponden a las rocas metasedimentarias y metavolcánicas del Complejo

Arquía [5] y las más jóvenes corresponden a la Formación Amagá de edad Oligocena y la Formación Combia de edad Miocena tardía. Cuerpos pequeños de rocas gabroicas y ultramáficas del Triásico constituyen la separación litoestratigráfica en el área [6].

2.1.1. Geología local

El Stock de Marmato corresponde a un cuerpo porfídico de composición andesítica- dacítica que intruye a los esquistos grafitosos del Complejo Arquía y las rocas sedimentarias de la Formación Amagá. La mineralización de oro que contiene esta roca esta espacialmente asociada con los pórfidos de la Formación Combia de edad Miocena. Este cuerpo consiste de un sistema paralelo a sub paralelo de venas distensivas, vetas de cuarzo, stockworks, entre otros; rellenando zonas brechadas y falladas, con una tendencia general N30-70°W de buzamiento vertical a sub-vertical, además se ha encontrado que algunos contactos intrusivos también se encuentran mineralizados [7,4].

2.1.2. Geología estructural

El depósito de Marmato se formó a finales del mioceno en un régimen de reactivación tectónica de tipo transpresión dextral inducida por ensamble de terrenos alóctonos [8]. La principal estructura geológica en el área de Marmato corresponde a la Falla Cauca – Almaguer, la cual buza hacia el Este y muestra desplazamientos sinistro- laterales con componente inverso. Dentro del Distrito Minero de Marmato las estructuras asociadas tienen buzamientos sub-verticales con dirección aproximada entre N45°W–N70°W [1].

2.2.3. Geología económica

Marmato alberga un depósito epitermal de intermedia sulfuración, en donde la mineralización ocurre a tres niveles topográficos diferentes: la zona superior de Echandia (1.450-1.600 msnm), la zona intermedia Cien Pesos (1.300-1.450 msnm) y la zona Marmato Bajo (1.160-1.260 msnm) [7].

Actualmente Gran Colombia Gold asumió la mayoría de los títulos mineros del sector incluyendo las denominadas Zona Baja y Echandía, estimando recursos por más de 15 MOz (Millones de Onzas).

3. Estado minero de Marmato

El municipio de Marmato, región minera desde hace más de 470 años, es el arquetípico de lo que sucede en varios otros lugares del mundo, donde se enfrenta la pequeña minería local ancestral y la gran minería transnacional, con una particularidad muy importante, para Marmato la explotación de oro de veta corresponde a su vocación, con unas dinámicas sociales y culturales arraigadas en esta actividad en donde toda su historia y cultura está permeada por tal forma de trabajo de la que vive un alto porcentaje de su población [9].

Sin embargo, el panorama minero ha sido crítico por años en la Zona alta, como fue definida con la expedición de la Ley 66 que deroga la Ley 72/39 y se reglamenta mediante el Decreto 1323 de 1947, por la cual se dividió la explotación minera de Marmato en Zona alta A y Zona baja B para pequeña y mediana minería respectivamente, asociado a la problemática no sólo de informalidad minera sino a la particular situación jurídica referida a la superposición tanto en planta como en la vertical de los títulos mineros actualmente vigentes.

Según la información suministrada por la ANM a diciembre de 2015 en cuanto a titulación minera en el municipio de Marmato, se reporta un total de 121 títulos mineros, de los cuales la Autoridad Minera Departamental a septiembre de 2011, develó que la cantidad de Unidades Productivas Mineras (UPM) así como del estado contractual de los títulos mineros (Tabla 1) corresponden a un total 334 UPM y 73 minas en condición de inactividad, localizadas todas ellas sobre los títulos mineros en mención [10].

En la Imagen 2 se ilustra la localización de los títulos mineros que tiene el municipio de Marmato y la ubicación de las UPM que se analizaron en este proyecto.

Tabla 1.
Estado contractual de los títulos mineros en Marmato

Estado contractual de los títulos mineros*	
Descripción	**Cantidad**
Construcción y montaje	17
Exploración	13
Explotación	91
Total de títulos mineros	**121**

Unidades productivas mineras (UPM)**	
Activas	334
Inactivas	73

Fuente: *Adaptada de información de la Agencia Nacional de Minería (ANM) al 2015.
**Adaptada de censo minero realizado por la alcaldía de Marmato en el año 2011.

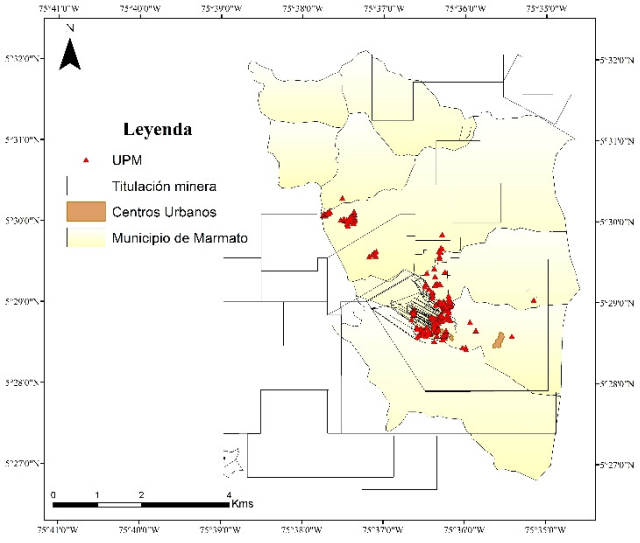

Imagen 2. Ubicación de títulos en el municipio de Marmato
Fuente: Propia

4. Panorama de riesgos en Marmato

La actividad minera es un ejercicio de alto riesgo y esta situación se agrava cuando existe una baja cultura de seguridad industrial y salud en el trabajo (SST) como la que presentan los mineros tradicionales del municipio de Marmato en actividades o infraestructuras como el acceso a las minas, manipulación de las herramientas de arranque, manipulación de los explosivos no convencionales, así como también los sistemas de cargue y transporte del material con muy bajos estándares de seguridad, como por ejemplo el sistema de transporte se realiza a través de carreta, cable aéreo (llamado de manera coloquial en Marmato como “Breques”), coches de madera, volquetas por las vías municipales y a lomo de mula, entre otros.

Las consecuencias de los accidentes en las UPM del municipio de Marmato son por lo general catastróficos, presentándose tanto en el interior de las minas subterráneas como en su exterior. En el interior de las UPM se presentan traumas en las personas debido al desprendimiento de materiales o rocas, caídas o atrapamiento, causando

discapacidades permanentes hasta la muerte, mientras que en el exterior de las minas a causa de las caídas a nivel y desniveles, daño electromecánico por contacto o choque de personas con los equipos de transporte y preparación de los explosivos no convencionales, se presentan también ese tipo de consecuencias catastróficas en las personas.

En forma general, las UPM del municipio de Marmato, no cuentan con procedimientos estandarizados para la ejecución de las operaciones mineras unitarias. Los procedimientos y controles existentes para minimizar los escenarios de riesgos se basan en la experiencia empírica de cada uno de los operarios mineros de la zona a la hora de realizar su labor.

5. Metodología de identificación y valoración de escenarios de riesgos mineros

Con el fin de identificar, describir, analizar y valorar los riesgos derivados de la actividad minera aurífera en el municipio de Marmato se presenta como referencia la metodología descrita en el *Manual de evaluación de riesgos de las faenas mineras abandonadas o paralizadas* (FMA/P); presentando las debidas modificación en cuanto a la condición activa de las minas del municipio de Marmato. Así mismo se presentan como foco cada uno de los componentes de una actividad minera y las actividades o procesos que estas desarrollan.

5.1. Parámetros evaluados

- Existencia de un circuito de ventilación y registro de medición periódica de gases.
- Existencia de controles y equipos para el manejo de aguas subterráneas.
- Existencia de plantas eléctricas, mantenimiento y aislamiento de equipos y conducción eléctrica.
- Uso adecuado y de calidad de los Elementos de Protección Personal (EPP).
- Existencia de la señalización pertinente.
- Existencia de programas de mantenimiento preventivo de equipos y herramientas.
- Condición de sostenimiento de túneles.
- Existencia de planes de atención de emergencias.
- Manipulación de explosivos y sustancias químicas realizada por personal capacitado.
- Dimensiones de los túneles mínimas requeridas.
- Condición de la atmosfera minera óptima.
- Planes de mantenimiento y tecnología empleada en los equipos.
- Condiciones de pisos del túnel, iluminación y visibilidad.
- Proceso de beneficio
- Capacidad del entable y registro de la cantidad de material procesado.
- Manejo de agua, vertimientos e insumos químicos.
- Manejo del material estéril (Colas y escoria).
- Condiciones de los equipos y dimensiones del entable minero.
- Existencia de señalización de seguridad.

5.2. Definición de lo escenarios de riesgos

Los escenarios de riesgos, hacen alusión a aquel entorno o medio en el cual se pueda evaluar la probabilidad de ocurrencia de un evento y sus consecuencias derivadas. Para este caso se discriminaron dichos escenarios en dos categorías: Seguridad y Contaminación.

5.2.1. Escenarios de riesgos según la seguridad (ERS)

Comprenden los casos en los que se reúnen las condiciones de peligro para un receptor potencial, sean las personas (P) o la actividad minera (AM), pudiendo resultar en consecuencias leves o graves dependiendo del nivel de exposición y la frecuencia de ocurrencia del evento. En la Tabla 2 se resumen los escenarios de riesgos por seguridad planteados.

5.2.2. Escenarios de riesgos según la Contaminación (ERC)

Comprende los casos en los que se reúnen las condiciones de peligro que afectan o generan un daño al medio ambiente, resultando consecuencias leves o graves dependiendo del nivel de exposición y la frecuencia de ocurrencia del escenario. En la Tabla 3 se resumen los escenarios según la contaminación planteados.

Tabla 2.
Resumen de escenarios de riesgos según la seguridad

Escenarios de riesgos según la seguridad (ERS)	Código
Asfixia	ERS-1
Asfixia por Inmersión	ERS-2
Caída a desniveles	ERS-3
Caída a nivel	ERS-4
Caída de Equipos y/o chatarra	ERS-5
Caída de Rocas	ERS-6
Colapso del frente de explotación	ERS-7
Colapso de túnel de transporte	ERS-8
Contacto con superficie cortante	ERS-9
Contacto eléctrico	ERS-10
Daño electromecánico	ERS-11
Explosiones no programadas	ERS-12
Incendio de origen eléctrico	ERS-13
Movimientos de masa	ERS-15
Movilización de material estéril de la mina	ERS-16
Proyecciones de roca	ERS-17
Contacto con llamas o superficies calientes (Quemaduras)	ERS-18
Riesgos biológicos	ERS-19
Riesgos biomecánico y físico	ERS-20
Superficies lisas e inclinadas	ERS-21
Vibraciones	ERS-22
Humedad anormal	ERS-23
Iluminación deficiente	ERS-24
Inundación	ERS-25
Subsidencia	ERS-26
Estrés térmico	ERS-27
Manejo inadecuado de explosivos	ERS-28
Colapso de la infraestructura (Oficinas, talleres, entable)	ERS-29
Alteración Orden público y hurto	ERS-30

Fuente: Propia.

Tabla 3.
Resumen de escenarios de riesgos según la contaminación

Escenarios de riesgos por contaminación (ERC)	Código
Drenaje con presencia de contaminantes y aguas ácidas	ERC-1
Manipulación de sustancias tóxicas	ERC-2
Modificación del drenaje en aguas superficiales	ERC-3
Movilización de material estéril del proceso de beneficio	ERC-4
Presencia de contaminantes tóxicos y sedimentos en aguas	ERC-5
Presencia de alto nivel de ruido	ERC-6
Presencia de gases contaminantes	ERC-7
Presencia de material particulado (polvo)	ERC-8

Fuente: Propia.

5.3. Estimación del Índice de Probabilidad de Ocurrencia (IP)

Para obtener el valor de probabilidad de ocurrencia o frecuencia con la cual ocurre o se manifiesta un escenario de riego (Seguridad o Contaminación), se realiza el cálculo del Índice de Probabilidad (IP). Para obtener dicho valor es necesario calcular dos parámetros que evidencien el estado en que se encuentra el equipo o área donde se presenta el escenario de riesgo y el tiempo en el cual los receptores se encuentran presentes, estos se definen como el nivel de deficiencia y de exposición (Ecuación 1).

Ecuación 1. Matriz de valoración IP

$$Matriz\ IP = [ND\ x\ NE]$$

Fuente: SERNAGEOMIN - BGR, 2008

Dónde:
IP = Índice de Probabilidad
ND = Nivel de Deficiencia del escenario de riesgo
NE = Nivel de Exposición

La valoración del ND: Nivel de Deficiencia y NE: Nivel de Exposición se realiza a través de las Guías de cálculo de IP.

Una vez realizada la valoración de estos dos parámetros (ND y NE), se efectúa la categorización, estandarización y evaluación del IP bajo la combinación matricial de estos dos valores según la Tabla 4.

Tabla 4.
Matriz y estándares del Indicie de Probabilidad (IP)

	Nivel de Exposición (NE)			
Nivel de Deficiencia del escenario (ND)	**Esporádico (1)**	**Ocasional (2)**	**Frecuente (3)**	**Continuo (4)**
Muy Alto	Muy Alto-1	Muy Alto-2	Muy Alto-3	Muy Alto-4
Alto	Alto-1	Alto-2	Alto-3	Alto-4
Moderado	Moderado-1	Moderado-2	Moderado-3	Moderado-4
Bajo	Bajo-1	Bajo-2	Bajo-3	Bajo-4
VALOR DEL ÍNDICE DE PROBABILIDAD (IP)				
Muy Alta			4	
Alta			3	
Moderada			2	
Baja			1	

Fuente: SERNAGEOMIN - BGR, 2008

Por último, se calcula un promedio ponderado del valor del Índice de Probabilidad (IP) asignado a cada uno de los escenarios de riesgos (Ecuación 2), con el fin de generar un único valor que nos permita medir las frecuencias de los escenarios de riesgos en particular.

Ecuación 2. Promedio ponderado del Índice de Probabilidad

$$Prom\ IP = \sum IP * X / \sum X$$

Fuente: Propia a partir de (SERNAGEOMIN - BGR, 2008)).

Dónde:
Prom IP = Promedio ponderado del Índice de Probabilidad
IP = Índice de Probabilidad
X = Número de UPM en el que se aprecia el escenario de riesgo

5.4. Estimación de la Severidad de Consecuencias (SC)

Para estimar la Severidad de las Consecuencias (SC) sobre los potenciales receptores cuando un escenario de riesgo se vuelve efectivo es relativamente complejo, además que éstos; debido a su procedencia, están íntimamente relacionados con los receptores (personas, medio ambiente y actividad minera); por lo tanto, fue necesario definir criterios que permitieran categorizar y parametrizar la evaluación de este parámetro (Tabla 5).

Para tal fin se asignó un valor entero de 1 a 4, por categorías definidas como baja, media, alta y catastrófica respectivamente para los diferentes receptores. Una vez generadas estas calificaciones de SC para cada uno de las UPM según la metodología y estandarización de los criterios de evaluación, se realiza un promedio ponderado del valor asignado a cada uno de los escenarios de riesgos (Ecuación 3).

Ecuación 3. Promedio ponderado de la Severidad de las Consecuencias

$$Prom\ SC = \sum SC * X / \sum X$$

Fuente: Propia a partir de (SERNAGEOMIN - BGR, 2008)).

Dónde:
Prom SC = Promedio ponderado de la Severidad de las consecuencias
SC = Valor Severidad de consecuencias
X = Número de UPM en la que se presenta el escenario de riesgo

Tabla 5.
Criterios para definir la Severidad de las Consecuencias

Receptores	**Criterios para Definir la severidad de las Consecuencias**	
	Seguridad	**Contaminación**
Personas	Lesiones físicas o pérdidas de vidas humanas	Daño a la salud humana
Medio ambiente	Perdida de superficie donde se desarrolla vida acuática, terrestre o áreas protegidas	Superficie potencialmente afectada donde se desarrolla vida acuática, terrestre o áreas protegidas

Fuente: Propia a partir de (SERNAGEOMIN - BGR, 2008)).

Las dos ecuaciones mencionadas anteriormente fueron generadas por el grupo de trabajo de la Universidad Nacional de Colombia con el fin de obtener un único y solo valor de IP y SC del escenario de riesgo evaluado y así determinar su categoría o nivel dentro de la matriz de priorización.

5.5. Estimación de matriz de evaluación de riesgos y priorización

La matriz de riesgos se formuló mediante la combinación de los factores Índice de Probabilidad de ocurrencia (IP) y Severidad de las consecuencias (SC) con el propósito de determinar los niveles de importancia del escenario de riesgo valorado. La priorización es catalogada como SIGNIFICATIVOS (celdas de color rojo y amarillo) y NO SIGNIFICATIVOS (celdas de color verde y azul) (Tabla 6).

6. Diagnóstico, identificación y valoración de los escenarios de riesgos según la seguridad y contaminación en Marmato

6.1. Diagnóstico de la actividad minera

En el municipio de Marmato se visitaron y evaluaron un total de 240 UPM, todas de tipo subterránea, distribuidas por veredas y sectores conocidos por los lugareños de Marmato, siendo la vereda Echandia la que presenta mayor cantidad de UPM con un total de 125 UPM, mientras que el sector denominado La Llorona ubicado en la vereda Cabras presenta la mayor cantidad con un total de 53 UPM, seguido del sector de Cien Pesos localizado en la vereda Echandia con 10 menos. De estas UPM visitadas se aprecia que el 55% se encuentran en operación y el 45% inactiva o abandonada.

Tabla 6.
Matriz de priorización de riesgos.

	Severidad de las Consecuencias (SC)			
Índice de Probabilidad (IP)	Baja (1)	Moderada (2)	Alta (3)	Catastrófica (4)
Muy Alta	1 Muy Alta	2 Muy Alta	3 Muy Alta	4 Muy Alta
Alta	1 Alta	2 Alta	3 Alta	4 Alta
Moderada	1 Moderada	2 Moderada	3 Moderada	4 Moderada
Baja	1 Baja	2 Baja	3 Baja	4 Baja
Descripción de priorización				
Significativa Tipo 1	Escenarios de riesgo en los que los planes de intervención deben efectuarse de manera inmediata o a corto plazo			
Significativa Tipo 2	Escenarios de riesgo en los que los planes de intervención deben efectuarse a corto o mediano plazo			
No Significativa Tipo 1	Escenario de riesgo en los que los planes de intervención deben efectuarse a mediano o largo plazo y las UPM conviven de manera esporádica con estos riesgos			
No Significativa Tipo 2	Escenarios de riesgo en los que los planes de intervención deben efectuarse a largo plazo y las UPM pueden convivir con los riesgos			

Fuente: Propia.

6.2. Identificación de los escenarios de riesgos según la seguridad y la contaminación de la actividad minera

En las diferentes UPM del municipio de Marmato se identificaron los escenarios de riesgos discriminados por seguridad presentando como receptor las personas y medio ambiente respectivamente, los cuales se resumen en las Tablas 7 y 8.

Tabla 7.
Escenarios de riesgo por seguridad.

Escenarios de riesgos según la seguridad (ERS)	**Código**	**Total UPM**
Asfixia	ERS-1	**79**
Asfixia por Inmersión	ERS-2	**3**
Caída a desniveles	ERS-3	**102**
Caída a nivel	ERS-4	**91**
Caída de Equipos y/o chatarra	ERS-5	**61**
Caída de Rocas	ERS-6	**171**
Colapso del frente de explotación	ERS-7	**86**
Colapso de túnel de transporte	ERS-8	**100**
Contacto con superficie cortante	ERS-9	**52**
Contacto eléctrico	ERS-10	**57**
Daño electromecánico	ERS-11	**27**
Explosiones no programadas	ERS-12	**65**
Incendio de origen eléctrico	ERS-13	**17**
Movimientos de masa	ERS-15	**39**
Movilización de material estéril de la mina	ERS-16	**47**
Proyecciones	ERS-17	**82**
Contacto con llamas o superficies calientes (Quemaduras)	ERS-18	**6**
Riesgos biológicos	ERS-19	**83**
Riesgos biomecánico y físico	ERS-20	**84**
Superficies lisas e inclinadas	ERS-21	**46**
Vibraciones	ERS-22	**65**
Humedad anormal	ERS-23	**26**
Iluminación deficiente	ERS-24	**62**
Inundación	ERS-25	**7**
Estrés térmico	ERS-27	**44**
Manejo inadecuado de explosivos	ERS-28	**71**
Colapso de la infraestructura (Oficinas, talleres, entable)	ERS-29	**4**
Alteración Orden público y hurto	ERS-30	**1**

Fuente: Propia.

De los 30 escenarios de riesgo por seguridad evaluados, los correspondientes a Caída de Rocas (ERS-6), Caída a desniveles (ERS-3) y Colapso de túnel de transporte (ERS-8) presentan la mayor ocurrencia en todas las labores mineras. El ERS-6, correspondiente al riesgo de caída de rocas (Imagen 3), encontrado en un total de 171 minas, es recurrente en toda la zona, llegando a afectar incluso al mismo casco urbano de Marmato y obedece principalmente al grado de exposición de las personas al riesgo por caída de rocas ya que no existe ningún tipo de actividades o planes de mitigación que disminuyan la existencia o control de este escenario.

El riesgo por caída a desnivel (ERS-3) se evidenció en un total de 102 UPM, en donde se han adelantado clavadas o accesos verticales para seguir la explotación de las vetas. Estos cambios de nivel no presentan el adecuado acceso para las personas así como tampoco señalización de seguridad, siendo un riesgo que podría ocasionar discapacidades permanentes o la muerte.

El escenario de riesgo de colapso del túnel de transporte (ERS-8) se encuentra en la precaria infraestructura de sostenimiento, limitada en su mayor parte a zonas de saprolito; estos sostenimientos son realizados con canastas de madera, puertas alemanas atizadas y forradas, presentando cápices reventados o en ocasiones podridos (Imagen 4).

Para cada una de las UPM visitadas en el municipio de Marmato se identificaron los siguientes escenarios de riesgos por contaminación (riesgo ambiental) (Tabla 8).

De los ocho (8) escenarios de riesgo por contaminación evaluados en el municipio de Marmato, se encontró que los de mayor impacto al medio ambiente y más recurrentes corresponden a: escenario de riesgo Presencia de material particulado (ERC-8) seguido de Modificación del drenaje en aguas superficiales (ERC-3) y Drenaje con presencia de contaminantes y aguas ácidas (ERC-1).

La presencia de material particulado y polvo (ERC-8) fue el riesgo predominante en las minas visitadas (Imagen 5), manifestándose de dos formas: la primera ocurre en el momento de la operación unitaria de perforación, la cual se realiza en la mayoría de los casos en seco bien sea empleando

Imagen 3. Escenario de riesgo por Caída de Rocas (ERS-6).
Fuente: Propia.

Imagen 4. Escenario de riesgo de colapso del túnel de transporte (ERS-8)
Fuente: Propia.

Tabla 8.
Escenarios de riesgo por contaminación.

Escenarios de riesgos según la contaminación (ERC)	Código	Total UPM
Drenaje con presencia de contaminantes y aguas ácidas	ERC-1	**15**
Manipulación de sustancias tóxicas	ERC-2	**9**
Modificación del drenaje en aguas superficiales	ERC-3	17
Movilización de material estéril del proceso de beneficio	ERC-4	2
Presencia de contaminantes tóxicos y sedimentos en aguas	ERC-5	12
Presencia de alto nivel de ruido	ERC-6	12
Presencia de gases contaminantes	ERC-7	9
Presencia de material particulado (polvo)	ERC-8	22

Fuente: Propia.

Imagen 5. Escenario de riesgo presencia de material particulado (ERC-8) en la Mina la Targueña.
Fuente: Propia.

el martillo neumático o con taladro eléctrico la cual libera una gran cantidad de material particulado PM10 a la atmósfera minera. La segunda se evidenció en la disposición inadecuada de estériles al aire libre y transito continuo de volquetas a través de las vías de acceso, las cuales no se encuentran pavimentadas y sin ningún tipo de riego de agua continuo para disminuir la generación de polvo.

6.3. Priorización de los escenarios de riesgo por seguridad

Esta priorización se realizó mediante la combinación matricial en la que se conjuga la valoración de los promedios ponderados de los parámetros de Severidad de las Consecuencias (SC) y del Índice de Probabilidad (IP), obteniendo categorías de dichos riesgos según el tiempo y medidas de acción a tomar (Significativas y No Significativas).

En general, las actividades mineras del municipio de Marmato presentan escenarios de riesgo por seguridad en las personas con valores de priorización entre Significativa Tipo 2 y No Significativa Tipo 1, es decir que los planes de intervención o acciones de control y/o mitigación se deben realizar desde corto a mediano plazo.

En la Tabla 9 se presenta la matriz de priorización de los riesgos según la seguridad para las personas evaluadas en el municipio de Marmato.

Los escenarios de riesgo por seguridad para las personas en los cuales se deben implementar los planes de intervención entre corto y mediano plazo en el municipio de Marmato son: caída a desniveles (ERS-3), caída de Rocas (ERS-6), colapso de túnel de transporte (ERS-8), explosiones no programadas (ERS-12), movimientos de masa (ERS-15) movilización de material estéril de la mina (ERS-16), vibraciones (ERS-22) y manejo inadecuado de explosivos (ERS-28) los cuales se localizan en el sector amarillo (Significativa tipo 2) y más cercano a la zona roja de matriz de priorización. Mientras que los escenarios de riesgos en los cuales las UPM pueden convivir con ellos sin que se presenten grandes eventualidades son: Incendio de origen eléctrico (ERS-13),

Tabla 9.
Matriz de priorización de riesgo según la seguridad en las personas.

	Severidad de las Consecuencias			
Índice de Probabilidad	Baja (1)	Moderada (2)	Alta (3)	Catastrófica (4)
Muy Alta				
Alta	**ERS-19**	**ERS-4, ERS-5, ERS-1, ERS-10, ERS-20, ERS-21, ERS-23, ERS-24, ERS-25, ERS-27, ERS-9**	**ERS-3, ERS-6, ERS-15, ERS-16**	
Moderada	**ERS-13, ERS-18**	**ERS-7, ERS-11, ERS-17**	**ERS-8, ERS-12, ERS-22, ERS-28**	
Baja				

Fuente: Propia.

Tabla 10.
Matriz de priorización de riesgos por contaminación para el medio ambiente.

	Severidad de las Consecuencias			
Índice de Probabilidad	Baja (1)	Moderada (2)	Alta (3)	Catastrófica (4)
Muy Alta		**ERC-2**		
Alta		**ERC-1**	**ERC-3, ERC-5**	
Moderada	**ERC-4**	**ERC-6, ERC-7, ERC-8**		
Baja				

Fuente: Propia.

contacto con llamas o superficies calientes (Quemaduras) (ERS-18) y riesgos biológicos (ERS-19) localizados en la zona azul (No Significativa tipo 2) de la matriz.

6.4. Priorización de los escenarios de riesgo por contaminación

En general las actividades mineras del municipio de Marmato presentan escenarios de riesgo por contaminación en el medio ambiente con valores de priorización entre Significativa Tipo 2 y No Significativa Tipo 1, es decir escenarios en los que la intervención o acciones de control y/o mitigación se deben realizar desde corto a mediano plazo.

Los escenarios de riesgo por contaminación que afectan de manera directa al medio ambiente y presentan una mayor prioridad se encuentran: manipulación de sustancias tóxicas (ERC-2), modificación del drenaje en aguas superficiales (ERC-3) y presencia de contaminantes tóxicos y sedimentos en aguas (ERC-5) los cuales se encuentran en la franja amarilla de la matriz (Tabla 10).

De la matriz se concluye que los escenarios se encuentran localizados en la zona centro, lo cual nos indica que los planes de intervención a ejecutar para la mitigación de estos escenarios deben ser ejecutados en el corto y mediano plazo, iniciando por los escenarios anteriormente mencionados.

7. Recomendaciones

A continuación se enumeran algunas recomendaciones para prevenir y mitigar los riesgos asociados a la actividad minera:

- Uso de Equipos de Protección Personal (EPP), durante el desarrollo de toda la actividad minera, los cuales deben ser personales e intransferibles.
- Mantenimiento preventivo y programado de los equipos y las herramientas con los que se desarrolla la actividad minera.
- Verificación del estado de los elementos de aislamiento eléctrico en máquinas, herramientas e instalaciones.
- Implementación de escaleras de madera y cuerdas para evitar las superficies lisas y prevenir de esta manera las caídas a desnivel de los operarios de la mina.
- Tecnificar el transporte del material.

- Usar medidores de gases luego de las voladuras y antes del ingreso de los trabajadores para evitar intoxicaciones.
- Utilizar equipos de ventilación durante el desarrollo de la actividad minera, para evitar asfixia.
- Evitar el ingreso de menores de edad a la unidad minera.
- Hacer una señalización adecuada dentro y fuera de la mina.
- Disponer de lugares aptos para la acumulación de residuos sólidos y material estéril.
- Disponer de lugares seguros para el almacenamiento de explosivos y sustancias tóxicas.
- Implementar herramientas de sostenimiento adecuado de los túneles.
- Hacer una buena planificación de las actividades a desarrollar en la mina día a día.
- Implementar sistemas de tratamiento de las colas generadas en el proceso de beneficio (Relaveras)
- Construir depósitos de material estéril técnicamente aptos para el tratamiento de los estériles generados en las UPM.

8. Conclusiones

- En el municipio de Marmato se intervinieron un total de 240 UPM de las cuales el 45% (108) se encuentran inactivas, presentándose esta condición en mayor proporción en los sectores de La Llorona y Cien Pesos, los cuales pueden considerarse como un pasivo ambiental eminente para el municipio.
- De acuerdo a las condiciones jurídicas mineras que se presentan en el municipio de Marmato, referidas al amparo bajo el Decreto 2223 de 1945, la actividad minera intervenida se concentra en la denominada Zona Alta con un total de 135 UPM de las cuales el 37% (51) se encuentra inactiva y su mayor proporción se concentra en los sectores de San José y Cien pesos.
- La actividad minera del municipio de Marmato representa una de las fuentes principales de empleo para los marmateños generando un total 1.726 empleos directos de los cuales el 80% (1.381) presentan afiliaciones de seguridad social y riesgos profesionales, en mayor proporción presente en la compañía minera Mineros de Colombia de propiedad de la empresa Gran Colombia Gold.
- Los escenarios de riesgos según la seguridad (ERS) identificados en las UPM del municipio de Marmato más recurrentes son: caída a desnivel (ERS-3) evidenciado en el 43% (102) de las UPM y localizado en mayor instancia en el sector de Cien pesos, caída de rocas (ERS-6) evidenciado en el 71% (171) de las UPM y localizado en los sectores de La Llorona y Cien pesos, y colapso de túnel de transporte (ERS-8) comprobado en el 42% (100) de las UPM y localizado en mayor proporción en el sector de La Llorona, todo esto debido a los escasos protocolos de seguridad, las precarias condiciones del sostenimiento, mantenimiento y falta de manejo geotécnico del macizo rocoso.
- Los escenarios de riesgos según la contaminación (ERC) identificados en las UPM más frecuentes son: presencia de material particulado (polvo) (ERC-8) y drenaje con presencia de contaminantes y aguas (ERC-1). El primero de ellos se presentó en el 79% (22) de las UPM en el que se identificó este escenario de riesgo, localizado principalmente en el sector de Cien pesos, mientras que el segundo se evidenció en el 72% (17) de las UPM y localizado en mayor proporción en los sectores de La Llorona y Echandia.
- Los escenarios de riesgos que presentan mayor prioridad en el municipio de Marmato respecto a las la seguridad de las personas son: caída a desniveles (ERS-3), caída de Rocas (ERS-6), colapso de túnel de transporte (ERS-8), explosiones no programadas (ERS-12), movimientos de masa (ERS-15) movilización de material estéril de la mina (ERS-16), los cuales es necesario realizar acciones de mitigación en el corto y mediano plazo.
- Los escenarios de riesgos que presentan mayor prioridad en el municipio de Marmato respecto a la contaminación generada en el medio ambiente son: la modificación del drenaje en aguas superficiales (ERC-3) y presencia de contaminantes tóxicos y sedimentos en aguas (ERC-5), los cuales es necesario realizar acciones de reparación en el corto y mediano plazo.

Bibliografía

[1] Tassinari, C.C.G., Díaz, F. and Buenaventura, J., Age and sources of gold mineralization in the Marmato mining district, NW Colombia: a Miocene–Pliocene epizonal gold deposit., Ore Geology Reviews, 33(3), pp. 505-518, 2008.

[2] Agencia Nacional de Minería, Emergencias mineras, 1 Noviembre 2016. [En línea]. Disponible en: anm.gov.co/?q=emergencias_mineras.

[3] DANE, DANE, [En línea]. Disponible en: www.dane.gov.co/reloj/ . [Último acceso: 1 Noviembre 2016].

[4] Toussaint, J.F. y Restrepo, J.J., Acreciones sucesivas en Colombia: un nuevo modelo de evolución geológica., V Congreso Colombiano de Geología, pp. 127-146, 1989.

[5] Leal-Mejía, H., Phanerozoic gold metallogeny in the Colombian Andes: a tectono-magmatic approach. Doctoral dissertation, Universitat de Barcelona, ESpaña, 2011, 989 P.

[6] González, H. y Maya, M., Unidades Litodémicas de la Ridge Central de Colombia.,» Boletín Geológico Ingeominas, 35, pp. 2-3; 43-57, 1995.

[7] Vinasco, C.J., A utilização da metodologia 40Ar–39Ar para o estudo de reativações tectônicas em zonas de cisalhamento. Paradigma: o Falhamento de Romeral nos Andes Centrais da Colômbia, M.Sc. Thesis, Instituto de Geociências, Universida de de São Paulo, Brazil, 2001, 85 P.

[8] Sillitoe, R.H., Special paper: major gold deposits and belts of the North and South American Cordillera: distribution, tectonomagmatic settings, and metallogenic considerations, Economic Geology, 103(4), pp. 663-687, 2008. DOI: 10.2113/gsecongeo.103.4.663

[9] Sandoval-Robayo, M.L. y Lasso, R.M., Riesgo: teoría y realidad: el caso de Marmato, Caldas. Luna Azul [online]. 34, 2012, pp.170-194. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-24742012000100011&lng=en&nrm=iso.

[10] Alcaldía de Marmato [En línea]. [Último acceso: Noviembre 2016]. Disponible en: www.marmato-caldas.gov.co.

A.J. Motta-Pascuas, es graduada del programa de Ingeniería Geológica en el año 2017, de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Actualmente se desempeña como profesional técnico de apoyo en la Secretaría de Obras Públicas e Infraestructura de la Alcaldía de Marinilla-Antioquia, en el área de gestión del riesgo como coordinadora del Consejo Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres.
ORCID: 0000-0002-7484-0737

M.A. Ustariz-Duran, es graduado del programa de Ingeniería de Minas y Metalurgia en el año 2012, de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Durante su trabajo como profesional se ha desempeñado como profesional técnico y coordinador de proyectos de extensión relacionados al sector minero de la misma Universidad concernientes con la valoración de títulos mineros, legalización y formalización minera, evaluación de riesgos asociado a la actividad minera e investigación de la trazabilidad del oro. Actualmente se desempeña como coordinador técnico del proyecto de valoración de la afectación generada por las descarga de la represa Porce III sobre los mineros tradicionales de la zona localizada aguas debajo de la presa.
ORCID: 0000-0003-0191-2557

O. Ordoñez-Carmona, es Geólogo de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, MSc. y Dr. en Geociencias de la Universidad de Brasilia, Brasil; actualmente es profesor asociado adscrito a la Escuela de Geociencias y Medio Ambiente de la Facultad de Minas, director del grupo de investigación en Georrecursos, Minería y Medio Ambiente – GEMMA; cuenta con una producción bibliográfica de 26 artículos científicos publicados en revistas indexadas por Colciencias y con una amplia experiencia en proyectos de investigación y extensión con el sector público y privado en temas relacionados con geología regional, geotecnia, geocronología, yacimientos minerales y minería en el territorio colombiano, incluyendo el desarrollo de aproximadamente 30 dictámenes técnicos periciales relacionados con problemáticas sociales, ambientales, civiles y geologíco-mineras.
ORCID: 0000-0003-3472-6160