

ARTÍCULOS

Relación consumo específico/avance,
en operaciones de minería subterránea MAPE,
caso de estudio Ecuador

Relation between specific consumption/advance,
in underground mining operations MAPE,
study case Ecuador

Paredes Parreño, Carla Maribel; Calderón Viveros, Edmundo Marcelo



Carla Maribel Paredes-Parreño



carla.paredes@geoenergia.gob.ec
Instituto de Investigación Geológico y
Energético. Quito, Ecuador.

Edmundo Marcelo Calderón-Viveros



edmundo.calderon@geoenergia.gob.ec
Instituto de Investigación Geológico y
Energético. Quito, Ecuador.

FIGEMPA: Investigación y Desarrollo

Universidad Central del Ecuador, Ecuador

ISSN-e: 2602-8484

Periodicidad: Semestral

vol. 17, núm. 1, 2024

revista.figempa@uce.edu.ec

Recepción: 18 julio 2023

Aprobación: 26 enero 2024

DOI: <https://doi.org/10.29166/revfig.v17i1.4932>

Autor de correspondencia:

calderonmarcelocell@yahoo.com

RESUMEN

En Ecuador, la Minería Artesanal y de Pequeña Escala, MAPE, es una actividad de relevancia nacional. Históricamente existen tres provincias de amplio potencial y de tradición minera, que son: El Oro, Zamora Chinchipe y Azuay. En este sentido, en la provincia de El Oro, gran porcentaje de la población económicamente activa, depende directa o indirectamente de la explotación de minerales de alta rentabilidad. Uno de los aspectos clave para el desarrollo de las operaciones subterráneas del régimen MAPE, son las actividades de perforación y voladura, en donde existe una gran oportunidad de mejora, gestionando de manera eficiente el diseño de la malla, la ejecución de la perforación, la cantidad de explosivo y la forma de cargado, que son los factores que definen el resultado de la voladura; mismo que es valorado en función de la profundidad de corte o avance y de la uniformidad de la estructura de la sección. Para el desarrollo de esta investigación se realizó el levantamiento de la línea base mediante visitas técnicas al sector de estudio (distrito minero Zaruma - Portovelo), donde se observaron los procedimientos tradicionales de trabajo, para luego, con base al método experimental realizar variaciones técnicas en cuanto al diagrama de disparo, carga específica, perforación específica y tipo de explosivo. Estos procedimientos tradicionales (empíricos), basados en la experiencia de campo del perforista, ocasiona entre otras cosas la ineficiencia del avance, problemas para mantener las dimensiones de la sección, sobre rotura de los frentes de trabajo, y uno de los factores más relevantes, la inseguridad del personal que en muchos casos permanece en el interior de la mina por más de 10 horas. Entre los principales resultados se obtuvo que los mejores ensayos fueron los que se utilizó la combinación emulsión/ANFO (Amonium Nitrate Fuel Oil), obteniendo un porcentaje de avance de aproximadamente 95%, considerado dentro de la operación como óptimo. Así también se evidenció que el Nitrato de Amonio de uso habitual en la MAPE, necesita una carga específica de mayor poder para cumplir con el objetivo de la voladura.

Palabras claves: MAPE; barreno; perforación y voladura; emulsión; ANFO; cuele.



Esta obra está bajo una Licencia
Creative Commons Atribución
4.0 Internacional (CC BY 4.0)

Cómo citar: Paredes-Parreño, C. M. & Calderón-Viveros, E. M. (2024). Relación consumo específico/avance, en operaciones de minería subterránea MAPE, caso de estudio Ecuador. FIGEMPA: Investigación y Desarrollo, 17(1), 43-58.
<https://doi.org/10.29166/revfig.v17i1.4932>

ABSTRACT

In Ecuador, Artisanal and Small-Scale Mining, MAPE, is an activity of national relevance. Historically there are three provinces with great potential and mining tradition, which are: El Oro, Zamora Chinchipe and Azuay. In this sense, in the province of El Oro, a large percentage of the economically active population depends directly or indirectly on the exploitation of highly profitable minerals. The key aspects for the development of underground operations of the MAPE regime are the drilling and blasting activities, where there is a great opportunity for improvement, efficiently managing the design of the grid, the execution of the drilling, the amount of explosive and the way it is charged, which are the factors that define the result of the blasting; same that is valued in function of the depth of cut or advance and of the uniformity of the structure of the section. For the development of this research, the baseline survey was carried out through technical visits to the study sector (Zaruma - Portovelo mining district), where traditional work procedures were observed, and then, based on the experimental method, technical variations were made in regarding the firing diagram, specific charge, specific perforation and type of explosive. These traditional (empirical) procedures, based on the driller's field experience, cause, among other things, the inefficiency of the advance, problems to maintain the dimensions of the section, over breaking of the working fronts, and one of the most relevant factors, the insecurity of the personnel who in many cases remain inside the mine for more than 10 hours. The main results show that the best tests were those that used the emulsion/ANFO (Amonium Nitrate Fuel Oil) combination, obtaining an advance percentage of approximately 95%, considered optimal within the operation. It was also evidenced that the Ammonium Nitrate commonly used in ASM needs a specific charge of greater power to meet the objective of the blasting.

Keywords: ASSM; blast-hole; drilling and blasting; emulsion; Amonium Nitrate Fuel Oil; strain

INTRODUCCIÓN

En el Ecuador históricamente se han desarrollado actividades de minería subterránea, con el predominio del régimen de minería artesanal y de pequeña escala, MAPE (Almeida, 2019); tal es el caso del Distrito Minero Zaruma Portovelo, que basa sus actividades económicas en la explotación de minerales de alta rentabilidad como: oro, plata y cobre (Ulloa, 2023).

El Distrito Minero Zaruma - Portovelo, se ubica en la provincia de El Oro, al suroeste del Ecuador Continental, y según el último Censo de Población y Vivienda publicado, aproximadamente el 65% de la población económicamente activa del sector depende directa o indirectamente de esta actividad (Oliva González, Ruiz Pozo y Gallardo Amaya, 2018).

En las operaciones de la MAPE, donde la sección promedio de las labores mineras es pequeña¹ ya que depende del tipo de equipos y vehículos utilizados (Rojas-Villacís y Zúñiga-Arrobo, 2022), un aspecto clave para su desarrollo, es la efectividad con que se realicen las actividades de perforación y voladura (Díaz-Martínez, Guarín-Aragón y Jiménez-Builes, 2012), y son éstas donde existe una gran oportunidad de mejora, que permita lograr prácticas de rentabilidad con seguridad en los trabajos mineros.

Con mucha frecuencia estos trabajos se realizan de manera empírica, basados en la experiencia del perforista (Paredes Pozo, 2013), y como resultado se obtiene un avance ineficiente, problemas para mantener las dimensiones de la sección, sobre rotura de los frentes de trabajo, y lo más preocupante, la inseguridad. Esto último, a pesar que el Artículo 47 del Código de Trabajo especifica: "El tiempo máximo de trabajo efectivo en el subsuelo será de seis horas diarias" (Registro Oficial Órgano del Gobierno del Ecuador N°162, 2012), sin embargo durante las visitas técnicas a varias labores mineras del sector se evidenció que en muchos casos los trabajadores permanecen en el interior de la mina por más de 10 horas.

Dadas las condiciones que anteceden, cabe señalar que el diseño de la malla de perforación, la distribución de los barrenos, la prolijidad de la perforación y paralelismo entre taladros², la cantidad de explosivo y forma de cargado, son factores que definen el resultado de la voladura, medido en función del avance, en este sentido, Seccatore y Cardú (2017) manifiestan que "En la excavación de galerías por perforación y voladura, la tasa de avance por tiro es el aspecto clave para la productividad del sitio de trabajo y por lo tanto para la rentabilidad del proyecto".

Con referencia a lo anterior, considerando que las labores mineras, objeto de los ensayos de perforación y voladura realizados, son horizontales y mantienen secciones menores a los 10 m² (sección pequeña), con roca de tipo "dura", en el Manual práctico de Voladura de EXSA, 2019, se menciona que la alineación de un barreno varía con el tipo y naturaleza de la roca, el método de perforación y el equipo utilizado; y en barrenos para voladura estos deben ser los más rectos posibles a fin que el explosivo quede distribuido adecuadamente. Así también Cardu y Seccatore (2016) en su artículo científico "Túneles y Tecnología Espacial Subterránea", indican que las voladuras de galería con cortes de orificios paralelos generalmente tienen una mayor eficiencia de tracción, que las voladuras con cortes de orificios inclinados.

Cabe agregar que, una parte importante para la definición del avance de la voladura es el cuele, cuya detonación inicia la secuencia de disparo. Para el desarrollo del estudio se utilizó la metodología de arranque por Corte Quemado en Rombo (Método Holmberg & Persson, 1980), y el método de Burden equivalente de tres y cuatro barrenos para asemejar a una perforación de mayor diámetro.

Otro de los aspectos clave al momento de realizar el diseño de la malla de perforación y voladura es el ejecutar previamente la caracterización del macizo rocoso, para conocer la dureza de las rocas, ya que no es suficiente con la clasificación litológica. En este sentido hay que tener en cuenta que, por definición, en macizo rocoso es un medio heterogéneo que debe ser considerado como tal, de modo que hay que asumir que siempre que se apliquen conceptos generales, o fórmulas más o menos desarrolladas de cálculo de voladuras, derivadas de modelizaciones y generalizaciones más o menos simplificadas de un medio heterogéneo (Bernaola, Castilla y Herrera, 2013).

¹ Secciones que no superan los 10 metros cuadrados (López Jimeno, 2016). Dato que se corroboró con las mediciones realizadas durante los ensayos

² A pesar de que el paralelismo de los barrenos varía con el tipo de roca, método de perforación y características del equipo perforador. En labores de sección pequeña la perforación debe tener la mayor rectitud y alineamiento para que el explosivo sea apropiadamente distribuido (EXSA, 2000)

Con respecto a la forma de cargado de explosivo, se ha evidenciado que con mucha frecuencia en la MAPE se utiliza Nitrato de Amonio de baja intensidad (LDAN, por sus siglas en inglés) como carga de columna, tal como lo describen Seccatore et al. (2020) que mencionan que en Ecuador los mineros suelen emplear una carga de columna de cartuchos artesanales de Nitrato de Amonio sin la combinación con Fuel Oil, que a pesar de tener una velocidad de detonación (VoD) más baja, la onda de choque logra fracturar la roca y disminuye los tiempos de ventilación, con respecto al uso de ANFO (del inglés: Ammonium Nitrate - Fuel Oil).

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se llevó a cabo mediante la metodología experimental-comparativa, que se basa en la manipulación de las variables: diagrama de disparo, tipo de explosivo, cantidad de explosivo y posterior análisis comparativo de resultados. En este estudio los resultados se basan en determinar: alto y ancho de la sección, profundidad de avance, volumen extraído, que tienen un tratamiento de datos y una comparación cuantitativa y, la forma resultante de la sección, con un análisis cuali-cuantitativo.

El desarrollo de la investigación tiene tres fases, una de gabinete para preparación de la infraestructura, que comprende desde la revisión bibliográfica, diseño y simulación de mallas, hasta la contratación de asesoría y compra de explosivos; la segunda de ensayos de campo, que se realizaron en una labor minera del Distrito Minero Zaruma Portovelo, donde se ejecutaron 9 pruebas de perforación y voladura, en un frente de trabajo denominado Frente C, con una sección promedio de 2,80 m de alto por 2,60 m de ancho, siendo una sección ideal, y finalmente la tercera fase que corresponde al análisis de datos y la gestión de resultados.

Los ensayos parten utilizando el diseño de malla y métodos de trabajo tradicional en la labor minera, que se lo denomina método empírico, para posterior realizar variaciones respecto al tipo de cuele, entre diámetro -burden- equivalente y cuele quemado; carga específica (kg de explosivo/volumen), y perforación específica (metros perforados/volumen).

En el frente C se realizaron 9 ensayos de perforación y voladura, de los cuales uno se realizó con burden equivalente de 4 taladros, con diámetro en conjunto de perforación promedio de 10 cm; y 8 ensayos con cuele quemado con diámetro de perforación de 3.8 cm (Figura 1); la distribución de la carga de cada ensayo varió entre:

- Emulsión/LDAN
- Emulsión/ANFO

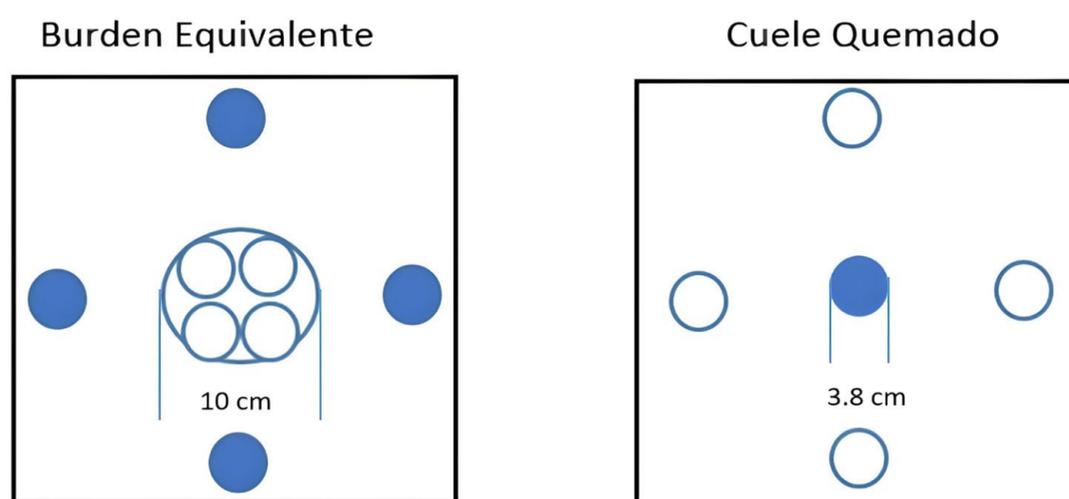


FIGURA 1
Diseños de cuele realizados en los ensayos

Cabe señalar que en el método empírico la distribución de la carga se realiza colocando un taco de LDAN, de dimensiones: 1 pulgada de diámetro, por 30 cm de largo, como carga de fondo, una emulsión y dos o tres tacos de LDAN como carga de columna y tacos de arcilla para retacar.

En este contexto, se realizó la primera variación técnica, con respecto a la distribución de la carga. Se colocó el explosivo primario, en este caso una emulsión como carga de fondo, el explosivo secundario, ANFO (requiere de la fuerza de detonación del primario para activarse y generar la cantidad de gases suficientes para romper la

roca), como carga de columna y los tacos de arcilla para el retacado; mismos que permitirán que la presión de la detonación no escape por el barrenado y genere el efecto deseado.

Para el cálculo de la carga específica de explosivo por metro cúbico de material volado, se consideró la cantidad total de explosivo (Emulsión/ANFO/LDAN) requerido para detonar un metro cúbico de material de acuerdo al volumen real de cada ensayo: siendo para el frente C un rango de 1,54 kg/m³ a 3,57 kg/m³.

La segunda variación técnica experimental fue la modificación de la malla de perforación disminuyendo la cantidad de taladros, de 50 que se realizan en el método empírico, a 32 en el método técnico mediante el diagrama con Cuele Quemado en Rombo. En tal sentido la perforación específica, que es la cantidad de metros perforados por unidad de volumen; para el frente C, se calculó en un rango de 3,54 m/m³ a 7,75 m/m³, considerando que por cada ensayo se mantiene el avance de acuerdo a la longitud del barrenado.

Para el análisis comparativo de los datos base (alto y ancho de la sección, profundidad de avance, volumen extraído), se realizó el levantamiento de la topografía, a detalle, con el uso de un escáner láser portable, previo y posterior a cada ensayo. Cabe destacar que, con base en los datos de sección inicial, y el avance ideal que se fija es el 95% de la profundidad de perforación, el volumen ideal por avance en el frente C es de 11,07 m³.

Una vez concluida la etapa de ensayos y levantamiento de campo, se realizó el procesamiento y depuración de datos en gabinete, organizando los resultados en matrices multicriterios en formato Excel; y posterior en tablas dinámicas se realizó las comparaciones respecto del avance, volumen de explotación, alto y ancho y regularidad de la sección. En las matrices se ejecutó un análisis con base en los datos medidos, para calificar con una puntuación de 1 a 10; puntuando con 10 al ensayo que más se aproxima al alto, ancho, avance y volumen ideal.

Así también, se analizó los ensayos que obtuvieron los mejores resultados con relación a la forma: uniformidad del techo, piso, frente y sobre excavación (panza) en la zona del cuele; para lo cual se midió en el programa Cloud Compare, con base en la nube de puntos, los volúmenes de sobrerotura o subrotura, puntuando con 1 a los ensayos de mayores volúmenes y con 10 a los que tuvieron efectividad en la voladura, con una óptima forma de la sección resultante.

Cabe señalar que se utilizó la ecuación de punto pendiente (Ecuación 1) para asignarles el peso real a cada uno de los valores de la serie de datos. El cálculo de punto pendiente se utiliza para resolver ecuaciones lineales, encontrar la pendiente de la recta y un punto de esta, que no está ordenada al origen. Es así que los valores obtenidos en el estudio (valores medidos), fueron traspasados a un valor puntual en un rango de 1 a 10, siendo 10 el que más se acerca al valor ideal. Por ejemplo, el ensayo en el cual el frente resultó defectuoso con sobrerotura en el área del cuele, será el que menor puntuación obtenga (Tabla 1, Figura 2). Este ejercicio se realizó en todas las variables medidas para lograr unificar unidades y poder promediar para obtener el resultado del ensayo más eficiente.

$$y=mx+b \quad \text{Ec.(1)}$$

Dónde:

X es el volumen de sobrerotura del cuele

Y es la puntuación en el rango de 1 a 10, considerando que, a mayor volumen, menor puntuación

Planteamiento:

Sí $x=0.71 \Rightarrow y=1$

Sí $x=0.02 \Rightarrow y=10$

Resolviendo la ecuación:

TABLA 1
Resolución de ecuación para volumen del cuele

$y = (-13.04)x + 10.26$	
0.71	1.0
0.06	9.5
0.23	7.2
0.08	9.3
0.02	10.0
0.50	3.7
0.08	9.2
0.25	7.1
0.23	7.2

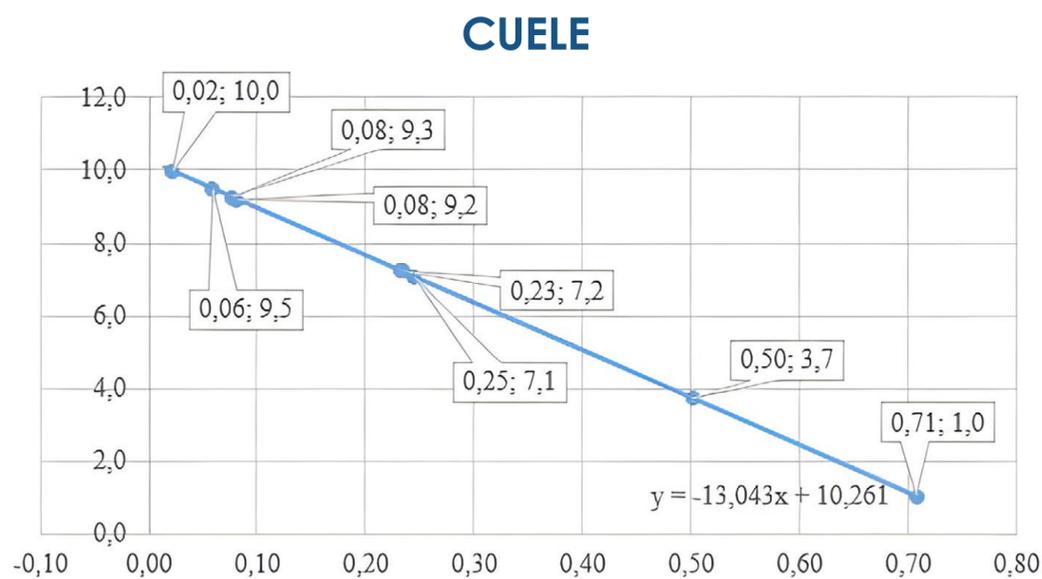


FIGURA 2
Resolución de la ecuación punto pendiente para los valores de volumen de la zona del cuele

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El resultado del análisis cuantitativo de las ocho variables que intervienen para calificar la eficiencia de la voladura, muestra que la voladura 5 de la combinación de explosivos Emulsión – Anfo, es la que obtuvo el mejor promedio (9,4); el detalle completo de las puntuaciones de cada variable se presenta en la tabla 2. Adicional, subsecuente se realiza un análisis completo, de las variables y sus interrelaciones, para concluir efectivamente el ensayo que logro mayor efectividad.

TABLA 2
Análisis cuantitativo de la eficiencia de la voladura

No. VOLADURA	Combinación Explosivo	Alto	Ancho	Avance	Volumen	Regularidad				Promedio
						Cuele	Piso	Techo	Frente	
VOLADURA 1	LDAN-EMULSIÓN-LDAN	9.8	9.9	8.6	9.9	1.0	8.5	6.7	7.8	7.8
VOLADURA 2	EMULSIÓN-LDAN	9.3	9.9	5.3	6.9	9.5	7.5	7.3	10.0	8.2
VOLADURA 3	EMULSIÓN-LDAN	9.7	9.6	9.4	9.2	7.2	8.0	6.5	6.8	8.3
VOLADURA 4	EMULSIÓN -ANFO	9.9	9.1	8.8	9.4	9.3	8.5	8.2	8.0	8.9
VOLADURA 5	EMULSIÓN -ANFO	9.7	9.9	9.7	9.0	10.0	8.7	8.0	9.9	9.4
VOLADURA 6	EMULSIÓN -ANFO	9.1	9.3	8.7	9.0	3.7	7.0	8.0	6.6	7.7
VOLADURA 7	EMULSIÓN -ANFO	8.8	8.6	9.0	7.6	9.2	8.2	7.5	1.0	7.5
VOLADURA 8	EMULSIÓN -ANFO	9.3	8.8	8.3	6.9	7.1	7.9	8.1	8.7	8.1
VOLADURA 9	EMULSIÓN -ANFO	9.3	8.8	9.1	9.1	7.2	7.9	6.7	9.5	8.5

* Calificación de 1 a 10 siendo 1 el valor que hace referencia a las peores condiciones y 10 las mejores condiciones.

Para analizar el tipo de cuele adecuado a ser utilizado en el diagrama de disparo, en los ensayos se realizó una comparación entre cuele tipo Equivalente y cuele Quemado (Figura 1), de las voladuras 1 y 3, que mantuvieron la misma estructura respecto al resto del diagrama: cantidad de barrenos y carga específica. Es preciso indicar que la voladura 1 presenta la combinación LDAN-Emulsión-LDAN y fue realizada con cuele equivalente, método utilizado habitualmente en la mina; mientras que la voladura 3 tiene como carga de fondo el explosivo primario combinación Emulsión-LDAN y fue realizada con cuele quemado con un barreno cargado en el medio y cuatro descargados.

Como se observa en la figura 3, la mejor puntuación en relación con el avance tiene la voladura 3 que corresponde al diseño de cuele quemado. Esto podría estar relacionado con la competencia de la roca, que según la clasificación RMR se ubica en la Clase II / Muy Buena, en este sentido García (2021) menciona que la técnica de cuele quemado funciona mejor en rocas de tipo dura; que es coherente con los ensayos geotécnicos realizados en campo al tipo de roca del frente de avance.

Adicional, los resultados de esta comparación de ensayos dejan en evidencia que el utilizar nitrato en la carga de fondo, cómo regularmente se realiza en el método empírico, en lugar del explosivo primario, disminuye la efectividad de la voladura.

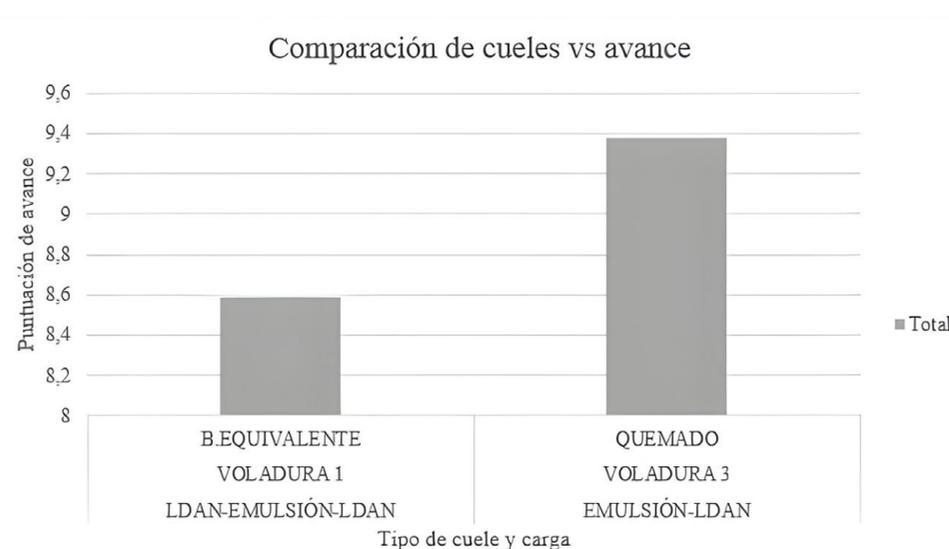


FIGURA 3
Comparación de tipo de cuele entre la Voladura 1 y Voladura 3 de similares características de disparo

En este propósito también se analizó la relación entre Consumo Específico – Perforación Específica (Figura 4), con la efectividad de la voladura, separando los ensayos por tipo de combinación de explosivos, que se mantuvo en el orden de (20-25) % de Emulsión y (80-75) % de LDAN/ANFO; con un consumo específico medio de 1,98 kg/m³ para la combinación Emulsión-ANFO y 3,14 kg/m³ para la combinación LDAN-Emulsión-LDAN.

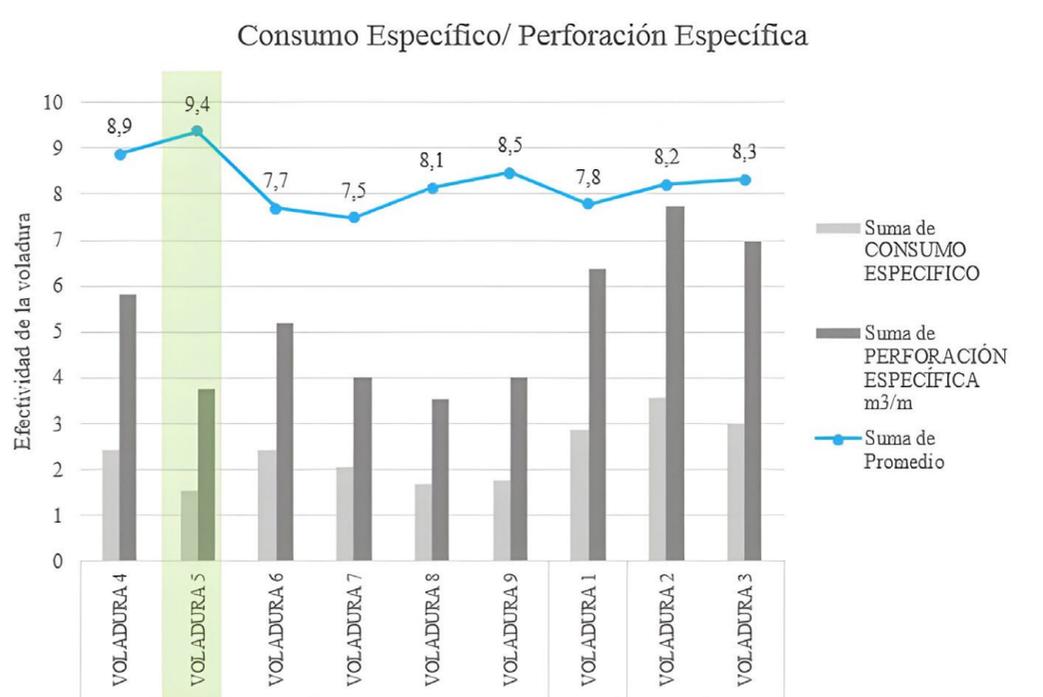


FIGURA 4

Relación Consumo Específico – Perforación Específica vs efectividad

El análisis arrojó como resultado que la mejor distribución (Consumo Específico – Perforación Específica), se obtuvo en la voladura 5, que tiene una carga específica de 1,54 kg/m³ distribuidos en 32 barrenos, con 28 barrenos cargados y 4 sin carga. Lo que demuestra que, para asegurar la voladura es importante manejar una buena distribución de los barrenos, un correcto cargado y cálculo adecuado de la cantidad de explosivos en el frente de trabajo, además permitirá mantener la sección operativa ideal de trabajo y no será necesario sobrecargar el diagrama de disparo. Teniendo consecuencias directas sobre los costos de operación generados por el proceso de perforación y voladura.

Es importante denotar que, la forma de cargado y el tipo de explosivo, juegan un papel importante a la hora de medir la efectividad de la voladura, puesto que, como se evidencia en la figura 4, el emplear LDAN, que es de uso frecuente en las operaciones mineras del sector, genera un gasto extra, que según se calculó da un promedio de 25,40% más de LDAN, que además de no ser considerado un explosivo, agente de voladura, su almacenamiento representa un riesgo debido a su inestabilidad, considerando que en las actividades de la MAPE, muy pocas empresas cuidan el tema de seguridad y normativa. Es así que el Centro Internacional de Ginebra para el Desminado Humanitario en el Informe de riesgos asociados con el Nitrato de Amonio del 2020 indica que “El nitrato de amonio gestionado inadecuadamente puede inflamarse, lo que resultaría en una detonación, destruyendo y contaminando el entorno. Cuando se trata de forma incorrecta y se expone a condiciones extremas (como calor o presión), el nitrato de amonio puede hacerse cada vez más inestable y explotar” (Risks and Nitrate, 2020).

Así también se puede observar, en la Figura 4, que la combinación LDAN-EMULSIÓN-LDAN (Voladura 1), utilizada tradicionalmente por los operadores mineros, es la menos efectiva, si se toma en consideración el promedio de los parámetros de medición, como avance y forma de la sección, así como el consumo y la perforación específicos (2,86 kg/m³ y 6,37 m³/m, respectivamente), ya que presenta una deficiencia de trabajo del 22% con respecto al valor ideal. También se evidencia que la voladura 1, con respecto a las voladuras 2 y 3 de combinación EMULSIÓN-LDAN, obtuvo un 5,45% de menor eficiencia, considerando que estas tres voladuras son las de mayor perforación específica lo que genera un mayor consumo de aceros de perforación, desgaste de equipos de perforación y consumo eléctrico.

En este orden de ideas, otro de los análisis respecto a la efectividad de la voladura, es el de la sección y avance real en referencia a la sección y avance ideal, en tal sentido en la figura 5 se puede evidenciar de manera general que el promedio del total de voladuras con la combinación Emulsión-ANFO presenta un 92% de efectividad en el avance, contra el 77,63% que produce la combinación Emulsión-LDAN.

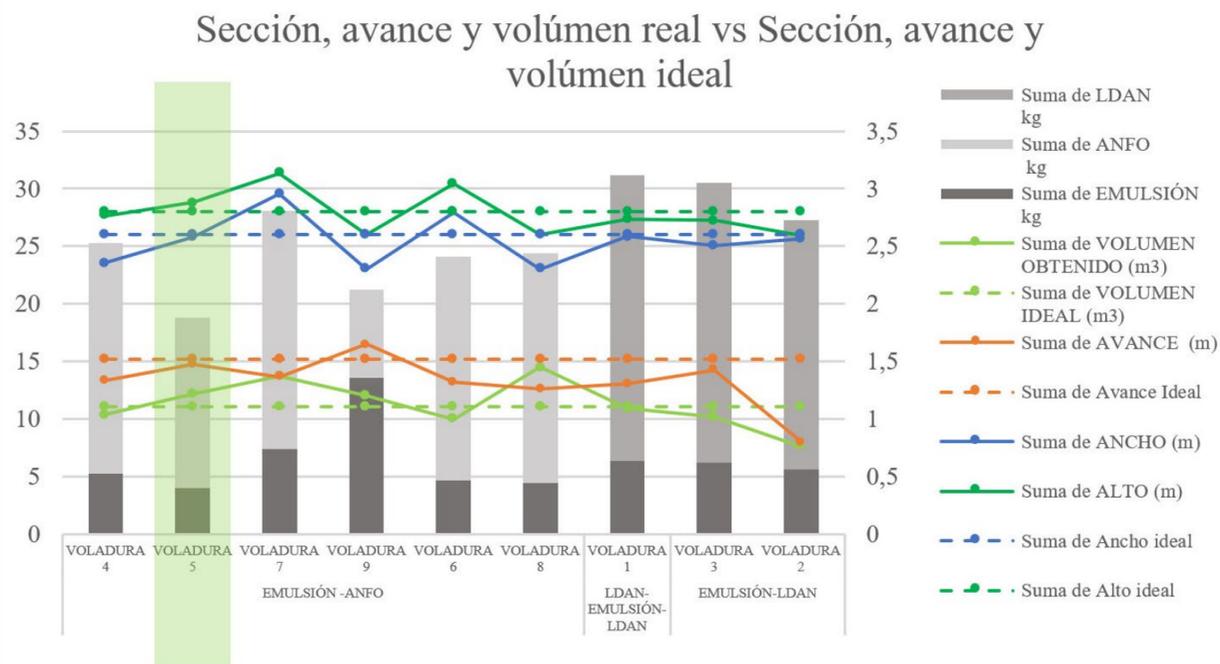


FIGURA 5

Forma y avance real vs forma y avance ideal

Así es claro que una correcta distribución de la carga logra obtener una voladura que se acerque a la forma de la sección y volúmenes ideales. El mejor ejemplo lo presenta la voladura 5, donde la proporción de explosivo es de 20/80 (Emulsión/ANFO) en 32 barrenos perforados (28 cargados y 4 sin carga), y se obtuvo los mejores resultados en los parámetros de forma, con porcentajes de efectividad de 99,23% en el ancho; 97,18% en el alto y un 95,91% en el avance, demostrando la importancia de una adecuada perforación, correcta configuración y cálculo de cantidad de la carga explosiva; que además de representar un seguimiento a los costos de perforación y voladura, también controla el área de la sección, y el gasto de aceros de perforación, porque se realizan menos perforaciones.

Otro aspecto importante de señalar de la combinación Emulsión/ANFO es el que se observa en la voladura 7, y es que el incremento de carga específica, generaría la pérdida de los parámetros de forma y avance del diagrama, ya que una sobrerotura y una disminución en el avance, genera dilución del material en galerías de producción o excesivo material de escombro en galerías de desarrollo o preparación.

Con respecto a la voladura 9 donde se aplicó un concepto de carga diferente siguiendo la relación Emulsión/ANFO de 65/35, se observa que el incremento de explosivo primario no garantiza la voladura, puesto que el poder rompedor del gas del ANFO, en la carga de columna, no alcanzó el rango adecuado para mantener los diámetros ideales de la sección, aun teniendo un sobre avance. Con estos resultados se puede sugerir que la combinación promedio de 20/80 de Emulsión/ANFO, que se utilizó en las voladuras 4, 5, 6 y 8, generó los mejores resultados.

Es necesario indicar que el avance medio de una voladura (ideal) puede llegar al 95 % de la profundidad de los taladros (Quispe Gaspar, 2014), y para ser considerada apta, dependiendo del plan de minado, se podría llegar de un 85 a 90% de la profundidad perforada; en esta línea cabe señalar que a pesar de que algunos ensayos obtuvieron mayor efectividad que otros, todas las voladuras con sus múltiples combinaciones resultaron aptas (Figura 6 y 7), con variaciones promedio de 8,55% con respecto al avance ideal, 2% frente al ancho ideal y 2,14% en relación al alto ideal. En este sentido Seccatore, Gonzalez y Herrera, 2020, en su artículo Peculiaridades de la perforación y voladura en minas subterráneas de pequeña escala, mencionan que, "los mineros locales suelen emplear una columna de carga de cartuchos artesanales de Nitrato de Amonio (AN, sin Fuel Oil, en los taladros: Esto se debe a que el tiempo de ventilación disminuye y, a pesar de tener un VOD más bajo, la onda de choque logra fracturar la roca".

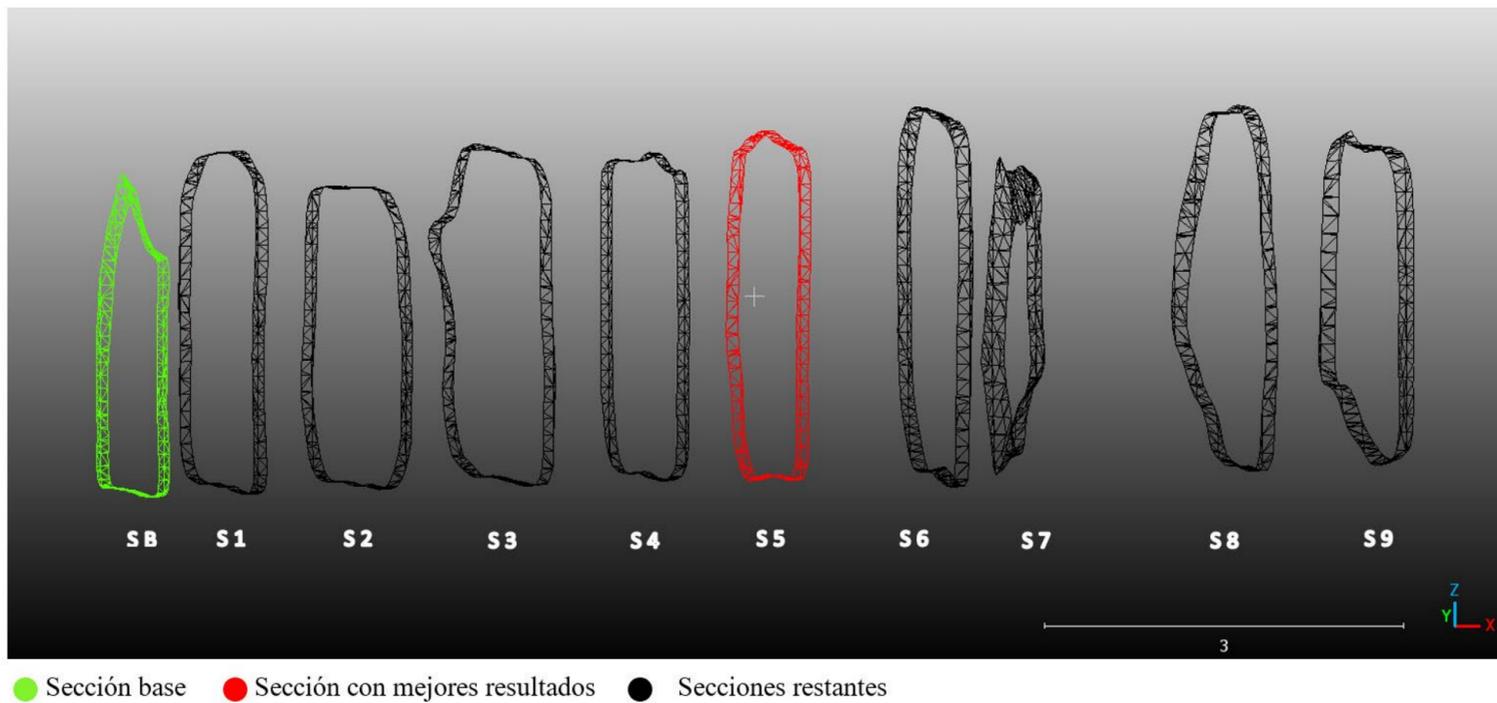


FIGURA 6

Vista isométrica de las secciones (S), resultantes de los 9 ensayos

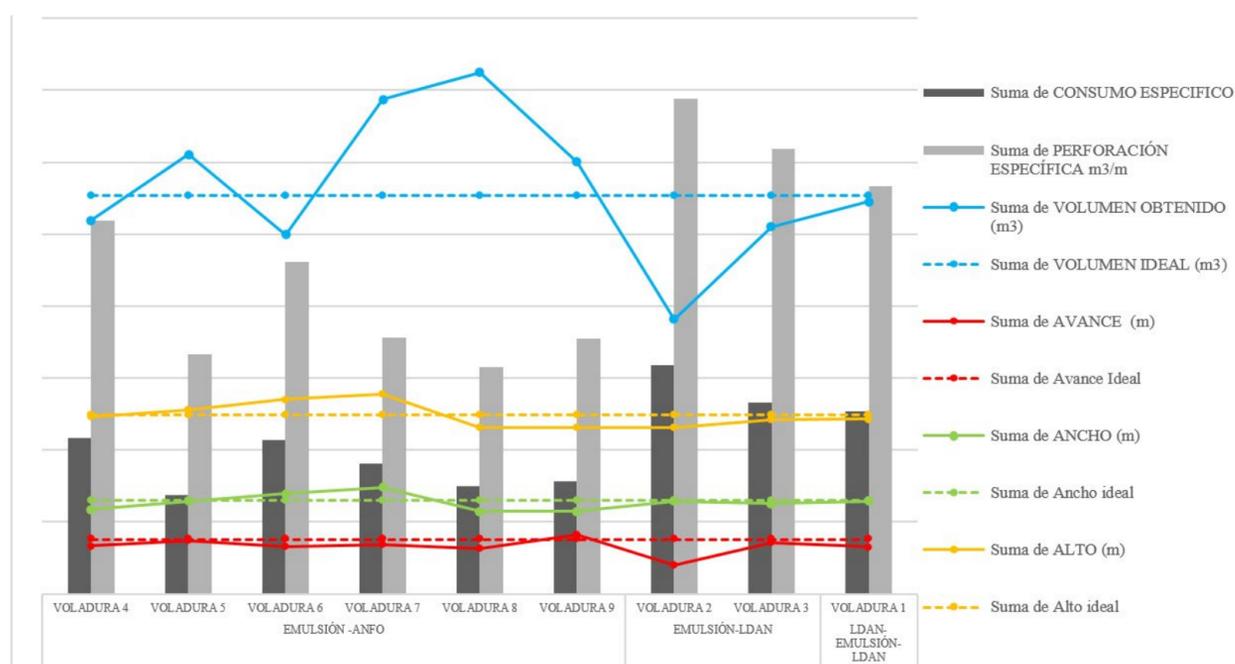


FIGURA 7

Consumo y perforación específica/Sección, avance y volumen

Un dato adicional, en relación al tamaño promedio ideal de fracturamiento de la roca (que será tema de discusión en otro documento científico), entre todos los ensayos de perforación y voladura, esta variable se ubicó entre 15 a 25 cm y con un porcentaje de fino-grueso de 20/80 es decir 20 % de fino y 80% de grueso.

Cabe agregar que para conseguir que las voladuras con la combinación Emulsión/LDAN, logren el fracturamiento de la roca³, es necesario realizar mayor cantidad de barrenos perforados y cargados, incurriendo en una mayor perforación y carga específica, con su impacto en el gasto de explosivo, aceros de perforación, energía y tiempo de perforación. En la práctica esta combinación se realizó con un diagrama de disparo de 50 barrenos (46 cargados y 4 vacíos, figura 8a); mientras que en las voladuras de la combinación Emulsión/ANFO los diagramas de disparo se mantuvieron entre 28 hasta 32 barrenos cargados y 4 vacíos, como se muestra en la figura 8b.

³ Para calcular el fracturamiento se utilizó un software de análisis de imágenes, una expresión matemática KUZ-RAM y se realizó medición en campo.

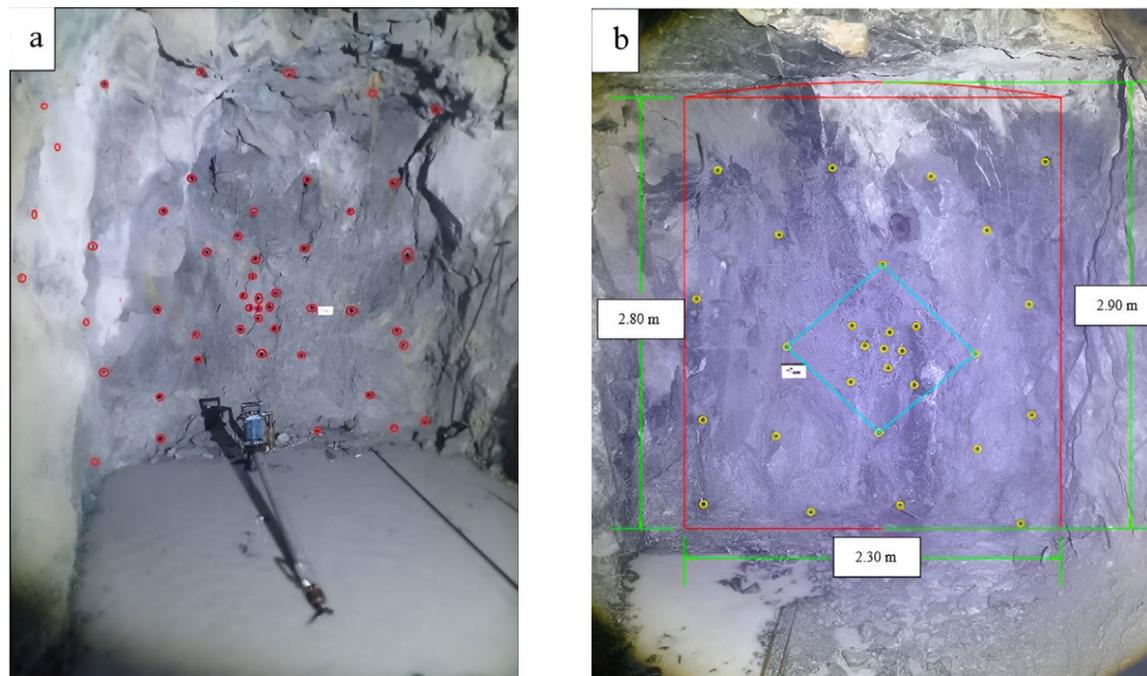


FIGURA 8
a) Malla empírica b) malla técnica

En la figura 7 se observa también que las voladuras 7, 8, 9 obtuvieron un mayor volumen de material desprendido, esto puede estar relacionado a la secuencia de encendido ya que en estas voladuras se probó microretardos, donde la onda de choque se propaga con toda fiabilidad a través del tubo de transmisión (Bernaola, Castilla and Herrera, 2013) (figura 9), en lugar del método tradicional donde los mineros realizan el encendido de forma manual e individual en el orden y secuencia más rápida, muchas veces dejando de encender algún barreno por la premura del tiempo para retirarse del frente.

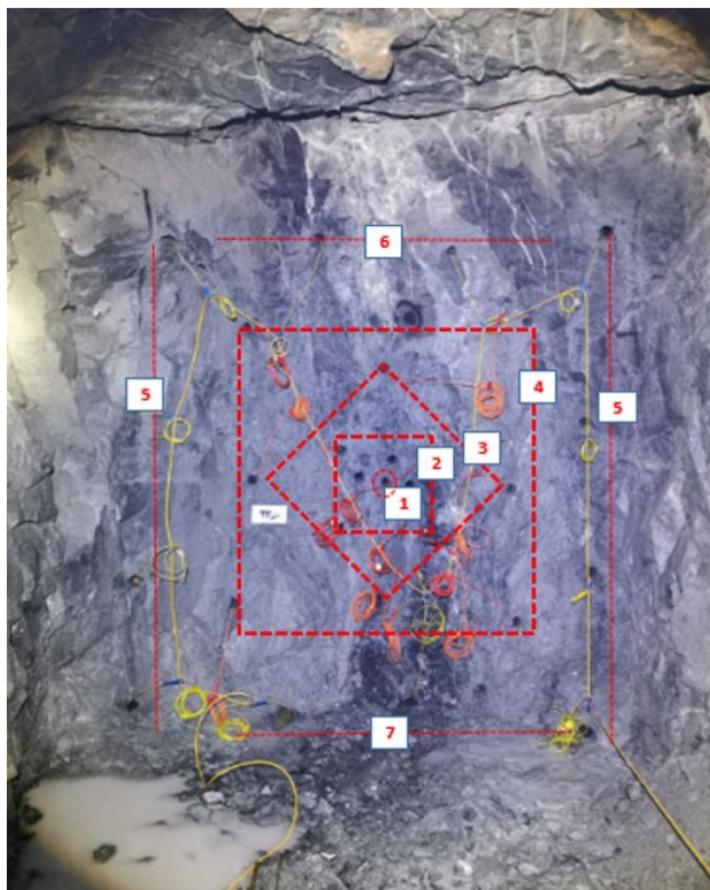


FIGURA 9
Secuencia de encendido con microretardos

Finalmente, para definir la voladura con mayor efectividad se realiza la comparación entre las puntuaciones de los parámetros de la forma resultantes: sobre excavación en el área del cuele, regularidad de piso y techo, y forma del frente, respecto de la valoración ideal de 10. En tal sentido en la Figura 10, se presenta los resultados obtenidos de dicha comparación.

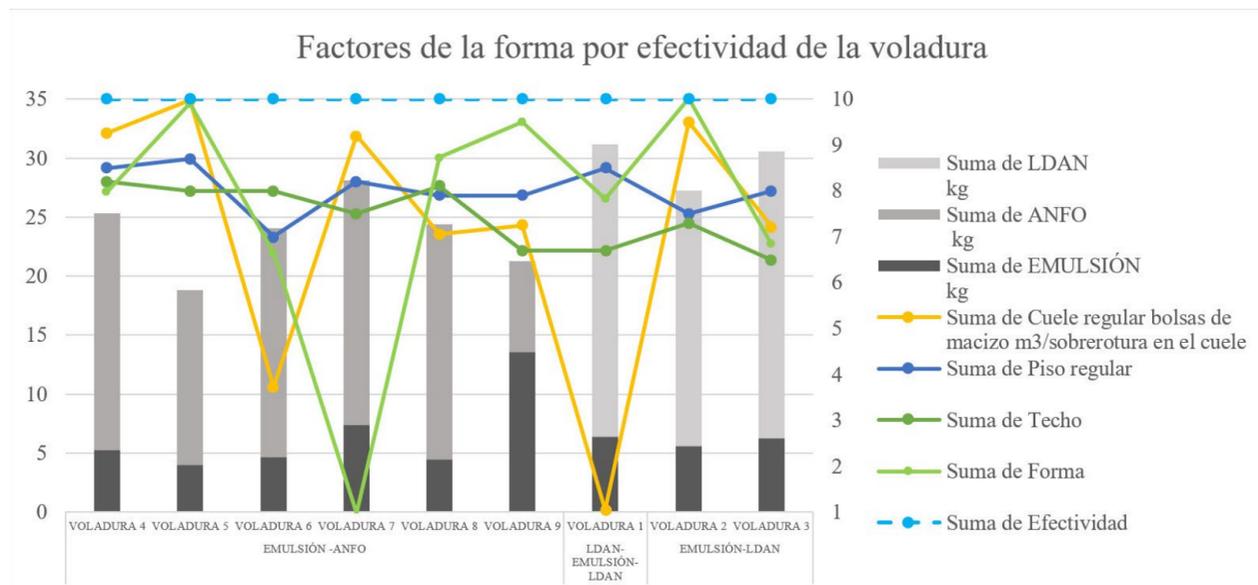


FIGURA 10 Factores de la forma y la efectividad de la voladura

Describiendo los resultados más representativos, en la voladura 6 se observa que la puntuación de efectividad de la forma resultante en el área del cuele es bajo porque se genera sobrerotura, figura 11, que fue calculada en volumen de la cavidad resultante y mediante la ecuación de punto pendiente traspasada a valor puntual en el rango de 1 a 10 para aplicar los criterios de calificación; así también la puntuación de la regularidad del piso. Este resultado puede estar relacionado con la sobrecarga específica, así como a la falta de prolijidad de la perforación, ya que una vez establecida la malla y con conocimiento de la geología, es en la fase operativa de la perforación, en la que se pueden comprometer los resultados, de ahí la importancia de la experiencia del perforista (Ingeopres, 2011).

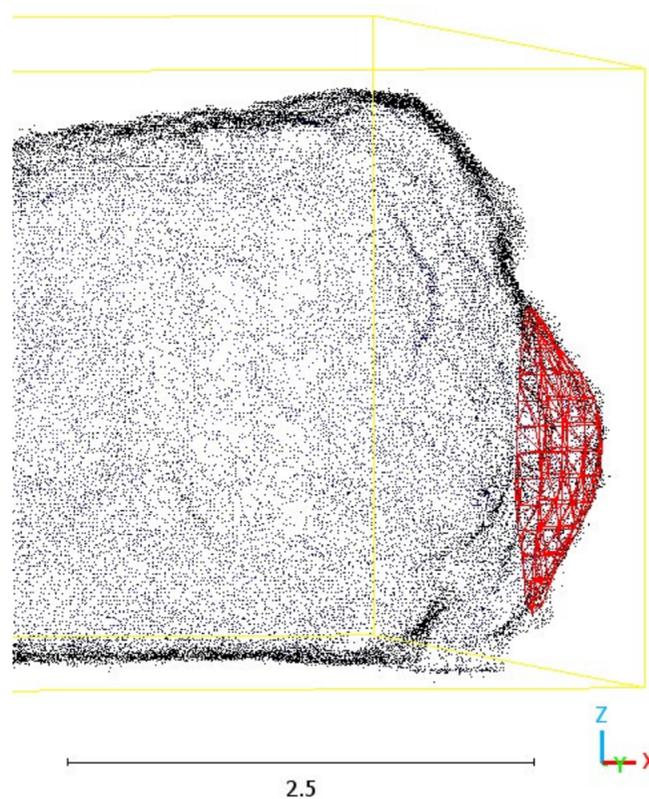


FIGURA 11 Vista de perfil de la nube de puntos donde se observa sobrerotura en el área del cuele de la voladura 6

La voladura 1 (Figura 12), de la combinación LDAN-Emulsión-LDAN, en el que se aplicó el método tradicional, presenta una muy baja puntuación de regularidad del área del cuele, esto puede ser atribuido al uso del explosivo LDAN que no permite la predictibilidad de la voladura debido a su inestabilidad (Barajas Pinzón, 2021).

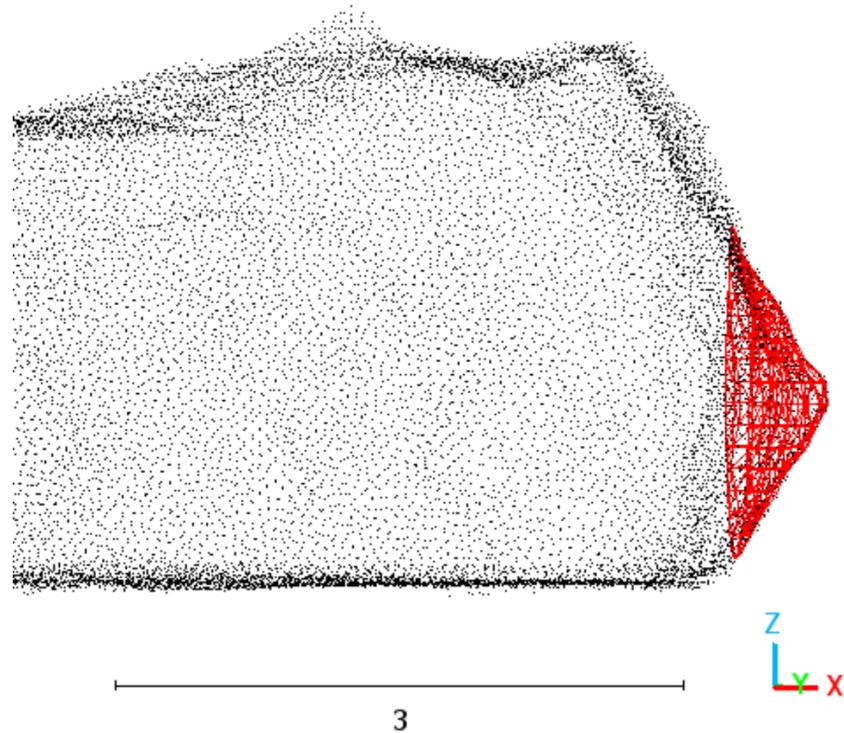


FIGURA 12

Vista de perfil de la nube de puntos donde se observa sobrerotura en el área del cuele de la voladura 1 área del cuele de la voladura 6

En la ejecución del ensayo 7, hubo diversos factores que condicionaron los resultados obtenidos, problemas relacionados con el equipo de perforación, el personal de apoyo y la modificación del rumbo de la galería por disposición del capitán la mina, por lo que se realizaron varias voladuras secundarias que alteraron considerablemente la sección con un ensanchamiento de 0.97 m (Figura 13), y generaron baja eficiencia que quedó reflejada en la forma final de la voladura (figura 14) y en su baja puntuación (figura 10).

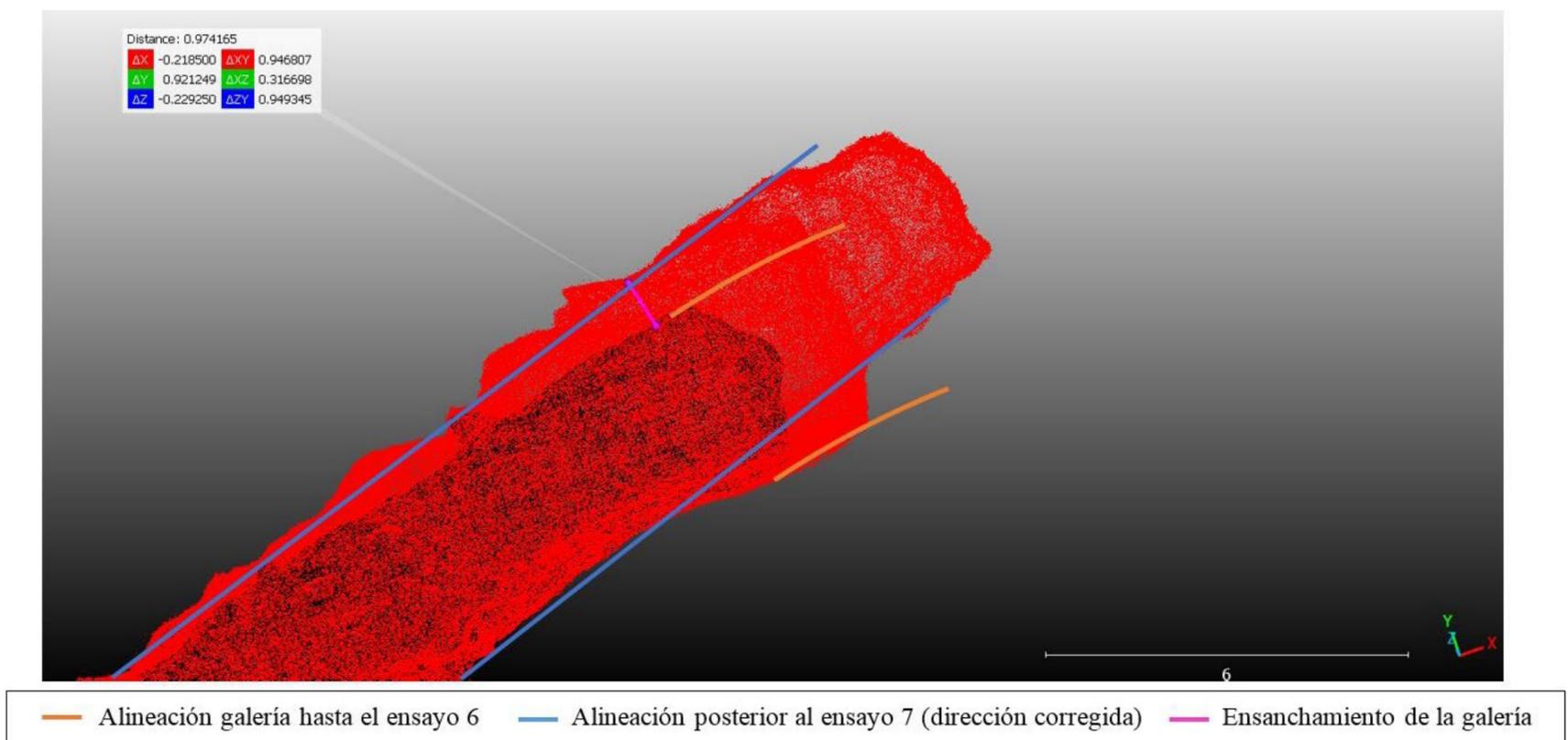


FIGURA 13

Alineación del rumbo de la galería, mediante varias voladuras secundarias

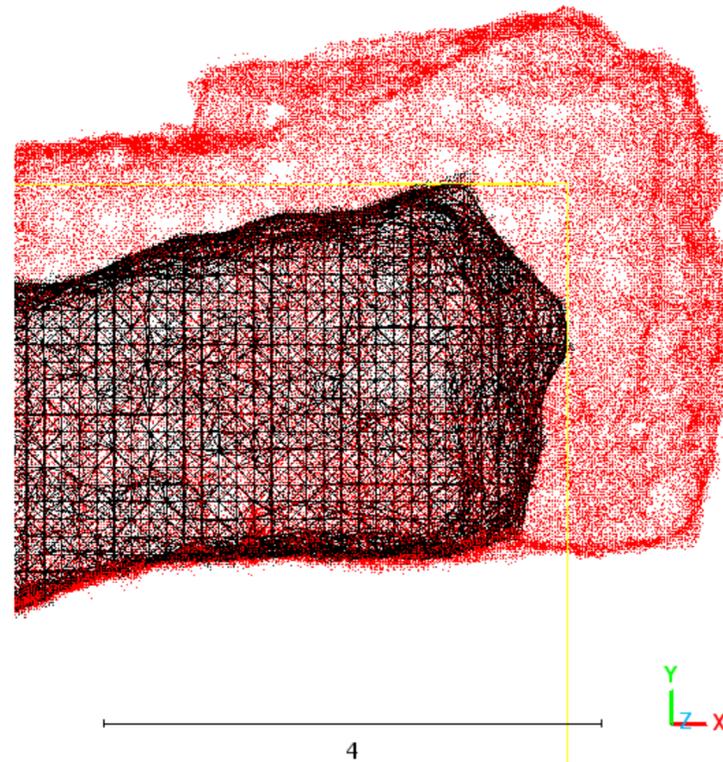


FIGURA 14

Vista de planta de los resultados de la voladura 6 (triangulado, color negro) y de la voladura 7 (nube de puntos, color rojo)

Hechas todas las consideraciones anteriores, una vez que se ha desarrollado el análisis pormenorizado de los resultados obtenidos en los 9 ensayos de perforación y voladura, analizado las variables: alto y ancho de la sección, volumen de avance, regularidad del piso y techo, forma del frente y de la zona del cuele; resultados que fueron puntuados en escala de 1 a 10, todos plasmados en la matriz multicriterios de la tabla 2, se determinó que la mejor puntuación fue la de la Voladura 5 con un valor de 9,4; en la figura 15 se visualiza gráficamente el resultado del levantamiento topográfico de la sección resultante posterior a la Voladura 5.

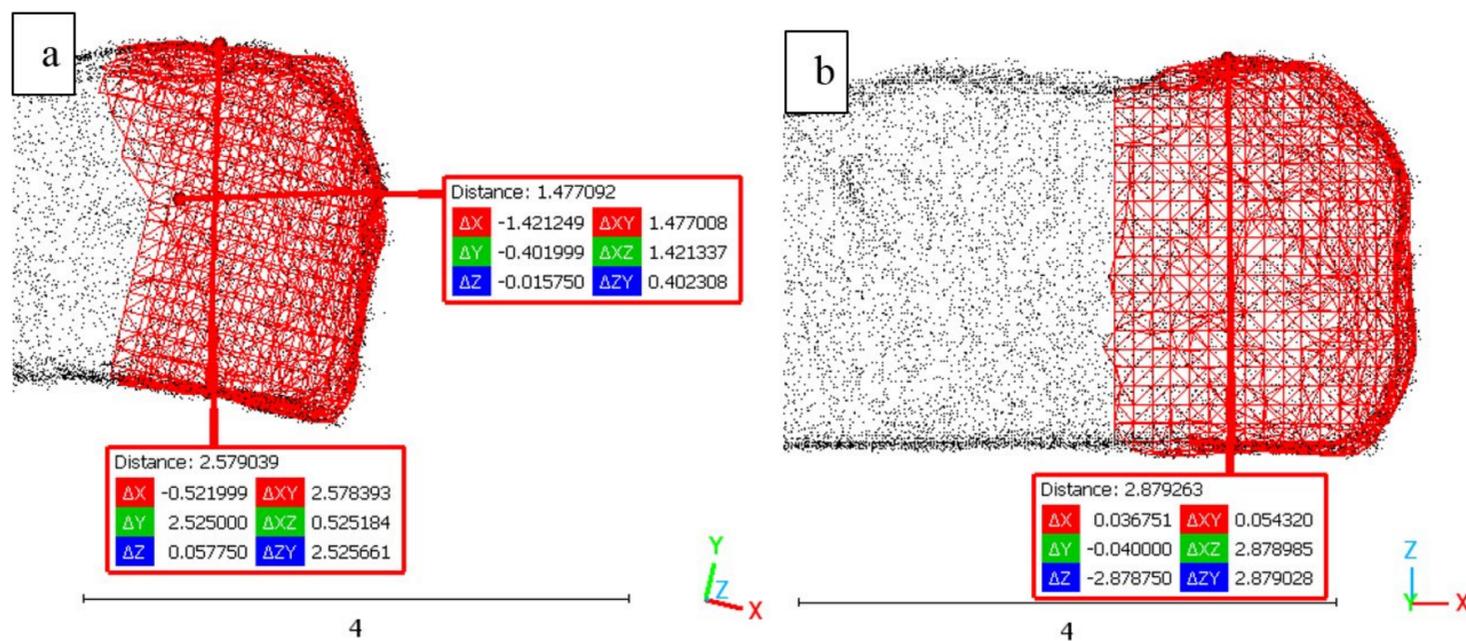


FIGURA 15

Resultados de la voladura 5 (triangulado, color rojo) a) vista en planta b) vista de perfil

Esto repercute sobre la regularización de uso de explosivo, puesto que en Ecuador las autoridades competentes recomiendan el uso de ANFO; ya que el nitrato puede ser inestable y su almacenamiento de alta peligrosidad (Department of Mines Industry Regulation and Safety, 2021), aún más, considerando que en los recorridos realizados en minas del distrito Minero Zaruma – Portovelo, se observó que algunas labores subterráneas, cuentan con polvorines de limitada capacidad de almacenamiento al interior de la mina.

Estas condiciones pueden favorecer la ocurrencia de accidentes por las altas temperaturas, mala ventilación y manejo inadecuado del explosivos (Bustamante and Lara Ponce, 2010). Además hay que considerar que la inversión económica se incrementa, al utilizar mayor cantidad de esta sustancia con respecto al necesario de ANFO, ya que si bien es cierto maneja costos más elevados pero que se compensan con el ahorro correspondiente a la menor cantidad de carga que se necesita en función de los volúmenes y secciones de la mina (López Aquino, 2019).

CONCLUSIONES

Las combinaciones de explosivo Emulsión /ANFO, presentan mayor previsibilidad de resultados de la voladura, en relación a la cantidad de carga/volumen; en este sentido se observó que a mayor proporción de ANFO se tiene mayor volumen de material fragmentado. Pero cabe señalar que una mala distribución respecto a la cantidad excesiva de carga puede generar sobre excavación con lo que se incurre en mayor dilución del material cuando se trabaja en frentes de producción y mayor cantidad de material escombros cuando se trabaja en frente de desarrollo.

La voladura 5, de combinación Emulsión/ANFO, presentó los mejores resultados en cuanto a carga y perforación específica, y fue el ensayo que más se acerca a los parámetros ideales, con apenas un 6% de diferencia promedio/efectividad, confirmando la necesidad de ejecutar una adecuada perforación, un buen

cálculo de la cantidad de material explosivo, en función del tipo de roca, logrando así un control de costos en la operación perforación y voladura, con mejor seguimiento del mantenimiento de dimensiones de la sección y evitando la sobrerotura.

En los ensayos que se realizaron con la combinación Emulsión/LDAN, se observa que para ser efectiva requiere aumentar el número de barrenos perforados para que funcione la detonación, así como mayor cantidad de carga para acercarse al volumen ideal de extracción, mostrando impredecibilidad en cuanto al resultado de la voladura.

Este trabajo evidenció que un adecuado diseño de la malla de perforación y una buena distribución de la carga explosiva, que tomen en cuenta la dureza de la roca, es indispensable para generar el avance/volumen ideal, cuidando no generar diferencias significativas en el volumen del material obtenido.

REFERENCIAS

- Almeida, M. D. (2019) Estudio de caso sobre la gobernanza del sector minero en el Ecuador, in *Documentos de Proyectos (LC/TS.2019/56)*. Santiago: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), p. 117. <http://hdl.handle.net/11362/44876>.
- Barajas Pinzón, Ó. M. (2021) 'Consideraciones de seguridad con nitrato de amonio'. Bogotá, D.C., Colombia: Consejo Colombiano de Seguridad. <https://ccs.org.co/portfolio/consideraciones-de-seguridad-con-nitrato-de-amonio/>.
- Bernaola, J., Castilla, J. y Herrera, J. (2013) *Perforación y voladura de rocas en minería, Perforación y Voladura de Roca en Minería*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Bustamante, T. y Lara Ponce, R. (2010) *El Dorado o la caja de Pandora : matices para pensar la minería en Ecuador, Flacso Ecuador*.
- Cardu, M. y Seccatore, J. (2016) 'Cuantificación de la dificultad de excavación de túneles mediante perforación y voladura', *Tunnelling and Underground Space Technology*, 60, pp. 178–182. Doi: [10.1016/j.tust.2016.08.010](https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.08.010).
- Department of Mines Industry Regulation and Safety (2021) 'Safe storage of solid ammonium nitrate – code of practice', in Department of Mines Industry Regulation and Safety (ed.). Western Australia, p. 35.
- Díaz-Martínez, J. C., Guarín-Aragón, M. A. y Jiménez-Builes, J. A. (2012) 'Análisis y Diseño de la Operación de Perforación y Voladuras en Minería de Superficie Empleando el Enfoque de la Programación Estructurada', *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 32(32), pp. 15–22. <http://www.scielo.org.co/pdf/bcdt/n32/n32a02>.
- EXSA (2000) 'Manual práctico de voladura'. Lima - Perú: Departamento Técnico Exsa S.A., p. 81. <https://www.udocz.com/apuntes/86082/manual-practico-de-voladura-exsa>.

- EXSA (2019) 'Manual práctico de voladura EXSA 5ta edición'. Lima - Perú. <https://www.minerosunsa.com/2019/10/manual-practico-de-voladura-exsa-5ta.html>.
- García P, J. M. (2021) 'Malla de Perforación Subterránea'. Cerro de Pasco, Perú: Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, UNDAC, p. 15.
- Holmberg, R. y Persson, P. (1980) 'Diseño de patrones de voladura del perímetro del túnel para evitar daños en las rocas', *Trans. Inst. mín. Metall.* Londres, pp. A37–A40.
- Ingeopres (2011) 'Perforación y Voladuras', IGP, 206, p. 52.
- López Aquino, J. J. (2019) *Voladura de rocas con anfo para optimizar avances en labores subterráneas de Compañía Minera Casapalca S.A.* Universidad Nacional del Centro del Perú.
- López Jimeno, C. (2016) 'Diseño de Voladuras en Túneles y Galerías'. Madrid, España, p. 6.
- Oliva González, A. O., Ruiz Pozo, A. F. y Gallardo Amaya, R. J. (2018) 'Inestabilidad del terreno en zonas de actividad minera: caso ciudad de Zaruma, Ecuador', *Redes de Ingeniería*, 8(1), pp. 69–81.
- Paredes Pozo, D. C. (2013) *¿Después de la minería que? Análisis del impacto socioeconómico y ambiental de la minería. Caso South American Development Company (SADCO - CIMA), Portovelo y Zaruma - El Oro - Ecuador.* FLACSO ANDES. <http://repositorio.flacsoandes.edu.ec/handle/10469/5943>.
- Quispe Gaspar, J. E. (2014) *El modelo Matemático de Holmberg como alternativa en el diseño de mallas de perforación para optimizar las operaciones de voladura subterránea en la Cia. Minera Casapalca S.A.* Universidad Nacional de Huancavelica.
- Registro Oficial Órgano del Gobierno del Ecuador No.162 (2012) *Código del Trabajo*. Quito-Ecuador: Talleres Gráficos Editora Nacional, p. 159. www.lexis.com.ec.
- Risks, R. y Nitrate, A. (2020) 'Amat insights', (01), pp. 1–26.
- Rojas-Villacís, C. A. y Zúñiga-Arrobo, C. A. (2022) 'Análisis de la actividad de carguío y transporte en minería artesanal en "El Guayabo", Ecuador', *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 14(2), pp. 1–12. doi: [10.29166/revfig.v14i2.3854](https://doi.org/10.29166/revfig.v14i2.3854).
- Seccatore, J. y Cardú, M. (2017) 'Sobre la influencia de los ángulos de rotura en la eficiencia de tracción de tunelización por perforación y voladura', *Asociación Chilena de Ingenieros Explosivistas XII*. Santiago, Chile.
- Seccatore, J., Gonzalez, P. y Herrera, M. (2020) 'Peculiaridades de la perforación y voladura en minas subterráneas de pequeña escala', *Mineração*, 73(3), pp. 387–394.
- Ulloa, W. (2023) 'Relación de las regalías mineras y el desarrollo del cantón Portovelo en Ecuador', *Estudios de la Gestión: Revista Internacional de Administración*, 13(13), pp. 149–172. doi: [10.32719/25506641.2023.13.7](https://doi.org/10.32719/25506641.2023.13.7).