

Optimization of Drilling and Blasting Processes through Mathematical Models to Increase Productivity in the SE Cutting Nv. 1680-Tingo Mine, Mining Company Poderosa S.A.-Pataz-Peru, 2022

Osmar Oswaldo Condor Valeriano, Bachiller¹, Alex Leodan Rodriguez Laiza, Bachiller¹, Liliana Castro Zavaleta, Magister¹, LLaque-Fernández Grant Ilich, Magister¹, Valderrama-Puscan Marlon Walter, Magister¹, Calvanapón-Alva Flor Alicia, Doctora¹

Universidad Privada del Norte, Perú, ¹N00172035@upn.pe, ¹N00245608@upn.pe, ¹liliana.castro@upn.pe, ¹grant.llaque@upn.edu.pe, ¹marlon.valderrama@upn.edu.pe, ¹flor.calvanapon@upn.edu.pe

Abstract— The objective of this research work is to determine the choice of a mathematical model to redesign a drilling and blasting mesh in the cut SE Nv. 1680, through the analysis of the rock mass, the analysis of the process and elements involved in drilling and blasting, and the study of the mesh that is being used, in order to optimize the drilling and blasting processes and thus increase productivity, taking as reference several studies in which productivity has been improved through the choice and correct use of one or more mathematical models. This pre-experimental, applied, retrospective and cross-sectional research, collecting data through documentary analysis, RMR, GSI, drilling and blasting parameters, and the field notebook. Analyzing the rock mass, the current drilling and blasting process, the current mesh, which allowed optimizing the process. Achieving the redesign of the mesh, which directly impacted in the optimization of the processes and increased productivity, generating a reduction of 18.87% per shot, which means a monthly saving of S/. 49140 soles in the SE Cut Nv. 1680 of the Tingo Mine in CMPSA, Patáz.

Keywords— Masizo rocos, drilling and blasting, mathematical models, optimization, production.

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

Optimización de los Procesos de Perforación y Voladura mediante Modelos Matemáticos para Incrementar la Productividad en la Cortada SE Nv. 1680-Mina Tingo, Compañía Minera Poderosa S.A. Patáz-Perú, 2022

Osmar Oswaldo Condor Valeriano, Bachiller¹, Alex Leodan Rodriguez Laiza, Bachiller¹, Liliana Castro Zavaleta, Magister¹, LLaque-Fernández Grant Ilich, Magister¹, Valderrama-Puscan Marlon Walter, Magister¹, Calvanapón-Alva Flor Alicia, Doctora¹

Universidad Privada del Norte, Perú, ¹N00172035@upn.pe, ¹N00245608@upn.pe, ¹liliana.castro@upn.pe, ¹grant.llaque@upn.edu.pe, ¹marlon.valderrama@upn.edu.pe, ¹flor.calvanapon@upn.edu.pe

Resumen— El presente trabajo de investigación, tiene como objetivo el de determinar la elección de un modelo matemático para rediseñar una malla de perforación y voladura en la cortada SE Nv. 1680, mediante el análisis del macizo rocoso, el análisis del proceso y elementos inmersos en la perforación y voladura, y el estudio de la malla que se viene usando, para poder optimizar los procesos de perforación y voladura y de esta manera poder incrementar la productividad, teniendo como referencia diversos estudios en los cuales se ha

logrado mejorar la productividad mediante la elección y uso correcto de uno o más modelos matemáticos. Esta investigación pre experimental, aplicada, retrospectiva y transversal, recolectando datos mediante análisis documental, RMR, GSI, parámetros de perforación y voladura, y el cuaderno de campo. Analizando el macizo rocoso, el proceso actual de perforación y voladura, la malla actual, lo que permitió optimizar el proceso. Logrando rediseñar la malla, lo que impactó directamente en la optimización de los procesos e incremento de la productividad, generando una reducción de 18.87% por disparo, lo que significa un ahorro mensual de S/ 49140 soles en la Cortada SE Nv. 1680 de la Mina Tingo en CMPSA, Patáz.

Palabras clave—Macizo rocoso, perforación y voladura, modelos matemáticos, optimización, producción.

I. INTRODUCCIÓN

El estudio de posibles soluciones que brinden acceso a un yacimiento minero es uno de los primeros pasos a desarrollar para implementar un plan de minado, en este sentido se debe tener en cuenta diferentes aspectos como el tamaño idóneo, su configuración, disposición y sobre todo el método de explotación que se va a utilizar y así dar nacimiento a una mina subterránea o ampliar una mina preexistente. Todo esto genera un serio problema de ingeniería que en muchos casos llegan a ser demasiados complejos debido a que cada yacimiento tiene características propias lo que llevara a un estudio preciso sobre todos los factores implicados para dar solución de como acceder al yacimiento rico, existiendo una serie de criterios básicos para el diseño de una mina. Teniendo gran relevancia

el proceso de perforación y voladura porque es esta actividad la cual empezara a abrir paso al interior del macizo rocoso [1].

La minería es una de las industrias más intensivas en tecnología en muchos procesos productivos como lo son el de perforación y voladura donde siempre está buscando optimizar este proceso para incrementar la productividad en la explotación del mineral, por eso existe un consenso de que la minería y la tecnología están intrínsecamente vinculadas, interconectadas, cambiando y evolucionando juntas, por eso no queda duda alguna de que la tecnología ha cambiado la forma evolutiva de esta actividad manufacturera [2].

En las tareas de minería subterránea, es importante caracterizar el macizo rocoso para tomar las decisiones correctas sobre la amalgama y otras tareas. La rama que se encarga de brindar los datos para un buen diseño de malla de perforación y voladura es la geomecánica. Lo que se desea con una malla de perforación y voladura es tener una voladura controlada y óptima, brindando seguridad y estabilidad en la labor lo cual conllevará a un desarrollo efectivo del plan de minado [3].

La voladura de rocas es un trabajo peligroso, la falla en el proceso de estas actividades puede acarrear enormes pérdidas económicas y, sobre todo, humanas. Por tal motivo, nunca se debe comenzar a trabajar en una labor que primero no haya sido desatada y asegurada [4].

Se tienen muchas teorías, métodos y modelos matemáticos los cuales procuran pronosticar las dimensiones de la roca al momento de ser fragmentadas mediante la voladura. La relación entre la fragmentación y la energía aplicada está vinculada directamente a la calidad de la roca, la gran problemática para la selección correcta de un modelo matemático radica en la mala caracterización del macizo rocoso y es por eso que no se logran optimizar los procesos inmersos en la explotación del mineral [5].

En la actualidad, es de gran importancia impulsar nuevas normas y procedimientos en el proceso minero, que las empresas

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).

ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).

DO NOT REMOVE

puedan modificar para optimizar su proceso minero. Pero también genera vacíos en las diferentes prácticas y métodos desarrollados durante la perforación y voladura utilizados en diversos avances en la minería subterránea [6].

CMPSA (Compañía Minera Poderosa S.A.) es una empresa dedicada al rubro minero desde la etapa de exploración, explotación, extracción, procesamiento y comercialización de refinado de oro. En la cortada SE Nv. 1680 de la Mina Tingo de la compañía se registra un promedio mensual de casos por taquero de, 12 tiros sopladados, 8 tiros cortados y 5 tiros anillados, lo que origina tener que realizar voladuras secundarias, poco avance por tiro, excesivo consumo de explosivos, demoras en colocación de sostenimiento con shotcrete vía húmeda por superficies que no han sido bien fragmentadas y rotura desmedida en algunas labores. Todos estos defectos llegan a elevar los costos operativos de todos los procesos inmersos en la explotación y extracción del mineral.

Los problemas identificados en la empresa se deben a factores como: diseño de malla de perforación por mala caracterización del macizo rocoso, criterios de perforación y voladura que no son idóneos para la labor (factores de voladura, mal espaciado y burden), explosivo inadecuado; taladros sobre cargados con explosivos, poco uso de guías lo que genera falta de paralelismo, voladura controlada inexistente o precaria, condiciones del terreno, y personal con poco preparación y nula capacitación. Siguiendo la línea de investigación que rodea a nuestro tema y a partir de todo lo antes mencionado es pertinente seguir la investigación enfocándonos en la siguiente pregunta: ¿Cómo la optimización de los procesos de perforación y voladura aplicando modelos matemáticos incrementan la productividad en la cortada SE Nv. 1680 en la mina Tingo en el periodo 2022?

Chancasanampa [7], en su trabajo de investigación logró el incremento de 21% de la productividad en el tajeo debido a la disminución del ciclo de minado con la nueva malla implementada. Así mismo, se disminuyeron los costos en insumos utilizados en el proceso de perforación y voladura (aceros y explosivos) y, por último, para obtener un mejor rendimiento al usar taladros cortos, mediante la aplicación del modelo matemático de Konya se estableció nuevos parámetros entre burden y espaciado en el tajeo.

Barrientos & Durand [8], en su investigación lograron demostrar que el modelo matemático de Langefors en conjunto con la carga aplicada por metro lineal $Q = 1.56 \text{ Kg/m}$ aplicado en su nueva malla de perforación logró una mejor fragmentación del macizo rocoso en el tajeo 6662 Nv. 3780, veta Lilia en la mina Socorro – Unidad Minera Uchucchacua.

Mamani [9] logró mejorar en un 95% el avance por disparo y demostró que mejorando el diseño de la malla de perforación bajo los modelos matemáticos de Holmberg en la labor CX 10111–Norte de la empresa MARSa se logró reducir el número de fallas en el proceso de voladura en un 20% a comparación de años anteriores, lo que en números significaron una disminución

total de 144 disparos fallados y esto significó una reducción considerable en la sobre excavación.

Choque [10] obtuvo importantes resultados al caracterizar el macizo rocoso en el Tajo 770 sección I lado Sur Nv. 4710 de la Unidad Minera Yauliyacu usando el modelo matemático de Börje Langefors diseñó una nueva malla de perforación y voladura, ya que considera criterios de fijación e inclinación lo cual es vital por las características del macizo rocoso en el yacimiento, el factor de potencia pasó de 0,62 Kg/Tm a 0,35 Kg/Tm y el factor de energía de 2,34 Kg/Tm a 1,32 Kg/Tm. Se redujo la disolución de 30% a 11%, la recuperación se elevó de 78% a 92%, las voladuras secundarias se disminuyeron de un 33% a 20%, todo esto logró reducir los gastos operativos de la empresa.

Quezada [11] en su investigación en la Rampa Grace, Veta Papagayo en Compañía Minera Poderosa S.A. al implementar el modelo matemático de Holmberg para diseñar la malla de perforación y voladura, logró optimizar las operaciones unitarias de los procesos inmersos en la explotación del mineral, ya que pudo reducir los disparos fallados promediando 3 a 4 disparos fallados por mes, mejor rendimiento de avance por disparo, redujo el factor de potencia, lo mismo con el factor de avance, todo esto impactó directamente en la reducción global del proceso de perforación y voladura en 536,31 US \$/m por metro lineal de avance.

Condori & Velazco [12] en su investigación en la Unidad Minera Estrella de Chaparra S.A. tajeos Cecilia y Nuevo Porvenir, aplicando el modelo de Holmberg en su malla de dimensiones 2 m x 10 m aumentando la distancia efectiva de la perforación pasando ahora a 1,71 metros lo cual permitió disminuir los taladros de 110 a 68 taladros con la nueva malla reduciendo en un 37,13% los costos unitarios del proceso de perforación y voladura y por último logró aumentar la producción en 11,13 Tm/disparo.

Tomando como punto de partida el macizo rocoso el cual es el conjunto que está formado por la matriz rocosa y discontinuidades, es fundamental su buena caracterización y clasificación para poder entender su comportamiento cuando este sea alterado por la intervención humana, especialmente en minería subterránea donde los trabajos son más riesgosos [13]. La perforación del macizo rocoso es una operación de iniciación en la roca mediante los taladros de las perforadoras, con la finalidad de introducir explosivos en el interior de la roca [14]. El proceso de perforación es la apertura de cavidades cilíndricas en el macizo rocoso por medio de taladros los cuales van penetrando la roca de forma giratoria [15]. La voladura es la fragmentación del macizo rocoso en tamaños idóneos por medio de material explosivo para un propósito en específico [14]. El factor de carga es uno de los indicadores que permite saber en qué pieza se utilizará la energía total gastada por disparo, conociendo así el uso elevado o no de los explosivos [12]. La eficiencia de la voladura parte con tener claridad para lograr resultados en minería para una gestión bien pensada y con la

menor cantidad de recursos para lograr la meta con los mismos o menos recursos [16].

Así mismo, la malla de perforación y voladura es la distribución de los taladros con material explosivo, en esta distribución se toman las dimensiones de la carga por distancia [6]. Los modelos matemáticos para diseñar una malla de perforación por definición se entienden “como el modelo matemático para calcular el burden para las operaciones mineras tanto subterráneas como superficiales creando un algoritmo para intervenir las variables reales del macizo rocoso, las mismas que se usarán para la voladura del macizo rocoso, teniendo presente que el burden es la variable fundamental y determinante para obtener un resultado adecuado de la fragmentación de la roca” [17]. Cuando hablamos de optimizar un proceso nos referimos a las actividades que realizamos para encontrar mejores resultados, mayor eficacia al realizar una actividad [18]. Los costos operativos obedecen a la tecnología de extracción, el volumen, las reservas probadas, el grado de heterogeneidad, la forma, la dureza del mineral, la preparación del acceso, la forma del terreno y la calidad de la roca, y también en términos de costo de mano de obra y método de explotación, afectan suficientemente el proceso de perforación y voladura [19].

Desde el punto de vista de los costos los cuales son el conjunto de valores obtenidos en un momento dado que tienen relación directa con el producto que se fabrica, existiendo costos directos e indirectos, donde los primeros se identifican de manera rápida y los últimos no [20]. Los equipos de perforación son todo aquellos que ayudarán en el proceso de perforar del macizo rocoso y dentro de los materiales para la voladura tenemos, explosivos, cordón detonante, fanel y retardos [12]. El burden es la trayectoria de un barrenado dentro de una malla adyacente a una de sus caras despejadas el cual se regirá por el diámetro de la barra de perforación, características de la roca y el explosivo que se usará [21].

La justificación de esta investigación se enfoca en lograr optimizar los procesos de perforación y voladura aplicando modelos matemáticos para diseñar una malla que permita incrementar la producción en la Cortada SE Nv. 1680 de la Mina Tingo en CMPSA eliminando tiros fallados o inconvenientes actualmente existentes. Económicamente se busca reducir los costos unitarios implementando una nueva malla de perforación lo que generará una mayor producción de material fragmentado sin hacer uso desmedido de los materiales para la perforación y fragmentación de la roca (explosivos y aceros). Académicamente se afrontará la problemática de la compañía usando diversos modelos matemáticos (Kuz–Ram, Holmberg, Konya, Konya & Walter, Langefors y el criterio de Hoek & Brown) para poder diseñar una malla de perforación y voladura que optimice los procesos implicados en la operación. Esto permitirá tener más conocimientos sobre los criterios óptimos para el diseño de una malla de perforación idónea, lo que servirá a futuros estudiantes tener antecedentes más precisos para posteriores estudios de investigación.

Teniendo como guía nuestra línea de investigación ya planteada, se definió el objetivo general, optimizar los procesos de perforación y voladura aplicando modelos matemáticos para incrementar la productividad en la Cortada SE Nv. 1680 en la Mina Tingo de Compañía Minera Poderosa S.A., Patag 2022.

Para lo cual se tienen que plantear los siguientes objetivos específicos: Analizar la geomecánica del macizo rocoso, posteriormente analizar el proceso actual de perforación y voladura para implementar mejoras en la Cortada SE Nv. 1680 en la Mina Tingo de CMPSA y finalmente analizar la malla actual y de esa manera poder identificar las oportunidades de mejora para poder sugerir y diseñar una mejor malla de perforación, voladura mediante modelos matemáticos, para poder incrementar la productividad en la Cortada SE Nv. 1680 en la Mina Tingo de la CMPSA.

II. MÉTODO

La presente investigación se ha desarrollado en base a un enfoque cuantitativo, la misma que según Medina et al. [22] indica que es el uso de manera agrupada los datos matemáticos y los resultados provenientes de los diversos análisis realizados. Esta investigación no cuenta con hipótesis, se recolectó datos que fueron analizados estadísticamente y permitió tomar la mejor decisión para optimizar los procesos de perforación y voladura.

La investigación es de tipo aplicativo, la que según Tomasada et al. [23] hace mención que busca la incorporación de artilugios para el estudio de la investigación a realizar y el uso de información recabada de manera directa. Esta investigación se realizó bajo el uso de conocimientos sobre modelos matemáticos ya existentes en el diseño de mallas de perforación y voladura, los cuales fueron probados en este estudio, aplicando el modelo más idóneo para el tipo de macizo rocoso de la labor.

Por la temporalidad del estudio es retrospectivo y transversal, debido a que los resultados fueron verificados y analizados posterior al recojo de datos en un periodo menor a un año.

El diseño de la investigación de tipo Pre Experimental ya que las variables en estudio fueron medidas en base a modelos matemáticos de perforación y voladura.

En el desarrollo de la presente tesis, se consideró como población la mina Tingo en la CMPSA y por muestreo por conveniencia se tomó a la Cortada SE Nv. 1680 de la Mina Tingo en CMPSA.

La técnica usada en esta investigación es el de la observación en campo, entrevista a los operarios y supervisores, análisis muestral y documental, dado que se midió cantidad de explosivo usado, número de taladros, avance lineal de la labor y se recogieron muestras para determinar la granulometría del material, la cantidad de explosivo utilizado y los diversos materiales inmersos en el proceso.

Así mismo, como instrumento se utilizó, RMR de Bieniawski, los parámetros de perforación y voladura, índice de resistencia geológica (GSI), el cuaderno de campo para facilitar el recojo de la información requerida en el estudio, para luego hacer un vaciado de la información recogida en tablas y cuadros en Excel y el programa WipFrag que luego se procesó y analizó para una buena decisión en la optimización de los procesos de perforación y voladura, lo mismo que las fichas de entrevista, fichas de análisis muestral y fichas de análisis documental.

El y fidedigna para su investigación, siguiendo estas pautas procedimiento de recolección de datos según Hernández et al. [24], indica que son los procesos que el investigador llega a ejecutar con el único objetivo de recabar información clara, precisa, objetiva de investigación se procedió a inspeccionar que la labor cumpla con los requisitos mínimos para poder trabajar, llenado de IPERC, pintado del diseño de la malla, supervisión del cumplimiento de los protocolos brindados por compañía para este tipo de trabajos, cumplimiento del uso correcto de los EPP, control de todas las etapas del proceso periódicamente, tomando apunte de todo ello en cuaderno de trabajo diario. Posteriormente se procedió a realizar un análisis de taburete con toda la información ya existente en artículos de investigación de fuentes confiables y las estadísticas suministradas por la propia compañía minera. Y finalmente, se realizó un análisis de laboratorio para poder ingresar al software los datos previamente recolectados, los cuales mediante simulaciones basados en los modelos matemáticos brindaron los parámetros idóneos para poder rediseñar la malla de perforación y voladura optimizada, la cual brindó mejores resultados desde el punto de vista productivo y costos unitarios del proceso, siempre teniendo como base el cumplimiento de los altos estándares que rigen a la empresa.

Respecto a la validez y confiabilidad los instrumentos usados en esta investigación son respaldados por expertos en temas de perforación y voladura en minera subterránea con una amplia trayectoria profesional en unidades mineras, docentes con una trayectoria intachable en diversas universidades y sobre todo por los ingenieros de Compañía Minera Poderosa S.A.

III. RESULTADOS

A. Análisis geomecánico del macizo rocoso en la cortada SE Nv. 1680 en la Mina Tingo de Compañía Minera Poderosa

Para lograr la clasificación del macizo rocoso se realizó mediante el uso del criterio de Bieniawski de 1989 (RMR – Rock Mass Rating o Valoración de la Masa Rocosa), con el único fin de lograr la clasificación del macizo rocoso.

TABLA I
PARÁMETROS GEOMECAÑICOS DE LA LABOR

Sección	3.4 x 4
Azimut	90
Pendiente	0.5
Encampane	627
Sostenimiento	Shocrete de 2'' reforzado con P.H. de 7' + Malla 4 x 4

Litología	Granodiorita
RQD	16
RMR	31
Q de Barton	0.24
Calidad de la Roca según GSI	F
N° fracturas/m ²	20
Tipo de roca	Roca Mala tipo IV A
Condiciones de cuñas	Cuña estable

Con los datos obtenidos analizando el macizo rocoso “in situ” se pudo determinar de manera exacta los diversos parámetros geomecánicos de la labor, de esta manera poder diseñar la malla de perforación y voladura más óptima, de igual forma el sostenimiento adecuado que brindara seguridad en la labor que se está explotando.

B. Análisis del proceso actual de perforación y voladura para implementar mejoras en la Cortada SE Nv. 1680 en la Mina Tingo de Compañía Minera Poderosa S.A.

En CMPSA se han estandarizado los parámetros y requisitos mínimos aceptables, establecidos para las tareas en perforación, el carguío de explosivos para la voladura en el lugar del disparo, minimizando los riesgos de seguridad y salud ocupacional, bajo la norma legal de, D.S. N.º 024-2016-EM que trata sobre el Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional. Art 234, D.S. N.º 023-2017-EM el cual Modifica diversos artículos y anexos del Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería, aprobado por D.S. N.º 024-2016-EM, las normas OSHAS 18001:2007 Requisito 4.4.6.y la ISO 45001:2015 Requisito 8.1.1.

TABLA II
PARÁMETROS DE PERFORACIÓN

Longitud de perforación: 6 pulgadas $L_{tal}=L_b*E_p$	L_{tal} =Longitud del taladro	L_b =Longitud del barreno	E_p =Eficiencia de potencia
Diámetro de taladro: De 4 a 5 centímetros		Diámetro de la broca: De 1 a 18 pulgadas	
Número de taladros	Método empírico: $N^{\circ} T = (10\sqrt{b}) * h$ b = base h = altura	Método de los perímetros: $N^{\circ} T = (P/dt) + (c * s)$ P = perímetro de la labor dt = espaciamiento de taladros c = constante de roca s = sección de túnel	
Dureza	Tenaz	Intermedia	Friable
Distancia entre taladros	0.55 a 0.55	0.60 a 0.65	0.70 a 0.75
Coefficiente de roca (m)	2.00	1.50	1.00
Burden Nominal: $B_n = \phi [(P_o D_{taladro} - (\gamma * H) / f_s * \sigma * RQD) + 1]$ Bn= Burden nominal (m) ϕ = Diámetro del taladro (m) $P_o D_{tal}$ = Presión de detonación del taladro (Kg/cm ²) RQD = Índice de calidad de la roca σ = Resistencia a la compresión de la roca o mineral, (Kg/cm ²) Fs = Factor de seguridad γ = Densidad de la roca (TM/m ³)		Burden Ideal: $B_i = B_n - D_p$ Bn = Burden nominal Dp = Desviación de perforación	

H = Profundidad de la labor (m)	
Espaciamiento entre taladros	Cuadradores: 50 a 70 centímetros. Arranque: 15 a 30 centímetros.
Desviación del Taladro	$y = 0.0008x^2 + 0.0152x + 0.0078$ $R^2 = 0.9867$
Palelismo de taladro	Guiadores (barrenos desgastados)
Taco de taladro	Generalmente el taco es 1/3 de la longitud del taladro.

El registro de los parámetros de perforación brindará mejor entendimiento a la geotecnia del macizo rocoso, debido a que se determina mediante pruebas físicas, mecánicas o hidrogeológicas que realiza el equipo de perforación.

TABLA III
PARÁMETROS DE EXPLOSIVO PARA LA VOLADURA

Presión de detonación: $P_{OD} = 0.25 * 10^{-5} * \sigma * V_{OD}^2$	P_{OD} = Presión de detonación (kBar) σ = Densidad del explosivo (g/cm ³) V_{OD} = Velocidad de detonación (m/s) De 30 a 202 Kbar.
Factor de Carguío	$F_c = V_c / V_{tal} = (\Phi_e * L_e * N_{cartuchos}) / (\Phi_{tal} * L_{tal})$ Donde: $F_c \cdot 1$ y está expresado en kg/m ³
Simpatía del Explosivo: $A_e = \Phi_e / \Phi_{tal}$	A_e = razón de acoplamiento (o desacoplamiento) Φ_e = diámetro del explosivo Φ_{tal} = diámetro del taladro Donde: $A_e \leq 1$
Longitud de Carga Explosiva: $L_c = [\Phi_e / (A_e * \Phi_{tal})]^2 * L_e * N_c / tal$	Φ_e = Diámetro del explosivo A_e = Acoplamiento del explosivo Φ_{tal} = Diámetro del taladro L_e = Longitud del explosivo N_c / tal = Número de cartuchos por taladro Donde: $L_c \cdot \frac{3}{4} L_{tal}$

Para iniciar los procesos de perforación y voladura, los operarios primeramente deben de tener su orden de trabajo, sus PETS (Procedimiento Escrito de Trabajo Seguro) de perforación y voladura, hacer el llenado del IPERC (identificación de peligros, evaluación de riesgos y medidas de control) y cumplir con los parámetros y controles, establecidos en el estándar de CMPSA e informar inmediatamente a su jefe de cualquier condición sub estándar que se presente en sus tareas y al momento del disparo deben de ponerse a buen recaudo tanto del estruendo como de la emanación del gas propio de la voladura.

Al realizar el DAP (Diagrama de Análisis de Procesos) se identificó 27 actividades que están involucradas en el proceso de perforación y voladura con un tiempo de ejecución de 9.83 horas evidenciándose actividades que deben ser mejoradas y otras eliminadas para poder optimizar este proceso.

C. Análisis de las mallas actual y optimizada para poder identificar las oportunidades de mejora, y con ello sugerir el diseño de una mejor malla de perforación y voladura, mediante modelos matemáticos, y finalmente incrementar la productividad en la Cortada SE Nv. 1680 en la Mina Tingo de la Compañía Minera Poderosa S.A.

Actualmente en CMPSA para la cortada SE Nv. 1680 se está utilizando la malla de perforación y voladura de 6 pulgadas con una sección de 3.5 x 3.5.

TABLA IV
ANÁLISIS DE MALLAS

Parámetros del taladro	Malla actual	Malla Optimizada
Taladros	43	41
Longitud de perforación	6 pulgadas	6 pulgadas
Longitud efectiva	1.65 m	1.65 m
Avance x disparo	1.55 m	1.55 m
Peso específico	2.7 TM/m ³	2.7 TM/m ³
Espojamiento	60%	60%
Sobrerotura	10%	10%
Diámetro máximo de fragmentación	0.2 m	0.2 m

Reducción de taladros de 43 a 41.

TABLA V
DESCRIPCIÓN DE LA MALLA ACTUAL Y OPTIMIZADA “CON” Y “SIN” SOBREROTURA

Dimensionamiento de rotura	Sobrerotura	
	Sin	Con
Perímetro (m)	13.0	14.3
Área (m ²)	12.16	13.4
Volumen in situ (m ³)	18.8	20.7
Peso (TM)	50.9	56.0
Volumen esponjamiento (m ³)	30.2	33.2
Área de fragmentos (m ²)	6031	6634

No hay variación debido a los parámetros y estándares de poderosa no permiten excederse de los límites establecidos por la compañía.

TABLA VI
EXPLOSIVOS Y ACCESORIOS EN LAS MALLAS

Explosivos y accesorios	Dimensiones	Cantidad	Perforación	Explosivo (kg)
Malla Actual				
Emulnor 1000	1 ¼" x 12"	42	7	9.1
Emulnor 3000	1 ¼" x 12"	70	7	19.0
Emulnor 5000	1 ¼" x 12"	274	25	76.1
Famecorte E-20		30	5	8.3
Sin explosivo	0.00	0	4	0.00
Mecha rápida	1 metro			
Cordón detonante	16 metros			
Detonador 2.40	2 unidades			
Malla Optimizada				
Emulnor 1000	1 ¼" x 12"	144	14	31.0
Emulnor 3000	1 ¼" x 12"	164	14	44.6
Famecorte E-20		30	5	8.3
Sin explosivo	0.00	0	8	0.00
Mecha rápida	1 metro			
Cordón detonante	16 metros			
Detonador 2.40	2 unidades			

Como cambio resaltante se realizó el reemplazo de Emulnor 5000 en la malla actual por Famecorte E-20 en la malla optimizada.

TABLA VII
FACTOR DE POTENCIA

Factor de potencia	Malla Actual	Malla Optimizada
Factor de potencia (Kg/TM)	1.86	1.50
Factor de potencia (Kg/m)	67.2	54.2

Los factores de potencia pasaron de 1.86 a 1.50 Kg/TM y de 67.2 a 54.2 Kg/m.

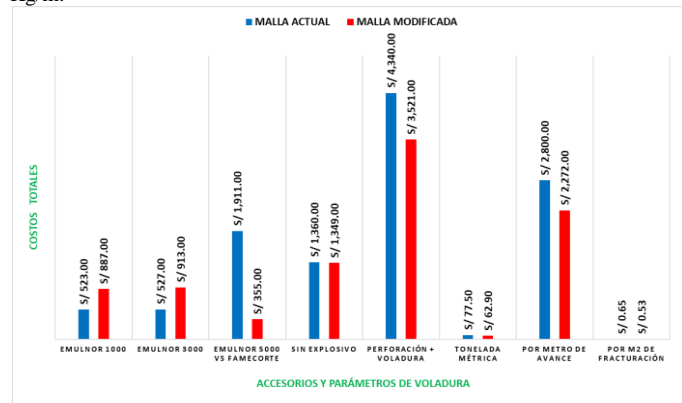


Fig. 1 Comparación de costos entre malla actual y malla optimizada.

Como se puede apreciar en las tablas 4, 5, 6, 7 y la figura 1, donde queda de manifiesto el avance, el volumen y tonelaje arrojado por voladura, de igual manera el consumo de material explosivo, accesorios y el costo general del proceso de perforación y voladura, los mismos que son elevados.

Para poder diseñar una nueva malla de perforación y voladura optimizada, se realizó diversos análisis más detallados desde lo estructural para una adecuada zonificación de la labor, simulaciones mediante el software DIPS, corroborar la estabilidad e inestabilidad de las cuñas existentes, los parámetros hallamos en el punto 3.1 y desde luego la aplicación del modelo matemático del criterio de “HOEK & BROWN” y de esta manera lograr optimizar el proceso de perforación y voladura que será medible mediante la reducción de los costos en los procesos de perforación y voladura, de igual forma la eliminación de algunos criterios que están ocasionando retrasos en la labor, que son materia de estudio.

Al realizar el análisis estructural los datos obtenidos se ingresaron al Software DIPS para realizar simulaciones y de esta manera analizar los datos, y así poder modelar el accionar cinemático de las fracturas y fallas que llegan a formar las cuñas, las mismas que presentan un 66.67% de probabilidad de deslizamiento de la cuña en dirección al avance y la orientación de las discontinuidades.

Teniendo presente la formación de cuñas, se procedió al modelamiento de la estabilidad de las mismas empleando el Software Unwegde, para ello se ingresó las 3 familias presentes y que están formando las cuñas, presentando un peso de 12.41 toneladas, con un volumen de 4.534 m³, teniendo un factor de seguridad (F.S.) de 1.074. Así mismo, se tiene que considerar que la Cortada SE del Nivel 1680 es una labor de explotación permanente, y por tal motivo se tiene que realizar los procesos

de perforación y voladura brindando la seguridad en todo momento.

Finalmente, en el proceso de análisis estructural se usó el modelo matemático del “CRITERIO DE HOEK & BROWN” el cual permite diseñar una malla optimizada para el proceso de perforación y voladura, y de esta forma lograr reducir los costos operativos en dichos procesos, todo ello mediante la aplicación de la fórmula descrita en la tabla VIII.

TABLA VIII
CRITERIO DE HOEK & BROWN GENERALIZADO

$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} * [m_b * (\sigma_3' / \sigma_{ci}) + s]^a$	$m_i = 30$
$m_b = m_i * Exp. (GSI - 100) / (28 - 14D)$	$RCM = 32.38476011$
$s = Exp. (GSI - 100) / (9 - 3D)$	$s = 0.0000135$
$a = 1/2 + 1/6 * [Exp. (-GSI/15) - Exp. (-20/3)]$	$a = 0.53$
	$D = 0.80$
	$m_b = 0.3665705$

El criterio de Hoek & Brown, se realiza mediante la aproximación lineal de la rotura curvilínea, con un rango de campo tensional y se pueden obtener su cohesión y ángulo de resistencia al corte de di Mohr – Coulomb. Es decir que evalúa la resistencia y deformación de la roca encajante fracturada, se realiza mediante la evaluación de tres propiedades de la roca encajante y son; La resistencia en compresión no confinada “ σ_{ci} ” de los trozos de roca intacta en la roca encajante, el valor de la constante “ m_i ” de Hoek-Brown para esta roca intacta, y el valor del Índice de Resistencia Geológica “GSI” para el macizo rocoso.

Al realizar los ajustes en los procesos implicados en la etapa de perforación y voladura se disminuyó los procesos de 27 a 18 reduciendo el tiempo de 9.83 a 3.25 horas eliminando tiempos muertos y actividades innecesarias al proceso.

Para ello se dispuso la mejora continua de los operarios mediante charlas instructivas, disposición de una camioneta para el traslado a la labor, limpieza de la labor horas previas al ingreso, coordinación de los explosivos 30 minutos antes de terminar la perforación de los taladros, eliminación de tiempo de descanso debido a la disminución de todo el proceso, entre otros que quedan de manifiesto en la optimización del DAP de perforación y voladura.

Al realizar la comparación de costos entre malla actual y optimizada los costos involucrados en el proceso total de la perforación y voladura, queda en evidencia que los costos han disminuido sustancialmente tal como se detalla en la figura 2.

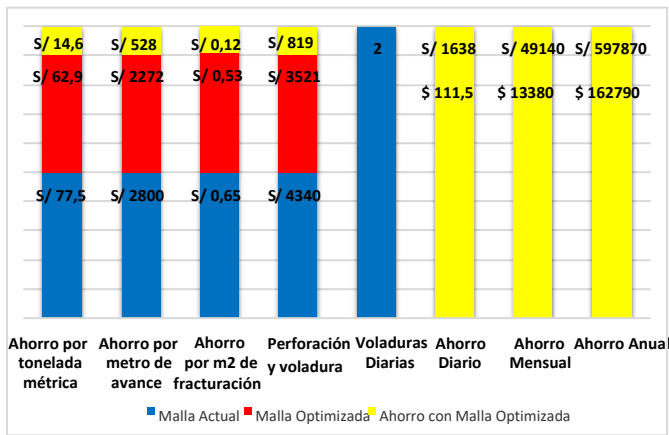


Fig. 2 Ahorro producto de la optimización de la malla de perforación y voladura.

El ahorro es muy notorio y deja en evidencia que la nueva malla diseñada es más rentable desde el punto de vista económico, entendiendo que solo se está tomando una labor con una producción que oscila alrededor de las 112 toneladas diarias y el ahorro sería mayor si se replica en todas las labores de avance de Compañía Minera Poderosa S.A.

Si comparamos los costos por metro lineal de avance entre la malla actual que es de S/ 578004000 (\$ 157334770) con la malla optimizada hubiera sido S/ 469008960 (\$ 127665927), lo que arrojaría un ahorro de S/ 108995040 (\$ 29668843) en el periodo comprendido entre los años 2009 – 2020.

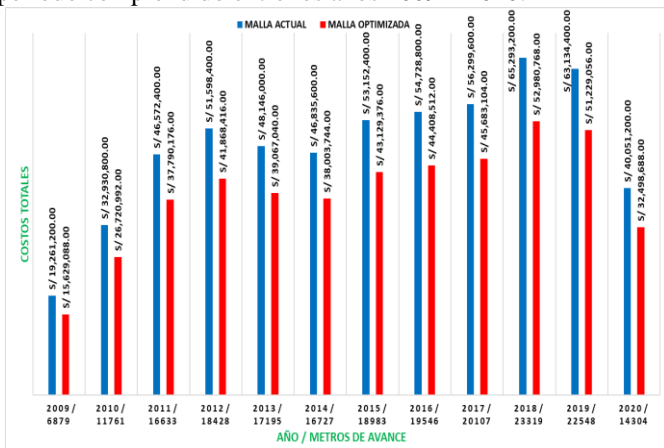


Fig. 3 Comparación de costos por metro de avance, malla actual vs malla optimizada de los años 2009 – 2020.

Del mismo modo al comparar los costos por tonelada métrica explotada de la malla actual con la malla optimizada el ahorro sería de S/ 217573842,80 (\$ 59224383) en el periodo comprendido entre los años 2009 – 2020.

CMPSA explota alrededor de 4500 TM diarias y llega a procesar 1600 TMS entre sus dos plantas de procesamiento “Marañón” y “Santa María”, queda comprobado que es muy beneficioso y rentable el uso de la nueva malla de perforación y voladura, todo ello entendiendo que CMPSA pretender producir

para el año 2023 alrededor de 327000 onzas de oro al procesar alrededor de 600000 TMS con una ley de 17 gr/TMS.

IV. DISCUSIÓN

Partiendo de nuestro objetivo general, Optimizar los procesos de perforación y voladura aplicando modelos matemáticos para incrementar la productividad en la Cortada SE Nv. 1680 en la Mina Tingo de Compañía Minera Poderosa S.A., Pataz 2022, los resultados quedan de manifiesto en la figura 4 donde se hace la comparación entre la malla actual y la malla optimizada mediante el modelo matemático del criterio de Hoek & Brown pues permitió una mejor optimización desde el punto de vista económico, logrando un ahorro de S/ 819 por proceso de perforación y voladura, sabiendo que este proceso se realiza 2 veces al día los 365 días del año, lo que en dinero es un ahorro de S/ 597870 (\$ 162790) por año, y en la tabla 13 se menciona los ahorros de manera independiente por proceso, entre los cuales tenemos, tonelada métrica de S/ 14,60, por metro de avance de S/ 528 y por m² fracturado de S/ 0,12. Todos estos datos al ser contrastados con Condori & Velazco [12], en su investigación utilizaron el modelo matemático de Holmberg para rediseñar la malla, logrando disminuir el número de taladros de 110 a 68 lo que les permitió reducir en un 37.13% los costos unitarios de todo el proceso de perforación y voladura, pasando de costar 11,39\$/Tm a 7,16 \$/Tm. Por tal motivo, queda en evidencia el uso correcto de un modelo matemático para el diseño de la malla de perforación y voladura, permite optimizar dichos procesos y de esa forma generar rentabilidad económica, lo que asegura que una empresa sea sustentable y perdure en el tiempo.

Desde el punto de vista del primer objetivo específico, Analizar la geomecánica del macizo rocoso la Cortada SE Nv. 1680 se identificó los siguientes parámetros: sección de 3.4m x 4m, azimut de 90, pendiente de 0.5, encampane de 627, litología de la roca es granodiorita, RMR de 31, N° fracturas/m² de 20, roca es Mala Tipo IV A, con condiciones de cuñas es estable y el tipo de sostenimiento a usar es el shotcrete de 2” reforzado con P.H. de 7’ + Malla 4X4. Todos estos parámetros geomecánicos fueron de vital importancia para el rediseño de la malla de perforación y voladura, para poder cambiar y reducir el consumo de explosivos, conservando siempre los parámetros de sobrerotura y finalmente reducir los tiros fallados, lo que impacto directamente en la economía de la empresa. Datos que al ser comparados con la tesis de Mamani [9], quien usando los modelos matemáticos de Kuz – Ram y Holmberg, concluye que un correcto análisis del macizo rocoso permite una adecuada distribución de energía, un mejor avance que en su caso fue de 95% por disparo, logró reducir en 20% los disparos fallados y conservar sus parámetros de sobrerotura. Por tal motivo, queda en evidencia que el primer análisis y es el más importante para el correcto diseño de la malla de perforación y voladura, pasa por el correcto estudio y caracterización del macizo rocoso, esto permitirá abordar el diseño de la malla con los parámetros adecuados para una mejor optimización de los procesos de

perforación y voladura, así mismo, diseñar el correcto sostenimiento que brindará seguridad en la labor.

Pasando al segundo objetivo específico, Análisis del proceso actual de perforación y voladura para implementar mejoras en la Cortada SE Nv. 1680; el resultado del análisis se identificó 27 actividades en el proceso con un tiempo de ejecución de 590 minutos, quedando en evidencia mediante el DAP mucho margen de mejora con una optimización de todos los procesos involucrados y el rediseño de la malla de perforación y voladura. Estos datos que al ser comparados con Chancasanampa [7], quien en su tesis dentro de sus resultados más resaltantes obtiene, un incremento de 21% de la productividad en el tajeo 068, la reducción de los costos en insumos en los procesos de perforación y voladura, todo ello mediante la optimización del ciclo de perforación y voladura, así mismo, Quezada [11] en su tesis también logra resultados que están vinculados a la optimización de las actividades unitarias involucradas en los procesos de perforación y voladura, lo que arrojó un costo por metro lineal de avance de \$ 536,31. Por tal motivo, se puede observar que la optimización de las actividades que están inmersas en el proceso de perforación y voladura, va impactar de manera favorable en las finanzas de la empresa al reducirse los tiempos e insumos usados en dicho proceso.

Pasando al tercer y último objetivo específico, Analizar la malla actual y de esa manera poder identificar las oportunidades de mejora para poder sugerir y diseñar una mejor malla de perforación y voladura mediante modelos matemáticos, para poder incrementar la productividad en la Cortada SE Nv. 1680, los resultados obtenidos al analizar la malla actual dieron un costo total en todo el proceso de S/ 4340 por disparo. Al realizar la optimización de todo el proceso mediante el modelo matemático del Criterio de Hoek & Brown se logró obtener los siguientes resultados, una nueva malla de perforación y voladura basada en 41 taladros, se reemplazó el emulnor 5000 por el Famecorte E-20, 83.9 kg de explosivos utilizado, un nuevo factor de potencia de 1.5 kg/TM y 54.2 kg/m, el avance por disparo sigue siendo el mismo 1.55 metros (debido a los estándares que se usa en poderosa para esta actividad), área de fragmentos de 6634 m² con un diámetro máximo de 20 cm ideal para los siguientes procesos, se optimizaron las actividades inmersas en el proceso de perforación y voladura, ahora constan de 18 actividades con un tiempo de ejecución de 195 minutos, todas estas mejoras arrojaron un costo por disparo de S/ 3521. Estos datos al ser contrastados con Choque [10], en su tesis logró resultados que están vinculados a la optimización del proceso de perforación y voladura mediante los modelos matemáticos de Langefors logra diseñar una nueva malla de perforación y voladura logrando una variación de potencia de 0.62 Kg/Tm a 0.35 Kg/Tm y el factor de energía paso de 2.34 Kg/Tm a 1.32 Kg/Tm y las voladuras secundarias se redujeron de un 33% a 20%. En la misma línea, Barrientos & Durand [8], rediseña la malla mediante el modelo matemático de Langefors obtuvo un factor de potencia de 0.50 Kg/Tm obteniendo una granulometría

de 20.19 cm, tamaño favorable para las operaciones. Por consiguiente, queda en manifiesto que un buen análisis de una malla de perforación y voladura, permite diseñar una nueva malla mediante el uso y elección correcta de un modelo matemático, lo que permite reducir los costos totales en el proceso de perforación y voladura por disparo realizado.

V. CONCLUSIONES

Mediante el análisis del macizo rocoso, el análisis de los procesos actuales en la perforación y voladura, y malla actual; todos estos datos obtenidos meticulosamente, permitió emplear el modelo matemático del “criterio de Hoek & Brown” siendo este modelo el más eficaz para el tipo de roca en la labor de trabajo y de esta manera rediseñar la malla de perforación y voladura, esto se vio reflejado en la optimización del proceso, logrando reducir las actividades inmersas en el proceso que pasaron de 27 a 18, el tiempo de ejecución paso de 592 a 195 minutos, los taladros de 43 a 41 y el costo total del proceso paso de S/ 4340 (\$ 1181) a costar S/ 3521 (\$ 958) por disparo. Por tal motivo, se recomienda a CMPSA ejecutar los análisis antes mencionados pues son estos los que brindarán los datos exactos para la elección de un buen modelo matemático para rediseñar una malla de perforación y voladura en las distintas labores de avance que se encuentren operando, y esto les generara optimizar sus procesos e incrementar su productividad.

Se logró la optimización del proceso de perforación y voladura mediante el rediseño de la malla por medio del modelo matemático del criterio de Hoek & Brown y la mejora realizada a las actividades inmersas en el ciclo de perforación y voladura. Pasando de tener un costo total de S/ 4340 (\$ 1181) por disparo a costar S/ 3521 (\$ 958) por disparo, lo que significa un ahorro de S/ 819 (\$ 223) por disparo realizado, y entendiendo que se realizan un mínimo de 2 voladuras diarias en la labor, estamos hablando de un ahorro mensual de S/ 49140 soles (\$ 13380).

Según el análisis y caracterización del macizo rocoso, permitió identificar el RMR, el índice Q, tipo y calidad de la roca, obteniéndose los siguientes valores, RMR 31 – 40, Q de 0.24 – 0.64 y roca mala tipo IV A. Siendo este análisis fundamental y al ser complementado con el levantamiento de información in situ, permitió rediseñar la malla de perforación y voladura, mediante la selección y uso correcto de un modelo matemático acorde a nuestros datos obtenidos. Por tal motivo, se recomienda a CMPSA realizar el análisis del macizo rocoso como primer paso pues se considera de vital importancia, siendo este análisis quien brindara los parámetros idóneos para lograr diseñar una malla de perforación y voladura optimizada para el tipo de roca de una labor.

Al llevar a cabo el correcto análisis de los procesos actuales de perforación y voladura, se pudo identificar diversos parámetros tanto en perforación y voladura, los elementos implicados en ambos procesos, las actividades inmersas en todo el proceso y el tiempo de ejecución de la misma. Del mismo modo, dicho análisis es importante pues permite identificar las

posibles oportunidades de mejora en todo el proceso de perforación y voladura, desde el punto de vista de actividades inmersas que actualmente son 27, del tiempo de ejecución siendo 590 minutos y los elementos inmersos en el mismo. Por consiguiente, se recomienda a CMPSA realizar un exhaustivo análisis de sus procesos actuales y mediante un DAP dejar en evidencia las actividades que están generando demoras en el tiempo de ejecución de todo el proceso.

Finalmente, al realizar el análisis de la malla que se usa actualmente, permitió identificar que el número de taladros, distribución de taladros y el explosivo usado no eran los más idóneos, pues el costo del proceso era muy elevado. Por tal motivo, se recomienda a CMPSA analizar la malla de perforación y voladura para poder rediseñar una nueva malla implementando el modelo matemático de el “CRITERIO DE HOEK & BROWN” pues se dejó en evidencia que empleando este modelo matemático de manera correcta generara un ahorro por proceso de perforación y voladura de S/ 819 soles (\$ 223).

Al mejorar drásticamente la productividad de CMPSA, la rentabilidad que genera la empresa afecta directamente de manera positiva a la población, debido al aumento de canon minero que recibirán producto de las utilidades de CMPSA.

AGRADECIMIENTO

Nuestra especial consideración y agradecimiento a Dios y familiares, ya que fueron el impulso para poder concluir una meta más de nuestro proyecto de vida.

REFERENCIAS

- [1] J. Herrera, “Introducción a la minería subterránea”. Vol. II: Construcción de accesos. Disponible en: <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/24513?localeattribute=en>
- [2] R. Castro, “Mineros de ayer y hoy”. Disponible en: <https://www.uchile.cl/noticias/93070/mineros-de-ayer-y-hoy->
- [3] G. Remigio, Estudio geomecánico para diseñar mallas de perforación y voladura en chimeneas - Mina San Andrés - Minera Aurífera Retamas S.A. Disponible en: https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/6078/T010_46831960_T_1.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [4] Instituto de Seguridad Minería, “Riesgos vinculados al uso de explosivos en actividades mineras”. Disponible en: <https://www.revistaseguridadminera.com/operaciones-mineras/riesgosvinculados-al-uso-de-explosivos-en-actividades-mineras/>
- [5] M. Chiclla & I. Zegarra, “Aplicación de modelos matemáticos de fragmentación para la reducción de costos, en perforación y voladura en el tajo Jesica, Mina Aruntani S.A.C. – 2016”. Disponible en: <http://repositorio.unamba.edu.pe/handle/UNAMBA/731>
- [6] L. Berrospi, “Diseño de malla de perforación - voladura y extracción de rocas para escolleras – Cantera Cristopher – Carabayllo – 2019”. Disponible en: https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/5653/T010_44379651_T.pdf?sequence=1
- [7] W. Chancasanampa, “Diseño de la malla de perforación y voladura para incrementar la productividad de tajeos en la Compañía Minera Great Panther Coricancha S.A.”. disponible en: https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/5431/T010_74357222_T.pdf?sequence=1
- [8] R. Barrientos & G. Durand, “Diseño de la malla de perforación para optimizar la fragmentación en el tajeo 6662 nivel 3780 veta Lilia en la Mina Socorro– Unidad Minera Uchucchacua – Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.”. Disponible en: https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/8574/5/IV_FIN_110_TE_Barrientos_Durand_2020.pdf
- [9] J. Mamani, “Diseño de malla de perforación y voladura aplicando el modelo matemático de áreas de influencia en la empresa minera MARSÁ”. Disponible en: <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/3850/MIchnmaj056.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [10] J. Choque, “Modelo Matemático de Langefors para optimizar el diseño de mallas de perforación y voladura de taladros largos – Unidad Yauliyacu”. Disponible en: https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/5141/T010_48046896_T.pdf?sequence=1
- [11] W. Quezada, “Optimización de perforación y voladura aplicando el modelo matemático de Roger Holmberg en frentes de 3.5m*3m en roca tipo II Veta Papagayo. Mina Poderosa. 2017”. Disponible en: <https://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/10020/Quezada%20Jacob%20c%20Wilmer%20Ubenmar.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [12] M. Condiri & J. Velazco “Optimización de perforación y voladura por el método de Roger Holmberg en minera aurífera Estrella de Chaparra S.A.”. Disponible en: https://repositorio.utp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12867/4395/Miguel_Condiri_Jhorlan_Velazco_Tesis_Titulo_Profesional_2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [13] Y. Jiménez, “Sistemas de clasificación para la caracterización del macizo rocoso”. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/268442439.pdf>
- [14] L. Santana, “Diseño de malla para perforación y voladura de frentes utilizando modelo matemático de Holmberg e índice de volabilidad de Lylli”. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.12894/1340>
- [15] C. López & E. López & P. García, “Manual de perforación y voladura de rocas”. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=202303>
- [16] H. Palomino, “Optimización del proceso de perforación y voladura en las labores de desarrollo para mejorar la eficiencia en la Compañía Minera Poderosa S.A.”. Disponible en: <https://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/5348/PALOMINO%20VIDAL%20HENRRY%20ALEXANDER.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [17] F. Reategui, “Aplicación del modelo de kuz ram y la teoría de daño por vibraciones para el diseño de los parámetros de perforación y voladura”. Disponible en: <https://revistas.ucsm.edu.pe/ojs/index.php/veritas/article/view/131>
- [18] Significado, “Significado de Optimizar”. Disponible en: www.significados.com/optimizar/
- [19] E. Lupaca, “Satisfacción percibida por la provisión de servicios públicos agrarios en los productores de irrigación La Yarada–Tacna”.
- [20] J. Duque, “Costos directos e indirectos”.
- [21] O. Lara, “Diseño de malla de perforación para optimizar la voladura en la Unidad Carahuacra de la Compañía Minera Volcan S.A.A” Disponible en: <https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/2173/Lara%20Baltazar.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [22] Medina et al., “Aplicación del análisis geoespacial para la clasificación de suelos en la región de La Libertad, Perú. 2020 | Aplicación de análisis geoespacial para la clasificación de suelos en la región La Libertad, Perú. 2020”. Disponible en: https://laccei.org/LACCEI2022-BocaRaton/full_papers/FPI21.pdf
- [23] Tomasada et al., “Aplicación de Sistemas de Información Geográfica al Estudio de Riesgo y Prevención de Incendios Forestales en Áreas Naturales Protegidas del Cuzco”. Disponible en: https://www.laccei.org/LACCEI2022-BocaRaton/full_papers/FPI29.pdf
- [24] R. Hernández, “Metodología de la Investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta”. México D.F.: Mc Graw Hill.