



MODELO MATEMÁTICO DE LA POTENCIA RELATIVA POR VOLUMEN DE UNA MEZCLA EXPLOSIVA

y su influencia en el diseño de mallas
de perforación y voladura

Víctor Alejandro Ames Lara
Rosendo Valerio Pascual

Víctor Alejandro Ames Lara

Correo: victorames888@gmail.com

Perfil: Ingeniero de Minas. Maestría en Ciencias: Mención en Ingeniería de Minas. Doctor en Seguridad y Control en Minería. Docente universitario de Tecnología de Explosivos y Perforación y Voladura. Consultor en Perforación y Voladura de Rocas. Gerente General de COMSEM S.R.L.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6722-8761>

Afiliación: Universidad Nacional del Centro del Perú (UNCP).

Rosendo Valerio Pascual

Correo: valerioreypr@gmail.com

Perfil: Ingeniero de Minas. Maestría en seguridad y medio ambiente en minería. Doctor en Seguridad y Control en Minería. Asistente en perforación y voladura. Consultor en Responsabilidad Social en Minería.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6688-8274>

Afiliación: Universidad Nacional del Centro del Perú (UNCP).

**MODELO MATEMÁTICO DE LA
POTENCIA RELATIVA POR VOLUMEN
DE UNA MEZCLA EXPLOSIVA
Y SU INFLUENCIA EN EL DISEÑO DE
MALLAS DE PERFORACIÓN Y VOLADURA**

Víctor Alejandro Ames Lara

Rosendo Valerio Pascual



Todas nuestras publicaciones son sometidas a revisión doble-ciego de pares académicos (*Peer Review Double Blind*).

Esta publicación cuenta con licencia Creative Commons Reconocimiento - NoComercial - SinObraDerivada 3.0 Unported License.



ISBN: 978-607-8960-14-9

© Víctor Alejandro Ames Lara

© Rosendo Valerio Pascual

2024

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.10903821>

© Editorial Tercer Sol

www.editorialtercersol.com

Queda prohibida la reproducción bajo cualquier modalidad de toda o una parte de esta obra sin autorización expresa del titular de los derechos.

Diseño de carátula y composición: Editorial Tercer Sol

Edición electrónica: Editorial Tercer Sol

Editado en México/ *Published in Mexico*

**MODELO MATEMÁTICO DE LA
POTENCIA RELATIVA POR VOLUMEN
DE UNA MEZCLA EXPLOSIVA
Y SU INFLUENCIA EN EL DISEÑO DE
MALLAS DE PERFORACIÓN Y VOLADURA**

Víctor Alejandro Ames Lara

Rosendo Valerio Pascual



ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	11
ÍNDICE DE TABLAS.....	13
INTRODUCCIÓN	15

CAPÍTULO I

EL MODELO MATEMÁTICO EN EL CÁLCULO TERMODINÁMICO.....	17
--	----

1.1. El cálculo termodinámico mediante ecuaciones.....	18
1.1.1. Ecuación de la presión de detonación o energía de tensión	19
1.1.2. Ecuación de la presión de explosión o presión de taladro.....	20
1.1.3. Ecuación de estado BKW	21
1.1.4. Ecuación de Rankine-Hugoniot.....	22
1.1.5. Ecuación de estado de Abel	23
1.1.7. Hipótesis de Chapman-Jouguet	23
1.2. Uso de modelos matemáticos en la minería	24
1.3 El modelo matemático de Crosby y Pinco	29

CAPÍTULO II

ASPECTOS RELEVANTES PARA LAS OPERACIONES DE PERFORACIÓN Y VOLADURA 31

2.1. Condiciones geológicas y geomecánicas	32
2.2. Parámetros para el diseño de las mallas de perforación y voladura.....	34
2.2.1. Burden	35
2.2.2. Espaciamiento.....	36
2.2.3 Tipo de roca	37
2.3. Operaciones de perforación	40
2.4. Operaciones de voladura	41

CAPÍTULO III

ENERGÍA EXPLOSIVA Y SU POTENCIA EN LAS MEZCLAS QUÍMICAS PARA VOLADURAS Y FRACCIONAMIENTO 43

3.1. Características fisicoquímicas de los explosivos.....	45
3.2. Conceptos fundamentales de mezclas explosivas.....	47
3.2.1. Combustión	48
3.2.2. Detonación.....	49
3.2.3. Explosión	51
3.3. Tipos de potencia de las mezclas explosivas	53
3.3.1. Potencia relativa por volumen	56

CAPÍTULO IV

LA POTENCIA RELATIVA POR VOLUMEN DE MEZCLAS EXPLOSIVAS Y SU MODELO MATEMÁTICO PARA EL DISEÑO DE MALLAS DE PERFORACIÓN Y VOLADURA 58

4.1. Objetivos	59
4.1.1. Objetivos generales	59
4.1.2. Objetivos específicos	59
4.2. Método de investigación	59
4.3. Sistema de variables	60
4.4. Población.....	61
4.5. Muestra	61
4.6. Diseño de investigación.....	61
4.7. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	61
4.8. Metodología de la investigación	61
4.9. Determinación de las ecuaciones para el cálculo termodinámico	62
4.9.1. Ecuación de la presión de detonación	62
4.9.2. Ecuación de Rankine-Hugoniot.....	63
4.9.3. Ecuación Becker-Kistiakowsky-Wilson (BKW)	63
4.10. Física - química de los explosivos.....	64
4.10.1. Energía de las mezclas explosivas	65
4.10.2. Determinación de la energía	67
4.10.3. Medición de la energía.....	67
4.10.4. Cálculo de la energía	67
4.10.5. Potencia de los explosivos	67

4.10.6. Eficiencia de los explosivos	68
4.10.7. Factor de energía.....	68
4.10.8. Características geomecánicas del macizo rocoso que tienen una influencia determinante en los resultados de la voladura de rocas.....	69
4.10.9. Propiedades físico-mecánicas de las rocas	69
4.11. Características geológicas y geotécnicas del área en estudio	70
4.11.1. Litología	70
4.11.2. Fracturas preexistentes	71
4.11.3. Tensiones de campo.....	72
4.11.4. Presencia de agua.....	72
4.11.5. Temperatura del macizo rocoso	72
4.11.6. Variables de la geometría del disparo.....	72
4.11.7. Otros parámetros importantes.....	73
4.12. Caracterización matemática del modelo de la potencia relativa por volumen (RBS)	74
4.12.1. Modelo de Crosby y Pinco	74
4.12.2. Ecuación modificada por los autores.....	74
4.12.3. Desarrollo del modelo matemático modificado	76
4.12.4. Esquema para la verificación del modelo matemático.....	76
4.12.5. Aplicación del modelo matemático que utiliza la potencia relativa por volumen (RBS)	76
4.13.2. Perforación y voladura.....	78
4.12.6. Diseño de la malla de perforación y voladura con el criterio RBS.....	79
4.13. Análisis y discusión de los resultados	85

4.13.1. Discusión técnica.....	85
4.13.2. Análisis de los resultados de la fragmentación	85
4.13.3. Discusión económica	87
4.13.4. Discusión ecológica	88
4.13.5. Consolidación de los resultados.....	88
4.14. Conclusiones.....	88
4.15. Recomendaciones.....	90

CAPÍTULO V

CONSIDERACIONES FINALES	92
-------------------------------	----

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	97
---------------------------------	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	
<i>Deducción de ecuaciones.....</i>	<i>19</i>
Figura 2	
<i>Parámetros para determinar las mediciones del intercambio térmico.....</i>	<i>25</i>
Figura 3	
<i>Parámetros reológicos analizados en ecuaciones.....</i>	<i>27</i>
Figura 4	
<i>Etapas representadas en la flotación de minerales.....</i>	<i>28</i>
Figura 5	
<i>Accidentes mortales según tipo de roca</i>	<i>39</i>
Figura 6	
<i>Histograma comparativo del factor de potencia.....</i>	<i>54</i>
Figura 7	
<i>Onda en el plano de detonación.....</i>	<i>62</i>
Figura 8	
<i>Interacción de las propiedades de las rocas y variables controlables con las operaciones mineras</i>	<i>70</i>
Figura 9	
<i>Variables de la geometría del disparo en minería superficial.....</i>	<i>73</i>
Figura 10	
<i>Cambio de explosivo de uno a dos (carga de fondo y carga de columna).....</i>	<i>75</i>

Figura 11

Cambio de explosivo de uno a tres tipos usando tacos intermedios.....75

Figura 12

Esquema para la verificación del modelo matemático que utiliza la potencia relativa por volumen (RBS) para el diseño de mallas de perforación y voladura..... 77

Figura 13

Esquema de carguío del taladro con ANFO pesado 50/50..... 82

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	
<i>Indicadores geológicos mineros (IGM)</i>	<i>33</i>
Tabla 2	
<i>Aproximaciones de los valores del RQD y RCU</i>	<i>38</i>
Tabla 3	
<i>Resumen total de costos por frente perforado según ítem</i>	<i>40</i>
Tabla 4	
<i>Optimización de taladros</i>	<i>41</i>
Tabla 5	
<i>Optimización de materiales en operación de voladura</i>	<i>42</i>
Tabla 6	
<i>Comparación de resultados promedio en la fragmentación por mes</i>	<i>44</i>
Tabla 6	
<i>Comparación de resultados promedio en la fragmentación por mes</i>	<i>47</i>
Tabla 8	
<i>Análisis comparativo HA-55 y MEQ73 (Quantex 73)</i>	<i>55</i>
Tabla 9	
<i>Operacionalización de variables</i>	<i>60</i>
Tabla 10	
<i>Distribución de la energía en diferentes eventos</i>	<i>66</i>
Tabla 11	
<i>Eficiencia de los explosivos</i>	<i>68</i>

Tabla 12	
<i>Tipos de discontinuidades</i>	<i>71</i>
Tabla 13	
<i>Parámetros básicos del Tajo</i>	<i>76</i>
Tabla 14	
<i>Parámetros principales del Tajo</i>	<i>78</i>
Tabla 15	
<i>Parámetros de perforación y voladura antes del uso de la RBS.....</i>	<i>78</i>
Tabla 16	
<i>Energía de las mezclas a granel del ANFO pesado</i>	<i>79</i>
Tabla 17	
<i>Nuevas dimensiones de burden (B) y espaciamiento (E)</i>	<i>80</i>
Tabla 18	
<i>Factores de energía</i>	<i>84</i>

INTRODUCCIÓN

La extracción minera es una labor ardua y constante. Además, los factores de riesgo en dicho trabajo son impredecibles durante el desarrollo de la actividad de extracción. En esta labor, se emplea distintos materiales y herramientas totalmente especializados y perfilados para potenciar y asegurar una gran extracción de minerales, los cuales, son distribuidos y puestos al mercado después de su debido proceso. En tales herramientas, por ejemplo, se encuentran los taladros, las palas, los picos, entre otros.

No obstante, los materiales empleados durante la extracción son los que provocan preocupación, pues la manipulación de explosivos en las minas debe ser meticulosa, por profesionales especializados, como los ingenieros de minas, que respeten las medidas exactas para dicha actividad y que cuenten con los conocimientos necesarios, a fin de asegurar una extracción óptima y segura.

Según Palacios et al. (2017), la extracción de recursos naturales en el continente americano, particularmente en la región latina, es una actividad bastante común, que se encuentra relacionada con distintos aspectos: sociales, políticos, económicos y culturales.

A nivel nacional, la minería representa aproximadamente el 10 % del PBI, razón por la cual las responsabilidades en torno al funcionamiento de esta actividad son mayores. Por ello, se aplica distintas políticas económicas, ambientales y de gestión, pues se busca garantizar una adecuada distribución de las ganancias y la seguridad de los trabajadores.

La innovación tecnológica, para la optimización de los explosivos empleados durante la extracción minera, también es un aspecto importante a considerar. Por ejemplo, de los trabajos de Escriba (2018); Chambi (2018); Iglesias (2016) se observa que constantemente los ingenieros de minas buscan técnicas alternativas para evaluar los efectos que tienen las mezclas, a fin de obtener mejores resultados en la extracción de minerales.

Para lograr este objetivo, es preciso, además, estudiar los distintos aspectos referentes a la extracción minera, como el espaciamiento, el burden, la potencia, las condiciones geológicas y las litológicas, entre otros. Además, se hace necesario el uso de modelos matemáticos que expliquen y describan los efectos de los explosivos. Por ejemplo, según la ecuación de la presión detonante, se debe considerar condiciones físicas y matemáticas como la temperatura, la densidad y la energía (García, 2019).

De la misma forma, se observa el comportamiento de los gases respecto a sus reacciones (deflagración, detonación y explosión) mediante ecuaciones como la de Rankine-Hugoniot, a fin de especificar las propiedades de combustión (Prieto et al., 2020).

Cabe resaltar que en toda extracción minera se debe observar los indicadores geológicos mineros (IGM), ya que resulta importante conocer las condiciones donde se procede con la extracción de los minerales (Afonso-Bambi et al., 2019).

Para finalizar, es pertinente señalar que para un óptimo trabajo minero: seguridad laboral, óptimos costos de operatividad, resultados favorables, etc., se debe considerar distintos factores, con el objetivo de crear un diseño de mallas, pues este último permite procesar operaciones de perforación y voladura. De esta manera, la labor de extracción minera será más eficiente que cuando se emplea métodos tradicionales.

CAPÍTULO I

EL MODELO MATEMÁTICO EN EL CÁLCULO TERMODINÁMICO

Los modelos matemáticos son empleados para analizar estadísticamente cualquier disciplina que pueda presentar una medición. El empleo de estos modelos permite describir las acciones que se ejecutan, tal es el caso del uso en las ciencias de la salud, ingeniería, educación, entre otras (Vidal et al., 2020; Vera-Dávila et al., 2018; Ferrando et al., 2017). En el caso de esta investigación, los modelos matemáticos son articulados en el área de la ingeniería de minas. Desde esta premisa, se destaca la participación de las ecuaciones para ejercer y encontrar resultados de medición que permiten calificar y optimizar los aspectos de las empresas mineras (García, 2018; Castellar-Ortega et al., 2019; Sánchez, 2016; García, 2019; Prieto et al., 2020; Abril, 2018).

Los modelos matemáticos que se utilizan de manera más destacable son las siguientes ecuaciones: ecuación de la presión detonante, ecuación de Rankine-Hugoniot y la ecuación Becker-Kistiakowsky-Wilson (BKW). Estas ecuaciones son empleadas para determinar el distanciamiento o la perforación y voladura.

Asimismo, el modelo matemático se encuentra en diversos estudios relacionados con la minería, tal es el caso del uso en vínculo con la medición de temperatura, presión, entre otras acciones (Hernández et al., 2017; Sánchez-Escalona et al., 2018; Navarro y Tito, 2010). Además, cada proceso de aplicación presenta ciertos parámetros que deben cumplirse para la equivalencia de valores y obtener resultados aceptables dentro de la optimalidad. De igual manera, se observa en el empleo del modelo matemático de Crosby y Pinco, que se utiliza para determinar el espaciamiento, el *burden* y la transformación respectiva de los explosivos ANFO a ANFO pesado.

1.1. El cálculo termodinámico mediante ecuaciones

La termodinámica es concebida como una ciencia que estudia las grandes partículas que se encuentran en la naturaleza. Estas presentan una composición de ciertas cantidades exuberante de sustancias. Asimismo, en esta ciencia, rama de la física, se detalla la temperatura, presión, entre otros fenómenos que pueden ser medibles desde determinados enfoques de ecuaciones (Mendoza, 2018).

Por otro lado, de acuerdo con Durán (2016), en la termodinámica clásica, se determina que la materia presenta como una de su característica el aspecto disipativo, debido a que se comprende que está en un constante proceso de destrucción de las estructuras, ordenaciones y formas, lo cual permite una disociación entre los conceptos de vida y materia.

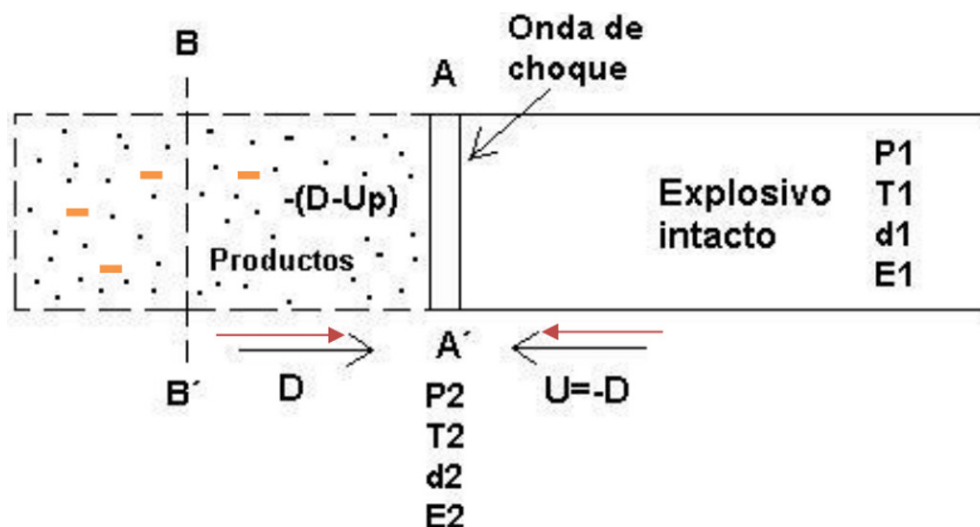
Además, mediante la aplicación de la termodinámica, se permite medir y calcular todo aquello que se relacione con la energía de la materia. Estos fenómenos medibles, tales como la temperatura, presión, etc., son analizados a través del empleo de ecuaciones matemáticas: ecuaciones de estado cúbicas tipo Peng-Robinson (García, 2018), ecuación cúbica del modelo de isoterma de Langmuir (Castellar-Ortega et al., 2019), ecuaciones de Euler-Lagrange (Sánchez, 2016), ecuación de la presión detonante (García, 2019), ecuación de Rankine-Hugoniot (Prieto et al., 2020) y ecuación BKW (Abril, 2018).

1.1.1. Ecuación de la presión de detonación o energía de tensión

Esta es considerada como una onda que se desarrolla al seguir el plano de detonación. Para ello, se formula la Figura 1:

Figura 1

Deducción de ecuaciones



Nota: Adaptado de *Aplicación de la energía producida por las mezclas explosivas en el diseño de mallas de perforación y voladura en Compañía Minera Antamina – año 2017*, de García, 2019, [Tesis de titulación, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo]. Repositorio UNASAM. <https://bit.ly/3x7y-C7L>.

De la Figura 1, se desprende que la ejecución de la presión de detonación se encuentra dividida en la influencia de los siguientes caracteres: temperatura, presión, energía y densidad. Estos pueden cambiar a valores que se relacionan con la etapa de explosión. Tal es el caso de la transformación a los valores P2, T2, δ_2 , E2. Para la figura, D-Up es la velocidad aparente de la masa; en este caso, Up corresponde a la velocidad de la masa en zonas entre AA', BB' lo cual se mantiene relativo a las coordenadas estipuladas, según detalló García (2019).

De acuerdo con los lineamientos termodinámicos, químicos y otros, la primera ecuación corresponde con la presión de detonación, la cual se mide de la siguiente manera:

$$P_2 = \delta_1 (D_2/4)$$

Para continuar, la segunda ecuación equivale a la mitad de la presión de detonación, la cual es la presión de taladro o explosión para un dispositivo acoplado completamente:

$$P_e = P_3 = P_2/2$$

Siguiendo con la perspectiva de la ecuación de la presión detonante, en el estudio de García (2019), se detalla la aplicación de dicha ecuación para indicar cómo se ejecutan los procedimientos de perforación que realiza la Compañía Minera Antamina S. A. C. Tras la investigación exhaustiva, el autor señaló que la empresa minera ejecuta acciones adecuadas al emplear también el ANFO pesado, ya que así se evita la producción de gases nitrosos.

1.1.2. Ecuación de la presión de explosión o presión de taladro

De acuerdo con Calderón et al. (2020), la explosión equivale a la expansión de una sustancia que se propaga de manera uniforme y presencia una liberación de una gran cantidad de energía. Asimismo, los autores recalcaron que, mediante el desarrollo de la explosión, se genera un aumento de la presión que ocasiona una onda encargada de desplazar la materia que rodea el lugar. En este sentido, se comprende que la velocidad de la explosión, junto con la propagación de la energía y las sustancias, es idéntica a la velocidad del sonido.

1.1.3. Ecuación de estado BKW

De acuerdo con Abril (2018), una de las ecuaciones de estado (EDE) que se conocen es la ecuación de Becker-Kistiakowsky-Wilson (BKW). Esta ecuación admite la adecuada descripción de los gases que se generan tras la producción de la detonación. Asimismo, el autor subrayó que esta señalización de los gases es considerada como un punto determinante para el cálculo termodinámico de explosivos que se rigen de acuerdo con el cálculo numérico de los parámetros de la detonación.

Además, realizó una indicación respecto con la expresión de la ecuación señalada:

$$P_V = \frac{1 + X e^{\beta X}}{RT}$$

Donde β es una constante, y X :

$$X = \frac{K}{V_g^\alpha (T + \theta)^\alpha}$$

V_g es volumen molar, α y θ son constantes, K es covolumen, el cual se define de la siguiente manera:

$$K = k \sum x_i k_i$$

En este caso, K es constante, x_i corresponde a la fracción molar y k_i es el covolumen de cada especie gaseosa.

Después de aplicar la ecuación BKW, el autor postuló que el explosivo que manifiesta mayor energía presenta una mayor fragmentación de la roca, debido a que la acción se relaciona con la energía liberada.

1.1.4. Ecuación de Rankine-Hugoniot

La ecuación propuesta por Rankine y Hugoniot presenta una explicación para determinar el salto de propiedades en el frente de una combustión u ola de choque en un medio unidireccional. Este postulado aparece a mediados del siglo XIX. La aplicación de este procedimiento se ha reemplazado por el uso de diversas optimizaciones de diversos métodos numéricos que permiten analizar los flujos a alta velocidad, según destacaron Prieto et al. (2020). Asimismo, estos autores destacaron que, a pesar de las diversas optimizaciones, no se desarrolla una estrategia computacional adecuada. Por lo consiguiente, para estos autores, los métodos numéricos permiten obtener soluciones más realistas, además de poseer la capacidad de agregar diversas físicas.

Para Moreno (2017), dicha ecuación otorga la comprensión para definir la relación que pueden existir entre las variables indicadas para las condiciones de salto de choque: presión, densidad, energía (e), velocidad de shock (U) o velocidad de partícula (U_p). Asimismo, el autor comentó que los sólidos manifiestan un vínculo lineal entre U_p y U , la cual se expresa de la siguiente manera:

$$U = C_o + S U_p$$

Asimismo, el autor, al aplicar esta ecuación, además de otras como la ecuación de estado de la forma Mie-Gruneisen, permite determinar los patrones de fragmentación por explosión. Para los cuales, consideró la relación con la totalidad de los aspectos geométricos del tanque: el largo, el volumen y su radio. Esta ejecución admitió el vínculo del patrón de fragmentación con los aspectos geométricos del tanque.

1.1.5. Ecuación de estado de Abel

De acuerdo con Sanchidrian (1986), la ecuación de Abel se describe de la siguiente manera:

$$f = \frac{1}{1 - \frac{b}{v}}$$

$$g = 0$$

Donde:

b corresponde a una constante (covolumen).

La expresión de la ecuación se sistematiza así:

$$P(v - b) = n_g RT$$

1.1.7. Hipótesis de Chapman-Jouguet

En esta hipótesis se indica que la velocidad de detonación expresa una igualdad con la velocidad del sonido en el lugar sumada con la velocidad de la partícula en el estado de detonación. En este sentido, se comprende que la velocidad de detonación es un rasgo constante correspondiente al explosivo (García, 2019).

Por lo consiguiente, el cálculo termodinámico se señala de la siguiente manera:

$$VODCJ = C + Up$$

De esta manera, el autor empleó esta hipótesis, así como la ecuación de BKW y la de Rankine-Hugoniot, para identificar la energía producida por las mezclas explosivas, ya que el estudio se centra en los cálculos termodi-

námicos con la finalidad de diseñar mallas de perforación y voladura en la Compañía Minera Antamina.

1.2. Uso de modelos matemáticos en la minería

Los modelos matemáticos corresponden a fórmulas que se ejecutan en contextos de cálculos. En este caso, los procesos de producción numérica se ejecutan desde la óptica de la minería y para su beneficio. De acuerdo con Hernández et al. (2017), los modelos matemáticos admiten el acceso para detallar el pronóstico de los parámetros relacionados con la minería; por ejemplo, temperatura de la hidromezcla presentada en grados mayores a 82 °C, la pulpa latérica por concentraciones de sólidos desde 35 % hasta 48 % y la cantidad de minerales entre tres a 16. Para estos autores, el modelo de Merschel-Bulkley permite analizar y obtener resultados con relación a los plásticos reales, además de la trascendencia del modelo UPD para diagnosticar destacados parámetros reológicos.

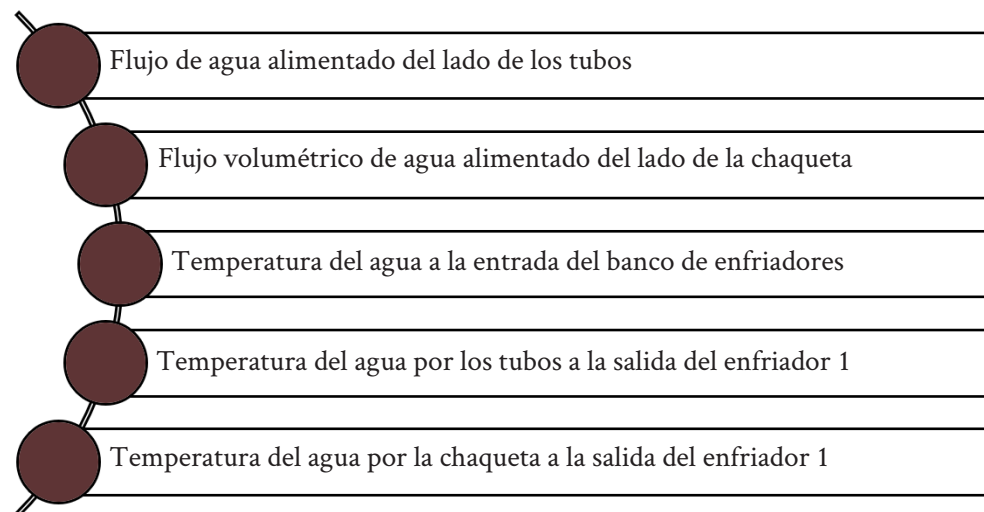
Por su lado, Medinaceli (2018) sostuvo, en su investigación, que la elaboración de modelos matemáticos permite obtener información acerca de los aspectos de la minería, teniendo en relación los yacimientos en que trabajan las empresas. El autor, para encontrar determinados resultados, emplea un modelo matemático que le permite determinar la distancia adecuada que debe existir entre las galerías de muestreo, además del distanciamiento entre las canaletas de muestreo. El fin de la aplicación de los modelos matemáticos corresponde a la elaboración de una mejor estimación de una veta; para ello, el autor toma en consideración lo siguiente: datos de las dimensiones de la veta, el presupuesto para el muestreo, los costos de muestro y una estimación del variograma del mineral de interés en la veta.

En el estudio de Sánchez-Escalona et al. (2018) se determinó que el uso de modelos matemáticos se rige bajo ciertos parámetros, formulados en la Figura 2, con el objetivo de determinar las mediciones del proceso de intercambio térmico.

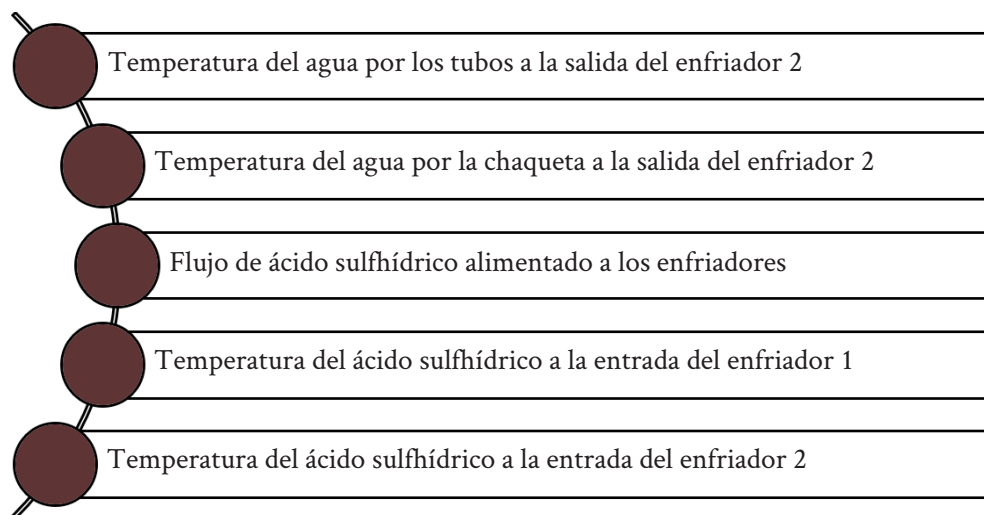
Figura 2

Parámetros para determinar las mediciones del intercambio térmico

Parte 1



Parte 2



Nota: Adaptado de *Predicción de la resistencia térmica de las incrustaciones en los enfriadores de ácido sulfhídrico* (pp. 348-362), por A. Sánchez-Escalona, E. Góngora-Leyva y C. Zalazar-Oliva, *Minería y Geología*, 34(3), 2018. <https://bit.ly/2V4Emkt>

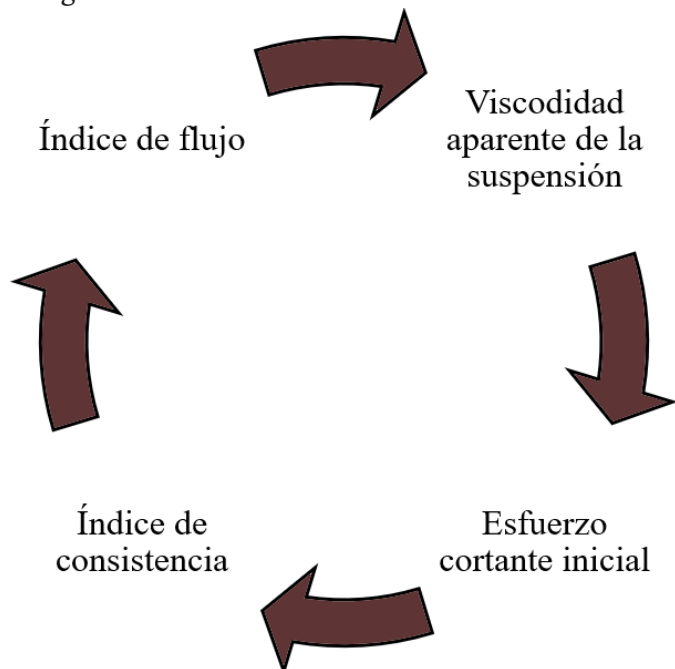
Asimismo, se evidencia el empleo de dos modelos matemáticos que otorgan cierta información vinculada con la presencia de relaciones: en primer lugar, se utilizan las ecuaciones de regresión lineal múltiple, las cuales presentaron como resultado que el 98.07 % y 97.23 % del intercambio de calor tubos-coraza e interacción coraza-chaqueta, respectivamente; finalmente, se emplea la red neuronal artificial, la cual manifiesta correlaciones de 99.03 % y 99.63 % de la transferencia coraza-chaqueta e intercambio de calor tubos-coraza, respectivamente (Sánchez-Escalona et al., 2018).

De acuerdo con Ríos (2021), los modelos matemáticos benefician en la investigación para señalar el impacto social que las empresas mineras ejercen, así como también determinar los conflictos socioambientales que puedan surgir tras las acciones de dichas empresas. En el estudio de Ríos (2021), se detalla el uso del método *Integration of the grey clustering and entropyweight* (IGCEW), la cual surge de la combinación del método Grey Clustering y la entropía de Shannon. Asimismo, el autor resaltó que, tras la aplicación de dicho modelo matemático, se obtienen resultados que favorecen y son empleados en la producción de planificaciones y políticas por parte de la nación, para que de esta manera las empresas mineras promuevan un adecuado ejercicio de sus funciones en la sociedad.

Por su parte, Hernández et al. (2018), en su investigación, aprovecharon los modelos matemáticos para determinar la incidencia de los parámetros reológicos y los lineamientos que corresponde a la energía sobre las condiciones de operación de una empresa que extrae níquel mediante la lixiviación ácida a presión. El resultado de la aplicación de los modelos matemáticos empleados por Hernández et al. (2018) demostró que, de acuerdo con determinados parámetros, la resolución de ecuaciones puede describir el comportamiento de las curvas características carga-descarga de las bombas y de las redes. Para ello, los autores formularon los parámetros, los cuales se observan en la Figura 3.

Figura 3

Parámetros reológicos analizados en ecuaciones

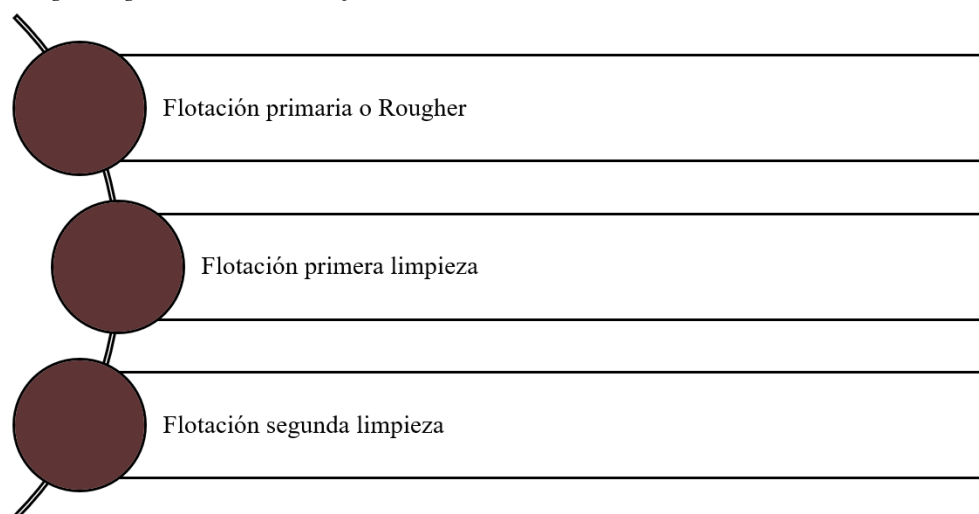


Nota: Adaptado de *Modelos matemáticos de parámetros reológicos y su influencia en el sistema de bombeo de fluidos no newtonianos*. (pp. 52-60), por G. Hernández, A. Legrá, L. Rojas, B. Ramírez y A. Mariño, *Revista Colombiana de Química*, 47(3), 2018. <http://dx.doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v47n3.70248>

Otro caso de aplicación de modelos matemáticos se encuentra en el estudio realizado por Navarro y Tito (2010), estos autores ejercieron una investigación en la que se establece una simulación del proceso de flotación de minerales con base en un sistema de ecuaciones algebraicas. Mediante el empleo de técnicas computacionales como hojas electrónicas (Qpro, Excel, entre otros), este conglomerado de ecuaciones permite realizar la creación de un programa que genera resultados confiables. Asimismo, los autores acentuaron que el estudio se realizó tras la aplicación de tres etapas, las cuales se detallan en la Figura 4.

Figura 4

Etapas representadas en la flotación de minerales



Nota: Adaptado de *Modelo matemático en la simulación de procesos de flotación*. (pp. 46-50), por C. Navarro y F. Tito, 2010, Revista Metalúrgica, 29. Recuperado de <https://bit.ly/3AiGgxU>

Por otro lado, Retirado-Mediaceja et al. (2017) indicaron que el modelo matemático también se utiliza mediante la adecuación de aplicaciones que permiten la descripción de algunas problemáticas. En el caso del estudio de Retirado-Mediaceja et al. (2017), se enfatizó sobre el uso de una aplicación para calcular la distribución de la humedad que experimenta el material. El aplicativo informático se conoce como SecSolar, el cual se encuentra basado en modelos matemáticos relacionados con el secado natural de la mena laterítica. Después del empleo de dicho aplicativo, se estimó que es útil para simular y optimizar la energía del secado natural de la mena laterítica. Asimismo, se consideró que este aplicativo puede ser perfeccionado a través de la introducción de algoritmos relacionados con la orientación arbitraria de las pilas y la asimetría geométrica, así como también el cálculo de diversas tecnologías utilizadas en el secado solar y la programación cíclica del proceso (Retirado-Mediaceja et al., 2017).

Siguiendo con el lineamiento de las aplicaciones informáticas que se emplean para ejecutar los modelos matemáticos determinados, Hernández et al. (2016) señalaron que, tras aplicar el modelo de Garcell-Pérez (MGP), se obtienen resultados favorables en relación con la modelación de la polispersión de pulpa laterítica cruda y de cieno carbonato. Asimismo, los autores destacaron que el MGP también describe la distribución granulométrica de las suspensiones. Ante el uso de este módulo, los autores plantearon la expresión que presenta la ecuación:

$$Y_N = \left(\frac{D_N}{(1 - B_N) + B_N} \right)^S$$

Donde:

s : coeficiente de polidispersión

B_N : coeficiente de ajuste

1.3 El modelo matemático de Crosby y Pinco

En el artículo *More power to the pop*, los científicos Crosby y Pinco promueven este modelo. En este, se tiene como base la potencia relativa por volumen (RBS), las dimensiones del taco y la sobreperforación, según manifestó Gómez (2016). Luego, la RBS es la energía que se encuentra disponible de acuerdo con el volumen de explosivo comparado, de la misma manera que el volumen de ANFO. La RBS presenta una densidad de 0.85 glcc, lo cual se obtiene tras la división de la ABS de un explosivo con la ABS del ANFO, luego el resultado se multiplica por 100 (Alcázar, 2017).

Asimismo, Gómez (2016) afirmó que, después de aplicar el modelo matemático de Crosby y Pinco, se pueden concretar los resultados referentes a las nuevas medidas del espaciamiento y del *burden*, lo cual permite la configuración y transformación del explosivo ANFO a ANFO pesado. También el autor subrayó que la composición de la ecuación del MCP permite calcular las dimensiones indicadas.

Esta ecuación se presenta de la siguiente manera:

$$\left[\frac{RBSa}{RBSu} \right]^{1/3} \times Du - Da$$

Donde:

RBSa : explosivo a usar

RBSu : explosivo en uso

Da : dimensión a usar

Du : dimensión en uso.

CAPÍTULO II

ASPECTOS RELEVANTES PARA LAS OPERACIONES DE PERFORACIÓN Y VOLADURA

En el ámbito de la minería, las labores de perforación y voladura deben ejecutarse de manera segura para evitar todo tipo de peligro que se presenta en la extracción de minerales. Para esto, los ingenieros trabajan en el mejor método posible para que los mineros puedan desarrollar sus actividades de forma segura. El diseño de mallas de perforación y voladura, por ejemplo, es un método riguroso y óptimo para la extracción segura de minerales en aquellos lugares donde las condiciones geológicas y litológicas puedan resultar adversas o complicadas para los métodos convencionales en los trabajos de minería.

Al respecto, Aranda y Vásquez (2020) señalan que, si bien las operaciones de perforación y voladura no poseen una periodicidad de observación con otros accidentes, en el Perú se ha registrado la disminución del porcentaje de accidentes en la minería. Esto se debe a que la gestión de seguridad para la extracción de minerales ha podido establecer indicaciones que permitan asegurar el bienestar de los trabajadores.

Según Mamani (2020), además de la seguridad, las operaciones de perforación y voladura se ejecutan en la medida que la rentabilidad y los costos de operación sean los más óptimos a fin de cumplir con el programa presupuestario. Así, mediante los nuevos diseños de malla se obtuvo que los costos de perforación y voladura disminuyeran 16,66 US\$/m y 25,66 US\$/m, respectivamente, lo que permite que aquellos proyectos con mayor estudio previo y con mejores resultados de costos sean aplicados para potenciar la minería.

2.1. Condiciones geológicas y geomecánicas

Las condiciones geológicas hacen referencia a los valores minerales en el yacimiento minero como también el grado de fractura de las rocas que componen la mina donde, además, se observa el tipo de yacimiento.

Por ejemplo, en Naranjo-Sierra et al. (2016), se describe las condiciones geológicas de la mina La Ye, cuyas características son las siguientes:

- Veta en zona de cizalla (vetiforme de cizalla)
- Deformación frágil-dúctil
- Milonitización de la roca de caja
- Minerales de alteración hidrotermal
- Presencia de cuarzos, calcita, sericita, clorita, pirita, sulfuros de metales base, oro y telururos de Au-Ag y Pb
- Halo de alteración hidrotermal de espesor 1 m
- Cuatro niveles de exploración
- Extensión de 2.2 km

- Buzamiento de 300 m
- Espesor de 1.15 m

En el mismo sentido, en la Tabla 1 se exponen los indicadores geológicos mineros (IGM) que sirven para especificar las condiciones geológicas de un yacimiento minero:

Tabla 1

Indicadores geológicos mineros (IGM)

Indicador	Sigla	Descripción
Tectónica del yacimiento	TY	Elementos tectónicos
Hidrogeología del yacimiento	HY	Acuíferos
Características geotécnicas del macizo	CGM	Propiedades físico-mecánicas de minerales y rocas
Condiciones para la estimación de los recursos	CER	Recursos minerales
Capacidad anual de producción y vida útil del yacimiento	CVU	Vida útil y aprovechable de la mina
Cantidad de empleados en la mina	CEM	Personal de trabajo
Rendimiento del personal en la mina	RPM	Productividad
Construcción de escombrera	CE	Parámetros para hacer una escombrera
Plan calendario de la minería	PCM	Actividades fijadas por fechas
Cálculos del equipamiento minero y de transporte	EMT	Criterios para la adquisición de los equipos
Elementos del sistema de explotación	ESE	Cumplimiento de la explotación

Nota: Adaptado de *Indicadores de sostenibilidad para la industria minera extractiva en Uige, Angola* (pp.233-251), por Afonso-Bambi, A., Montero-Peña, J. y Watson-Quesada, R., 2019, *Minería y Geología*, 35(2), <https://bit.ly/2TpDmXv>

2.2. Parámetros para el diseño de las mallas de perforación y voladura

Para el diseño de mallas de perforación y voladura, se tiene en cuenta ciertos parámetros que permitan medir la eficacia y la aplicación del modelo creado a partir de las dificultades en el terreno de extracción. Por ejemplo, según Ortega-Ramos et al. (2016), en las labores de extracción minera se debe contar con las condiciones del macizo rocoso, pues su caracterización permite que los diseños para la perforación y la voladura sean adecuados al momento de la aplicación. De esta forma, los ingenieros son capaces de optar por una decisión para la configuración y diseño de las mallas que se emplearán a cada tipo de roca.

Además del tipo de roca, Reátegui (2016) señala otros parámetros o variables de diseño como:

- Factor de roca
- Diámetro de taladro
- Taco
- Densidad de roca
- *Burden*
- Espaciamiento
- Pasadura

Estos parámetros permiten que la configuración de la malla de perforación y voladura sea medible y puesta a correcciones en caso de que algún elemento no llegue a cumplirse. Como se resaltó antes, todo diseño de malla debe asegurar la mayor eficacia a fin de disminuir costos y de otorgar seguridad en su aplicación. Algunos de esos parámetros, como el *burden*, el

espaciamiento y el tipo de roca son observados de manera práctica para describir la función de los diseños de mallas.

2.2.1. *Burden*

En minería, el *burden* se define como:

La distancia medida perpendicularmente desde el centro del taldro cargado con mezcla explosiva a la cara libre (Peña, 2019, p. 58).

Además, el *burden* se relaciona con el grado de fragmentación. Según Munday (2019), la calidad de fragmentación de rocas es uno de los parámetros más importantes que indican el rendimiento en la minería.

Para la predicción de la fragmentación, se emplea la ecuación Kuz-Ram, la cual fue desarrollada por Claude Cunningham a partir del modelo de Kuznetsov y en la función de distribución granulométrica. Así, el tamaño medio de la roca (X_{50}) se mide por medio de la siguiente ecuación:

$$X_{50} = A \left(\frac{V^0}{Q} \right)^{0.8} Q^{\frac{1}{6}} \left(\frac{1.15}{E_r} \right)^{\frac{19}{30}}$$

Donde:

X_{50} : Tamaño medio de la roca fragmentada (cm)

A : Factor de roca

V^0 : Volumen de roca removida por una perforación (m^3)

Q_t : Kilogramos de explosivos de TNT en el pozo

Q : Kilogramos de explosivos

E_r : Potencia relativa al Anfo en peso

Por otro lado, según Peña (2019), el *burden* puede ser objeto de aplicación mediante el modelo matemático de López Jimeno, el cual se basa en la siguiente ecuación:

$$B = 0,76 \times D \times F$$

Donde:

B : *burden* en metros

D : diámetro del taladro en pulgadas

F : factor de corrección en función al tipo de roca y explosivo

Por último, el *burden* resulta dificultoso de medir con precisión, pues la fragmentación de las rocas precisa de otras variables como las condiciones geológicas, la medición de las mezclas explosivas, el explosivo en el taladro, entre otros. Esto lo define como la variable más relevante y crítica al momento de diseñar mallas de perforación y voladura.

2.2.2. Espaciamiento

En el caso del espaciamiento, este es considerado como parte de las dimensiones principales para diseñar la malla de perforación y voladura. De esta manera, se evita la inserción y perjuicio de las rocas macizas con el entorno del lugar. Asimismo, se recalca que esta dimensión es analizada desde la óptica de la geometría. En este sentido, se comprende que el espaciamiento es la distancia percibida, en una fila, entre los taladros y las cargas. Por un lado, esta medida se descubre de manera perpendicular hacia el *burden* y, por otro lado, a través del paralelo a la cara libre del movimiento premeditado de la roca.

De acuerdo con EXSA (2020), conocer los grados de destrucción, así como el alcance máximo de la presión de detonación permite reconocer el espaciamiento entre los taladros de la misma fila. El descubrimiento del espa-

ciamiento es de importancia para evitar resultados desfavorables para la minera:

- Craterización en la boca y, en consecuencia, produce fragmentos sobredimensionados.
- Soplo de gases sin generar rotura entre las rocas.

Así, según EXSA (2020), lo óptimo es alcanzar la fragmentación por interacción entre los taladros de una voladura. Ante esto, también se expresa la relevancia del conocimiento de las condiciones geológicas que inciden en los resultados.

Según Martínez-Vargas (2017), el problema sobre el espaciamiento óptimo ha sido investigado por distintos autores; actualmente se emplean dos enfoques: el DHSA o análisis del espaciado de los taladros y la optimización por simulaciones condicionales. El primero se basa en porcentajes de errores aplicados a superficies amplias, mientras que el segundo ofrece una aproximación sobre el impacto económico de perforaciones adicionales.

2.2.3 Tipo de roca

En la clasificación geomecánica o GSI, las rocas poseen dos tipos de calidad. La primera consiste en medir su fracturación (*Rock Quality Designation* o RQD) y la segunda consiste en medir su resistencia de comprensión (RCU), especificados en la Tabla 2. Asimismo, dicho criterio de clasificación se utiliza para seleccionar la malla de perforación y voladura con cual se desea aplicar a la extracción de minerales (Ortega-Ramos et al., 2016).

Según la Tabla 2, el tipo de roca es medida a través de sus fragmentos resueltos luego de golpes con martillo. Así, por ejemplo, en el caso de RCU, una roca es buena cuando demuestra mayor resistencia a fragmentarse, mientras que, en el caso de RQD, la técnica de fragmentación de una roca resulta eficiente al conseguir mayor cantidad de fragmentos por metros.

Tabla 2

Aproximaciones de los valores del RQD y RCU

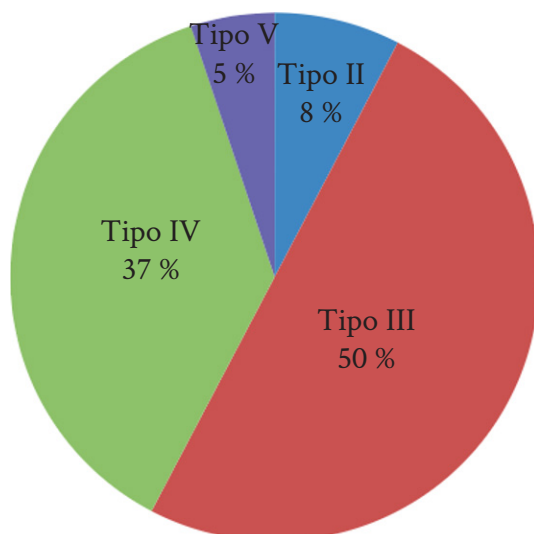
Medida	RCU	Medida	RQD
Se rompe con 3 o más golpes de martillo	Roca buena (RCU de 100 a 250 MPa)	Roca levemente fracturada (2-6 fracturas por metro)	100-75
Se rompe con 1 o 2 golpes de martillo	Roca regular (RCU de 50 a 100 MPa)	Roca moderadamente fracturada (6-12 fracturas por metro)	75-50
El martillo se inserta superficialmente	Roca pobre (RCU de 50 a 100 MPa)	Roca muy fracturada (12-20 fracturas por metro)	50-25
El martillo se inserta superficialmente más de 5mm o se disgrega	Roca muy pobre (RCU de 5 a 25 MPa)	Roca intensamente fracturada (12-20 fracturas por metro)	25-0

Nota: Adaptado de *Modificación de las mallas de perforación de voladuras a partir del índice de esfuerzo geológico (GSI), caso mina “La Maruja”, Colombia* (pp. 32-38), por C. Ortega-Ramos, A. Jaramillo-Gil y J. Molina-Escobar, 2016, Boletín de Ciencias de la Tierra, 40, <https://bit.ly/3A6moOI>

Según Giraldo (2016), conocer los tipos de rocas presente en las minas ayuda a conocer los peligros en caso de un inminente derrumbe de la cueva, tal como muestra la Figura 5.

Figura 5

Accidentes mortales según tipo de roca



Nota: Adaptado de *Identificación de factores para reducir accidentes por desprendimiento de rocas en minería subterránea*, por E. Giraldo, 2016, Revista del Instituto de investigación de la Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas, 19(37), 2016. <https://bit.ly/3dnYvIv>

Según la Figura 5, en los accidentes mortales, se hallaron rocas de tipo III y IV, cuya suma porcentual resulta en 87 %. Esta distinción en tipos de rocas permite que las autoridades encargadas y los ingenieros estudien los métodos efectivos para evitar el desprendimiento que causa accidentes mortales, además de advertir el tipo de equipamiento de extracción a utilizar.

Por último, en Feijoo et al. (2021), se destaca la importancia en determinar la resistencia a compresión simple (RCS) del material rocoso, pues su uso es fundamental para las clasificaciones geomecánicas (índice Q o RMR), en donde se establecen parámetros geométricos para asegurar la estabilidad en canteras y la fortificación en minas subterráneas, lo que garantiza la protección de equipos y la salud de trabajadores.

2.3. Operaciones de perforación

En el diseño de mallas para las operaciones de perforación, se contempla la finalidad de que dicha malla debe reducir los gastos de operatividad para que los métodos tradicionales de extracción de minerales sean desplazados por los nuevos, los cuales devienen de análisis y estudios realizados por ingenieros en zonas mineras.

Por ejemplo, en la investigación de Ayamamani (2016), se costeo los gastos realizados por una corporación minera.

Tabla 3

Resumen total de costos por frente perforado según ítem

Costo de arrancar la roca en US\$/TM				
Condiciones	Explosivos y accesorios	Perforación e insumos	Mano de obra	Unidad
Antes de la investigación	7.65	5.52	1.18	US\$/TM
Después de la investigación	5.29	4.41	1.06	
Diferencia	2.36	1.11	0.12	

Nota: Adaptado de *Diseño de perforación y voladura y su incidencia en los costos unitarios en Balcón III de la corporación minera Ananea S. A., por C. Ayamamani, 2016*, [Tesis de titulación, Universidad Nacional del Antiplano].
<https://bit.ly/2UE4FO4>

Según la Tabla 3, se puede observar que luego de una investigación en el diseño de una malla de perforación, los costos se redujeron de 5.52 a 4.41 US\$/TM en las labores de perforación e insumos, lo que indica una diferencia de 1.11 US\$/TM. No obstante, la diferencia más significativa resulta ser los explosivos y accesorios, pues se observa 2.36 US\$/TM de diferencia luego de la investigación.

Asimismo, según Yana (2019), se puede optimizar las operaciones de perforación para reducir su tiempo a través de rediseño de las mallas de perforación.

Tabla 4

Optimización de taladros

Descripción	Antes	Después	Diferencia (un.)	Diferencia (US\$/m)
Taladros perforados	31	28	3	13.59
Taladros cargados	28	25		

Nota: Adaptado de *Optimización de operaciones unitarias en perforación y voladura en el frente de crucero 890 NV 1665 de la Unidad Minera Esperanza – Arequipa*, por D. Yana, 2019, [Tesis de titulación, Universidad Nacional del Antiplano]. <https://bit.ly/3qyiU2R>

Según la Tabla 4, los resultados permitieron constatar que la reducción de taladros de perforación fue de 31 a 28 y los taladros cargados se redujeron de 28 a 25, lo que implica una reducción en los costos en 13.59 US\$/m.

2.4. Operaciones de voladura

Según Reátegui (2016):

La malla de voladura es un arreglo geométrico de taladros u hoyos cuyo objetivo es distribuir la energía proporcionada por los explosivos de manera óptima para lograr la mayor fragmentación con el menor gasto energético posible (p. 64).

Esto quiere decir que las operaciones de voladuras se realizan con la finalidad de fragmentar rocas a partir de explosivos integrados a un taladro. Asimismo, la creación y el desarrollo de mallas de voladura hace posible la reducción de costos en las operaciones de extracción minera. Por ejemplo, en

Chambi (2019), se diseñó una malla de voladura que permitió la reducción de los gastos de operatividad en la mina de Tambomayo, puesto que los costos se optimizaron de 109.52 a 95.53 \$/m, es decir, una reducción favorable de 13.99 \$/m para dicha mina.

En la misma línea, la siguiente investigación estimó una reducción en los materiales, la cual se muestra en la Tabla 5:

Tabla 5

Optimización de materiales en operación de voladura

	Explosivo (Kg)	Frente (m)	Factor de carga (kg/m ³)
Antes de la investigación	25.06	2.4 m × 2.7 m	2.07
Después de la investigación	23.40	2.4 m × 2.7 m	1.93 ~ 1.74

Nota: Adaptado de *La optimización de las operaciones unitarias de perforación y voladura, mejora el rendimiento económico en la unidad minera San Andrés - MARSA 2014*, por C. Carrasco, 2016, [Tesis de titulación, Universidad Nacional Micaela Bastidas Apurímac]. <https://bit.ly/3dunF8d>

En la Tabla 5, se puede observar que los materiales usados para un mismo frente o área de minado se han reducido en cuanto a la cantidad de explosivo y su factor de carga, donde la diferencia es de 1.66 kg y 0.14 kg/m³, respectivamente. En cuanto a la variación del factor de carga después de la investigación, se debe a que en el último mes se optimizó aún más el factor de carga a 1.74 kg/m³.

CAPÍTULO III

ENERGÍA EXPLOSIVA Y SU POTENCIA EN LAS MEZCLAS QUÍMICAS PARA VOLADURAS Y FRACCIONAMIENTO

Para la explotación minera, se realizan operaciones de perforación y voladuras, las cuales, además de emplear taladros, utilizan explosivos y mezclas de estos a fin de acelerar la extracción de minerales. Asimismo, se emplea explosivos porque en los yacimientos se hallan materiales rocosos de dura consistencia, por lo que herramientas clásicas no son útiles. Por tal razón, se estudia el área de extracción para definir sus características geológicas a fin de implementar los materiales suficientes y eficaces.

Según Hagan (1979), las cargas explosivas deben proporcionar una tensión de compresión máxima en la pared del barreno que no provoque aplastamiento en cuanto al simétrico patrón de grietas radiales, pues es posible que se desperdicie energía explosiva durante la pulverización. Asimismo, los gases de la explosión se filtran por las grietas, lo que implica un control de medición para las siguientes explosiones. Según Hagan (1977, citado en Enriquez, 2019), la energía total generada durante la voladura es de 15 % y se aprovecha durante la fracturación y el desplazamiento de las rocas,

mientras que en Hagan (1977, citado en Bravo, 2018) se consume 30 % de energía transportadora de ondas de choque por los mecanismos de rotura.

Según García (2019), en cuanto a los explosivos, las mineras actuales las emplean como un elemento cotidiano para la explotación. No obstante, constantemente se realizan optimizaciones en las mezclas explosivas a fin de obtener la más adecuada, la más eficiente y menos costosa para las operaciones de perforación y voladura. La sustitución de un explosivo por otro se realiza en base al cálculo de su energía y su potencia, la cual es medida según el grado de fragmentación de las rocas.

Tabla 6

Comparación de resultados promedio en la fragmentación por mes

Mes	Parámetros	Fortis Extra	Vistis 250
Enero	P80 (pulg.)	6.61	3.11
	% de finos (< 1 pulg.)	24.48	41.79
Febrero	P80 (pulg.)	5.63	3.55
	% de finos (< 1 pulg.)	25.52	45.89
Marzo	P80 (pulg.)	4.89	3.35
	% de finos (< 1 pulg.)	28.75	45.56

Nota: Adaptado de *Optimización de la fragmentación en zonas de minera con la aplicación de explosivos de alta energía, para reducción de costos, en el proceso de chancado y molienda en el tajo Ferrobamba, las Bambas 2017*, por M. Huamani y F. Huamani, 2019, [Tesis de titulación, Universidad Nacional Micaela Bastidas Apurímac], <https://bit.ly/3qA6XJY>

En la Tabla 6, se observa la comparación de la energía explosiva entre dos mezclas empleadas para la explotación minera. Los resultados son medidos con base en la fragmentación de las rocas, cuya unidad de medida es la pulgada. La mezcla explosiva Vistis 250 fue el más eficiente, pues produjo el mayor porcentaje de fragmentación fina respecto a la Fortis Extra.

Según Enriquez (2019), la energía explosiva es una característica importante de las mezclas para voladuras y fraccionamiento, pues se almacena

como energía química liberada durante la detonación. Asimismo, la energía explosiva se encuentra regulada y medida por las leyes de conservación de energía, tiempo y masa, además que se calcula por las leyes de la termodinámica con principios matemáticos y químicos. Por su parte, Bernaola et al. (2013) señalan que la energía explosiva se libera como presión de detonación (choque de rocas) y de barrenos (aumento de gas). Según Huacho (2018), medir la energía explosiva es importante porque su cantidad influye y mejora significativamente en los avances de exploración minera.

En resumen, la mezcla se realiza con la finalidad de obtener mejores resultados en cuanto a energía explosiva. No obstante, para dicha mezcla, se debe conocer las propiedades químicas de los materiales explosivos y medir las cantidades óptimas a fin de asegurar su eficacia como su costo.

3.1. Características fisicoquímicas de los explosivos

Según Giraldo-Villada y León-Castillo (2020):

En actividades de voladuras, el uso de explosivos es fundamental, dado que a través de la detonación, debido a sus propiedades físico-químicas, se generan de manera instantánea gases a alta presión y temperatura, lo que permite la fragmentación de la roca de forma rápida y dirigida. (p. 183)

Esto quiere decir que los explosivos son parte de toda actividad de explotación minera. No obstante, las compañías mineras y los ingenieros encargados deben asegurarse de utilizar la mezcla correcta para no provocar accidentes mortales ni contaminación. Gracias a los estudios en ingeniería y química, se conocen distintas mezclas químicas para explosivos como el ANFO, la pólvora negra, los hidrogeles, el ALANFO, los gelatinosos, el ANFO pesado, entre otros.

Por ejemplo, en Foladori y Robles (2019), se observa la trayectoria histórica de la extracción minera en México, donde se ha empleado distintos ex-

plosivos como la pólvora negra (compuesta por elementos químicos como el azufre, el nitrato de potasio y el carbón) y el ANFO (compuesta de diésel y nitrato de amonio).

Es así que resulta importante conocer las propiedades físico-químicas de los explosivos para determinada labor de extracción minera. Según Giraldo-Villada y León-Castillo (2020), las características más elementales son las siguientes:

- Potencia explosiva
- Poder rompedor
- Velocidad de detonación
- Resistencia al agua
- Calidad de humos
- Estabilidad química
- Calor de explosión, entre otros.

Al respecto, Aguirre (2016) señala que la estabilidad es una característica importante en la fabricación de explosivos, pues su descomposición provoca que las mezclas sean desperdiciadas y sus efectos sean deficientes para las operaciones de voladura. De la misma forma, la resistencia al agua, según el ambiente en donde se aplique, es considerada para dichas operaciones, pues existen explosivos que disminuyen en eficacia cuando se exponen a la humedad, como el ANFO; en cambio, los hidrogeles, las emulsiones y las gomas son útiles en ambientes húmedos

Por ejemplo, Giraldo (2020) señala que en las operaciones de voladura se emplea la mezcla química ANFO, pues es la menos costosa y una de las más

potentes; no obstante, su potencia puede ser regulada mediante su mezcla con el aluminio.

Tabla 6

Comparación de resultados promedio en la fragmentación por mes

Medidas	Aluminio adicionado (%)			
	0	2	4	6
% de nitrato de amonio (AN)	94,57	93,32	91,75	90,34
% de petróleo (FO)	5,43	4,68	4,25	3,66
Densidad (g/cc)	0,995	1,025	1,040	1,090
Velocidad de detonación (VOD) (m/s)	4737,36	4902,51	5073,23	5379,70
Calor de detonación (kCal/kg)	907,21	984,01	1062,68	1140,41
Volumen de explosión (l/kg)	973,29	940,21	910,66	879,35
Potencia relativa por peso (RWS) (%)	100	106	113	120

Nota: Adaptado de *Formulación óptima de anfo aluminizado para voladuras en minería subterránea* (pp. 95-102), por E. Giraldo, 2020, Revista del Instituto de investigación de la Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas, 23(46). <https://doi.org/10.15381/iigeo.v23i46.19185>

De la Tabla 7, se observa que, según el porcentaje de aluminio agregado al compuesto ANFO, los resultados varían. Por ejemplo, la potencia relativa por peso aumenta de 100 a 120 % cuando hay una adición del 6 % de aluminio, por tanto, el ANFO aluminizado al 6 % es la más efectivo para la fragmentación máxima de rocas en las minas, pues se emplea poco porcentaje mezcla AN y FO para el mayor porcentaje de RWS.

3.2. Conceptos fundamentales de mezclas explosivas

Según De Prada (2020), los conceptos como combustión, deflagración, detonación y explosión se emplean como sinónimos para describir la cinética en la reacción de los gases.

No obstante, existe diferencia entre estos términos, por lo que, de forma somera, este autor señala lo siguiente:

- La combustión es un proceso exotérmico cuya reacción de oxigenación se presenta, generalmente, con una llama rápida.
- Durante la deflagración, se forman productos gaseosos intermedios en los cuales se libera energía para descomponer y volatilizar moléculas de combustible.
- En cuanto a los detonantes, se caracteriza por la relación entre las velocidades de onda expansiva y descomposición.

3.2.1. Combustión

Considerando la postura de autores como García (2019), se recalca que la definición de combustión se relaciona con las reacciones exotérmicas de un material en la superficie y que se mantiene por el calor de los gases producidos por la reacción.

Asimismo, Rabbia y Contreras (2018) señalan que la combustión tiene tipo de reacciones, tal como la deflagración que es una reacción caracterizada por su nula explosión y llama de baja propagación, además que indica una etapa previa a la detonación.

Según Cardona (2017), la combustión y sus propiedades varían según condiciones específicas respecto a sus equipos como los motores de combustión, las calderas, las turbinas, entre otros. Asimismo, según este autor, la combustión es una reacción química de oxidación donde se libera energía en forma de luz y calor, donde la liberación puede ser ligera o turbulenta.

Durante la combustión, se mide las siguientes propiedades:

- Volumen estequiométrico del aire, humos, dióxido de carbono y de agua
- Peso molecular
- Densidad relativa
- Calor específico
- Viscosidad
- Poder calorífico (inferior y superior)
- Temperatura de rocío
- Inflamabilidad
- Temperatura y velocidad de llama adiabática

Según Jaramillo (2017), la combustión posee variaciones cíclicas durante su proceso que son importantes de analizar. Los ciclos más rápidos poseen mayor efectividad durante el tiempo de chispa, mientras que ciclos más lentos poseen retrasos durante ese tiempo, de tal forma que se pierde eficiencia y potencia para una posterior detonación. Así, los ciclos establecen los límites de operaciones en el motor y la cantidad de gases.

3.2.2. Detonación

En el estudio de Ortega-Ramos et al. (2016), la presión de detonación es un factor más que sirve para medir la eficiencia de las voladuras.

Aquella se calcula de la siguiente forma:

$$PD = \frac{VD^2 \times p_e}{4}$$

Donde:

PD : presión de detonación

VD : velocidad de detonación

p_e : densidad del gas

Mediante la anterior ecuación, se puede calcular las características de explosivos como el ANFO para las operaciones de voladuras. Además, cabe decir que las secuencias de detonación de los barrenos también son un parámetro para la eficiencia de las voladuras, pues permiten observar la granulometría y a los costos de operatividad.

En la misma línea, en Castillo et al. (2017), se observa el cálculo de la desviación del explosivo:

$$\varphi = \left(-1 - \frac{V_G}{2E_k} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Donde:

φ : desviación del explosivo

V_G : velocidad de detonación de la partícula detrás del frente de detonación de los gases

E_k : energía cinética del explosivo

En Fonseca et al. (2021), se puede observar que la detonación y las actividades relacionadas a esta presentan características técnicas que son evaluadas para elegir al mejor explosivo:

- La presión de detonación, la cual se diagnostica mediante la prueba de Hess para medir la energía liberada
- La velocidad de detonación (VoD), con la cual se mide la expansión de la onda
- Sensibilidad del detonador o prueba del péndulo, que mide la elongación

Estas características técnicas descritas ayudan a la fabricación de explosivos adecuados para la extracción de minerales con base en el grado de detonación, el cual no logre afectar a los trabajadores de la mina. Es decir, mediante dichas características, es posible la creación de explosivos con uso profesional y responsable. Así, en García et al. (2021), se estudia el ANFO como material explosivo para la predicción de daños durante su uso en las detonaciones. De esta forma se pudo calcular la energía de choque o presión de detonación ANFO, el cual midió 700 hp. Esta cantidad afecta a todo objeto dentro de un rango menor de 75 m, lo cual puede producir percances en las extracciones.

3.2.3. Explosión

La explosión es la liberación de energía calorífica durante la deflagración de los gases.

En la reacción de la explosión, las exploraciones mineras incluyen, dentro de sus procesos de extracción, la gestión de los riesgos operacionales, pues, si bien durante la explosión se mide la calidad del explosivo en cuanto a magnitud y resultados de fragmentación de las rocas, también es posible que ocurran accidentes mortales. Según el estudio de Guerrero (2016), las causas de las explosiones en las minas se relacionan a la acumulación

de gases dentro de una mina sin una adecuada ventilación, además de la falta de afinidad de los instrumentos de detección de los gases y del mal estado de los equipos que usualmente ocasionan chispas detonantes. Respecto a los sistemas de ventilación, en dichos accidentes es común la falta de oxígeno y la presencia de gases tóxicos (CO_2 , CO , H_2S , SO_2 , nitrato en vapor, entre otros); asimismo, las detonaciones accidentales producen el desprendimiento de rocas dentro de las minas, lo que potencia el aumento de accidentes.

En Puche et al. (2016), se constata que muchos accidentes en las minas de carbón europeas eran producidos por la presencia del grisú, el cual es un tipo de gas metano en conjunto con otros gases en menor cantidad y se formaba por procesos de carbonización en las zonas altas de las galerías mineras por su baja densidad. La explosión de este gas ocurría cuando se mezclaba con el aire en un 5 a 15 % de proporción con 9.5 % de dicho gas.

En Ortega-Ramos et al. (2018), se resalta la importancia de detectar y medir el gas de metano en las minas de carbón, puesto que su presencia evidencia una posible explosión. Además, se recomienda que en toda extracción mineral haya sistemas de ventilación, pues en las explosiones, sea natural o condicionada por actividades antropogénica, se suele liberar distintos gases dentro de las minas.

Además de los accidentes mortales, las explosiones no medidas o estudiadas producen contaminación en los alrededores de la mina explotada. Fis (2017), señala que las explosiones impactan en el medio ambiente, pues se produce la modificación de los relieves en el lugar de extracción, así como la afectación a los inmuebles de labor minera.

Al respecto, en Fuentes et al. (2018) se observa un estudio de medición para la creación de explosivos a base de carbón. Para ello, se midió parámetros analíticos como la humedad residual, el poder calorífico, la granulometría, el límite inferior de explosividad, la severidad de la explosión, entre otros.

Los resultados indicaron que hay una relación directa entre la severidad y la granulometría.

Esto quiere decir que mientras más pequeña sea la roca fragmentada, mayor es el índice de poder explosivo de la mezcla. Este estudio demuestra que es importante realizar investigaciones sobre los distintos insumos químicos que son útiles para la fabricación de mezclas explosivas, pues la medición de sus características en los resultados posexposición permite evidenciar la calidad de explosivo que se está empleando; con esto, los ingenieros son capaces de prevenir el impacto de la detonación y sus posibles consecuencias.

3.3. Tipos de potencia de las mezclas explosivas

En cuanto a la potencia, según Aguirre (2016):

(La potencia de las mezclas explosivas) es, desde el punto de vista de aplicación industrial, una de las propiedades más importantes, ya que define la energía disponible para producir efectos mecánicos (p. 77).

De la misma forma, Escriba (2018) señala lo siguiente:

Se expresa como potencia absoluta por peso (AWS) y potencia absoluta por volumen (ABS). También se puede expresar como una comparación de la energía de un explosivo respecto al del ANFO, el cual es tomado como el 100 %, obteniéndose la potencia relativa por peso o la potencia relativa por volumen. Entonces, es un valor relativo cuya finalidad es comparar los explosivos entre ellos. (p. 6)

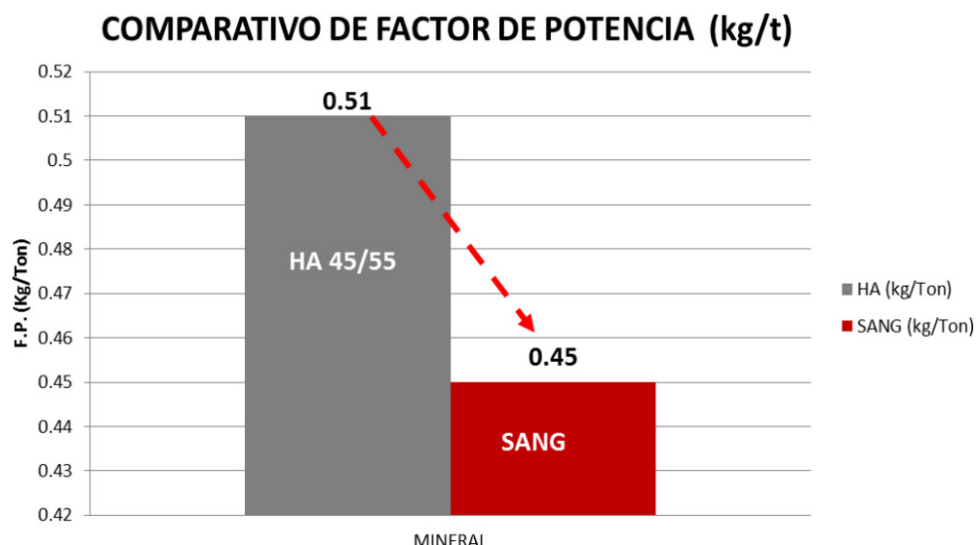
Por tanto, la potencia de los explosivos puede considerarse a partir de su volumen y de su peso; asimismo, estas dos dimensiones son englobadas en parámetros absolutos o relativos. En los trabajos de minería, se busca optimizar los resultados de los explosivos en puntos como el económico, el técnico y el medioambiental. Así es que se emplea usualmente el parámetro de la potencia relativa, para comparar la efectividad entre mezclas explosivas.

Para diferenciar la potencia de las mezclas explosivas, primero se debe caracterizar la liberación de energía producida. Por ejemplo, en García (2020), la mezcla ANFO pesado produjo resultados favorables en los procesos de voladura en dicho estudio, pues, en términos ambientales, técnicos y económicos, dicha mezcla o emulsión favoreció a la explotación minera. Cabe decir que la mezcla empleada en este estudio es una modificación del ANFO común, pues los avances de ingeniería minera constantemente buscan potenciar sus explosivos a fin de obtener mejores resultados.

Por ejemplo, en Chambi (2018), se compara la efectividad del ANFO pesado con la emulsión gasificada SAN-G. Si bien el factor de potencia de esta emulsión es menor al ANFO pesado, el costo de voladura también es menor y, por tanto, más económico. Además, su VOD y su granulometría también resultaron ser eficientes. Asimismo, el impacto ambiental también es menor, pues no se genera humo naranja contaminante (gases nitrosos).

Figura 6

Histograma comparativo del factor de potencia



Nota: Adaptado de *Evaluación técnica – económica y ecológica de la aplicación de emulsión gasificable en lugar de Heavy Anfo Tradicional en Mina Apumay*. por E. Chambi, 2018, [Tesis de titulación, Universidad Nacional de San Agustín]. <https://bit.ly/2TxNLAD>

Como se observa en la Figura 6, el factor de potencia de la emulsión gasificada es menor a la clásica mezcla explosiva ANFO pesado (HA). No obstante, las ventajas de la nueva mezcla recaen en los tres indicadores ya mencionados. Por dicho motivo, resulta más rentable emplear la nueva mezcla explosiva.

De la misma forma, en Iglesias (2016), se compara los efectos del ANFO pesado con la emulsión gasificable Quantex 73.

Tabla 8

Análisis comparativo HA-55 y MEQ73 (Quantex 73)

Parámetros	Explosivos	
	HA 55	MEQ73
Densidad mezcla (g/cc)	1,28	1,38
Densidad final (g/cc)	1,28	1,15
VOD (m/s)	5200	5450
Carga (kg)	779,1	766,4
FP (kg/t)	0,407	0,401
FC (kg/m ³)	1,060	1,042
Costo Unitario (\$/kg)	0,584	0,534
Costo / taladro (\$/tal)	455,0	409,5
Costo / Ton. (\$/t)	0,238	0,214

Nota: Adaptado de *Estudio técnico – económico del uso de la mezcla explosiva Quantex 73 en la unidad minera Toquepala – SPCC*, por L. Iglesias, 2016, [Tesis de titulación, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann]. <https://bit.ly/3x9uLHb>

Similar a la Figura 6, en la Tabla 8 se observa que el factor de potencia (FP) es mayor con la mezcla HA 55; no obstante, los costos de la mezcla MEQ73 es menor y, por lo tanto, más económico. Además, la diferencia en el FP es mínima, por lo cual, la segunda mezcla es más eficiente en términos económicos. En términos técnicos, la VOD es mayor que la primera mezcla, además de que la densidad empleada para la explosión es

menor. De la misma forma, los gases nitrosos y la fragmentación de las rocas disminuyeron con el uso de la MEQ73, lo que favorece al medioambiente para su cuidado y a las labores operativas.

A partir de la comparativa de distintas mezclas explosivas para las labores de extracción de minerales, se debe recalcar que los explosivos son valorados por su potencia o liberación de energía. Los demás factores como costos, impacto ambiental, densidad, entre otros, muchas veces quedan de lado cuando el factor de energía es mucho mayor que los demás factores.

3.3.1. Potencia relativa por volumen

Según Bernaola et al. (2013), a partir de los valores de la potencia absoluta, sea por unidad de peso (cal/g) o por volumen (cal/cm³), se obtiene la potencia relativa por peso (RWS) y por volumen (RBS). Estos se obtienen a partir de las siguientes ecuaciones:

$$RWS = \frac{AWS}{AWS_{anfo}} \times 100$$

$$RBS = \frac{ABS}{ABS_{anfo}} \times 100$$

En Gómez (2016), se observa los resultados positivos de la aplicación de la potencia relativa por volumen para el diseño de una malla de perforación y voladura. Gracias a dicha forma de potencia, los resultados en el cambio del ANFO y el ANFO pesado constatan que los costos de operatividad para la extracción mineral se optimizaron en 5.1 %; puesto que la potencia relativa por volumen en el ANFO era menor al nuevo ANFO pesado (1.00 y 1.35, respectivamente).

Dicho aumento corresponde a la adición de componentes químicos a la mezcla. Por ejemplo, según Giraldo (2020), el ANFO aluminizado, en comparación con la mezcla normal (100 %), aumenta de peso hasta 106 o 120 % dependiendo de la cantidad de peso del aluminio agregado. En otras palabras, la comparativa de las mezclas explosivas a través de la potencia relativa absoluta permite contrastar la efectividad de dichas mezclas. En los trabajos de explotación mineral, se busca la eficiencia de los explosivos en ámbitos económicos (costos), técnicos (grado de fragmentación) y medioambientales (contaminación por gas). Por tal motivo, se observa la eficiencia de las mezclas mediante la RWS.

CAPÍTULO IV

LA POTENCIA RELATIVA POR VOLUMEN DE MEZCLAS EXPLOSIVAS Y SU MODELO MATEMÁTICO PARA EL DISEÑO DE MALLAS DE PERFORACIÓN Y VOLADURA

Los explosivos son sustancias químicas que se llegan a utilizar en varios medios, por ejemplo, en la extracción de elementos minerales. Su particularidad es que en temperaturas normales, son inofensivas, pero por intermedio de una reacción química se convierten raudamente en un elemento gaseoso que produce un gran volumen de presión y altas temperaturas.

Sin embargo, la tendencia a utilizar explosivos de gran energía se ha vuelto un problema, debido a que a veces no se puede estimar los valores necesarios para hallar un rango determinado de actividad. Esto conlleva a que sea necesario encontrar nuevas técnicas para el diseño de herramientas explosivas, tal como es el caso de las mallas de perforación y voladura.

Mediante este trabajo de investigación se brindará los elementos necesarios para utilizar correctamente la potencia relativa por volumen (RBS), con la finalidad de aplicarla correctamente en las diferentes actividades extractivas. Ello bajo los lineamientos de distintos modelos matemáticos que toman en cuenta la energía del explosivo.

4.1. Objetivos

4.1.1. Objetivos generales

- Analizar y aplicar la energía de una mezcla explosiva para el diseño correcto de una malla de perforación y voladura.

4.1.2. Objetivos específicos

- Conocer y determinar la energía de los explosivos.
- Analizar el uso de la potencia relativa por volumen (RBS).
- Determinar la geometría del disparo con el uso de la potencia relativa por volumen.
- Analizar el rendimiento de los explosivos mediante el factor de energía.
- Mejorar el grado de fragmentación de las rocas.

4.2. Método de investigación

El estudio presentó dos métodos de investigación:

El método general: se basó en el análisis y comparación.

El método específico: se basó en la observación y medición.

4.3. Sistema de variables

Variable de entrada: Geología de la mina, energía de los explosivos, potencia relativa por volumen de los explosivos (RBS), diámetro de taladro, burden, espaciamiento, sistemas de iniciación, costos de explosivos y accesorios

Variable de salida: Diseño de la malla, burden, espaciamiento, factor de potencia, factor de energía, fragmentación

Tabla 9

Operacionalización de variables

Variable	Dimensión	Escala de medición
Entrada	Geología de la mina	Cubicación de mineral (t)
	Energía de los explosivos	Kilocaloría/ kilogramo
	Potencia relativa por volumen de explosivos	Volumen, adimensional
	Diámetro de taladro	Pulgadas
	<i>Burden</i>	Metro
	Espaciamiento	
	Costo de explosivos y accesorios	Dólar
	<i>Burden</i>	Metro
Salida	Espaciamiento	
	Factor de potencia	Kilogramo/tonelada de mercancía, kilogramo/metro cúbico
	Factor de energía	Kilocaloría/tonelada de mercancía, kilocaloría/método cúbico
	Fragmentación	Porcentaje
	Costo de voladura	Dólar/tonelada de mercancía

4.4. Población

La población del trabajo investigativo estuvo compuesta por la industria minera del Perú.

4.5. Muestra

La muestra del trabajo investigativo estuvo compuesta por una empresa minera del norte del Perú.

4.6. Diseño de investigación

$$Y_i \rightarrow X_i$$

Donde:

Y_i = Muestra

X_i = Observación

4.7. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Las técnicas de recolección de datos que se utilizaron fueron los datos técnicos de la empresa sobre las operaciones de perforación y voladura, que estuvieron basados en el catálogo de fabricantes de explosivos nacionales y extranjeros.

Los instrumentos que se utilizaron para la recolección de datos fueron una computadora, una cámara fotográfica, un software adecuado, entre otros.

4.8. Metodología de la investigación

La metodología que se manejó estuvo basada en el estudio y análisis del modelo matemático que utilizó la potencia relativa por volumen (RBS) dentro del diseño de las mallas de perforación y voladura.

Para el mejor entendimiento de la tecnología de explosivos fue necesario conocer y entender las definiciones de combustión, detonación y explosión. La *combustión* se define como una reacción exotérmica que toma lugar en la superficie de los granos que componen el material; esta reacción es mantenida por el calor transmitido de los productos gaseosos de la reacción. La *detonación* como una reacción exotérmica específica la cual está asociada con una onda de choque. Y la *explosión* como una rápida expansión de una sustancia en un volumen más grande que su volumen original.

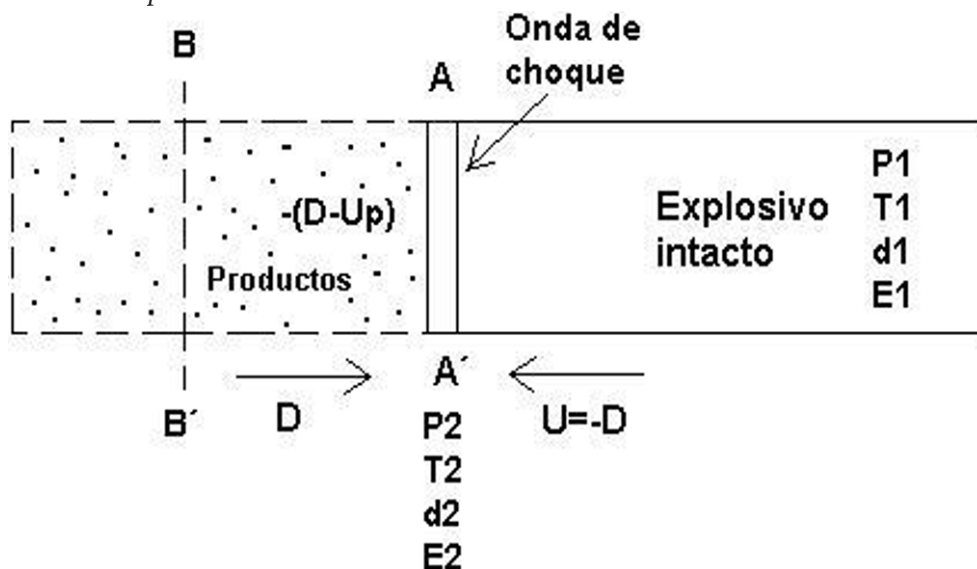
4.9. Determinación de las ecuaciones para el cálculo termodinámico

Se consideraron tres ecuaciones para determinar el cálculo termodinámico: la ecuación de la presión de detonación, la ecuación de Rankine-Hugoniot y la ecuación Becker-Kistiakowsky-Wilson.

4.9.1. Ecuación de la presión de detonación

Figura 7

Onda en el plano de detonación



Nota: Adaptado de *Explosives Technology*, por P. Katsabanis, 2000, Department of Mining Engineering; Queen University.

De acuerdo con la Figura 8, se demuestra que, el frente de la onda avanzó hacia el explosivo con una velocidad constante D ; por otro lado, el explosivo no detonado fluyó hacia el frente de choque AA' con una velocidad constante $U = -D$. La presión, temperatura, densidad y energía interna por unidad de masa fueron P_1 , T_1 , δ_1 , E_1 en todos los puntos al lado derecho de AA' . El frente de la onda fue una discontinuidad en comparación a los cambios que ocurrieron detrás de él. Por lo tanto, en AA' estos valores cambiaron a los valores P_2 , T_2 , δ_2 , E_2 ; estos aún pudieron cambiar más tarde de etapa (explosión). Además, la velocidad aparente de la masa que va dejando el frente tuvo el valor de $-(D-U_p)$, donde U_p fue la velocidad de la partícula en la zona entre AA' , BB' , relativo a las coordenadas fijadas.

Al seguir los criterios y procedimientos químicos, termodinámicos y otros, obtuvimos que el valor de la presión de detonación fue el siguiente:

$$P_2 = \delta_1 \left(\frac{D^2}{4} \right)$$

Por otro lado, la presión de taladro o explosión para un explosivo completamente acoplado fue la mitad de la presión de detonación, el cual presentó el siguiente valor:

$$P_e = P_3 = \frac{P_2}{2}$$

4.9.2. Ecuación de Rankine-Hugoniot

La conservación de la energía fue expresada mediante la ecuación:

$$E_2 - E_1 = \frac{1}{2} (P_1 + P_2) (V_2 + V_1)$$

4.9.3. Ecuación Becker-Kistiakowsky-Wilson (BKW)

La correcta descripción de los gases de detonación fue uno de los puntos clave en el cálculo termodinámico de explosivos. La ecuación de estado (EDE) para gases Becker-Kistiakowsky-Wilson (BKW) fue expresado por la siguiente ecuación:

$$\frac{P_v}{RT} = 1 + X e^{\beta X}$$

Donde:

β = constante

$$X = \frac{K}{V_g (T + \theta)^\alpha}$$

Donde:

V_g = volumen molar

α y β = constantes

$$K = k \sum x_i k_i$$

Donde:

K = constante

X_i = fracción molar

K_i = covolumen

4.10. Física - química de los explosivos

En las mezclas explosivas, la liberación de la energía fue optimizada al realizar el balance de oxígeno cero, ella tuvo la siguiente fórmula:

$$OB = O_o - 2C_o - \frac{1}{2}H_o$$

Donde:

Oo, Co y Ho = el número de átomos-gramo por unidad de peso de la mezcla explosiva. La determinación de los atm-gr de cada elemento servirá para determinar el calor liberado por el explosivo.

El calor de detonación pudo ser determinado por la ley de Hess:

$$Q = \sum H_f 0 \text{ (productos)} - \sum H_f 0 \text{ (reactantes)}$$

Donde:

$\sum H_f 0$ = calor de formación en condiciones normales

El principio de balance de oxígeno se ilustró mejor por la reacción de las mezclas de nitrato de amonio y petróleo llamado AN/FO.

4.10.1. Energía de las mezclas explosivas

Durante la detonación, la energía de las mezclas explosivas fue liberada y usada en los eventos mostrados en la Tabla 10:

La utilización de la energía explosiva estuvo gobernada por las leyes de conservación de la energía, masa y tiempo. La energía de la mezcla explosiva fue liberada en la roca circundante en dos formas diferentes:

Presión de detonación (energía de tensión) que ejerció una fuerza de fragmentación sobre la roca

Presión de taladro (energía de burbuja) que se debió a la formación de gases y fue causa principal del desplazamiento de la masa rocosa.

Tabla 10

Distribución de la energía en diferentes eventos

Evento	%
Desmenuzamiento de la pared del taladro	5
Formación de fractura (radial y de tensión)	10
Corte	5
Calor y luz	20
Movimiento de la masa rocosa	15
Vibración del terreno	30
Presión de aire	15
Total	100

Nota: Adaptado de *Explosives and Rock Blasting*, por Atlas Powder Company, 1987, Field Technical Operations.

La energía de burbuja pudo ser calculada por la ecuación formulada por C. K. Mc Kenzie: “Surface Blast Design”, 1998.

$$E_b = .684 P_h^{2.5} t^3 P_w^{-1.3}$$

Donde:

E_b = Energía de burbuja

P_h = Presión hidrostática

t = periodo de tiempo entre la pulsación del choque y la primera implosión de la burbuja.

P_w = densidad del agua

4.10.2. Determinación de la energía

La energía explosiva fue calculada para determinar su rendimiento termoquímico de la mezcla explosiva.

4.10.3. Medición de la energía

Se realizó mediante la comprobación de otras características ya conocidas. Para esta medición se utilizó el método basado en el ensayo de energía de burbuja bajo el agua.

4.10.4. Cálculo de la energía

La energía explosiva fue calculada usando técnicas basadas en las leyes de la termodinámica, siguiendo estrictamente principio químicos y matemáticos.

4.10.5. Potencia de los explosivos

La potencia de los explosivos se expresó de dos maneras: la primera bajo dos definiciones, potencia absoluta por peso (AWS) y potencia absoluta por volumen (ABS); la segunda, como una comparación de la energía de un explosivo respecto al del ANFO y del cual se obtuvo la potencia relativa por peso o por volumen.

La potencia absoluta por peso (AWS) fue utilizada para medir la cantidad de energía disponible en cada gramo de explosivo (en calorías); la potencia absoluta por volumen (ABS) fue utilizada para medir la cantidad de energía disponible en cada centímetro cúbico de explosivo; la potencia relativa por peso (RWS) fue utilizada para medir la energía disponible de explosivo comparado a un peso igual de AN/FO, y la potencia relativa por volumen (RBS) fue utilizada para medir el volumen de explosivo comparado a igual volumen de ANFO.

4.10.6. Eficiencia de los explosivos

Las mediciones de las eficiencias de los explosivos fueron desarrolladas para evaluar la potencia práctica del explosivo y sugerir sus propiedades en el campo. La eficiencia de los explosivos se determinó empíricamente mediante la técnica de la “energía de burbuja” en las voladuras bajo el agua, y se midió bajo el porcentaje de energía aprovechable.

Tabla 11

Eficiencia de los explosivos

Mezcla explosiva	Eficiencia (%)
Explosivos moleculares	95-100
Emulsiones	90-95
ANFOS pesados bombeables	75-90
ANFOS pesados comunes	65-85
Acuageles	55-70
AN/FO	60-80
SANFO	50-70

Nota: Adaptado de *Explosives and Rock Blasting*, por Atlas Powder Company, 1987, Field Technical Operations.

4.10.7. Factor de energía

El factor de energía fue utilizado para determinar la cantidad de energía usada al momento de fragmentar una tonelada de mineral o un metro cúbico de material estéril (en el movimiento de tierras). Este presentó la siguiente relación:

$$\text{Factor de Energía} = \frac{\text{kcal (MJ) de energía}}{\text{TM } \text{om}^3 \text{ de material fragmentado}}$$

4.10.8. Características geomecánicas del macizo rocoso que tienen una influencia determinante en los resultados de la voladura de rocas

Las propiedades del macizo rocoso fueron importantes en las operaciones de perforación y voladura, por ser el medio en el que actuaron los explosivos. Existieron diferencias significativas entre las rocas de la misma zona en una determinada mina por lo que fue necesario cuantificar algunas de sus propiedades.

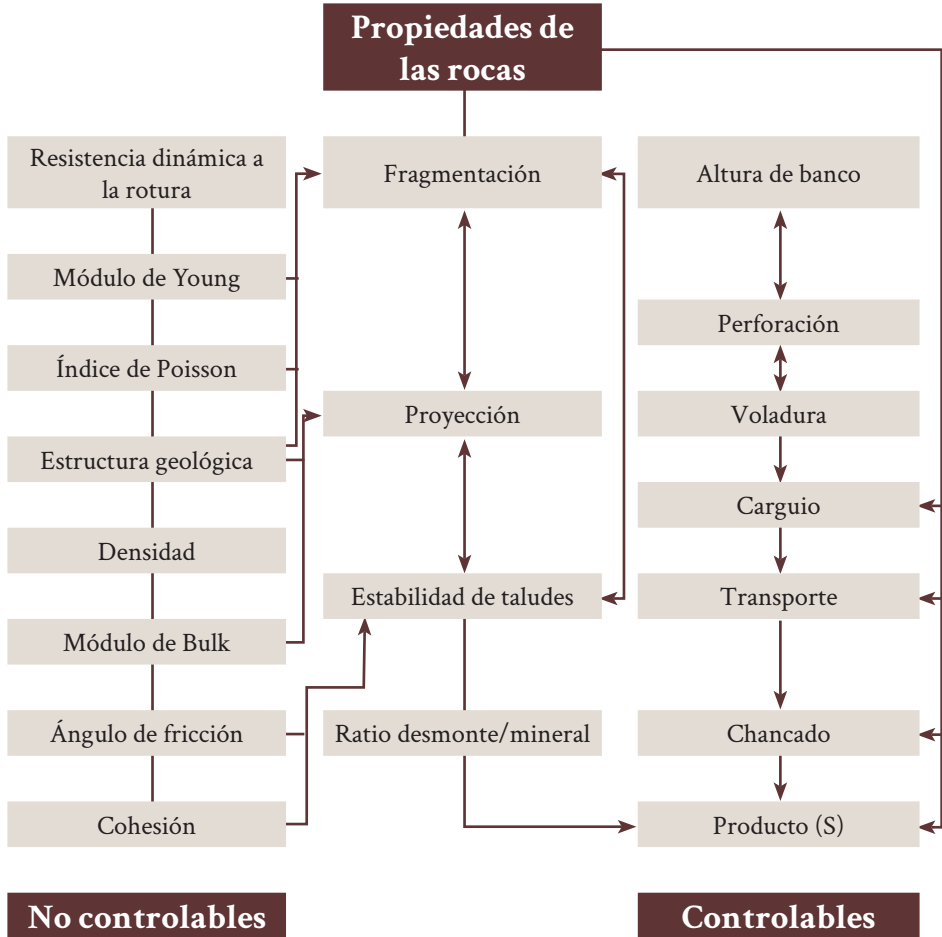
4.10.9. Propiedades físico-mecánicas de las rocas

Para seleccionar la mezcla explosiva que mejor se adecuó a las propiedades del macizo rocoso fue necesario definir desde el punto de vista físico y geológico, las propiedades físicas y mecánicas que influyeron en la reacción del macizo rocoso a la energía producida por la detonación de un explosivo, las cuales fueron las siguientes:

- Densidad
- Resistencia a la compresión y tracción
- Módulo de Young
- Relación de Poisson
- Módulo de Bulk o compresibilidad
- Velocidad de la onda longitudinal
- Porosidad
- Fricción interna

Figura 8

Interacción de las propiedades de las rocas y variables controlables con las operaciones mineras



4.11. Características geológicas y geotécnicas del área en estudio

4.11.1. Litología

La voladura en zonas donde se produjo un cambio litológico brusco obligó a reconsiderar el diseño, posteriormente, se tiene dos alternativas: esquemas iguales para los dos tipos de roca y variación de las cargas unitarias o esquemas distintos, pero con igual carga por taladro.

4.11.2. Fracturas preexistentes

Todas las rocas presentaron discontinuidades, microfisuras y macrofisuras, que influyeron de manera directa en las propiedades físicas y mecánicas de las rocas y, por lo tanto, en los resultados de la voladura.

Tabla 12

Tipos de discontinuidades

Absorción de la energía de onda de tensión de las fracturas	Abertura de las fracturas (mm)	Naturaleza de las fracturas
Pequeña (< 20 %)	(A) 0	(A) Fuertemente cementada
	(B) 0 – 4,0	(B) Cementada con un material de impedancia acústica similar a de la matriz
Ligera (20 % - 40 %)	(A) < 0,5	(A) Fracturas rellenas con agua o aire
	(B) < 4,0	(B) Cementada con un material de impedancia acústica 1,5 – 2 veces menor que de la matriz
Media (40 % - 80 %)	0,5 – 1,0	Fracturas abiertas rellenas con aire o agua
Grande (> 50 %)	(A) 0,1 – 1,0	(A) Fracturas rellenas con material suelto y poroso
	(B) 1,0	(B) Fracturas abiertas rellenas de material suelto poroso, aire y agua

Nota: Adaptado de *Geomecánica y Voladura*, por N. Córdova, 2004, DCR Ingenieros S.R. Ltda..

4.11.3. Tensiones de campo

Se utiliza para determinar si, de las rocas masivas homogéneas, las grietas se propagan radialmente desde los taladros en dirección de las tensiones principales.

4.11.4. Presencia de agua

Se utilizó para determinar si las rocas porosas y los macizos rocosos fracturados y saturados de agua presentaron los siguientes problemas:

- Obligar a seleccionar explosivos no alterables por agua.
- Produjeron la pérdida de taladros por hundimientos internos.
- Dificultaron la perforación inclinada.

4.11.5. Temperatura del macizo rocoso

Los yacimientos que contienen piritas suelen presentar problemas de altas temperaturas de la roca por efecto de la oxidación, lo cual ocasiona que los agentes explosivos del ANFO reaccionen a partir de una temperatura de 120°. Una recomendación general cuando se presentan estos problemas es delimitar el número de taladros por voladura a fin de disminuir el tiempo que transcurre entre la carga y el disparo.

4.11.6. Variables de la geometría del disparo

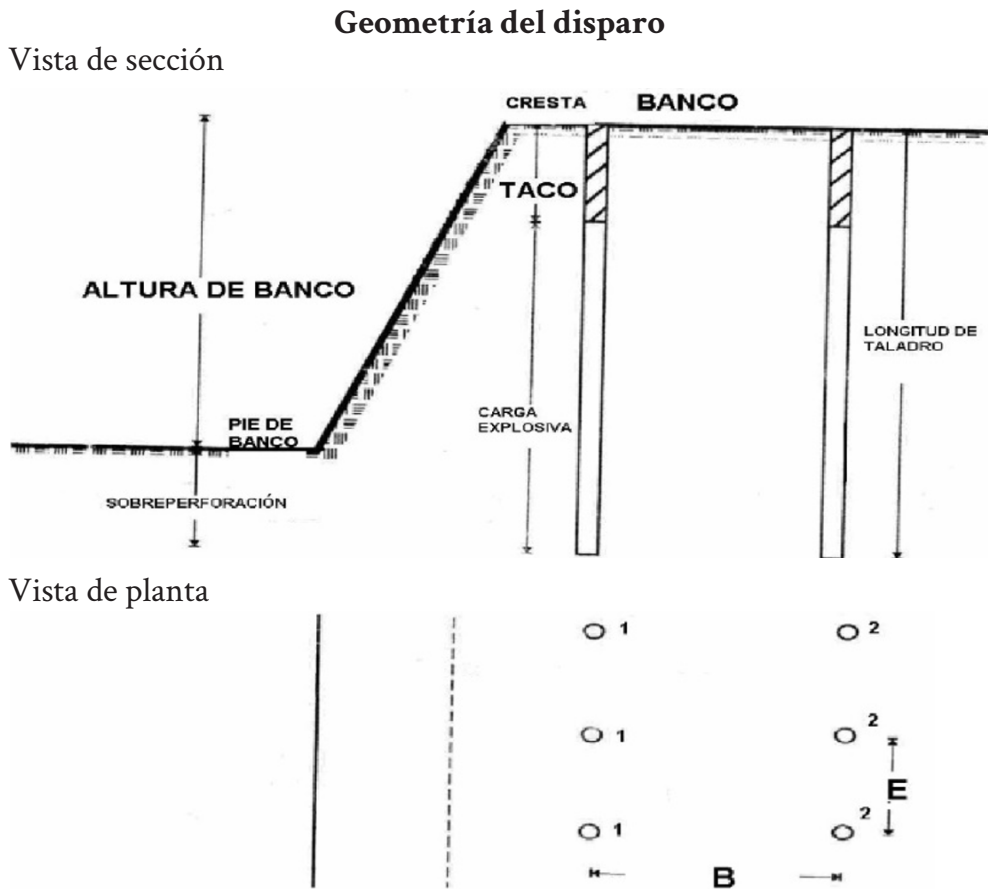
Se utilizaron estas variables para verificar si las condiciones particulares de cada macizo rocoso determinaron los detalles del diseño de voladura. Entre las dimensiones principales se encontraron al *burden*, utilizado para determinar la distancia perpendicular desde un taladro hasta la superficie y el espaciado, el cual es empleado para determinar la distancia entre taladros y cargas en una fila, medida perpendicularmente hacia el *burden* y paralelo a la cara libre del movimiento esperado de la roca.

4.11.7. Otros parámetros importantes

Entre los otros parámetros importantes para determinar las medidas geométricas se encontró al diámetro de taladro, la altura de banco, la sobreperforación y el taco.

Figura 9

Variables de la geometría del disparo en minería superficial



Nota: B = burden;

E = espaciamiento;

1 = taladros de la primera fila;

2 = taladros de la segunda fila

4.12. Caracterización matemática del modelo de la potencia relativa por volumen (RBS)

4.12.1. Modelo de Crosby y Pinco

Este modelo fue utilizado para determinar nuevas dimensiones del *burden* y el espaciamiento. Su fórmula es la siguiente:

$$\left[\frac{RBSa}{RBSu} \right]^{1/3} \times Du - Da^y$$

Donde:

RBSu = explosivo en uso

RBSa = explosivo a usar

Du = dimensión en uso

Da = dimensión a usar

4.12.2. Ecuación modificada por los autores

El modelo matemático planteado por Crosby y Pinco no permite determinar las nuevas dimensiones del *burden* y espaciamiento cuando hay más de un tipo de explosivo dentro de los taladros, es por ello que se debe de modificar el modelo mediante las pautas indicadas en las Figuras 10 y 11.

Figura 10

Cambio de explosivo de uno a dos (carga de fondo y carga de columna)

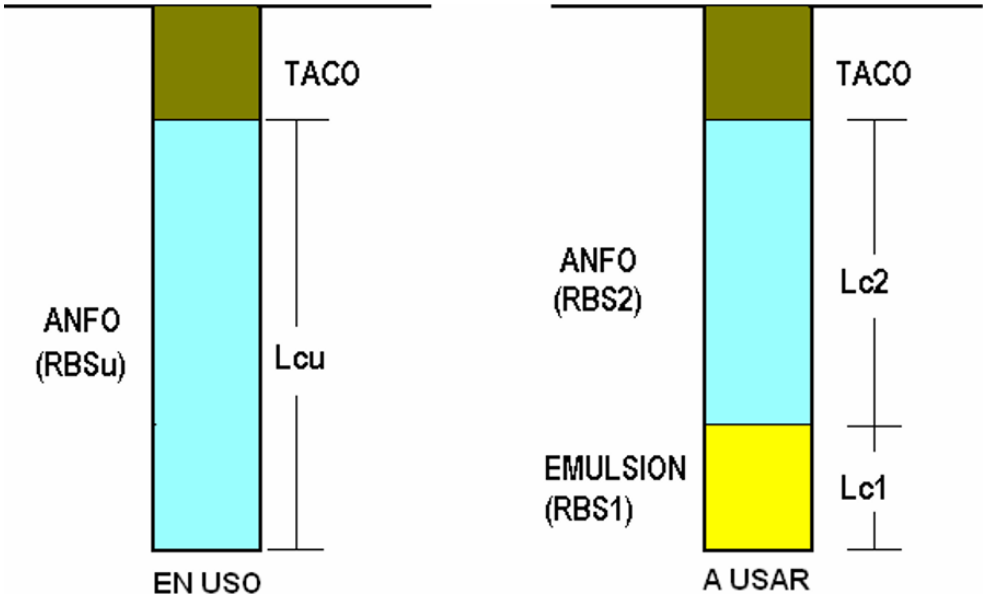
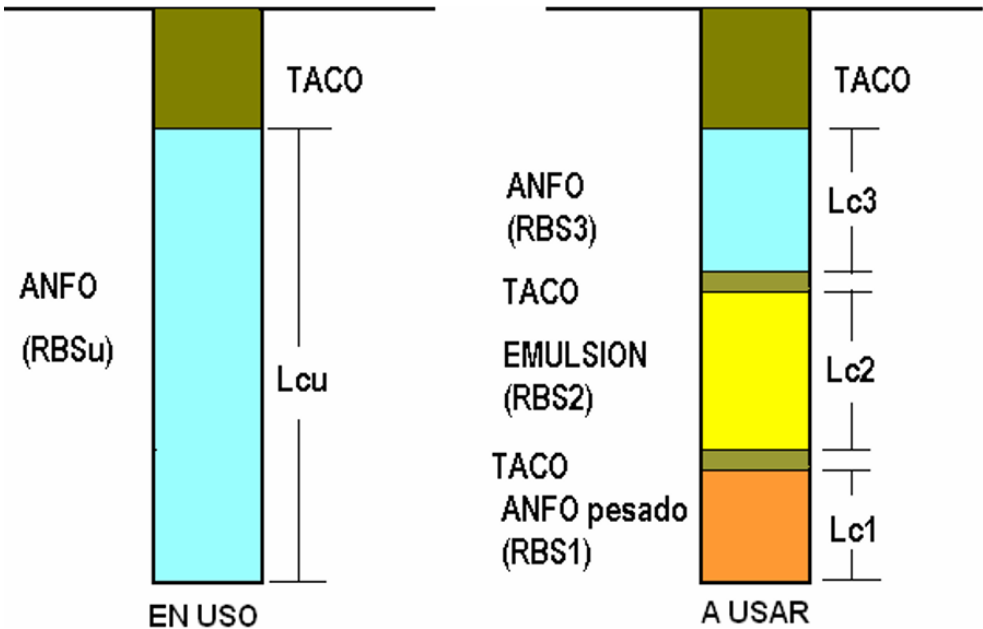


Figura 11

Cambio de explosivo de uno a tres tipos usando tacos intermedios



4.12.3. Desarrollo del modelo matemático modificado

Tenemos la siguiente ecuación:

$$Da - Du \times \frac{[\sum_{i=1}^n (Lc_i \times RBS_i)]^{1/3}}{(Lcu \times RBSu)^{1/3}}, n \in Z^+$$

Donde:

RBS_i = Potencia relativa de los explosivos a usar

Lc_i = longitud de los explosivos a usar

n = número de explosivos a usar

4.12.4. Esquema para la verificación del modelo matemático

El esquema en la Figura 12 se utilizó para verificar si el modelo matemático cumplió o no con los objetivos del trabajo de investigación.

4.12.5. Aplicación del modelo matemático que utiliza la potencia relativa por volumen (RBS)

4.12.5.1. Parámetros del diseño

Tabla 13

Parámetros básicos del Tajo

Datos	Parámetros asumidos	Proporcionados por
Producción diaria	36 500 TM	Superintendencia General
Topografía base		Topografía
Modelo de bloques		Geología mina
Diseño de <i>pit</i> final		Planeamiento mina
Dilución		
Talud final	Variable	
Recuperación proyectada	58 %	Planta

Figura 12

Esquema para la verificación del modelo matemático que utiliza la potencia relativa por volumen (RBS) para el diseño de mallas de perforación y voladura



Tabla 14

Parámetros principales del Tajo

Descripción	Unidad	Cantidad
Altura de banco	m	8
Altura de banco II	m	6
Ángulo de talud de banco	grado	55
Ancho de berma inter banco	m	3.5
Ancho de rampa principal	m	12
Ancho de vías	m	12
Ángulo de talud final Inter. Rampa	grado	45
Ángulo de talud final Inter. Rampa II	grado	42

4.13.2. Perforación y voladura

Tabla 15

Parámetros de perforación y voladura antes del uso de la RBS

Banco	Dimensiones		Altura de banco (h)	Longitud de perforación (Lp)		Longitud de carga (Lq)		Factor de carga	Rendimiento
	B (m)	E (m)	m	M		m		kg/TM	TM/m
En desmonte	5.50	6.30	8	8.5	0.5	6.5	2.0	0.137	83
En mineral	4.80	5.50	8	8.5	0.5	6.5	2.0	0.181	63
En mineral y desmonte	4.50	5.20	6	6.5	0.5	5.0	1.5	0.213	55

4.12.6. Diseño de la malla de perforación y voladura con el criterio RBS

4.12.6.1. Cálculo de las nuevas dimensiones

Para el diseño de las nuevas dimensiones geométricas se tomará en cuenta el ANFO pesado 50/50 (emulsión/ANFO).

Tabla 16

Energía de las mezclas a granel del ANFO pesado

Características	% Emulsión / % ANFO			
	25/75	30/70	40/60	50/50
Densidad (gr/cc)	0,95	1,05	1,20	1,28
Energía kcal/kilogramo	852	840	815	791
Energía MJ/kilogramo	3,57	3,52	3,43	3,31
Velocidad (VOD) m/s	3 900	3 950	4 050	3 900
P. relativo (ANFO=100) Peso	0,95	0,94	0,91	0,88
P. relativo (ANFO=100) Volumen	1.07	1.17	1.3	1.34

En la Tabla 16 se calcularon las nuevas medidas del *burden* y el espaciamiento y se obtuvo un ANFO con una densidad de 0,84 g/cc y una energía de 3,75 MJ/kg. Este material reemplazó el ANFO del agente de voladura con el ANFO pesado a granel, el cual nos permitió obtener diferentes combinaciones de emulsión/ANFO. Cabe destacar que estas combinaciones dependieron del tipo de material que se utilizó, ya sea desmonte, minerales o una combinación de minerales y desmonte, para el ANFO pesado.

A manera de ejemplo para el cálculo de un nuevo diseño de la malla de perforación voladura, se utilizó el ANFO pesado de relación emulsión/ANFO igual a 25/75 cuyo RBS fue de 1,07. Este cálculo resultó ser el explosivo a utilizar, el cual fue ANFO, cuyo RBS fue de 1,00, por ser el explosivo estándar. Los cálculos fueron los siguientes:

Desmante *burden*:

$$\left[\frac{1,07}{1,00} \right]^{1/3} \times 5,50\text{m} = 5,62\text{m}$$

Espaciamento del desmante:

$$\left[\frac{1,07}{1,00} \right]^{1/3} \times 6,30\text{m} = 6,44\text{m}$$

Mineral *burden*:

$$\left[\frac{1,07}{1,00} \right]^{1/3} \times 4,80\text{m} = 4,90\text{m}$$

Espaciamento del mineral:

$$\left[\frac{1,07}{1,00} \right]^{1/3} \times 5,50\text{m} = 5,62\text{m}$$

Mineral–desmante *burden*:

$$\left[\frac{1,07}{1,00} \right]^{1/3} \times 4,50\text{m} = 4,60\text{m}$$

Espaciamento del mineral–desmante:

$$\left[\frac{1,07}{1,00} \right]^{1/3} \times 5,20\text{m} = 5,32\text{m}$$

Tabla 17

Nuevas dimensiones de burden (B) y espaciamento (E)

Potencia relativa por volumen (RBS)	Tipo de material					
	Desmante		Mineral		Mineral desmante	
	B (m)	E (m)	B (m)	E (m)	B (m)	E (m)
1,00	5,50	6,30	4,80	5,50	4,50	5,20
1,07	5,63	6,44	4,91	5,63	4,60	5,32
1,17	5,80	6,64	5,06	5,80	4,74	5,48
1,30	6,00	6,88	5,24	6,00	4,91	5,68
1,34	6,06	6,94	5,29	6,06	4,96	5,73

En la Tabla 17 se observó que existe una viabilidad en la determinación de nuevas dimensiones de *burden* y espaciamiento para los diferentes tipos de materiales, ya que se tomó en cuenta los tipos de mezclas explosivas, de los cuales se consideró su potencia relativa por volumen (RBS).

La importancia de este nuevo cálculo radica en que se evitó pruebas de ensayo y error, ya que los valores calculados nos indicaron explícitamente las nuevas dimensiones de la malla por el cambio de los explosivos con mayor cantidad de energía.

El cambio de ANFO pesado en vez del ANFO no solo involucra al nuevo diseño de la malla sino también el conocimiento del procedimiento correcto de su utilización.

4.12.6.2. Características de las voladuras de prueba utilizando ANFO pesado 50/50 (Emulsión HA y ANFO)

Para la evaluación técnica se realizó dos pruebas de voladura; por razones prácticas, redondeamos los valores de la malla teórica obtenida para un ANFO pesado, cuyo RBS fue de 1,34 (5,29 m x 6,06 m) a los valores 5,30 m x 6,00 m y se tuvo en cuenta las siguientes características:

Tipo de roca:	mineral (densidad 2,55 TM/m ³)
Profundidad de los taladros:	8,50 m
Diámetro de los taladros:	5 ¾"
Burden:	5,30 m
Espaciamiento:	6,00 m
Taco:	2,00 m

Accesorios y explosivos

ANFO pesado:	50/ 50
RBS:	1,34
Fanel Dual:	1000/ 25 ms x 15 m
Nonel dual:	1000/25ms

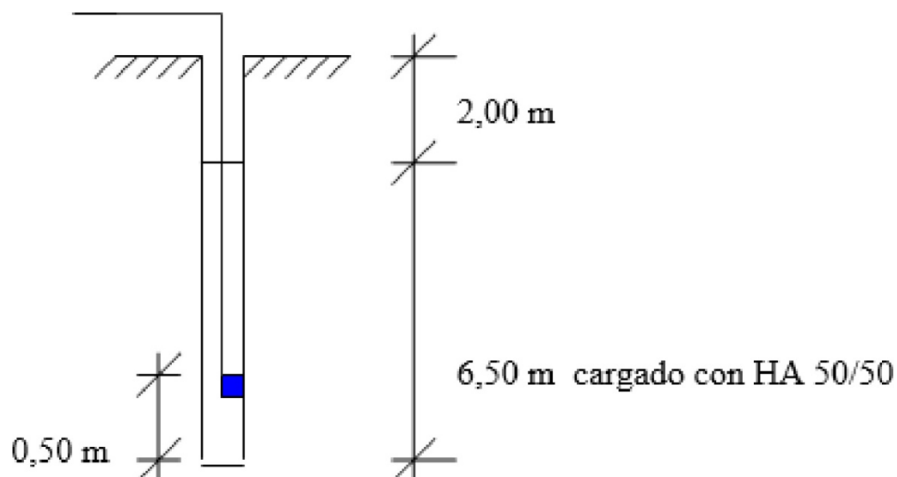
Accesorio de Voladura:

- Sensible al golpe (fulminante)
- Retardo superficial 25 MS
- Retardo de fondo 1000 MS

Booster HDP – 1: 1 libra

Figura 13

Esquema de carguío del taladro con ANFO pesado 50/50



4.12.6.3. Cálculo del factor de energía

Se calculó el factor de energía de los resultados mostrados; a manera de ejemplo se pudo trabajar con el ANFO pesado 25/75. Este material tuvo como energía alrededor de 3,57 MJ/kg; el diámetro de taladro fue de 5 ¾", que equivale a 14,605 cm; asimismo, la altura de su banco fue de 8 m y la longitud de carga de 6,5 m.

Desmante:

Tonelaje = volumen × densidad

TM = 5,63 m × 6,44 m × 8,00 m × 2,4 TM/m³
= 696,14 TM

Energía del ANFO pesado en el taladro:

Energía total = $\pi \times \text{diámetro}^2 \times \text{longitud de carga} \times \text{densidad} \times \text{energía}/40$

Energía total = $\pi (14,605 \text{ cm})^2 \times 6,50 \text{ m} \times 0,95 \text{ g/cc} \times 3,57 \text{ MJ/kg}/40$

Energía total = 369,31 MJ

Factor de energía:

Factor de energía = 369,31 MJ / 696,14 TM = 0,530 MJ/TM

Como se observa en la Tabla 18, el factor de energía fue el mejor parámetro para cuantificar el rendimiento del explosivo, ya que la energía del explosivo fue el que fragmentó al macizo rocoso.

Tabla 18
Factores de energía

Potencia relativa por volumen (RBS)	Tipo de material							
	Desmante				Mineral			
	B (m)	E (m)	F.E. MJ/TM		B (m)	E (m)	F.E. MJ/TM	Mineral desmante B (m) E (m) F.E. MJ/TM
1,00	5,50	6,30	0,516		4,80	5,50	0,643	4,50 5,20 0,801
1,07	5,63	6,44	0,530		4,91	5,63	0,654	4,60 5,32 0,822
1,17	5,80	6,64	0,544		5,06	5,80	0,713	4,74 5,48 0,897
1,30	6,00	6,88	0,562		5,24	6,00	0,745	4,91 5,68 0,934
1,34	6,06	6,94	0,572		5,29	6,06	0,706	4,96 5,73 0,886

4.12.6.4. Cálculo computarizado de las mallas de perforación y voladura

En la revisión de programas para el diseño de las mallas de perforación y voladura se pudo determinar que en el diseño de las mallas no se utilizó el criterio de la potencia relativa por volumen (RBS), solamente se realizó un análisis de la distribución de la energía en los taladros, por lo que se propone un programa sencillo y versátil para el cálculo computarizado.

4.13. Análisis y discusión de los resultados

4.13.1. *Discusión técnica*

Se implementó una permanente supervisión del carguío al granel del ANFO pesado en los taladros; también de los amarres de las líneas troncales y el muestreo de las densidades de la mezcla explosiva. El laboratorio químico de la mina continuamente realizó las mediciones de las densidades de la emulsión matriz; de esta manera, se estableció un permanente control de calidad del producto a utilizarlo en los disparos.

4.13.2. *Análisis de los resultados de la fragmentación*

Después de las pruebas de voladura se realizó la toma de fotografías de las pilas de escombros para el respectivo análisis granulométrico. Luego del análisis del grado de fragmentación que produjo cada una de las pruebas, se pudo resumir y concluir en los siguientes puntos:

4.13.2.1. Análisis de la fragmentación en la primera prueba

Tamaño de los fragmentos:

- Tamaño mínimo 0,008 m
- Tamaño máximo 0,276 m

Distribución de los fragmentos:

- El 100 % < a 0.30 m
- El 69 % < a 0.15 m
- El 57,3 % < a 0.125 m

4.13.2.2. Análisis de la fragmentación en la segunda prueba

Tamaño de los fragmentos:

- Tamaño mínimo 0,006 m
- Tamaño máximo 0,215 m

Distribución de los fragmentos:

- El 100 % < a 0.30 m
- El 90,7 % < a 0.15 m
- El 83,0 % < a 0.125 m

Se consideró que los resultados a nivel de fragmentación fueron satisfactorios, particularmente en la segunda prueba porque el 90,7 % de los fragmentos tuvieron tamaños menores a 0,15 m y, por lo tanto, fueron adecuados para el proceso de lixiviación, ya que para este proceso se requirió que el material fragmentado obtenga tamaños reducidos. Anteriormente, cuando se usaba ANFO, la evaluación era de forma visual después del disparo y, de acuerdo a los ingenieros encargados de la voladura, eran más grandes y en algunos casos tenía que realizarse voladura secundaria para reducir el tamaño de los bancos.

4.13.2.3. Cálculo del factor de energía

Se pudo determinar que el factor de energía de la nueva malla posee las siguientes características:

Mineral:

$$TM = 5,30 \text{ m} \times 6,00 \text{ m} \times 8,00 \text{ m} \times 2,55 \text{ TM/m}^3 = 648,72 \text{ TM}$$

Energía del ANFO pesado en el taladro:

$$\text{Energía total} = \pi (14,605 \text{ cm})^2 \times 6,50 \text{ m} \times 1,28 \text{ g/cc} \times 3,31 \text{ MJ/kg/40}$$

$$\text{Energía total} = 461,37 \text{ MJ}$$

Factor de energía

$$F.E. = 461,37 \text{ MJ} / 648,72 \text{ TM} = 0,711 \text{ MJ/TM}$$

4.13.3. Discusión económica

El cálculo de los costos de perforación y voladura mediante el método manual fue tedioso y complicado, por lo que se desarrolló un programa en la hoja electrónica Excel, cuyos resultados para el uso de ANFO y el ANFO pesado 50/50 del nuevo diseño son los siguientes:

ANFO:

Costo de perforación y voladura US\$/ton 0,234

ANFO pesado 50/50

Costo de perforación y voladura US\$/ton 0,220

De acuerdo a los resultados brindados, se observó una reducción en los costos de perforación y voladura con el uso del ANFO pesado 50/50.

4.13.4. Discusión ecológica

En lo que respecta a la seguridad y el medio ambiente, se evidenció que cada semana se debió de inspeccionar que los kits antiderrames (trapos absorbentes, bolsas plásticas y bandejas de contención) se encuentren en perfecto estado. Asimismo, cotidianamente se debió realizar limpieza externa y el mantenimiento de la bomba utilizada para la descarga de la emulsión matriz de la cisterna al silo.

4.13.5. Consolidación de los resultados

De los resultados presentados anteriormente, se pudo deducir que el cambio del ANFO pesado por el ANFO ha llevado a obtener resultados satisfactorios en el aspecto técnico. Esto se debió a que, en la primera prueba, el 69 % de los fragmentos tenían dimensiones menores a 0,15 m y, en la segunda prueba, el 90,7 % de los fragmentos eran menores que dicho tamaño, los cuales fueron adecuados para el tratamiento por lixiviación del mineral fragmentado.

Respecto a los resultados económicos, la diferencia de US\$/ton fue 0,014 a favor del ANFO pesado y si el movimiento de material fuera de 36 500 TM/día, el ahorro hubiera sido de US\$ 183 960.

En lo concerniente a la evaluación ecológica, se tuvo que implementar un programa riguroso para las inspecciones semanales de los kits antiderrames y otros, con la finalidad de evitar el impacto del uso del ANFO pesado.

4.14. Conclusiones

- En el presente estudio se utilizó un modelo matemático que abarca la potencia relativa por volumen (RBS) dentro del diseño de las mallas de perforación y voladura, además, para una mejor comprensión de la

tecnología de explosivos, fue necesario conocer y entender las definiciones de combustión, detonación y explosión.

- Se consideraron tres ecuaciones para determinar el cálculo termodinámico: la ecuación de la presión de detonación, la ecuación de Rankine-Hugoniot y la ecuación Becker-Kistiakowsky-Wilson. Se siguieron criterios y procedimientos químicos, termodinámicos y otros para obtener el valor de la presión de detonación. Por otro lado, la presión de taladro o explosión para un explosivo completamente acoplado fue la mitad de la presión de detonación. La correcta descripción de los gases de detonación fue uno de los puntos clave en el cálculo termodinámico de explosivos.
- Se hizo una optimización de la liberación de la energía en la mezcla explosiva realizando un balance de oxígeno cero ilustrándolo a partir de la reacción de las mezclas de nitrato de amonio y petróleo llamado AN/FO. El calor de detonación pudo ser determinado por la ley de Hess.
- La utilización de la energía explosiva estuvo gobernada por las leyes de conservación de la energía, masa y tiempo y su liberación en la roca circundante fue de dos formas diferentes: presión de detonación (energía de tensión), que ejerció una fuerza de fragmentación sobre la roca y la presión de taladro (energía de burbuja), que se debió a la formación de gases y fue causa principal del desplazamiento de la masa rocosa.
- La medición de la energía se realizó mediante el método basado en el ensayo de energía de burbuja bajo el agua. En ese sentido, la potencia de los explosivos se expresó de dos maneras: la primera bajo dos definiciones, potencia absoluta por peso (AWS) y potencia absoluta por volumen (ABS); la segunda, como una comparación de la energía de un explosivo respecto al del ANFO y del cual se obtuvo la potencia relativa por peso o por volumen.

- La potencia absoluta por peso (AWS) fue utilizada para medir la cantidad de energía disponible en cada gramo de explosivo (en calorías); la potencia absoluta por volumen (ABS) fue utilizada para medir la cantidad de energía disponible en cada centímetro cúbico de explosivo; la potencia relativa por peso (RWS) fue utilizada para medir la energía disponible de explosivo comparado a un peso igual de AN/FO, y la potencia relativa por volumen (RBS) fue utilizada para medir el volumen de explosivo comparado a igual volumen de ANFO.
- En cuanto a la eficiencia de los explosivos, se determinó empíricamente mediante la técnica de la “energía de burbuja” en las voladuras bajo el agua, y se midió bajo el porcentaje de energía aprovechable y su cantidad fue medida a partir del cálculo del factor de energía al momento de fragmentar una tonelada de mineral o un metro cúbico de material estéril (en el movimiento de tierras).
- Las características geomecánicas del macizo rocoso tienen una influencia determinante en los resultados de la voladura de rocas, por lo que existieron diferencias significativas entre las rocas de la misma zona en una determinada mina, así que fue necesario cuantificar algunas de sus propiedades físicas y mecánicas que influyeron en la reacción del macizo rocoso a la energía producida por la detonación de un explosivo, entre ellas la densidad, resistencia a la compresión y tracción, módulo de Young, relación de Poisson, módulo de Bulk o compresibilidad, velocidad de la onda longitudinal, porosidad y la fricción interna.

4.15. Recomendaciones

- Determinar y analizar la energía empleada en la mezcla explosiva para que, de esta manera, se pueda ejecutar el diseño adecuado de una malla de perforación y voladura en operaciones mineras.
- Utilizar modelos matemáticos contextualizando los parámetros que inciden en la geometría del disparo, la cual presenta condiciones par-

ticulares relacionadas con el esparcimiento de las rocas para el diseño y elaboración de la malla de perforación y voladura para que haya una distribución adecuada y uniforme de la energía para optimizar y reducir los costos producidos por la perforación.

- Para el estudio de las mezclas de los explosivos, se recomienda una señalización pertinente de la tecnología de explosivos, los cuales manejan conceptos que se relacionan con la deflagración, detonación y explosión, dado que estos son aspectos a considerar para el proceso de diseño y análisis de los modelos matemáticos.
- Emplear el modelo presentado con respecto a las operaciones mineras en el empleo de la malla de perforación y voladuras, dado que presenta resultados óptimos de voladura con el beneficio adicional que tiene mínimos daños en el ambiente generados por la contaminación ambiental y porque, además, reduce el riesgo de daños a la vida del trabajador de las minas.

CAPÍTULO V

CONSIDERACIONES FINALES

Tras el recorrido de las bases teóricas contenidas en los capítulos I, II y III, se destaca la necesidad del empleo de los modelos matemáticos para el desarrollo del diseño de las mallas de perforación y voladura. Para ello, se realizó un análisis mediante la medición de la energía, temperatura, entre otras variables relacionadas con la potencia relativa por volumen de la mezcla explosiva. En el capítulo IV, mediante un estudio riguroso, se resalta las determinaciones y los análisis en referencia a la energía empleada en la mezcla explosiva para poder ejecutar el diseño adecuado de una malla de perforación y voladura.

Uno de los aspectos a considerar es el desarrollo de las ecuaciones o modelos matemáticos para medir y determinar los resultados favorables o desfavorables en el crecimiento de la empresa minera. Asimismo, se resalta el empleo de dichas ecuaciones que manifiestan una relación determinante con otras ciencias que también las emplean para resultados estadísticos que necesitan una medición, tal es el caso de la mayoría de las ciencias, dado que cumple una función de cuantificación. Los modelos matemáticos más

utilizados son aquellos que permiten el desarrollo, la obtención y, en consecuencia, la explicación de determinados parámetros que se designan para el momento del análisis; es decir, para la medición de los datos.

Por otro lado, se resalta la importancia de la aplicación de modelos matemáticos para optimizar y reducir los costos producidos por la perforación, ya que —mediante la implementación de estas medidas— el diseño y ejecución de mallas de perforación serían más eficaces. Sin la elaboración de los modelos matemáticos, no se obtendrían resultados favorables que beneficien el diseño de las mallas de perforación y voladura.

Análogamente, para señalar los aspectos de cada valor que equivale a determinado lineamiento reemplazado en la ecuación, se requiere la comprensión de la variable de la geometría del disparo, la cual presenta condiciones particulares relacionadas con el esparcimiento de las rocas. Mediante el empleo de dicho modelo, se permite realizar el diseño de voladura en relación al espaciamiento y el *burden*. Ambos aspectos se encuentran vinculados para el diseño y elaboración de la malla de perforación y voladura. Asimismo, Beltran (2018) señaló que el espaciamiento en relación con el *burden* también se conoce como el diseño inicial para perforación, cuya finalidad es lograr la distribución adecuada y uniforme de la energía.

Así como destacó Giraldo (2020), las voladuras presentan efectos negativos que pueden minimizarse con la aplicación de explosivos en condiciones adecuadas para cada tipo de roca y su cantidad, pues la potencia se regula con base a las características del terreno. De acuerdo con lo indicado por el autor, se enfatiza que las modificaciones de las explosiones pueden beneficiar un mejor desempeño en la fragmentación de las rocas, debido a que todos los terrenos no presentan una misma composición. Asimismo, se acentúa que los aspectos que determina los efectos negativos de la voladura se relacionan con la composición y condiciones de los tipos de rocas que pueden existir en el terreno de exploración.

En consecuencia, se recalca que la potencia relativa por volumen, sin el cambio del diámetro, es importante para determinar las nuevas dimensiones relacionadas con el *burden* y el espaciamiento. Esto se ejecuta mediante la aplicación de varios explosivos de una potencia radioactiva. El fin de esta aplicación es evitar las afecciones en el ambiente, lo cual perjudicaría la producción de las comunidades aledañas.

El modelo de Crosby y Pinco podría ser modificado para el uso de dos cargas explosivas distintas, en lugar de una columna con ANFO. Sin embargo, en las minas del territorio peruano no se utiliza dicho modelo. En este sentido, se propone que el cambio de las dimensiones de la malla de perforación y voladura sean realizadas mediante el uso de la ecuación de Crosby y Pinco.

Ante esta exposición, se evidencia la necesidad de un diseño de mallas de perforación y voladuras; por ende, el empleo de los modelos matemáticos para estructurar y desarrollar acciones que no perjudiquen la producción de las empresas mineras, menos el espacio donde se desarrolla la labor.

Asimismo, se asume la relevancia de las potencias que se ejecutan en el uso de los taladros para el cumplimiento de la perforación del lugar. Este aspecto se aclara en líneas posteriores a esta, pues requiere una mayor precisión y descripción de la relevancia de la potencia en el diseño de las mallas de perforación y voladuras. De acuerdo con lo que se postuló en primera instancia, las energías de mezclas explosivas que se producen se reconocen como un recurso de optimización para el diseño e implementación de las mallas de perforación. Además, para tal caso, se requiere poseer conocimientos de los resultados obtenidos por medio de la malla predecesora o si incluso había presencia o ausencia de dichas mallas.

Por otra parte, el diseño de mallas de perforación presenta una importancia para la obtención de rocas fragmentadas de acuerdo con la calidad de aquellas y con las dimensiones requeridas de los fragmentos para su posterior tratamiento metalúrgico. Por lo consiguiente, todas las medidas y aspectos

conseguidos y analizados permiten determinar los lineamientos que se deben seguir para ejecutar un adecuado diseño de mallas de perforación que otorguen una eficiente fragmentación de las rocas. Asimismo —como se indicó anteriormente— la energía de las mezclas explosivas desempeña un rol fundamental. Para el desarrollo de estas, se considera pertinente la actualización permanente en la tecnología de explosivos, los cuales manejan conceptos que se relacionan con los procesos de combustión, detonación, explosión, entre otros que involucran el uso adecuado de los explosivos.

El empleo de estos conceptos permite delimitar las nociones respecto a los criterios que se deben considerar para el análisis de los modelos matemáticos que servirán para el diseño correcto de las mallas de perforación y voladura. En primer lugar, la explosión es comprendida como la liberación de energía que se produce por medio de la presión, calor y gases, además del acompañamiento acústico y la fragmentación del cuerpo en el que está. Mientras que, finalmente, en el caso de la detonación, esta se comprende como un fenómeno superficial que se realiza a una velocidad baja. Asimismo, la fragmentación de las rocas también se rige a la presión o volumen en el que se ejecuta la explosión, la cual se vincula con la potencia relativa por volumen (RBS) (Castillejo y Poterico, 2016).

Entendiéndose que la potencia es la cantidad de energía que emana un explosivo, las potencias de las mezclas explosivas pueden manifestarse de dos maneras: absolutas y relativas. Asimismo, estas potencias presentan una composición de acuerdo con el peso y el volumen. Mientras que la potencia absoluta es la medida de la energía que se encuentra en los explosivos, la potencia relativa es la medida de la energía que se encuentra en un explosivo al ser comparado con la medida de ANFO. Las designaciones señaladas se estructuran de acuerdo con el volumen o peso de la potencia que sea empleada. Siguiendo con el lineamiento de las potencias, Giraldo (2020) señaló lo siguiente:

“El explosivo de mayor aplicación actualmente es el ANFO, cuya potencia puede regularse de acuerdo al tipo de terreno, variando el porcentaje de aluminio en su formulación” (p. 96).

Por consiguiente, tras la aplicación de los modelos matemáticos, el ANFO puede modificarse para obtener resultados que favorezcan el entorno, así como la economía de la empresa minera. Desde esta premisa, se recalca la relevancia y relación que los modelos matemáticos poseen para la estructuración y diseño de la malla de perforación, ya que tanto la voladura como la perforación puede desencadenar efectos negativos en vínculo con las condiciones y realidades del tipo de rocas. Asimismo, mediante el empleo de la malla de perforación y voladuras, se destaca la trascendencia de manifestar resultados óptimos de voladura, los cuales se vinculan con los mínimos daños (ambiente y seguridad del personal).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abril, E. (2018). *Optimización de las mallas de perforación y voladura utilizando la energía producida por las mezclas explosivas de mina subterránea en la Compañía Minera Ares S. A. C.* [tesis de bachillerato, Universidad Continental]. Repositorio Institucional Continental. <https://bit.ly/2SNpsOM>
- Afonso-Bambi, A., Montero-Peña, J. y Watson-Quesada, R. (2019). Indicadores de sostenibilidad para la industria minera extractiva en Uige, Angola. *Minería y Geología*, 35(2), 233-251. <https://bit.ly/2TpDmXv>
- Aguirre, A. (2016). *Optimización de parámetros de tronadura en función de explosivos de alta energía en sociedad contractual minera El Abra* [tesis de titulación, Universidad de Chile]. Repositorio Universidad de Chile. <https://bit.ly/3yjLUhq>
- Alcázar, P. (2017). *Optimización del proceso de voladura implementando emulsión gasificable en mina de hierro* [tesis de licenciatura, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann]. Repositorio UNJBG. <https://bit.ly/3wgeTBw>

- Aranda, P. y Vásquez, A. (2020). *Gestión de la seguridad en las operaciones de perforación y voladura en minería subterránea: una revisión sistemática entre 2010-2019* [tesis de bachillerato, Universidad Privada del Norte]. Repositorio UPN. <https://bit.ly/2UfQTB7>
- Atlas Powder Company (1987). *Explosives and Rock Blasting*. Field Technical Operations.
- Ayamamani, C. (2016). *Diseño de perforación y voladura y su incidencia en los costos unitarios en Balcón III de la corporación minera Ananea S. A.* [tesis de titulación, Universidad Nacional del Antiplano]. Repositorio UNAP. <https://bit.ly/2UE4FO4>
- Beltran, K. (2018). *Optimización de explotación del Tajo 427-Cuerpo Chiara 445 usando taladros largos paralelos – CIA Minera Casapalca S. A. – 2017* [tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio UNCP. <https://bit.ly/3xhBfnx>
- Bernaola, J., Castilla, J. y Herrera, J. (2013). *Perforación y voladura de rocas en minería*. Universidad Politécnica de Madrid. <https://bit.ly/3Apo71l>
- Bravo, I. (2018). *Estudio de vibraciones inducidas por tronadura en Minera Spence* [tesis de titulación, Universidad de Chile]. Repositorio UCH. <https://bit.ly/30zSjKs>
- Calderón, S., Iglesias, E. y Medina, H. (2020). Aplicación de la energía libre de Gibbs y la fugacidad de Lewis al estudio de explosiones mecánicas usando ecuaciones cúbicas de estado. *Revista Ciencia e Ingeniería*, 41(2), 187-196. <https://bit.ly/3lS06eL>

- Cardona, A. (2017). *Estudio teórico y experimental de la velocidad de deflagración turbulenta del metano a condiciones subatmosféricas* [tesis de maestría, Universidad de Antioquía]. Repositorio institucional. <https://bit.ly/3htgqyA>
- Carrasco, C. (2016). *La optimización de las operaciones unitarias de perforación y voladura, mejora el rendimiento económico en la unidad minera San Andrés - MARSA 2014* [tesis de titulación, Universidad Nacional Micaela Bastidas Apurímac]. Repositorio UNAMBA. <https://bit.ly/3dunF8d>
- Castellar-Ortega, G., Mendoza, E., Angulo, E., Paula, Z., Rosso, M. y Jaramillo, J. (2019). Equilibrio, cinética y termodinámica de la adsorción del colorante DB-86 sobre carbón activado de la cáscara de yuca. *Revista MVZ Córdoba*, 24(2), 7231-7246. <https://doi.org/10.21897/rmvz.1700>
- Castillejo, R. y Poterico, J. (2016). Empleo de un agente de voladura de baja velocidad de detonación VOD (velocity of detonation) en voladura de carbón antracita. *Aporte Santiaguino*, 9(1), 27-36. <https://doi.org/10.32911/as.2016.v9.n1.210>
- Castillo, J., Fernández, T., Alcántara, D. y Rodríguez, I. (2017). Comportamiento microestructural de uniones de materiales disímiles obtenidas por explosión. *Minería y Geología*, 33(2), 204-218. <https://bit.ly/2Ui9Xyw>
- Chambi, E. (2018). *Evaluación técnica – económica y ecológica de la aplicación de emulsión gasificable en lugar de Heavy Anfo Tradicional en Mina Apumay* [tesis de titulación, Universidad Nacional de San Agustín]. Repositorio UNSA. <https://bit.ly/2TxNLAD>
- Chambi, J. (2019). *Análisis y Optimización de las Operaciones de Perforación y Voladura para el Desarrollo de Estándares Técnicos e Incremento de Utilidades en*

- Mina Tambomayo [tesis de titulación, Universidad Nacional de San Agustín]. Repositorio UNSA. <https://bit.ly/3y5XVHi>
- Córdova, N. (2004). *Geomecánica y Voladura*. DCR Ingenieros S.R. Ltda.
- De Prada, F. (2020). La asombrosa química de las deflagraciones controladas. *Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 17(2), 2401. https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2020.v17.i2.2401
- Durán, R. (2016). Vida y materia: Bergson y la termodinámica clásica. *VERITAS*, 34, 75-91. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-92732016000100004>
- Enriquez, R. (2019). *Ventajas Técnico - Económicas del heavy anfo 46 en reemplazo del anfo, en la voladura de rocas de tipo iib – cuarcitas, en la mina El Toro – Huamachuco* [tesis de titulación, Universidad Nacional de Trujillo]. Repositorio UNT. <https://bit.ly/3qLMYE5>
- Escriba, E. (2018). *Utilización de emulsión gasificable en voladura para optimizar factores ambientales, técnicos y económicos en Minería a Tajo Abierto* [tesis de titulación, Universidad Nacional de San Agustín]. Repositorio UNAS. <https://bit.ly/3As2RrO>
- EXSA. (2020). *Manual práctico de voladura*. EXSA.
- Feijoo, P., Bustamante, E. y Guillén, C. (2021). Curvas granulométricas como alternativa para la caracterización del material rocoso en minería. *Athenea*, 2(3), 28-39. <https://doi.org/10.47460/athenea.v2i3.14>
- Ferrando, I., Albarracín, L., Gallart, C., García-Raffi, L. y Gorgorió, N. (2017). Análisis de los modelos matemáticos producidos durante la resolución de problemas de Fermi. *Bolema*, 31(57), 220-242. <http://dx.doi.org/10.1590/1980-4415v31n57a11>

- Fis, Y. (2017). Evaluación minero-ambiental del yacimiento polimetálico Castellano en la provincia de Pinar del Río. *Ciencia & Futuro*, 7(2), 23-44. <https://bit.ly/3xjgxna>
- Foladori, G. y Robles, R. (2019). Una revisión histórica de la automatización de la minería en México. *Revista Latinoamericana de Economía*, 50(197). <https://doi.org/10.22201/iiec.20078951e.2019.197.64750>
- Fonseca, J., Rincón, J., Alvarado, H. y Murcia, L. (2021). Influencia de los sistemas de iniciación en la entrega de energía de los explosivos pentolita, PTX-2 y composición B. *BISTUA*, 19(1), 58-63. <https://bit.ly/3xcJS2v>
- Fuentes, R., Molina, J. y Blandón, A. (2018). Parámetros explosivos para muestras de carbón (Antioquia, Colombia). *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 17(33), 19-38. <https://doi.org/10.22395/rium.v17n33a1>
- García, E. (2019). *Aplicación de la energía producida por las mezclas explosivas en el diseño de mallas de perforación y voladura en Compañía Minera Antamina – año 2017* [tesis de titulación, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo]. Repositorio UNASAM. <https://bit.ly/3x7yC7L>
- García, J. (2018). Aplicación de ecuaciones de estado cúbicas y desarrollo de correlaciones numéricas para el cálculo de propiedades termodinámicas en saturación de refrigerantes para su uso en microcontroladores. *Maskana*, 9(2), 75-88. <https://doi.org/10.18537/mskn.09.02.09>
- García, M., Ávila, J., Rincón, J. y Fonseca, J. (2021). Estudio por simulación de un radio de acción de la posible explosión de una caldera, mediante el uso de un material explosivo. *Bistua*, 19(1), 51-57. <https://bit.ly/364U7dc>

- Giraldo, E. (2016). Identificación de factores para reducir accidentes por desprendimiento de rocas en minería subterránea. *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 19(37). <https://bit.ly/3dnYvIv>
- Giraldo, E. (2020). Formulación óptima de anfo aluminizado para voladuras en minería subterránea. *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 23(46), 95-102. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v23i46.19185>
- Giraldo-Villada, O. y León-Castillo, J. (2020). Empleo de explosivos en proyectos de minería aurífera. En E. Chaparro-Ávila y L. Güiza-Suárez (eds.), *Mitos y realidades de la minería aurífera en Colombia* (pp. 183-232). Editorial Universidad del Rosario. <https://doi.org/10.12804/tj9789587844887>
- Gómez, W. (2016). *Diseño de malla de perforación basado en la energía de mezclas explosivas, para optimizar costos de perforación y voladura en Aruntani SAC 2015* [tesis de titulación, Universidad Nacional de Moquegua]. Repositorio UNAM. <https://bit.ly/2UnM4G4>
- Guerrero, M. (2016). Riesgos operacionales en proyectos de minería subterránea. *Teknos*, 16(1), 19-27. <https://doi.org/10.25044/25392190.803>
- Hagan, T. (1979). Rock breakage by explosives. *Acta Astronautica*, 6(3-4), 329-340. [https://doi.org/10.1016/0094-5765\(79\)90102-4](https://doi.org/10.1016/0094-5765(79)90102-4)
- Hernández, G., Legrá, A., Garcell-Puyans, L. y Martínez-Rojas, R. (2016). Evaluación de un modelo de polidispersión para la caracterización granulométrica de la pulpa laterítica y el cieno carbonatado. *Minería y Geología*, 32(3), 47-59. <https://bit.ly/2UpUa0A>

- Hernández, G., Legrá, A., Ramírez, B. y Pérez, L. (2017). Modelos matemáticos para pronosticar parámetros reológicos de hidromezclas latéricas. *Mine-ría y Geología*, 33(4), 380-395. <https://bit.ly/3whrhku>
- Hernández, G., Legrá, A., Rojas, L., Ramírez, B. y Mariño, A. (2018). Modelos matemáticos de parámetros reológicos y su influencia en el sistema de bombeo de fluidos no newtonianos. *Revista Colombiana de Química*, 47(3), 52-60. <http://dx.doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v47n3.70248>
- Huacho, M. (2018). *Diseño de mallas de perforación y voladura para mejorar avances en Nv. 12 – veta Oroya - Compañía Minera Casapalca S.A.* [tesis de titulación, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio UNCP. <https://bit.ly/3ntlF5B>
- Huamani, M. y Huamani, F. (2019). *Optimización de la fragmentación en zonas de minera con la aplicación de explosivos de alta energía, para reducción de costos, en el proceso de chancado y molienda en el tajo Ferrobamba, las Bambas 2017* [tesis de titulación, Universidad Nacional Micaela Bastidas Apurímac]. Repositorio UNAMBA. <https://bit.ly/3qA6XJY>
- Iglesias, L. (2016). *Estudio técnico – económico del uso de la mezcla explosiva Quantex 73 en la unidad minera Toquepala – SPCC* [tesis de titulación, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann]. Repositorio UNJBG. <https://bit.ly/3x9uLHb>
- Jaramillo, J. (2017). *Estudio de las inestabilidades de combustión de un motor de encendido provocado trabajando con altas relaciones de compresión* [tesis de maestría, Universidad de Antioquía]. Repositorio Institucional. <https://bit.ly/3xcsLOf>

- Katsabanis, P. (2000). *Explosives Technology*. Department of Mining Engineering; Queen University.
- Mamani, W. (2020). *Optimización de costos de producción mediante la evaluación de las operaciones de perforación y voladura en la galería N12 de la empresa minera SOTRAMI S.A – Ayacucho* [tesis de titulación, Universidad Nacional del Antiplano]. Repositorio UNAP. <https://bit.ly/2UL20Cq>
- Martínez-Vargas, A. (2017). Optimizing grade-control drillhole spacing with conditional simulation. *Minería y Geología*, 33(1), 1-12. <https://bit.ly/3x-4JMdo>
- Medinaceli, R. (2018). Búsqueda de modelos matemáticos para la determinación del espaciamiento óptimo del muestreo sistemático en depósitos minerales tipo veta. *Revista de Medio Ambiente y Minería*, 4, 68-74. <https://bit.ly/3jEJmq9>
- Mendoza, L. (2018). *Termodinámica. Notas de clase*. Editorial de la Universidad de La Plata. <https://bit.ly/3hqAO3u>
- Moreno, D. (2017). Determinación estadística de patrones de fragmentación por explosión interna en tanques cilíndricos presurizados horizontales, a partir de simulaciones numéricas. *Universidad de los Andes*, 1-25. <https://bit.ly/3qNDY5M>
- Mucuta-Lito, H., Cartaya-Pires, M. y Watson-Quesada, R. (2020). Evaluación de estabilidad en taludes del yacimiento Castellano mediante el cálculo del factor de seguridad. *Minería y Geología*, 36(4), 441-450. <https://bit.ly/3qAHWyp>

- Mundaca, Ó. (2019). Predicción de fragmentación ajustada y Burden en función de una granulometría requerida. *Ingeopress*, 277, 24-33. <https://bit.ly/2ThDIVF>
- Naranjo-Sierra, E., Alvaran-Echeverri, M. y Zapata-Cardona, E. (2016). Análisis metalogenético preliminar del depósito vetiforme en la mina La Ye, Antioquia, Colombia: características geológicas, isotópicas y estructurales. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 33(3), 316-328. <https://bit.ly/2U-XyjhH>
- Navarro, C. y Tito, F. (2010). Modelo matemático en la simulación de procesos de flotación. *Revista Metalúrgica*, 29, 46-50. <https://bit.ly/3AiGgxU>
- Ortega-Ramos, C., Franco-Bonfante, T., Blandón-Montes, A. y Molina-Escobar, J. (2018). Evaluación del riesgo de explosividad del gas metano en minería subterránea de carbón, caso de la cuenca del Sinifaná, Colombia. *Boletín de Geología*, 40(1), 83-91. <http://dx.doi.org/10.18273/revbol.v40n1-2018005>
- Ortega-Ramos, C., Jaramillo-Gil, A. y Molina-Escobar, J. (2016). Modificación de las mallas de perforación de voladuras a partir del índice de esfuerzo geológico (GSI), caso mina “La Maruja”, Colombia. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 40, 32-38. <https://bit.ly/3A6moOI>
- Palacios, J., Calvo, G., Valero, A. y Valero, A. (2017). *La explotación minera en la Región Andina: un enfoque termodinámico* [sesión de congreso]. I Congreso El Extractivismo en América Latina: Dimensiones Económicas, Sociales, Políticas y Culturales, Sevilla, España. <https://bit.ly/3xbHXLE>
- Peña, M. (2019). Calidad en el cálculo del Burden (B) basado en el modelo matemático de López Jimeno para contribuir en la gestión del riesgo en las

- voladuras, en cantera de roca caliza. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 22(43), 53-58. <https://bit.ly/3qv2gRE>
- Prieto, P., Huete, C. y Vera, M. (2020, 24-26 de noviembre). *Modelado y simulación de ondas expansivas en espacios confinados* [sesión de congreso]. VIII Congreso Nacional de I+D en Defensa y Seguridad, León, España. <https://bit.ly/3jDu9Wr>
- Puche, O., López, R., Ortiz, J. y Mazadiego, L. (2016, 23 a 26 de junio). *El penitente: una profesión trágica de la minería del carbón* [sesión de congreso]. IX Simposio internacional sobre minería y metalurgia históricas en el SW europeo: Nuestras raíces mineras, Madrid, España. <https://bit.ly/3dEvybj>
- Rabbia, O. y Contreras, Y. (2018). *Análisis geológico mineralógico y químico de rocas reactivas yacimiento Río Blanco, Región de Valparaíso, Chile* [tesis de titulación, Universidad de Concepción]. Repositorio UDEC. <https://bit.ly/3AkPwBR>
- Reátegui, F. (2016). Aplicación del modelo de kuz ram y la teoría de daño por vibraciones para el diseño de los parámetros de perforación y voladura. *Véritas*, 17(1), 61-67. <https://bit.ly/3hbdGWI>
- Retirado-Mediaceja, Y., Legrá-Lobaina, A., Laurencio-Alfonso, H., Gilbert-Hernández, A., Zalazar-Oliva, C., Osorio-Laurencio, L. y Gresesqui-Lobaina, E. (2017). Aplicación informática basada en modelos matemáticos del secado natural de la mena laterítica. *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*, 11(2), 102-116. <https://bit.ly/3xfoMk1>
- Ríos, S. (2021, 22 al 26 de marzo). *Evaluación del impacto social y análisis de conflictos socioambientales en un proyecto minero en el sur del Perú usando mo-*

- delos matemáticos* [sesión de congreso]. XII Congreso Internacional de Prospectores y Exploradores – proEXPLO, Modalidad virtual. <https://bit.ly/3ynsrMK>
- Sánchez, C. (2016). *Estudio de propiedades físicas del silicio mediante el uso de la termodinámica estadística* [tesis de maestría, Universidad de Sevilla]. Depósito de Investigación Universidad de Sevilla. <https://bit.ly/3xftKNX>
- Sánchez-Escalona, A., Góngora-Leyva, E. y Zalazar-Oliva, C. (2018). Predicción de la resistencia térmica de las incrustaciones en los enfriadores de ácido sulfhídrico. *Minería y Geología*, 34(3), 348-362. <https://bit.ly/2V4Emkt>
- Sanchidrian, J. (1986). *Desarrollo de un método para el cálculo de las características teóricas de los explosivos* [tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Madrid]. Archivo Digital de la Universidad Politécnica de Madrid. <http://oa.upm.es/384/>
- Vera-Dávila, A., Delgado-Ariza, J. y Sepúlveda-Mora, S. (2018). Validación del modelo matemático de un panel solar empleando la herramienta Simulink de Matlab. *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación*, 8(2), 343-356. <https://doi.org/10.19053/20278306.v8.n2.2018.7972>
- Vidal, M., Guinivart, R., Baldoquín, W., Valdivia, N. y Morales, W. (2020). Modelos matemáticos para el control epidemiológico. *Educación Médica Superior*, 34(2), 1-15. <https://bit.ly/3ApMVXm>
- Yana, D. (2019). *Optimización de operaciones unitarias en perforación y voladura en el frente de crucero 890 NV 1665 de la Unidad Minera Esperanza – Arequipa* [tesis de titulación, Universidad Nacional del Antiplano]. Repositorio UNAP. <https://bit.ly/3qyiU2R>

