

# Predicción y evaluación de la granulometría de la pila de material obtenido en las voladuras en la mina polimetálica Castellano, Pinar del Río, Cuba

**Alberto Paulo Bunga**

[pbalberto@ismm.edu.cu](mailto:pbalberto@ismm.edu.cu)

**José Antonio Otaño Noguel**

**Roberto Watson Quesada**

Universidad de Moa (Cuba)

**Resumen:** Se definieron los métodos de predicción y evaluación para las voladuras realizadas en la mina polimetálica Castellano, que se adaptan a las características y complejidades del yacimiento. Para ello se tuvo en cuenta las características estructurales del macizo, las propiedades de las rocas, de las sustancias explosivas empleadas y el diseño de los patrones de voladura. Tras los estudios realizados de viabilidades de los diferentes métodos de predicción de voladura existente se aplicó el método de predicción KUZ-RAM para la mina y para su evaluación el software WIPFRAG. En las dos pruebas realizadas se obtuvo una convergencia superior a 95 % entre las curvas obtenidas, lo que implica un margen de error inferior de 5 %. Se comprueba que hay correspondencia entre la predicción y el resultado, por lo que se considera que el método de predicción KUZ-RAM es apropiado para la predicción de la granulometría a obtener en las voladuras en la mina polimetálica castellano con los patrones empleados.

**Palabras clave:** Granulometría; predicción; fragmentación; voladura; KUZ-RAM.

## **Prediction and assessment of material gradation obtained through blasting in Polymetallic Castellano mine, Pinar del Río, Cuba**

**Abstract:** Prediction and evaluation methods were defined for blasting in “Castellano” polymetallic mine, which adapt to the characteristics and complexities of the Deposit. For which the properties of the rocks, the structural characteristics of the massif, the explosive substances used and the blasting patterns design were taken into account. After feasibility studies of different existing blasting prediction methods, KUZ-RAM prediction method was applied for the mine and WIPFRAG software for its evaluation. A convergence greater than 95% was obtained in the two tests performed between the curves, which imply a margin of error less than 5%. It is considered that the KUZ-RAM prediction method is appropriate for predicting grading to be obtained through blasting in Castellano polymetallic mine with the standards used. It was found correspondence between prediction and the result, why it is considered that KUZ-RAM prediction method is appropriate for predicting grading to be obtained through blasting in Castellano polymetallic mine with the patterns used.

**Keywords:** Gradation; prediction; fragmentation; blasting; KUZ-RAM.

## Introducción

En las canteras y minas a cielo abierto donde se emplean voladuras para el arranque de las rocas, el costo global y la eficiencia general de los procesos tecnológicos dependen de la calidad con que se desarrollen los procesos de perforación y voladura. El costo de los procesos tecnológicos de excavación-carga del mineral fragmentado y su transportación disminuye considerablemente con el incremento de la calidad de la fragmentación de las rocas.

El costo total de la producción del mineral en las minas alcanza su valor mínimo cuando se obtienen resultados racionales en la fragmentación. Según los estudios realizados por expertos uno de los procesos que tiene una marcada incidencia en esta actividad es el arranque con perforación y voladura, el cual ocupa el 15 % y 25 % de los costos totales de la unidad minera. El control sistemático de los parámetros de perforación y voladura conllevará a la obtención de los resultados racionales durante el proceso de fragmentación de las rocas con voladuras por parte de la entidad minera.

No se conoce una teoría que explique el movimiento de fracturamiento de las rocas, aplicable a cualquier condición del par explosivo-roca que haya sido completamente aceptada. Las teorías de fragmentación han sido formuladas teniendo en cuenta los años de experiencia sobre la base de prueba y error, pruebas de laboratorio, investigaciones de terreno y modelos matemáticos y físicos adaptados de otras áreas de la ciencia.

En el transcurso del tiempo varios autores y compañías mineras han propuesto sus criterios para las predicciones y evaluaciones de los resultados de las voladuras a partir de las modelaciones matemáticas como: Gilvarry (1961), Da Gama (1974), Ouchterlony (2005), Kuznetsov (1973), Otaño (1998), Palacios (2017) y Linares (2018).

La voladura de rocas se ha considerado hasta épocas recientes como un arte nacido de la pericia y experiencia, pero en la actualidad este procedimiento se ha transformado en una técnica basada en principios científicos surgidos del conocimiento de las acciones ejercidas por los explosivos, los mecanismos de rotura de la roca y propiedades geomecánicas de los macizos rocosos, los modelos de predicción de fragmentación y las técnicas de evaluación de esta.

Por esta razón, después que se realiza la voladura es necesario realizar una evaluación de esta con ayuda de instrumentación y tecnología moderna (software minero y

modelaciones matemática), ya que su interpretación permitirá introducir modificaciones sucesivas en las variables de diseño de las siguientes voladuras, lo cual constituye una etapa básica dentro del proceso de racionalización.

El Proyecto Castellano se encuentra ubicado aproximadamente a 3 km de la localidad de Santa Lucía, dentro de los límites del municipio de Minas de Matahambre, en la provincia de Pinar del Río, Cuba. Se trata de un yacimiento polimetálico (Figuras 1 y 2).

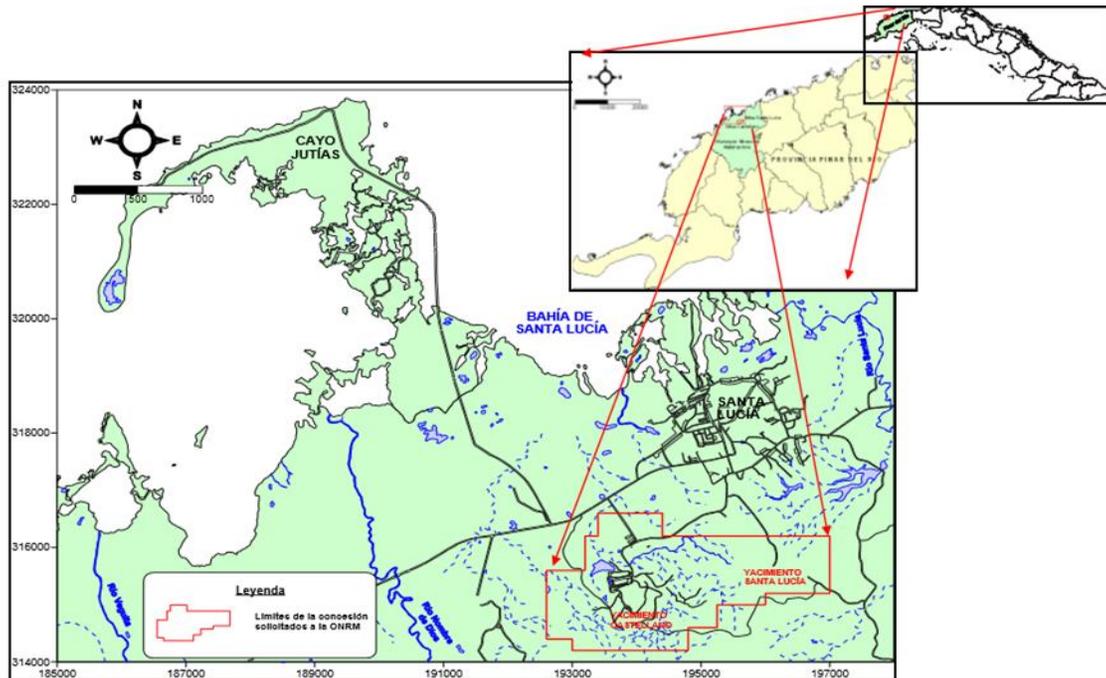


Figura 1. Ubicación geográfica de la mina polimetálica Castellano (Emincar, 2015).



Figura 2. Mina polimetálica Castellano. Proyecto de la concesión de explotación y procesamientos polimetálico Castellano, Pinar de Rio, (Emincar, 2015).

Se emplea el modo de explotación a cielo abierto y se realiza el arranque de las menas y rocas con el método de perforación y voladura. En la actualidad la mina carece de metodología para la estimación de la distribución granulométrica del volumen del mineral arrancado, que permita racionalizar los distintos procesos tecnológicos subsecuentes como acarreo, carga y transporte del material, así como las operaciones de conminución en la planta de preparación mecánica.

Para definir los métodos de predicción y evaluación de la granulometría de la pila de material obtenido en las voladuras se realizó la investigación que se presenta en este trabajo, para lo cual se partió de las características estructurales del macizo, de las propiedades de las rocas, de las sustancias explosivas empleadas, de los patrones de voladura utilizados y los métodos de predicción existentes. Posteriormente y debido a las diferencias estructurales del macizo en el territorio de la mina, esta se dividió en dos locaciones (frente I, II), tal como se muestra en la Figura 2.

## **Materiales y métodos**

### **Metodología empleada para el desarrollo de la investigación**

- 1) Determinación de las propiedades de las rocas, del macizo rocoso y de las sustancias explosivas.
- 2) Identificación de los parámetros de los patrones de voladura.

- 3) Elección del método de predicción y evaluación de la granulometría de la pila de material obtenido en las voladuras.
- 4) Determinación de las distribuciones granulométricas de la pila del material volado por los dos métodos seleccionados, respectivamente.

### **Propiedades de las rocas y del macizo rocoso de los frentes de arranque de la mina**

Los dos frentes de arranque que comprenden la mina (Figura 2) están formados por una variedad litológica compleja, donde se destacan principalmente intercalaciones de rocas encajantes como: arenisca consolidada y compacta, arenisca brechosa fracturada, pizarra y limonita, con una litología formada por secciones intercaladas de 1 m a 10 m; se observan bloques de rocas secos y ligeramente húmedas con afluencia de agua regular. Los bloques son anisótropo, el espaciamiento entre plano de grietas varía de 0,5 m a 1 m y las aberturas de las grietas de 0,1 cm a 2 cm, con una persistencia que varía 1 m a 5 m. Se observan grietas sin relleno y rellenas con óxido de hierro. Los sistemas de discontinuidades de las familias de grietas S1, S2 y S3 tienen las siguientes orientaciones 46/233, 71/059, 61/054.

Tabla 1. Propiedades físico-mecánicas de la variedad litológica

<b>Propiedades de las rocas</b>	<b>Pizarra</b>	<b>Arenisca</b>	<b>Mena</b>
Resistencia a la compresión seca (MPa)	30,60	61,5	73,80
Resistencia a la compresión saturada, (MPa)	0,50	0,70	
Coefficiente de fricción (grado)	35,00	34,00	
Cohesión (MPa)	0,56	2,06	
Módulo de elasticidad (GPa)	8,00	2,99	
Resistencia a la tracción, (MPa)	0,05	0,51	
Coefficiente de esponjamiento		1,59	1,45

### **Sustancias explosivas y accesorios empleadas en las voladuras realizadas**

Para la realización de las voladuras en los frentes de arranque se utilizaron como sustancia explosiva Senatel Magnafrac como carga de fondo (Emulsión encartuchada) y Centragold como carga de columna (Emulsión bombéale) y como accesorios para las voladuras se utilizarán Exel TD (Conector Unidireccional), Exel Handidet, Exel Connectadet y Cordex.

## Diseño de los patrones de voladura utilizados

Los patrones de voladura empleados fueron confeccionados por los especialistas de la empresa minera para los diferentes frentes.

En todas las voladuras experimentales realizadas se mantuvieron constantes los siguientes parámetros:

- Altura del banco: 6 m
- Diámetro de perforación: 115 m
- Longitud de perforación: 6,9 m
- Relleno: 2,1 m
- Longitud de sobredotación: 0,9 m
- Mallas de perforación: (3 x 3,5 m) y (3,5 x 4 m)
- Densidad Senatel Magnafrag: 1,20 t/m<sup>3</sup>
- Densidad Central: 1,4 t/m<sup>3</sup>
- Longitud de carga de fondo: 0,40 m
- Longitud carga de columna: 4,40 m
- Gasto específico: 0,98 kg/m<sup>3</sup>

## Método de predicción y evaluación de voladura

De los métodos existentes de predicción de la granulometría de las rocas a obtener en las voladuras se eligió para su investigación en la mina Castellano el método KUZ-RAM (Cunningham, 1987, citado por López-Jimeno, 1988), atendiendo a los elementos que contempla este método: las propiedades físico-mecánico y las características estructurales del macizo rocoso, las propiedades de las sustancias explosivas y los parámetros del diseño de los patrones de voladura.

EL método KUZ-RAM consta de una serie de fórmulas desarrolladas desde 1933 que reunió Cunningham en 1987 y las adaptó a un modelo, que consiste en tres fórmulas:

- 1) Ecuación de Rosin Rammler (1933)

$$R_x = 1 - e^{-0,0963 * \left(\frac{x}{x_m}\right)^n}$$

## 2) Ecuación de Kuznetsov

$$x_m = A * k^{-0,8} Q^{\frac{1}{5}} * \left(\frac{115}{RWS}\right)^{\frac{19}{20}}$$

## 3) Cunningham (1987)

$$n = \left(\frac{LO}{H}\right) * \left(2.2 - 14 * \frac{B}{d}\right) * \left(\frac{1 + \frac{S}{B}}{2}\right)^{0,5} * \left(1 - \frac{W}{B}\right)$$

Por los buenos resultados y facilidades para su manejo este método ha tenido una gran difusión a nivel mundial.

### Método de evaluación de voladura

De los métodos de evaluación de la granulometría de las rocas obtenidas en las voladuras se eligió el método de procesamiento de imagen WIPFRAG (Palangio, Palangio & Maerz, 2005) por las siguientes razones: rapidez en la toma de datos, no interfiere en la producción, se puede analizar varias imágenes sin mayor costo y es de fácil aplicación.

Para determinar el grado de confiabilidad de los métodos de predicción y evaluación de las voladuras para la mina Castellano se determinó el número de voladuras necesarias para cada frente de arranque mediante el método de muestras pequeñas, utilizando la distribución t de Student, en la cual se determinaron, de forma convencional, dos voladuras de pruebas.

## Determinación de las distribuciones granulométricas de la pila de material volado por WIPFRAG y KUZ-RAM

### Distribuciones granulométricas por WIPFRAG

Primera voladura (Prueba I)

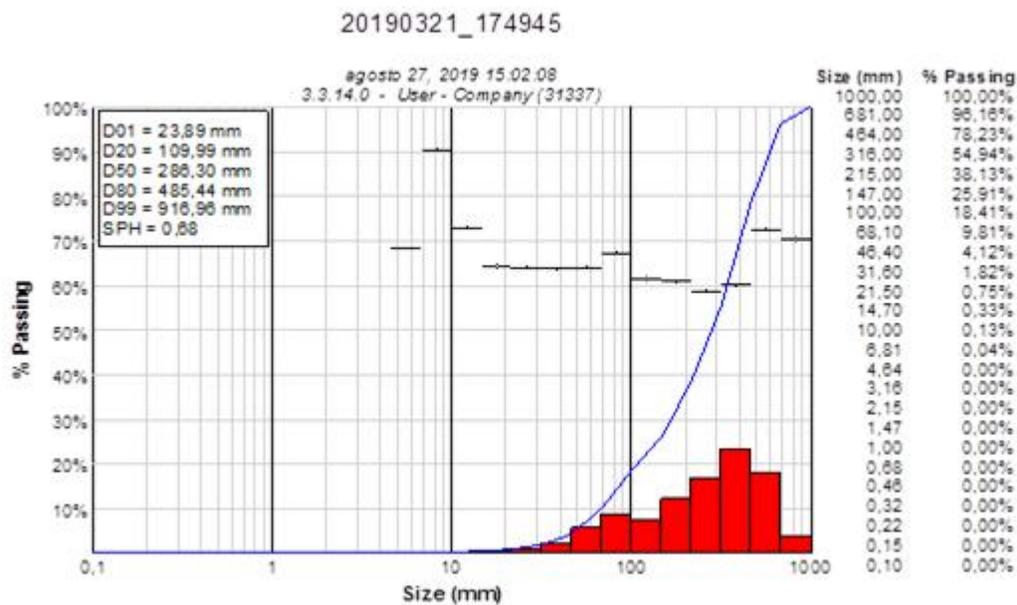


Figura 3. Curva de distribución granulométrica WIPFRAG.

Segunda voladura (prueba II)

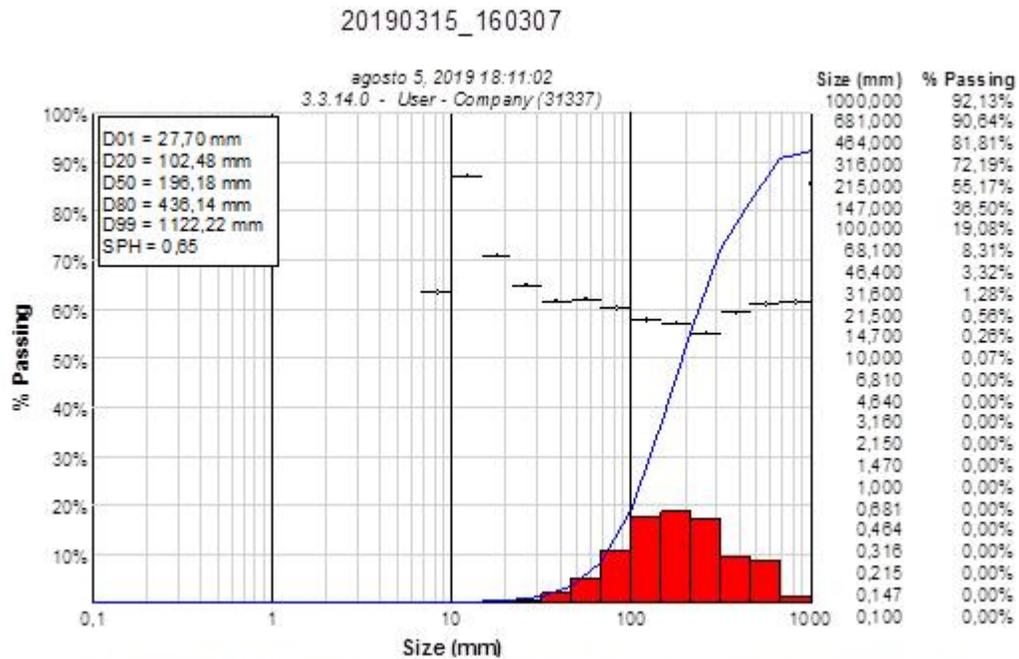


Figura 4. Curva de distribución granulométrica por WIPFRAG.

**Comprobación del grado de convergencia entre las curvas granulométricas obtenidas por WIPFRAG-KUZ-RAM**

**-Frente I (Primera voladura Prueba I)**

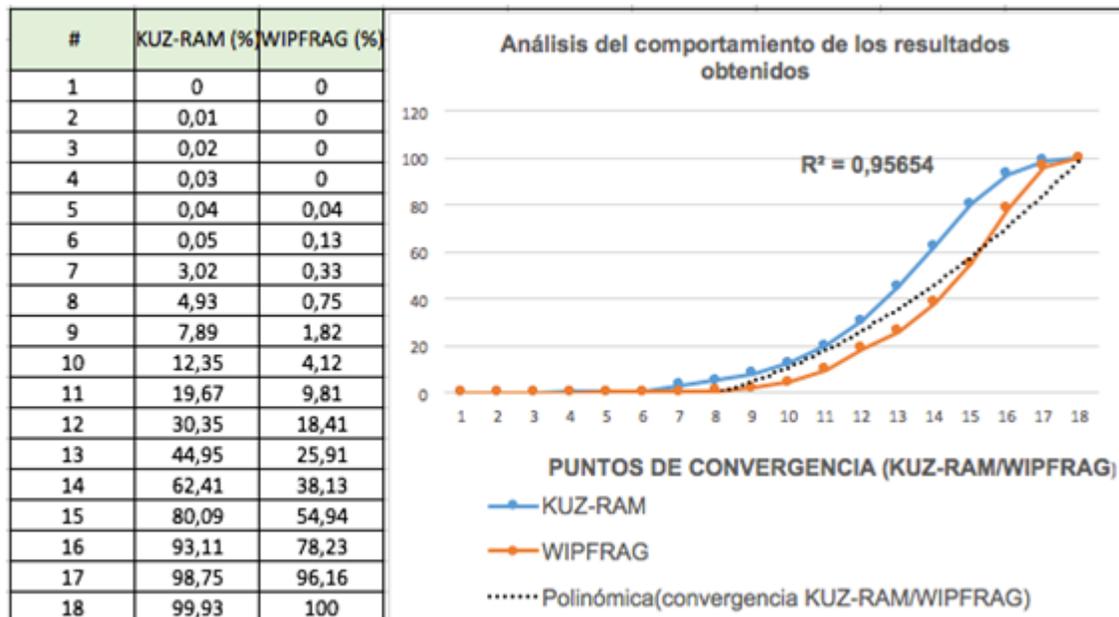


Figura 5. Convergencia entre las curvas de distribución granulométricas KUZ-RAM / WIPFRAG.

**-Frente II (segunda voladura prueba II)**

**Voladura I**

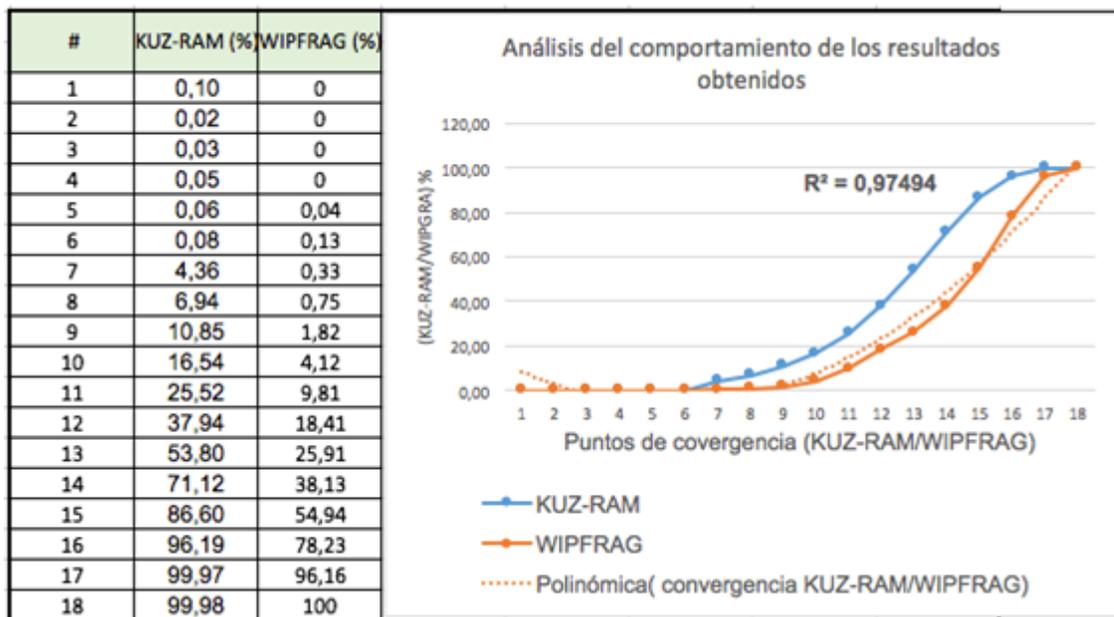


Figura 6. Convergencia entre las curvas de distribución granulométricas KUZ.

Una vez determinadas las curvas de distribución granulométrica del montón del material volado en los frentes de arranque de la mina Castellanos por el método KUZ-RAM y WIPFRAG, se observó la similitud del comportamiento de las curvas de distribución granulométrica obtenidas, lo que permite afirmar que son estadísticamente iguales. La convergencia entre las mismas es superior a 95 %, como se puede observar en las Figuras 5 y 6, con un margen de error inferior a 5 %, lo que permite afirmar que los métodos de predicción y evaluación definidos para la mina Castellana son adecuados.

### **Conclusión**

Las voladuras experimentales realizadas en los dos frentes de arranque de la mina Castellana permiten analizar el comportamiento de las curvas de distribución granulométrica de pila del material volado obtenidas por KUZ-RAM y WIPFRAG. Se comprueba que hay una similitud de las mismas, con un grado de convergencia superior a 95 %, lo cual permite definir que el modelo de predicción de las voladuras para la mina polimetálica Castellano es el KUZ-RAM y para la evaluación de voladuras de las mismas se puede emplear el procesamiento de imágenes con el software WIPFRAG.

### **Referencias bibliográficas**

- DA GAMA, C. D. 1974. The size of the largest fragment in rock blasting. In: Proceedings 3rd Congress International Society of Rock Mechanics. Denver. Vol. 2, p. 1343-1348.
- EMINCAR. 2015. Proyecto de la concesión de explotación y procesamientos polimetálico Castellano. Pinar de Rio.
- GILVARRY, J. J. 1961. Fracture of brittle solids. I. Distribution function for fragment size in single fracture (theoretical). *Journal of Applied Physics* 32(3): 391-399.
- KUZNETSOV, V. M. 1973. The mean diameter of the fragments formed by blasting rock. *Soviet Mining* 9(2): 144-148.
- LINARES, E. L. R. 2018. Un nuevo enfoque predictivo de la fragmentación en la Voladura de Rocas. *Industrial data* 21(1): 17-26.

LÓPEZ-JIMENO, C. 1988. La gestión de recursos mineros no energéticos y el medio ambiente. En: *Geología ambiental* (pp. 69-84). Instituto Tecnológico Geominero de España, Madrid.

OTAÑO, J. 1998. *Fragmentación de rocas con explosivos*. Félix Varela, La Habana.

OUCHTERLONY, F. 2005. The Swebrec© function: linking fragmentation by blasting and crushing. *Mining Technology* 114(1): 29-44.

PALACIOS, L. D. 2017. *Validación del modelo Kuz-Ram para optimizar la voladura en túnel*. Tesis de diploma. Ciudad Universitaria, Cd. México. Consultado: 12 feb 2019.

PALANGIO, T. W.; PALANGIO, T. C. & MAERZ, N. 2005. Advanced automatic optical blast fragmentation sizing and tracking. In: Brighton Conference Proceedings 2005 (p. 259-267). European Federation of Explosives Engineers. ISBN 0-9550290-0-7.