

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

Optimización del proceso de Trituración primario en una cantera
de caliza

PROYECTO DE TITULACIÓN

Previo la obtención del Título de:

Magíster en Minas

Mención Mineralurgia y Metalurgia Extractiva

Presentado por:

Kleber Jonnathan Puma Zaruma

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2025

Dedicatoria

Dedico este trabajo a Abigail Ávila,
la que me inspira día a día a no
rendirme, mi motor interno que con
sus palabras y acciones permitió que
este proyecto pueda ser culminado.

Agradecimientos

Agradezco profundamente a mis
padres, Esther y Kleber, su sacrificio
hoy permite que su hijo haya llegado
hasta donde está, a mi hermana por
su constante apoyo y a Samith
Botero por permitirme desarrollar
mi proyecto en su Cantera.

Declaración Expresa

Yo, Kleber Jonnathan Puma Zaruma acuerdo y reconozco que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al autor que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 18 de noviembre del 2025.

Kleber Jonnathan Puma Zaruma

Evaluadores

Kenny Fernando Escobar Segovia, M.Sc.

Profesor de Materia

Juan María Menéndez Aguado, Ph.D.

Tutor de proyecto

Resumen

El proyecto optimiza el proceso de trituración primaria en una cantera de caliza, con el objetivo de mejorar la eficiencia energética y económica y el rendimiento de trituración, mediante la generación de modelos descriptivos y predictivos de trituración primaria, generando curvas de costos para su evaluación. La hipótesis plantea que el control de la granulometría de alimentación incide directamente en los costos y el rendimiento global del proceso. La justificación se fundamenta en la necesidad de reducir costos energéticos y operativos en la Cantera. El proyecto se desarrolló mediante la recopilación de datos en campo, fotogrametría de voladuras con dron DJI Mavic 3 Enterprise y procesamiento con inteligencia artificial mediante el software Strayos. Se caracterizó la maquinaria de trituración y se simuló el proceso en el software Modsim, aplicando la Ley de Bond para el análisis energético y de costos. Los principales resultados mostraron que una granulometría de voladura con D80 cercano a 65 cm optimiza el equilibrio entre consumo de explosivos y energía de trituración, mejorando la eficiencia y reduciendo costos. En conclusión, la optimización del proceso de trituración primaria permite aumentar la productividad y eficiencia energética, garantizando una operación más rentable y sostenible en la cantera de caliza.

Palabras Clave: Granulometría, Ley de Bond, Consumo energético, Eficiencia operativa.

Abstract

The project optimizes the primary crushing process in a limestone quarry, aiming to improve energy and economic efficiency as well as crushing performance through the development of descriptive and predictive models for primary crushing and the generation of cost curves for later evaluation. The hypothesis states that controlling the particle size feed directly affects the overall process costs and performance. The justification is based on the need to reduce energy and operational costs within the quarry. The project was developed through field data collection, blast photogrammetry using a DJI Mavic 3 Enterprise drone, and artificial intelligence processing with the Strayos software. The crushing equipment was characterized, and the process was simulated using the Modsim software, applying Bond's Law for energy and cost analysis. The main results showed that a blasting particle size distribution with a D80 close to 65 cm optimizes the balance between explosive consumption and crushing energy, improving efficiency, and reducing costs. In conclusion, optimizing the primary crushing process increases productivity and energy efficiency, ensuring a more profitable and sustainable operation in the limestone quarry.

Keywords: *Particle size distribution, Bond's law, Energy consumption, Operational efficiency.*

ÍNDICE GENERAL

Resumen	I
<i>Abstract</i>	II
ABREVIATURAS	V
SIMBOLOGÍA	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Descripción del problema	2
1.2 Justificación del problema	3
1.3 Objetivos	4
1.3.1 Objetivo General	4
1.3.2 Objetivos Específicos	4
1.4 Marco teórico	5
1.4.1 La cantera	5
1.4.2 Circuito de trituración de la cantera	5
1.4.3 La extracción de materia prima para procesos industriales	6
1.5 ¿Qué es la conminución?	7
1.5.1 Leyes de Conminución	8
1.6 Trituración	8
1.6.1 Trituración primaria	9
1.7 Fragmentación	10
1.7.1 Modelo de fragmentación de Evertsson	10
CAPÍTULO 2	11
2. METODOLOGÍA	11

	IV
2.1 Obtención de datos en campo	11
2.1.1 Granulometría de voladuras	11
2.1.2 Investigación de la maquinaria	11
2.1.3 Simulación con Modsim	11
2.1.4 Análisis de costos	14
CAPÍTULO 3	15
3. RESULTADOS	15
3.1 Granulometrías de voladuras, simulación de rendimiento y costos de voladuras.	15
3.2 Granulometría de la clasificación	17
3.3 Granulometría producto de trituración	19
3.4 Costos	21
CAPÍTULO 4	25
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	25
4.1 Conclusiones	25
4.2 Recomendaciones	26
BIBLIOGRAFÍA	27

ABREVIATURAS

CSS	Closed Side Set
D80	Tamaño del 80% del pasante
F80	Tamaño del 80% del pasante de alimentación
P80	Tamaño del 80% del pasante del producto
OSS	Open Side Set
ROM	Run of Ore Mine

SIMBOLOGÍA

mm	Milímetros
m	Metros
cm	Centímetros
kg	Kilogramos
Ton	Toneladas métricas
h	Horas
min	Minutos
kW	Kilowatios
kWh	Kilovatio hora

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Circuito de trituración simplificado de la cantera estudiada.....	6
Figura 2	Tipos de trituradoras de mandíbulas	9
Figura 3	Circuito de trituración primario de la Cantera	12
Figura 4	Curvas granulométricas de las voladuras estudiadas	17
Figura 5	Granulometría de la alimentación a la trituradora	18
Figura 6	Granulometría del flujo inferior de la criba	19
Figura 7	Curvas granulométricas para las distintas configuraciones de OSS. .	20
Figura 8	Producto final combinado de la criba y trituradora.....	21
Figura 9	Curvas de los costos de las voladuras	22
Figura 10	Curvas de costos de trituración para distintos OSS	23
Figura 11	Curvas combinadas de costos de Voladura y Trituración.....	24

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Rangos de tamaño en la trituración	8
Tabla 2	Parámetros del sistema de trituración.....	13
Tabla 3	Granulometrías de las voladuras, producción de la Criba y Trituradora y costos asociados a cada voladura.....	15
Tabla 4	Granulometría del sobretamaño de la criba.....	17

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

La reducción de tamaño de rocas, también llamada conminución, permite a través de los distintos procesos de trituración, clasificación y/o molienda, obtener un tamaño de roca adecuado para el tratamiento aguas abajo en los procesos industriales y, en el caso de minas de materiales para la construcción, producir un material de tamaño controlado, también llamado agregado . Para ello, se usan máquinas muy robustas que permiten mediante la aplicación de fuerzas a las partículas (Rao, 2016), romper el material desde un tamaño de alimentación dado hacia un tamaño de producto específico (Lynch & Rowland, 2015).

Esta conminución se divide esencialmente en dos etapas; trituración y molienda. En la etapa de trituración, las máquinas reductoras de tamaño reciben el material volado en la mina y lo reducen a través de dos (o hasta tres) etapas de chancado al tamaño requerido para los procesos subsecuentes (Rao, 2016).

El enorme tamaño de estas máquinas hace que, al funcionar, se consuman cantidades muy grandes de energía, y a la postre, esto hace que la conminución termine participando en un porcentaje mayoritario del costo de la operación.

Por ello, diversos modelos matemáticos para el entendimiento del consumo energético en las máquinas y circuitos de trituración se han desarrollado, basados más en la observación que en el entendimiento del movimiento de partículas (Herbst et al., 2003) conocidos como leyes de conminución. Por otra parte, se han desarrollado también modelos predictivos de fragmentación como el modelo de Evertsson, que permiten en conjunto con las leyes de conminución, tener un mayor control de la eficiencia tanto energética como operativa del circuito de trituración. (Guimaraes et al., 2007) muestra en

su trabajo cómo la producción de finos aumenta el consumo energético, (Fladvad & Onnela, 2020) muestran a través de pruebas en campo y laboratorio, las relaciones entre los parámetros de alimentación y de salida de en los agregados, mientras que (Johansson et al., 2017) desarrollaron un modelo para la compresión energética, predicción granulométrica y capacidad de una trituradora de mandíbulas.

Por ello, el presente trabajo desarrolla modelos descriptivos y predictivos del proceso de trituración primaria en una cantera de caliza, usando Modsim como software de modelado, caracterizando la roca de trituración desde la etapa de voladura en campo, generando la información necesaria para alimentar los modelos predictivos de fragmentación y consumo energético, con el fin de comprender las relaciones morfológicas y físicas de la roca de alimentación con la calidad de la producción de agregados, su granulometría y el consumo energético de la cantera, buscando optimizar la producción y los costos productivos.

1.1 Descripción del problema

Un proyecto se sostiene en el tiempo por sus costos y entender la influencia directa de sus procesos unitarios permite gestionar adecuadamente los recursos y optimizar el uso de dichos recursos para obtener el máximo rédito económico. En el sector de agregados, es necesario comprender que el sistema minado-triturado es un sistema integral, ya que primero se debe minar para luego triturar.

Por otra parte, si la granulometría de entrada no es controlada, la trituradora invertirá más tiempo y energía rompiendo una sola partícula si las rocas son muy grandes y de encontrarse con rocas de sobretamaño (mayor al de la boca de entrada) será necesario romper de otra manera o retirar la roca, lo que induce a pérdidas significativas de tiempo y energía.

Sin embargo, el exceso de finos en la alimentación puede sobrecargar la banda transportadora en la salida de la trituradora y generar taponamientos en los chutes de

descarga. Y, si la trituración genera más finos de lo esperado también hará que se genere un gasto innecesario de energía triturando.

Es decir, al no tener un control de los parámetros mencionados, la operación se entorpece, reduciendo el rendimiento general, generando costos elevados energéticos al parar y arrancar equipos, aumentando el riesgo de daños a equipos e infraestructura, así como los riesgos laborales por trabajos en espacios confinados y altura.

Actualmente, en la cantera, el material volado es enviado directamente hacia la tolva de alimentación, siendo el único parámetro de entrada el tamaño de alimentación (<1m), existen problemas por granulometría de salida (sobretamaño), atoramientos en chutes y ocasionalmente bajos rendimientos de trituración. Si bien, se cuenta con un modelo descriptivo de la trituración, este solamente toma en cuenta el rendimiento del sistema, es decir, cuánto tonelaje pasa por cada etapa de trituración, omitiendo su granulometría de entrada y salida y no se tiene un entendimiento sobre el consumo de la trituradora –hasta que se paga la factura de consumo-.

Tampoco se cuenta con un modelo predictivo que permita estimar la producción y el costo de trituración para el material que se caracteriza de manera muy simplificada en campo, haciendo que, cuando haya fallas, se actúe una vez se presente dicha falla.

1.2 Justificación del problema

La mayor parte de los costos en las operaciones de canteras a cielo abierto ocurren en los procesos de trituración y molienda (Gill, 1991; Tosun & Konak, 2015) y, además de esta implicación económica del proceso, la trituración representa el punto de partida para los procesos industriales subsecuentes y, de no realizarse de manera óptima puede representar serios cuellos de botella que, a la larga, entorpecen el proceso industrial en general. Por ello, resulta necesario comprender y optimizar la reducción de tamaño de roca desde la voladura

hasta su etapa final de trituración para mejorar la productividad de la cantera, reducir costos energéticos, desgaste de maquinaria y las implicaciones inherentes a estos aspectos.

En sentido, esta investigación aporta a través de la caracterización en campo de los parámetros del material triturado, de la maquinaria usada y de los modelos descriptivos y predictivos de la producción, granulometría y consumo energético, mejoras significativas para no solamente la cantera sino también para los procesos industriales subsecuentes de la planta. Por otra parte, se busca que la metodología, técnicas de caracterización y modelos desarrollados sean replicados en otras canteras, buscando mejorar la industria de agregados en el país y el mundo.

El proyecto es viable partiendo del hecho que la instrumentación para la caracterización en campo hace uso de herramientas de bajo costo -fotografías digitales, software, manuales e información bibliográfica- y los modelos descriptivos y predictivos pueden retroalimentarse diariamente, haciendo que el tiempo de ejecución y evaluación del proyecto sean cortos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Optimizar los procesos de trituración primaria y secundaria en una cantera de caliza a través de la generación de modelos descriptivos y predictivos para mejorar en el rendimiento diario de trituración.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Desarrollar un modelo predictivo del consumo energético en base a la ley de Bond para predecir los consumos energéticos con las diferentes condiciones de entrada de material en la trituradora.

2. Determinar la influencia de la granulometría de alimentación al circuito de trituración en base al rendimiento de la criba y trituradora.
3. Aproximar el punto máximo de equilibrio para el costo de producción de la cantera a través de curvas de costos y rendimientos.

1.4 Marco teórico

1.4.1 La cantera

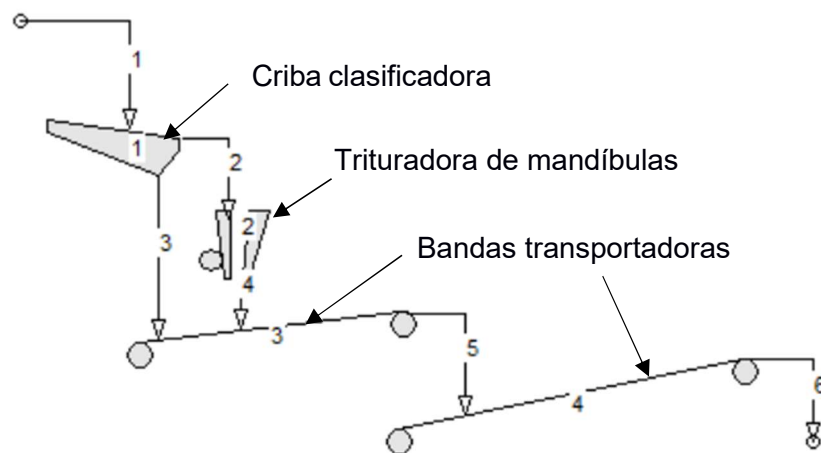
La cantera en estudio se dedica a la explotación de piedra caliza, la reducción de tamaño inicia con la voladura de los macizos rocosos, pasa por un circuito de trituración primario que alimenta a un secundario, que finalmente se almacena en un coliseo de stock para la posterior molienda. Esta cantera se encuentra localizada en la Parroquia Chongón, en el km 18 de Vía a la Costa, Guayaquil, Ecuador.

1.4.2 Circuito de trituración de la cantera

La cantera posee un circuito de trituración de dos etapas; primaria y secundaria. En la etapa primaria, el material se alimenta desde la mina hacia la criba, la cual envía el underflow hacia una banda transportadora, mientras que el overflow alimenta a la trituradora primaria que es una trituradora de mandíbulas, cuya salida alimenta a la misma banda en descarga la criba, la cual junta ambos productos y descarga a una pila de Stock que luego alimenta al circuito de trituración secundario. Esto se resume en la **Figura 1**.

Figura 1

Circuito de trituración simplificado de la cantera estudiada



1.4.3 La extracción de materia prima para procesos industriales

Prácticamente todo lo que usamos se compone de materiales extraídos de la Tierra (Casper, 2007), conocidos como materia prima, base para la manufactura de los productos que luego usamos. La actividad necesaria para la extracción de esta materia prima es la Minería, que son, justamente, junto con la agricultura las principales actividades industriales para la civilización humana (Hartman, 1987).

1.4.3.1 La minería

La extracción mineral se lleva a cabo en depósitos minerales, los cuales generalmente, a través de varios procesos de estimación de reservas y estudios de prefactibilidad y factibilidad se clasificaron como probados o medidos (JORC, 2012). Esta extracción se puede realizar en dos grandes métodos de excavación: Minería Subterránea y Minería a Cielo Abierto (Abzalov, 2016).

1.4.3.2 Minería a Cielo Abierto

En la minería a cielo abierto, la excavación inicia desde la cota topográfica. Geométricamente, se excavan varios escalones descendentes llamados bancos, con una forma

general final de un cono invertido (Abzalov, 2016). La extracción mineral y de estéril puede realizarse de manera mecánica o con explosivos en una técnica denominada perforación y voladura (Adler & Thompson, 2011).

1.4.3.3 Canteras

Se denominan canteras aquellas minas a cielo abierto que extraen materiales para la construcción (Instituto de Investigación Geológico y Minero [IIGE], 2019) ya sea a través de excavación mecánica o mediante perforación y voladura. Entre los materiales que se incluyen como materiales para la construcción se encuentra la caliza, que a pesar de ser un material blando según la escala de Mohs; dureza 3, es más práctico extraerla mediante el uso de explosivos.

En canteras de agregados, el material volado se envía hacia el circuito de trituración, que empieza con la trituradora primaria, que generalmente es una trituradora de mandíbulas o giratoria (Johansson et al., 2017b), siendo el beneficio de la planta de la cantera afectado directamente por la morfología y resistencia del producto (Yamashita et al., 2021).

1.5 ¿Qué es la conminución?

Es un proceso donde los materiales particulados se reducen a través de voladura, trituración y molienda a los tamaños finales requeridos por los procesos subsiguientes (Herbst et al., 2003). El tamaño al cual las partículas son reducidas está gobernado por (Gill, 1991):

- El tamaño de producto requerido si solamente el dimensionamiento es el objetivo (para el caso de agregados y canteras).
- El tamaño de partículas en una mena, necesario para la liberación mineral.
- La exposición de los granos minerales a disoluciones lixiviantes.

1.5.1 Leyes de Conminución

Son tres las leyes principales que relacionan el consumo energético: **Ley de Rittinger, Ley de Kick y ley de Bond**. En específico, en este trabajo se usó la ley de Bond, ya que esta ley establece que la energía usada para reducir el tamaño de partícula es proporcional a las nuevas superficies que se crean:

$$\frac{E}{m} = W = 10W_i \left[\frac{1}{\sqrt{d_p}} - \frac{1}{\sqrt{d_f}} \right] \quad (1.1)$$

donde:

E es la Potencia (kW), **m** es la tasa de alimentación a la máquina (ton/h), **W** es la potencia (kWh/ton), **dp** es el tamaño del producto por donde pasa el 80% del producto (micrones), **df** es el tamaño de alimentación por donde pasa el 80% de la alimentación (micrones) y **Wi** (kwh/ton) es el índice de trabajo de Bond, característico para distintos materiales.

1.6 Trituración

La trituración es una operación seca que se realiza usualmente entre dos o tres etapas, conocidas como: primaria, secundaria y terciaria y se puede realizar en circuitos abiertos o cerrados, dependiendo del requerimiento de tamaño final (Wills & Finch, 2016). Los valores nominales típicos para la trituración se muestran en la **Tabla 1**.

Tabla 1

Rangos de tamaño en la trituración

	Tamaños nominales de trituración		
	Primaria	Secundaria	Terciaria
Entrada (mm)	1500	100	37
Salida (mm)	100	37	5

Nota. Datos tomados de Wills & Finch (2016)

1.6.1 Trituración primaria

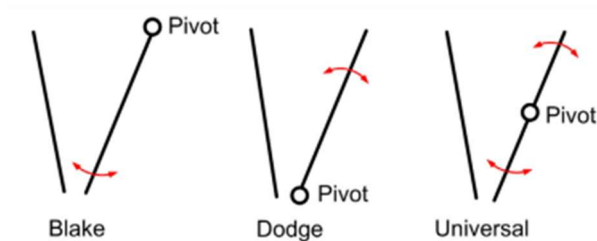
En esta etapa se usan máquinas muy robustas que operan usualmente en circuitos abiertos con cribas. Las máquinas usadas suelen ser trituradoras de mandíbulas y giratorias (Wills & Finch, 2016).

1.6.1.1 Trituradora de mandíbulas

Consiste en un par de placas, una fija y otra móvil que golpea al material usando la placa móvil contra la fija, simulando el movimiento de una mandíbula. Se distinguen tres tipos de trituradoras según el pivote de la placa móvil; Blake, Dodge y Universal (Ver **Figura 2**). La trituradora tipo Blake es la más usada industrialmente, mientras que la trituradora Dodge se usa solamente en laboratorio, la trituradora universal combina el modo de trabajo de las trituradoras Dodge y Blake.

Figura 2

Tipos de trituradoras de mandíbulas



Nota. Figura tomada de (Wills & Finch, 2016)

1.6.1.2 Trituradora tipo Blake

Pueden ser de palanca única o doble. El pivote se encuentra en la parte superior, de manera que el área de alimentación es fija y la descarga variable. La trituradora de palanca única genera un movimiento elíptico de la placa móvil contra la fija y tiene mayor capacidad que la doble.

1.7 Fragmentación

La fragmentación de materiales particulados se logra a través de fuerzas en la superficie de las partículas, creando nuevas partículas y por ende más área superficial total (Rao, 2016).

1.7.1 Modelo de fragmentación de Evertsson

A través del balance de masa, (Evertsson & Bearman, 1997) desarrollaron el modelo de predicción para la fragmentación en trituradoras de impacto que se muestra en la Ecuación.

$$P = f * \left(\prod_{i=1}^N (B_i S_i + (1 - S_i)) \right) \quad (1.2)$$

Donde:

Bi= función de rotura

Si= función de golpeo

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

2.1 Obtención de datos en campo

Se realizaron recorridos en la cantera y en la planta de trituración para la obtención de los datos de las voladuras y las características de las máquinas de trituración y transporte disponibles.

2.1.1 Granulometría de voladuras

Mediante vuelos fotogramétricos usando un Dron DJI Mavic 3 Enterprise se recopiló información alrededor de 9 diferentes voladuras, las fotografías se procesaron con Inteligencia Artificial, usando el software Strayos, determinando las granulometrías de las voladuras mencionadas.

2.1.2 Investigación de la maquinaria

Se recorrieron los edificios de trituración primaria, identificando las diferentes máquinas usadas, así como sus distintas configuraciones. Se buscó su información para determinar los distintos parámetros de las máquinas en sus manuales y catálogos del proveedor.

2.1.3 Simulación con Modsim

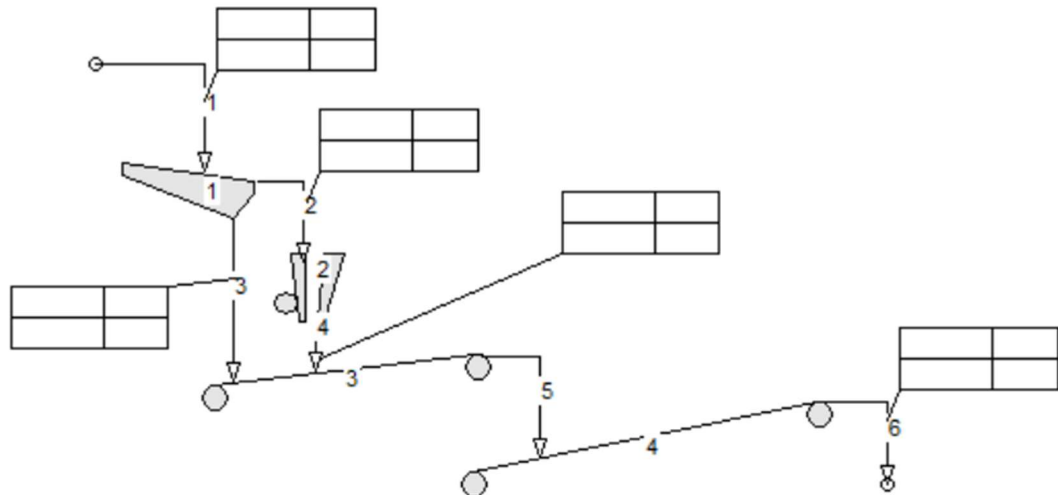
Con la granulometría de alimentación y el conocimiento de la maquinaria usada, sus características y diseño del circuito de trituración, se simuló el proceso en Modsim.

2.1.3.1 Circuito de Trituración

Se encontró un circuito abierto de trituración con una criba, una trituradora de mandíbulas y bandas de transporte. En la **Figura 3** se muestra el circuito de trituración usado en la Cantera.

Figura 3

Circuito de trituración primario de la Cantera



Nota. Los cuadros en blanco se rellenan con la información de tonelaje por hora, porcentaje de sólidos y humedad una vez se corre la simulación. Los números que se observan solamente reflejan el orden de dibujado, no tiene mayor relevancia.

2.1.3.2 Asignación de información del sistema

Dado que el material procesado es Caliza, se consideró al material como uno convencional, con una densidad de 2.4 ton/m³, se asignaron 20 los números de clases y como tamaño máximo de alimentación se indicó 1 m. Por último, se asignó a la corriente de alimentación los valores de las granulometrías de las voladuras y se indicó un flujo másico de 1100 toneladas/hora.

2.1.3.3 Asignación de modelos y parámetros del sistema

Para la criba se seleccionó el modelo CSCR, ya que se basa en la capacidad de manejo de alimentación de la criba, en la **Tabla 2** se muestran los parámetros y sus valores correspondientes asignados.

Tabla 2

Parámetros del sistema de trituración

Parámetros del modelo CSCR	
Tamaño de la malla (cm)	25
Área de apertura (%)	50
Ángulo de Inclinación (°)	10
Agua superficial (%)	0
Longitud de la criba (m)	5
Ancho de la criba (m)	2.4

Para la trituradora se eligió el modelo JAW1, asumiendo una granulometría estándar del producto de trituración, independiente de la granulometría de entrada. Se probaron distintos tamaños de Configuración de lado abierto (Open Side Setting), desde 5" hasta 12" y se asignó un valor de 12 kwh/ton como índice de Bond, un valor típico de las calizas.

Para las bandas transportadoras se eligió el modelo MIXR, en donde no fue necesario incorporar ningún parámetro.

2.1.3.4 Simulación de trituración primaria

Una vez establecido el circuito, los parámetros y modelos se ejecutó la simulación, los datos granulométricos en las distintas corrientes de producto y transporte se graficaron con Excel y se hicieron los análisis correspondientes.

2.1.4 Análisis de costos

2.1.4.1 Voladuras

Para las 9 voladuras se determinó el costo en dólares por tonelada volada y se graficó con el D80 de cada voladura, obteniendo la curva de costos en voladura.

2.1.4.2 Energía de Trituración

Usando la ley de Bond, se obtuvo el consumo energético proyectado y su valor en dólares por tonelada triturada. Se comparó para las distintas configuraciones del OSS y se obtuvieron las curvas de costo de trituración.

2.1.4.3 Costos totales

Los costos por voladuras y por trituración se sumaron y se graficaron, obteniendo la curva de costos total final.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS

3.1 Granulometrías de voladuras, simulación de rendimiento y costos de voladuras.

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra la granulometría obtenida con fotogrametría e Inteligencia Artificial, los parámetros granulométricos: D80, D50 y D10 y se observa como varía la intervención de la criba y la trituradora con el tamaño de las partículas. Es evidente que mientras más fino sea el material (D80 menor) más interviene la criba, mientras que más gruesa sea la alimentación (D80 mayor), mayor es la intervención de la trituradora.

Otro punto importante en la **Tabla 3** es el costo por tonelada de las voladuras. Se puede ver que mientras más explosivo se usó, se tuvieron mayores costos, pero mejoró la fragmentación.

Tabla 3

Granulometrías de las voladuras, producción de la Criba y Trituradora y costos asociados a cada voladura

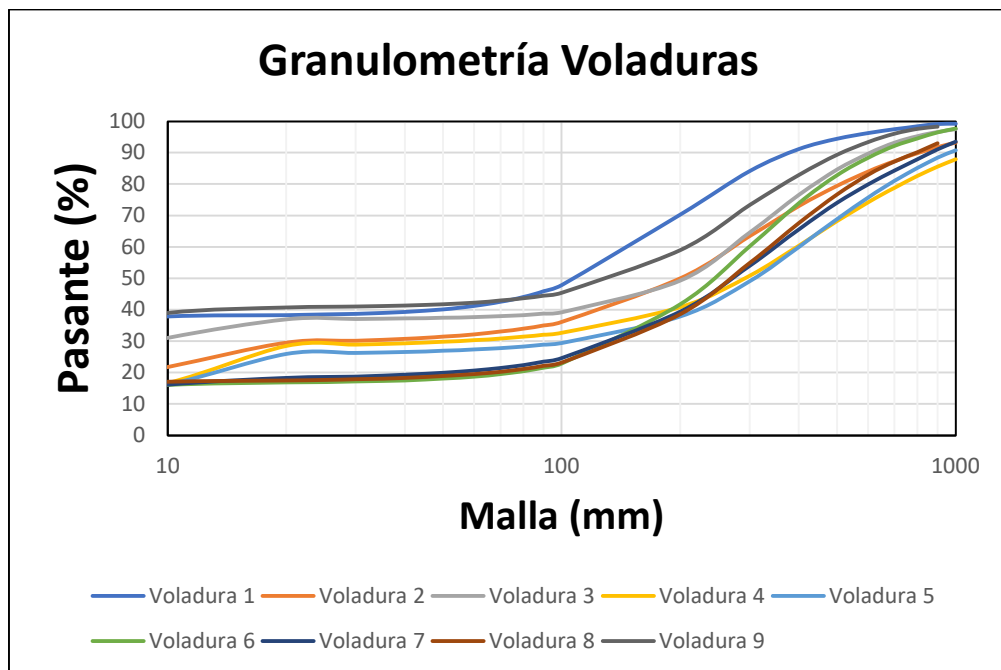
Malla (mm)	Pasante alimentación								
	Voladura 1	Voladura 2	Voladura 3	Voladura 4	Voladura 5	Voladura 6	Voladura 7	Voladura 8	Voladura 9
	Pasante (%)								
5	35.47	14.36	22.14	10.12	9.99	13.62	12.2	16.13	32.51
10	37.9	21.76	31.03	16.7	16.17	16.13	16.19	17.15	38.99
20	38.34	29.59	36.99	28.53	25.95	16.86	18.33	17.51	40.74
30	38.76	30.13	37.11	28.93	26.24	17.16	18.78	17.88	41.01
40	39.37	30.74	37.26	29.37	26.58	17.56	19.32	18.34	41.36
50	40.18	31.43	37.46	29.83	26.96	18.08	19.95	18.9	41.79
60	41.23	32.2	37.7	30.33	27.37	18.73	20.68	19.55	42.32
70	42.54	33.06	37.99	30.87	27.82	19.54	21.51	20.31	42.95
80	44.11	34	38.35	31.44	28.33	20.5	22.45	21.18	43.67
90	45.91	35.02	38.77	32.04	28.88	21.63	23.49	22.16	44.49

100	47.93	36.13	39.27	32.68	29.47	22.94	24.63	23.25	45.42
200	70.33	49.99	49.27	40.86	37.85	41.77	39.44	38.61	59.01
300	84.13	63.44	64.63	50.89	49.12	60.21	54.04	54.92	73.33
400	91.15	73.02	76.59	60.46	60.03	73.93	65.66	67.61	82.97
500	94.47	79.51	84.63	68.24	68.91	82.89	74.08	76.73	89.33
600	96.28	84.04	89.79	74.23	75.77	88.43	79.94	83.07	93.45
700	97.51	87.33	93.21	78.89	81.08	92.18	84.4	87.25	96.07
800	98.42	89.86	95.31	82.6	85.21	94.6	87.97	90.23	97.58
900	99.15	91.81	96.63	85.58	88.4	96.48	91.11	93.01	98.37
1,000	99.3	93.26	97.52	87.96	90.84	97.73	93.51	95.35	98.79
>1000	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Parámetros Granulométricos									
D80 (cm)	26.25	50.9	43.8	72.8	67.8	46.3	60.1	54.68	36.5
D50 (cm)	10.95	20	20.5	29.1	30.8	24.2	27	26.79	14
D10 (cm)	1.4	3	2	5	5	4	4	3.1	2
Producción (ton/h)									
Criba	493	411.5	401	331.8	326	440.5	384.7	394.8	337.2
Trituradora	607	688.5	699	768.2	774	659.5	715.3	705.2	662.8
Costos de Voladura									
Voladura (\$/ton)	0.473	0.322	0.413	0.311	0.330	0.348	0.328	0.340	0.389

La **Figura 4** muestra las curvas granulométricas de las 9 voladuras evaluadas. Todas tienen una característica forma elongada, en la parte fina (<100 mm) el porcentaje de tamaño hasta los 10 mm es prácticamente constante debido a la naturaleza de la medición fotogramétrica. Sin embargo, a partir de los 10 mm, las curvas muestran una buena gradación de partículas, con rangos amplios ideales para la clasificación con criba previo a la trituración.

Figura 4

Curvas granulométricas de las voladuras estudiadas



3.2 Granulometría de la clasificación

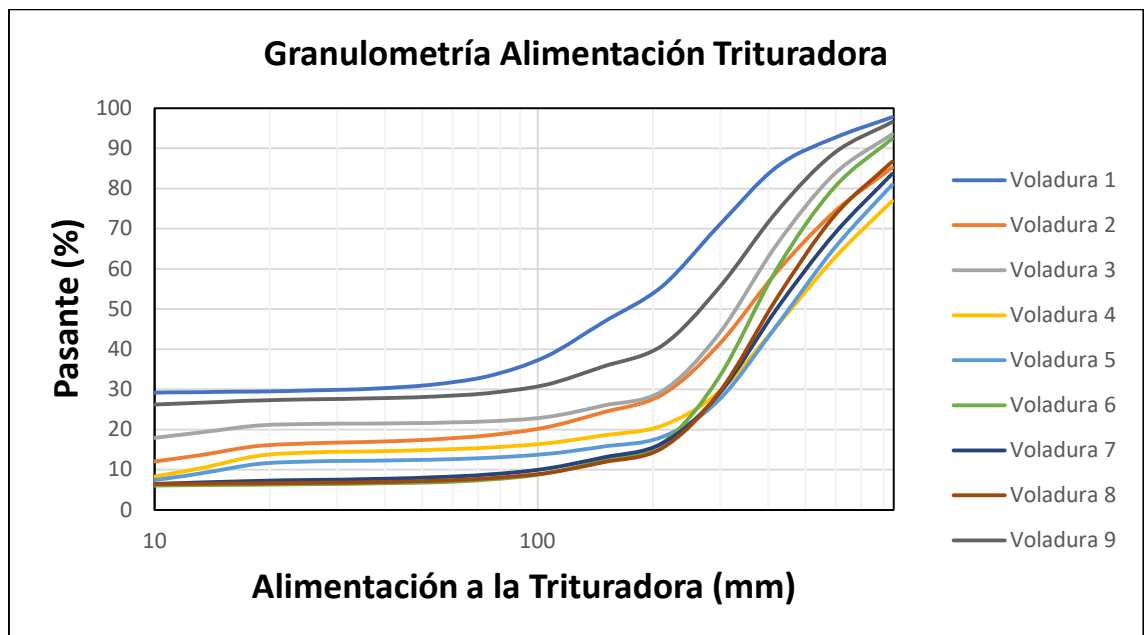
En la **Figura 5** se muestra la simulación del sobretamaño de la criba. En cada una de las curvas la pendiente en la parte gruesa tiene ahora una pendiente muy pronunciada, con los valores tendiendo a ser mayores a 200 mm en la mayor parte del rango de tamaños de partícula, en la **Tabla 4** se observa la distribución de los tamaños y los parámetros granulométricos determinados. Esta parte gruesa es la que se alimenta a la trituradora, muy poco porcentaje de fino cae hacia la trituradora, siendo la criba la que clasifica y retira el mayor porcentaje de finos inicial.

Tabla 4

Granulometría del sobretamaño de la criba

Malla (mm)	Pasante alimentación Trituradora								
	Voladura a 1	Voladura a 2	Voladura a 3	Voladura a 4	Voladura a 5	Voladura a 6	Voladura a 7	Voladura a 8	Voladura a 9
842	97.776	85.17	93.557	76.933	80.97	92.432	83.644	86.7	96.58
594	92.633	74.168	83.573	62.68	65.101	80.287	68.725	73.134	88.835

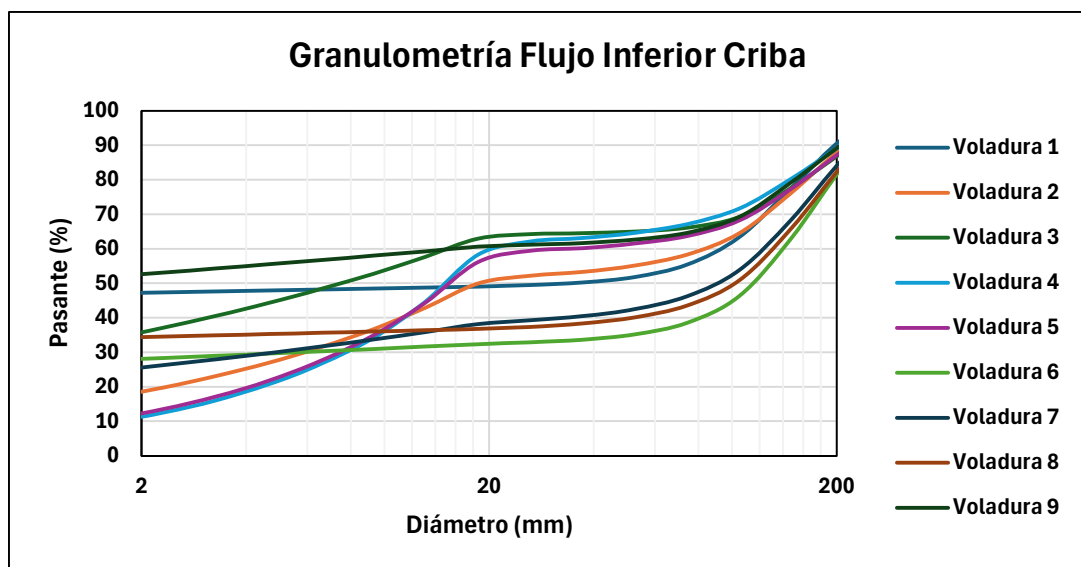
421	85.467	59.296	66.164	45.868	46.026	60.037	50.134	52.741	74.297
297	70.766	41.118	43.795	29.334	27.319	32.908	28.789	29.077	55.215
211	55.662	28.689	29.595	21.002	18.166	16.625	16.569	15.41	40.935
148	46.737	24.321	25.971	18.592	15.815	12.384	13.085	11.928	35.713
105	38.152	20.595	23.139	16.604	13.934	9.102	10.289	9.205	31.213
74.2	33.354	18.618	22.1	15.554	13.018	7.567	8.84	7.886	29.143
52.6	31.213	17.594	21.738	14.975	12.565	6.919	8.122	7.268	28.242
37.1	30.248	17.007	21.562	14.62	12.296	6.616	7.733	6.943	27.794
26.3	29.792	16.657	21.474	14.391	12.135	6.466	7.511	6.766	27.56
18.6	29.538	15.94	21.04	13.498	11.472	6.36	7.293	6.657	27.311
13.1	29.368	13.685	19.282	10.356	9.074	6.221	6.855	6.588	26.719
9.29	29.199	11.712	17.643	7.921	7.137	6.085	6.441	6.52	26.137
6.57	29.031	10.044	16.159	6.174	5.634	5.952	6.054	6.453	25.569
4.64	28.864	8.613	14.8	4.795	4.448	5.821	5.689	6.386	25.014
3.28	28.698	7.386	13.556	3.733	3.511	5.694	5.347	6.32	24.471
2.32	28.532	6.334	12.416	2.906	2.771	5.569	5.025	6.255	23.939
1.64	28.368	5.432	11.371	2.262	2.188	5.447	4.723	6.19	23.42
Parámetros Granulométricos									
D80 (cm)	36.6	70.8	55	91.3	82.2	59.1	76.7	70	47.6
D50 (cm)	10.7	35.5	32.9	46	45.4	37.4	42	40.6	26.3

Figura 5*Granulometría de la alimentación a la trituradora*

La **Figura 6** muestra la granulometría luego de la clasificación de la criba. Los tamaños evidentemente están entre un 80% y 90% por debajo de los 200 mm, dado el tamaño de apertura de la malla (250 mm), las curvas tienen una gradación muy pobre, en excepción del rango superior a los 50 mm.

Figura 6

Granulometría del flujo inferior de la criba

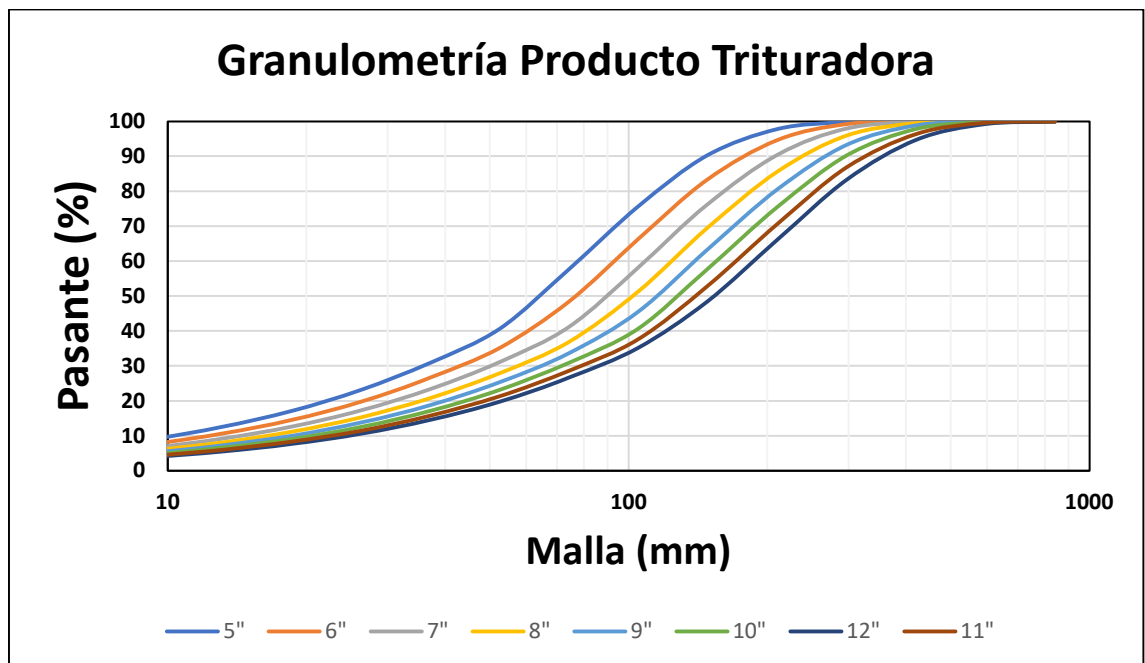


3.3 Granulometría producto de trituración

Dado el modelo seleccionado para modelar la trituradora de mandíbulas, independientemente de la granulometría de alimentación, el tamaño de salida es el mismo para todas las voladuras. En la **Figura 7** se observa como las curvas son mejor gradadas a medida que el OSS es mayor, lo que a su vez permite el paso de tamaños más grandes que podrían afectar los procesos aguas abajo.

Figura 7

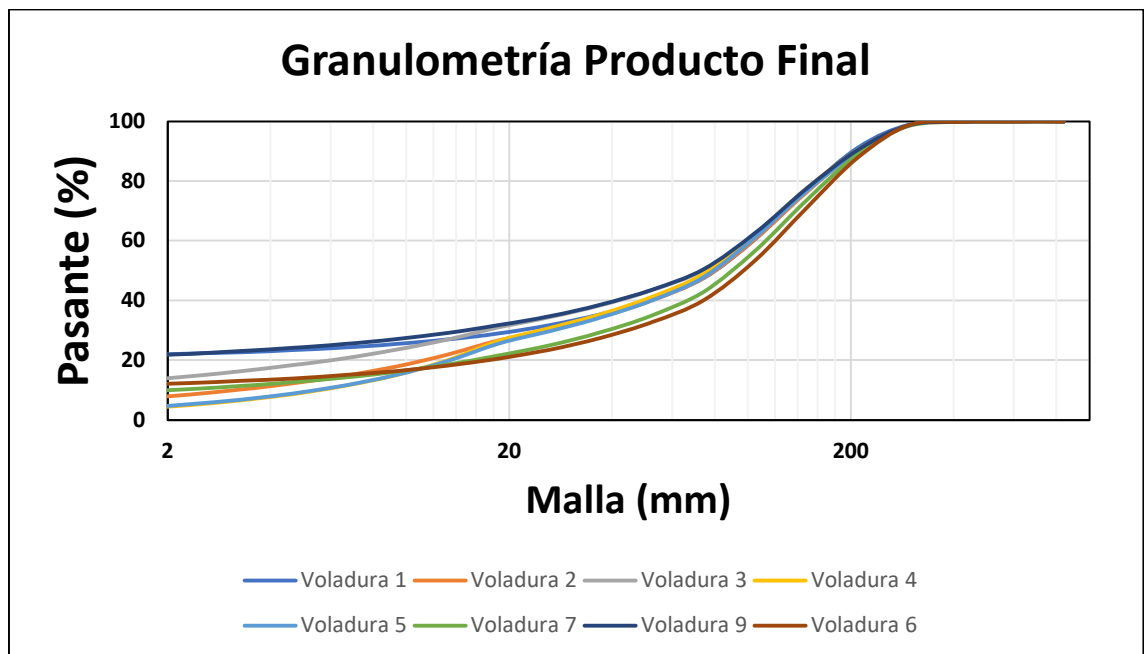
Curvas granulométricas para las distintas configuraciones de OSS.



En la **Figura 8** se puede observar la granulometría combinada entre el producto de la criba y la trituradora para un OSS de 7", la curva se observa bien gradada, con rangos muy amplios de tamaños, pero en un 90% menor a 200 mm.

Figura 8

Producto final combinado de la criba y trituradora

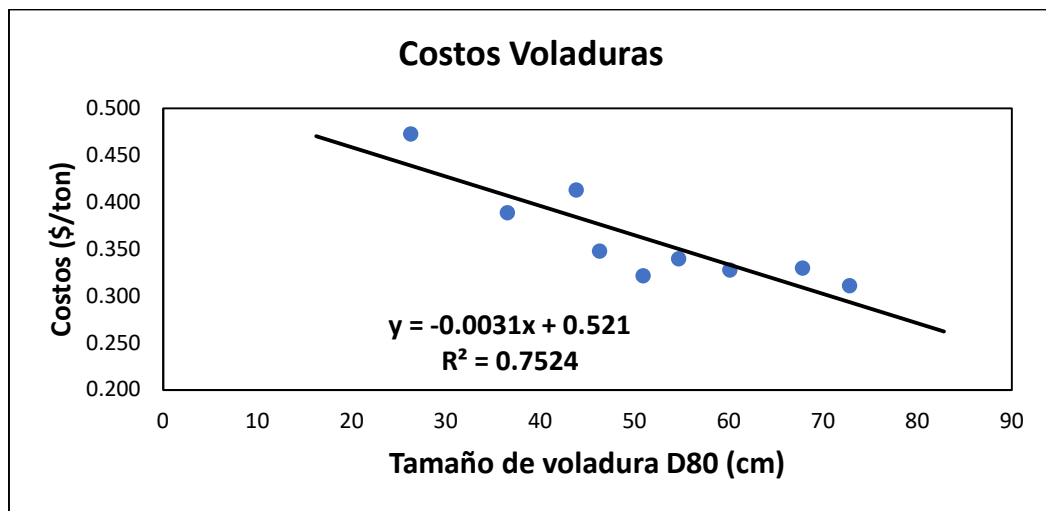


3.4 Costos

En la **Figura 9** se puede observar como a mayor tamaño de partícula, es decir, voladuras más gruesas, menor es el costo de explosivo por tonelada, esto puede lograrse ampliando la malla de perforación o usando columnas explosivas más cortas para reducir la energía, lo que no necesariamente indicaría ser óptimo. Un D80 cercano a 1 m indicaría que el 20% de la voladura sería material sobretamaño, que se debería separar y aplicar algún método de fragmentación secundaria para poder aprovecharlo.

Figura 9

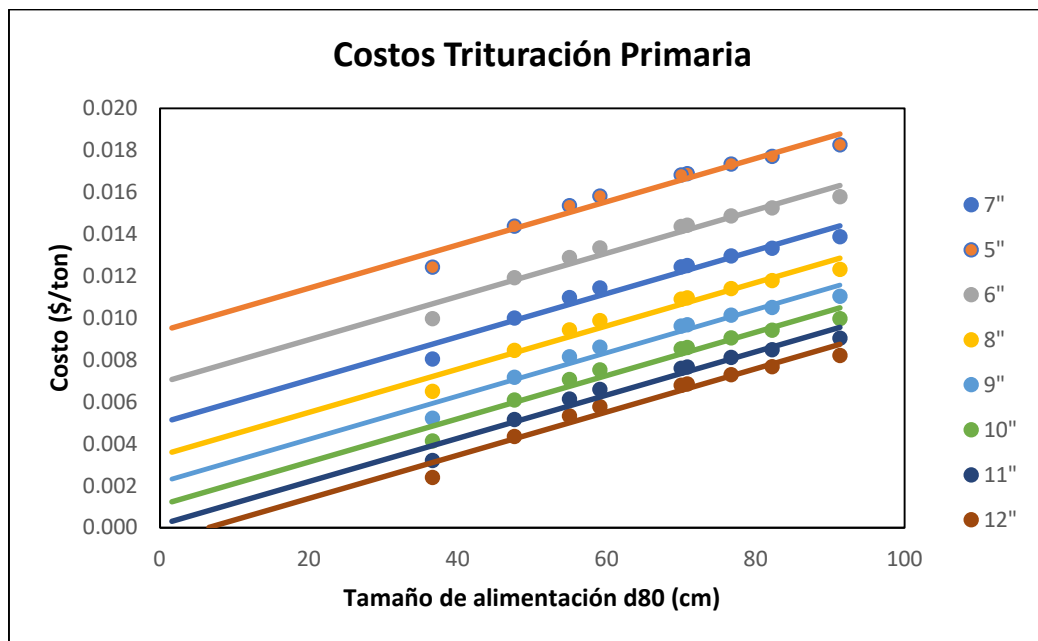
Curvas de los costos de las voladuras



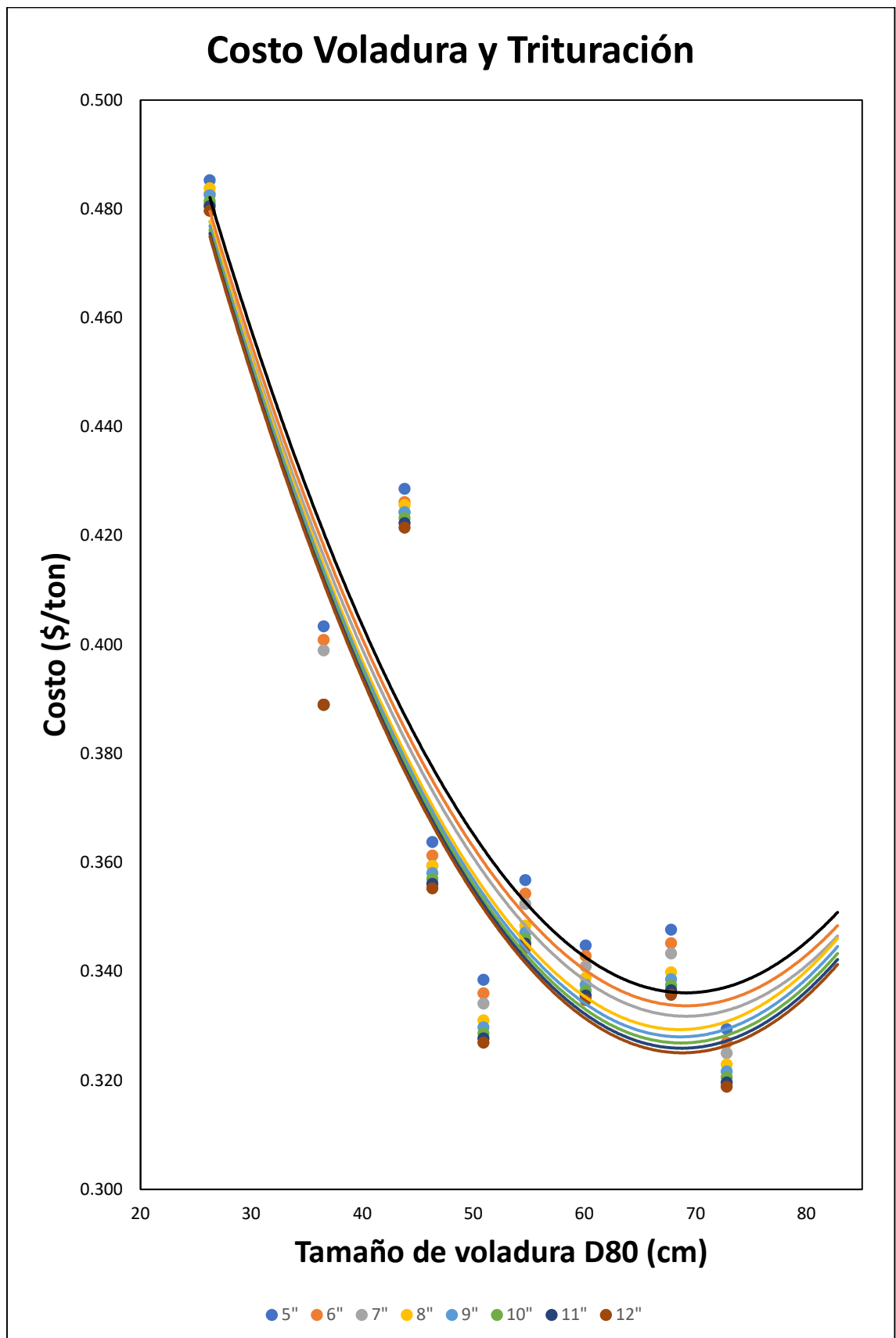
Luego de aplicar la Ley de Bond, la **Figura 10** recoge la simulación en costos para las 9 voladuras con los diferentes tamaños de OSS, desde 5” hasta 12”. Para todos los casos se observa que mientras mayor sea el tamaño de alimentación, mayor es el costo debido a la energía usada. El costo más bajo se da para un OSS de 12” y la voladura 1 cuyo D80 es menor a 27 cm.

Figura 10

Curvas de costos de trituración para distintos OSS



Finalmente, la **Figura 11** suma ambas curvas y se observa el efecto de la influencia de ambos parámetros; costos de voladura y costos en trituración, la forma mejor ajustada fue la cuadrática. Siendo el punto más bajo de las curvas cuadráticas el punto óptimo a buscar, es decir, un D80 cercano a los 66 cm. De tal manera que trituradora y criba trabajen adecuadamente y el consumo de explosivos no sea excesivo.

Figura 11*Curvas combinadas de costos de Voladura y Trituración*

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

La granulometría de alimentación influye directamente en el desempeño de la trituración y los costos asociados, tal como se observa en la **Tabla 3**, a un OSS de 7", con un D80 de 72.8 cm, el rendimiento necesario para procesar este material debe ser de 768 ton/h. Además, el efecto de la clasificación hace que la alimentación real a la trituradora acorde a la **Tabla 4** tenga un D80 de 91.3 cm. Por ello, con este tipo de OSS, será la trituradora la que aporte la mayoría de la producción total. Para evitar atasques en la trituradora, será necesario bajar la velocidad de zarandeo de la criba y controlar la alimentación.

Si bien, el D80 es un factor muy importante para la predicción de la fragmentación y consumo energético, es igual de importante la gradación del material como se observó en la **Figura 4**, ya que el sistema trabaja en serie con una criba y una trituradora. Una curva bien gradada, con tamaños desde los 10 cm hasta los 80 cm permitirá que ambas máquinas trabajen en armonía para buscar el objetivo de sostener una producción horaria de 1100 toneladas.

Las curvas de costos permitieron evidenciar que el consumo excesivo de explosivo si bien redujo los consumos energéticos en trituración, incrementó significativamente los costos de voladuras. Claramente, manejar un D80 cercano a los 65 cm y alimentaciones bien gradadas, es el punto óptimo de operación para la cantera.

4.2 Recomendaciones

Para mejorar el modelado de la trituración, se podría usar el modelo EMJC de Modsim, de manera que la curva de producción no sea independiente del tamaño de alimentación, ya que puede darse el caso que materiales más finos pasen directamente por la trituradora sin ser triturados. Esto demanda de más investigación en campo, siendo necesarias campañas de muestreo granulométricos en la banda de recepción del material triturado y cribado, con el fin de determinar el parámetro m para calibrar el modelo.

Se recomienda que la trituradora trabaje congestionada, para evitar el paso de material no deseado (planchas largas con espesores menores al OSS) que pueden generar daños a las bandas y atoramientos en chutes o de alimentación.

Es recomendable incorporar los demás costos unitarios de cantera: carga y acarreo a las curvas de costos para determinar un punto óptimo de operación integral, ya que el rendimiento en estas operaciones también se ve afectado por la granulometría y la gradación del material volado.

BIBLIOGRAFÍA

- Abzalov, M. (2016). *Mining Methods* (pp. 5–18). https://doi.org/10.1007/978-3-319-39264-6_2
- Adler, L., & Thompson, S. D. (2011). Mining Methods Classification System. In Peter Darling (Ed.), *SME MINING ENGINEERING HANDBOOK* (3rd ed., pp. 349–355). SME.
- Casper, J. (2007). Minerals Gifts from the Earth. In *Natural Resources*. Chelsea House.
- Evertsson, C. M., & Bearman, R. A. (1997). Investigation of interparticle breakage as applied to cone crushing. *Minerals Engineering*, 10(2), 199–214. [https://doi.org/10.1016/s0892-6875\(96\)00146-x](https://doi.org/10.1016/s0892-6875(96)00146-x)
- Fladvad, M., & Onnela, T. (2020). Influence of jaw crusher parameters on the quality of primary crushed aggregates. *Minerals Engineering*, 151(March), 106338. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106338>
- Gill, C. B. (1991). Crushing. In *Materials Beneficiation* (Issue i, pp. 10–42). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3020-5_2
- Guimaraes, M. S., Valdes, J. R., Palomino, A. M., & Santamarina, J. C. (2007). Aggregate production: Fines generation during rock crushing. *International Journal of Mineral Processing*, 81(4), 237–247. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2006.08.004>
- Hartman, H. L. (1987). *Introductory Mining Engineering*. Wiley.
- Herbst, J. A., Lo, Y. C., & Flintoff, B. (2003). Size Reduction and Liberation. In *Principles of Mineral Processing* (pp. 61–118). SME.
- Instituto de Investigación Geológica y Minero [IIGE]. (2019). *Guía Técnica Minera para la Pequeña Minería y Minería Artesanal*. Gobierno de la República del Ecuador.

- Johansson, M., Bengtsson, M., Evertsson, M., & Hulthén, E. (2017a). A fundamental model of an industrial-scale jaw crusher. *Minerals Engineering*, *105*, 69–78. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.01.012>
- Johansson, M., Bengtsson, M., Evertsson, M., & Hulthén, E. (2017b). A fundamental model of an industrial-scale jaw crusher. *Minerals Engineering*, *105*, 69–78. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.01.012>
- JORC. (2012). *The Australasian Code for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Ore Reserves*. AUSIIM.
- Lynch, A. J., & Rowland, C. A. (2015). *The History of Grinding*.
- Rao, D. V. S. (2016). Minerals and coal process calculations. In *Minerals and Coal Process Calculations*. <https://doi.org/10.1201/9781315225524>
- Tosun, A., & Konak, G. (2015). Development of a model estimating energy consumption values of primary and secondary crushers. *Arabian Journal of Geosciences*, *8*(2), 1133–1144. <https://doi.org/10.1007/s12517-013-1260-3>
- Wills, B. A., & Finch, J. A. (2016). Comminution. In *Wills' Mineral Processing Technology* (Eight, Vol. 1, pp. 109–122). Elsevier Ltd.
- Yamashita, A. S., Thivierge, A., & Euzébio, T. A. M. (2021). A review of modeling and control strategies for cone crushers in the mineral processing and quarrying industries. *Minerals Engineering*, *170*(September 2020). <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107036>