

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS

**MUESTREO REPRESENTATIVO Y DISTRIBUCIÓN DE
TAMAÑO DE PARTÍCULAS MEDIANTE ANÁLISIS DIGITAL
DE IMÁGENES EN OPERACIONES DE TRONADURA
UTILIZANDO SIMULACIONES DEM**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

SEBASTIÁN IGNACIO ABBOTT SÁEZ

PROFESOR GUÍA:

GONZALO MONTES ATENAS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

ÁLVARO VALENCIA MUSALEM

PATRICIO DIP SEGOVIA

SANTIAGO DE CHILE

2020

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE: INGENIERO CIVIL DE MINAS
POR: SEBASTIÁN IGNACIO ABBOTT SÁEZ
FECHA: 2020
PROF. GUÍA: GONZALO MONTES ATENAS**

**MUESTREO REPRESENTATIVO Y DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE
PARTÍCULAS MEDIANTE ANÁLISIS DIGITAL DE IMÁGENES EN
OPERACIONES DE TRONADURA UTILIZANDO SIMULACIONES DEM**

El objetivo del trabajo realizado en esta memoria es generar mejores prácticas operacionales para lograr una correcta estimación de fragmentación, mediante análisis digital de imágenes y muestreo físico de roca tronada, a partir de simulaciones de elementos discretos con el software *Rocky*®.

Se define un caso base con roca tronada tipo pórfido dacítico, con un P_{80} de 21 cm, luego con el software *Rocky*® se genera un modelo de una pila de material con esta fragmentación. Posteriormente, se utiliza el software *PowerSieve* para realizar un análisis digital de imágenes de las muestras tomadas de la pila de tronadura simulada con el software DEM. La roca en cuestión posee un Módulo de Young de 55 GPa, una densidad de 2.57 T/m³ y un UCS de 130 MPa.

Los resultados obtenidos por el análisis de imágenes presentaron sesgo, las curvas promedio tienen un P_{80} de 14 cm, pero un comportamiento similar (Coef. de correlación de 0.95). Se busca mejorar la estimación mediante el uso de ponderadores, los cuales ponderan cada muestra tomada por un valor determinado. A partir de casos específicos que minimizan el error de estimación entre las muestras y el caso base, se obtuvieron ponderadores por categorías, para muestras con fragmentación fina e intermedia y para fragmentación gruesa. Al ponderar las imágenes de las distintas categorías por los ponderadores adecuados, mejora la estimación de la granulometría entre un 18% a un 97%. También, se obtuvo que aumentar la cantidad de muestras procesadas mejora la estimación, debido a que, las curvas estimadas de las muestras tienden a converger. Se propone como práctica operacional ponderar las muestras finas e intermedias por 0.34 y las gruesas por 0.66, además, utilizar curvas promedio por categorías disminuye la variabilidad de los resultados. Finalmente, el muestreo físico se vuelve más eficiente si se logra aislar una porción del mineral para tomar una muestra de una sección vertical de este, incluyendo así todos los tamaños de roca presentes en la pila.

Se concluye que el uso de ponderadores logra una mejora de la estimación de fragmentación, pero se debe ser cuidadoso con la categorización de las imágenes. Además, se deben utilizar varias muestras por categoría.

**ABSTRACT OF THE THESIS SUBMITTED TO
OBTAIN THE DEGREE OF: MINING ENGINEERING
BY: SEBASTIÁN IGNACIO ABBOTT SÁEZ
DATE: 2020
THESIS ADVISOR: GONZALO MONTES ATENAS**

**REPRESENTATIVE SAMPLING AND PARTICLE SIZE DISTRIBUTION
THROUGH DIGITAL IMAGE ANALYSIS IN BLASTING OPERATIONS USING
DEM SIMULATIONS**

The objective of the work in this thesis is to generate best operational practices to achieve a correct estimation of fragmentation, through digital images analysis and physical sampling of muckpile, from simulations of discrete elements with the Rocky® software.

A base case is defined with a muckpile of dacitic porphyry rock, with a P_{80} of 21 *cm*, then with the Rocky® software a model of a muckpile with this fragmentation is generated. Subsequently, PowerSieve software is used for digital image analysis of samples taken from the simulated muckpile with DEM software. The rock in question has a Young's Modulus of 55 *GPa*, a density of 2.57 T/m^3 and a *UCS* of 130 *MPa*.

The results obtained by the image analysis had a high biased, the average curves have a P_{80} of 14 *cm*, but a similar behavior (correlation coefficient of 0.95). The aim is to improve the estimation by using weights, which they weight each sample taken by a certain value. From specific cases that minimize the estimation error between the samples and the base case, then category weights were obtained for samples with fine and intermediate fragmentation and for coarse fragmentation. By weighting the images of the different categories by the appropriate weights, it improves the estimation of the granulometry between 18% to 97%. Also, it was found that increasing the number of processed samples improves the estimation, because the estimated curves of the samples tend to converge. It is proposed as an operational practice to weight the fine and intermediate samples by 0.34 and the coarse samples by 0.66, in addition, using average curves by categories reduces the variability of the results. Finally, physical sampling becomes more efficient if it is possible to isolate a portion of the mineral to take a sample from a vertical section of it, thus including all the sizes of rock present in the pile.

It is concluded that the use of weights can achieve a notable improvement in the estimation of fragmentation, but care must be taken with the categorization of the images. Additionally, multiple samples per category should be used.

Tabla de Contenido

Introducción.....	1
1.1. Motivación.....	2
1.2. Relevancia del Trabajo.....	2
1.3. Objetivos.....	3
1.3.1. Objetivo Principal.....	3
1.3.2. Objetivos Específicos.....	3
1.4. Alcances o Limitaciones.....	4
Análisis Crítico del Estado del Arte y Fundamentos.....	5
2.1. Tronadura.....	5
2.1.1. Mecanismos de fragmentación.....	5
2.1.2. Fragmentación.....	8
2.1.3. Material rodado.....	10
2.1.4. Impacto en procesos posteriores.....	10
2.2. Medición de fragmentación.....	12
2.2.1. Métodos directos.....	13
2.2.2. Métodos indirectos.....	14
2.3. Análisis Digital de Imágenes con Software <i>PowerSieve</i>	16
2.3.1. Protocolo de muestreo.....	16
2.3.2. Procesamiento de imágenes <i>PowerSieve</i>	19
2.4. Software <i>Rocky</i> ® DEM.....	26
2.4.1. Método de elementos discretos.....	26
2.4.2. Aspectos teóricos DEM.....	27
2.4.3. Interacción de partículas.....	28
2.4.4. Modelo de contacto.....	29
2.4.5. Simulación de partículas.....	30
2.4.6. Esquema de iteración.....	31
2.4.7. Parámetros.....	31

Metodología.....	33
3.1. Definición Caso Base.....	33
3.2. Simulación Casos de Estudio.....	37
3.2.1. Aspectos generales	37
3.2.2. Geometría.....	37
3.2.3. Variable a cambiar.....	40
3.2.4. Simulaciones y parámetros	43
3.2.5. Resumen simulaciones.....	47
3.3. Muestreo Casos de Estudio	48
3.4. Análisis Digital de Imágenes Casos de Estudio	51
3.5. Análisis Comparativo Realidad versus Simulación	57
Resultados y Discusión de Resultados	60
4.1. Previo al Procesamiento de Imágenes.....	60
4.2. Resultados Análisis Digital de Imágenes <i>PowerSieve</i>	62
4.3. Discusión de Resultados.....	67
4.3.1. <i>P80</i> estimado.....	67
4.3.2. Uso de ponderadores	73
4.4. Muestreo Físico Representativo.....	87
Conclusión y Recomendaciones	89
5.1. Conclusiones.....	89
5.2. Recomendaciones.....	92
Bibliografía	93
Anexos	96
Anexo A: Figuras Resultados Casos de Estudio por Repetición.....	96
Anexo B: Tablas Resultados Casos de Estudio por Repetición.....	104

Índice de tablas

Tabla 1. Factor de llenado de pala según RS [1].	11
Tabla 2. Parámetros a ingresar en Rocky® [30].	32
Tabla 3. Propiedades roca caso de estudio.	34
Tabla 4. Distribución granulométrica original caso base.	34
Tabla 5. Distribución granulométrica caso base modificado.	36
Tabla 6. Parámetros ingresados a Rocky.	44
Tabla 7. Tiempos de entrada de partículas.	47
Tabla 8. Cantidad de partículas por simulación.	48
Tabla 9. Posición fotografías para muestreo.	49
Tabla 10. Análisis comparativo realidad versus simulación	57
Tabla 11. Fragmentación promedio por repetición Material Rodado 10%.	63
Tabla 12. Fragmentación promedio por repetición Material Rodado 20%.	64
Tabla 13. Fragmentación promedio por repetición Material Rodado 30%.	65
Tabla 14. Resultados fragmentación promedio por caso de estudio.	66
Tabla 15. Diferencia porcentual absoluta entre P80 real y estimado por caso de estudio.	70
Tabla 16. Diferencia porcentual absoluta entre P80 real y estimado de todos los casos de estudio.	72
Tabla 17. ECM y coeficiente de correlación por repetición y casos de estudio para curvas promedio.	74
Tabla 18. Ponderadores por muestra Material Rodado 10%.	75
Tabla 19. Ponderadores por muestra Material Rodado 20%.	75
Tabla 20. Ponderadores por muestra Material Rodado 30%.	75
Tabla 21. ECM y coeficiente de correlación por repetición y casos de estudio para curvas con ponderadores.	76
Tabla 22. ECM y coeficiente de correlación por repetición y casos de estudio para curvas con ponderadores promedio.	76
Tabla 23. Ponderadores globales por muestra.	77
Tabla 24. ECM y coeficiente de correlación por repetición y casos de estudio para curvas con ponderadores globales.	77
Tabla 25. Ponderadores únicos por casos de estudio.	78
Tabla 26. Estadísticas ECM ponderadores únicos Material Rodado 10%.	79
Tabla 27. Estadísticas ECM ponderadores únicos Material Rodado 20%.	79
Tabla 28. Estadísticas ECM ponderadores únicos Material Rodado 30%.	79
Tabla 29. ECM y coeficiente de correlación por repetición y caso de estudio para curvas promedio por categoría con ponderadores únicos.	82

Tabla 30. Resultados fragmentación por caso de estudio con ponderadores únicos por categoría.	85
Tabla 31. Resultados Análisis de Imágenes Material Rodado 10% Rep. 1.....	104
Tabla 32. Resultados Análisis de Imágenes Material Rodado 10% Rep. 2.....	105
Tabla 33. Resultados Análisis de Imágenes Material Rodado 10% Rep. 3.....	106
Tabla 34. Resultados Análisis de Imágenes Material Rodado 10% Rep. 4.....	107
Tabla 35. Resultados Análisis de Imágenes Material Rodado 10% Rep. 5.....	108
Tabla 36. Resultados Análisis de Imágenes Material Rodado 20% Rep. 1.....	109
Tabla 37. Resultados Análisis de Imágenes Material Rodado 20% Rep. 2.....	110
Tabla 38. Resultados Análisis de Imágenes Material Rodado 20% Rep. 3.....	111
Tabla 39. Resultados Análisis de Imágenes Material Rodado 20% Rep. 4.....	112
Tabla 40. Resultados Análisis de Imágenes Material Rodado 20% Rep. 5.....	113
Tabla 41. Resultados Análisis de Imágenes Material Rodado 30% Rep. 1.....	114
Tabla 42. Resultados Análisis de Imágenes Material Rodado 30% Rep. 2.....	115
Tabla 43. Resultados Análisis de Imágenes Material Rodado 30% Rep. 3.....	116
Tabla 44. Resultados Análisis de Imágenes Material Rodado 30% Rep. 4.....	117
Tabla 45. Resultados Análisis de Imágenes Material Rodado 30% Rep. 5.....	118

Índice de figuras

Figura 1. Esquema de mecanismos de fragmentación [1].	7
Figura 2. Zonas de fragmentación según modelamiento [3].	8
Figura 3. Zonas de fragmentación en terreno [3].	9
Figura 4. Fracturamiento en un pozo de tronadura [5].	9
Figura 5. Métodos de estimación de fragmentación.	13
Figura 6. Diámetro de Feret [21].	16
Figura 7. Comparación distintos ángulos de fotografía [20].	17
Figura 8. Panel para crear proyecto [25].	20
Figura 9. Pestaña Details preprocesamiento PowerSieve [25].	20
Figura 10. Pestaña Crop/ROI preprocesamiento PowerSieve [25].	21
Figura 11. Pestaña Calibrate preprocesamiento PowerSieve [25].	22
Figura 12. Pestaña Equalize preprocesamiento PowerSieve [25].	22
Figura 13. Pestaña Binarize preprocesamiento PowerSieve [25].	23
Figura 14. Resultados Bin Viewer PowerSieve [25].	24
Figura 15. Resultados Tabular Results PowerSieve [25].	25
Figura 16. Resultados Graph Results PowerSieve [25].	25
Figura 17. Ejemplo superposición de partículas [29].	28
Figura 18. Esquema de iteraciones software Rocky® [27].	31
Figura 19. Curva granulométrica original caso base.	35
Figura 20. Curva granulométrica caso base modificado.	36
Figura 21. Vista en planta geometría caso de estudio.	38
Figura 22. Vista longitudinal geometría caso de estudio.	39
Figura 23. Vista isométrica geometría caso de estudio.	39
Figura 24. Vista isométrica (sólido) geometría caso de estudio.	40
Figura 25. Curva granulométrica caso de estudio separada por categoría.	42
Figura 26. Curvas granulométricas casos de estudio.	42
Figura 27. Partícula poliédrica no redondeada.	45
Figura 28. Partícula poliédrica redondeada.	45
Figura 29. Ejemplo de simulación terminada (MR 10% Rep. 1).	48
Figura 30. Posición fotografías para muestreo, vista frontal de la frente.	50
Figura 31. Muestras importadas en PowerSieve.	52
Figura 32. Escala en muestra en PowerSieve.	52
Figura 33. Comparación imágenes sin (arriba) y con (abajo) ecualización.	53
Figura 34. Comparación threshold de 20 (arriba) y 45 (abajo).	54
Figura 35. Comparación imágenes híbridas, threshold 20 (arriba) y 45 (abajo).	56
Figura 36. Perfiles de la pila de roca tronada [1].	58

Figura 37. Distribución granulométrica procesamiento automático vs manual. R10% 1 Rep 1-1.....	60
Figura 38. Distribución granulométrica procesamiento automático vs manual. R10% Rep 1-13.....	61
Figura 39. Fragmentación promedio por repetición Material Rodado 10%.	63
Figura 40. Fragmentación promedio por repetición Material Rodado 20%.	64
Figura 41. Fragmentación promedio por repetición Material Rodado 30%.	65
Figura 42. Resultados fragmentación promedio por caso de estudio.....	67
Figura 43. Diferencia porcentual entre P80 real y estimado de cada muestra de cada repetición del Material Rodado 10%.....	68
Figura 44. Diferencia porcentual entre P80 real y estimado de cada muestra de cada repetición del Material Rodado 20%.....	68
Figura 45. Diferencia porcentual entre P80 real y estimado de cada muestra de cada repetición del Material Rodado 30%.....	69
Figura 46. Diferencia porcentual absoluta entre P80 real y estimado todas las muestras por cada caso de estudio.....	70
Figura 47. Histograma de frecuencia del error porcentual absoluto para el P80 estimado del Material Rodado 10%.....	71
Figura 48. Histograma de frecuencia del error porcentual absoluto para el P80 estimado del Material Rodado 20%.....	71
Figura 49. Histograma de frecuencia del error porcentual absoluto para el P80 estimado del Material Rodado 30%.....	72
Figura 50. Histograma de frecuencia del error porcentual absoluto para el P80 estimado de todos los casos de estudio.....	73
Figura 51. Contacto distribuciones granulométricas. Muestra 10 Material Rodado 10% Rep. 3.....	80
Figura 52. Contacto distribuciones granulométricas. Muestra 9 Material Rodado 20% Rep. 5.....	81
Figura 53. Contacto distribuciones granulométricas. Muestra 10 Material Rodado 30% Rep. 2.....	81
Figura 54. Fragmentación curvas promedio por categoría con ponderador único por repetición Material Rodado 10%.	83
Figura 55. Fragmentación curvas promedio por categoría con ponderador único por repetición Material Rodado 20%.	83
Figura 56. Fragmentación curvas promedio por categoría con ponderador único por repetición Material Rodado 30%.	84
Figura 57. Fragmentación promedio por caso de estudio con ponderadores únicos por categoría.	85
Figura 58. Resultados fragmentación Material Rodado 10% Rep. 1.....	96

Figura 59. Resultados fragmentación Material Rodado 10% Rep. 2.....	97
Figura 60. Resultados fragmentación Material Rodado 10% Rep. 3.....	97
Figura 61. Resultados fragmentación Material Rodado 10% Rep. 4.....	98
Figura 62. Resultados fragmentación Material Rodado 10% Rep. 5.....	98
Figura 63. Resultados fragmentación Material Rodado 20% Rep. 1.....	99
Figura 64. Resultados fragmentación Material Rodado 20% Rep. 2.....	99
Figura 65. Resultados fragmentación Material Rodado 20% Rep. 3.....	100
Figura 66. Resultados fragmentación Material Rodado 20% Rep. 4.....	100
Figura 67. Resultados fragmentación Material Rodado 20% Rep. 5.....	101
Figura 68. Resultados fragmentación Material Rodado 30% Rep. 1.....	101
Figura 69. Resultados fragmentación Material Rodado 30% Rep. 2.....	102
Figura 70. Resultados fragmentación Material Rodado 30% Rep. 3.....	102
Figura 71. Resultados fragmentación Material Rodado 30% Rep. 4.....	103
Figura 72. Resultados fragmentación Material Rodado 30% Rep. 5.....	103

Índice de ecuaciones

Ecuación 1. Ecuación de Bond.....	11
Ecuación 2. Ecuación de traslación de partícula.	27
Ecuación 3. Ecuación de rotación de partícula.....	27
Ecuación 4. Ecuación de traslación con contacto.	30
Ecuación 5. Ecuación de rotación con contacto.	30

Capítulo I

Introducción

Para el proceso minero es importante mantener un control y monitoreo total de sus operaciones, por ello, se vuelve necesario, entre otras cosas, poder estimar y predecir de manera correcta y acertada todas las variables relevantes de cada proceso. Es por esto que, es fundamental conocer las distribuciones granulométricas procedentes de la operación de tronadura, por diversos motivos. Uno de ellos es la necesidad de tener un buen control de calidad, lo cual se traduce en conseguir una buena reconciliación entre lo entregado una vez realizada la tronadura y los resultados solicitados por los procesos posteriores. Conocer los resultados de la voladura permite predecir y anticipar posibles beneficios o problemas en procesos aguas abajo como lo es el carguío, transporte, chancado, etc., dado que estos trabajan directamente con lo entregado por esta operación unitaria. Como se mencionó anteriormente los resultados de la tronadura afectan el resto de la cadena de procesos, pudiendo también, afectar la seguridad en otras operaciones.

Actualmente existen variados métodos para medir la fragmentación post tronadura, de ellos destacan principalmente dos, el primero consiste en análisis de imágenes mediante el uso de softwares de análisis digital como el *PowerSieve*, *ImageJ*, *Split Engineering*, *Wipfrag*, entre otros, los cuales entregan curvas de distribución granulométricas que luego pueden ser ajustadas con distintas funciones matemáticas como la distribución Rosin-Rammler o Swebrec. El segundo método reside en el uso de modelos predictivos como el Kuz-Ram o Crush Zone Model, los cuales utilizan funciones matemáticas y variables de entrada como, malla de tronadura, factor de carga, parámetros geomecánicos de la roca y del entorno como condiciones de fallas o estructuras, etc.

El principal problema del primer método es que no evalúan todo el material tronado, sino que solo la superficie de una porción, ya sea en la frente, la pala, el camión o una correa, teniendo dificultades a la hora de hacer la reconciliación entre lo obtenido y lo esperado por posibles problemas de muestreo o segregación de material. También, el segundo método presenta problemas ya que solo es el resultado de un modelo basado en fórmulas empíricas y donde no se pueden incluir todas las condiciones del terreno.

A pesar de estos inconvenientes, en la industria minera se busca constantemente medir la fragmentación de la tronadura, pero la forma en la que se ha resultado involucra mucho tiempo de uso de softwares y uso intensivo de recursos, ya sea económicos o humanos, lo cual lleva a un muestreo constante que obtiene distribuciones más exactas, pero a un costo mayor.

Dicho esto, este trabajo busca resolver el tema de la estimación de distribución granulométrica de manera más eficiente. En busca de este objetivo es que el software *Rocky*® presenta una buena oportunidad de estudiar el modo en que se estima la fragmentación de una tronadura, ya que permite simular material particulado con distintas características como distribuciones granulométricas, factores de forma y disposiciones espaciales. Es por esto que se propone el uso del software *Rocky*® para simular el resultado de una tronadura y con ello buscar desarrollar mejores prácticas operacionales que permitan obtener resultados más representativos de la pila tronada. Tomando en cuenta que ya se conoce la distribución granulométrica de dicha tronadura simulada se puede analizar el error asociado a distintas maneras de tomar muestras de la pila.

1.1. Motivación

La principal motivación de esta memoria es desarrollar mejores prácticas operacionales para perfeccionar la estimación de la distribución granulométrica de la roca tronada, mediante análisis de imágenes y muestreo en pila, debido a que en la actualidad se invierten muchos recursos en obtener una distribución de tamaños de la tronadura precisa. Además de que es fundamental conocer estas distribuciones de tamaño para el buen funcionamiento de procesos posteriores como carguío, transporte, chancado, etc. Esto porque una distribución granulométrica optimizada para los procesos venideros implica mejores rendimientos de equipos, disminución de costos y un aumento en la seguridad de la operación.

1.2. Relevancia del Trabajo

El valor agregado de este trabajo radica, principalmente, en lograr mejorar las estimaciones de las distribuciones granulométricas mediante el perfeccionamiento de las prácticas operacionales de muestreo con el fin de

conseguir una correcta reconciliación, con el mínimo error posible, entre lo estimado y lo entregado por dicho por la tronadura. El software *Rocky*® permite simular partículas en variadas disposiciones espaciales, con diferentes factores de forma y distribuciones granulométricas, entre otras cosas, por lo que se vuelve ideal a la hora de simular distintos escenarios de roca tronada para luego realizar pruebas en cuanto a estimación. Finalmente, se busca estandarizar un proceso de muestreo que permita asegurar la calidad de las estimaciones de distribuciones granulométricas, complementando la medición de estas en procesos posteriores y con ello poder anticipar posibles problemas o beneficios procedentes de la tronadura.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo Principal

Desarrollar mejores prácticas operacionales para estimar las distribuciones granulométricas, mediante análisis digital de imágenes, de rocas procedentes de tronadura y sentar las bases para un muestreo representativo de material tronado a partir de simulaciones de elementos discretos con el software *Rocky*®.

1.3.2. Objetivos Específicos

1. Realizar un análisis crítico del estado del arte sobre cómo se miden o estiman las distribuciones granulométricas de las voladuras en la actualidad.
2. Desarrollar un caso de estudio en el cual se haya medido la distribución granulométrica de la tronadura.
3. Determinar la variable a modificar en el caso de estudio que permita reflejar distintos escenarios de una tronadura.
4. Simular y analizar distintos escenarios de tronadura con el software *Rocky*® a partir de un caso base.
5. Analizar la información obtenida de las muestras tomadas del software *Rocky*® y procesadas con el software *PowerSieve* de análisis digital de imágenes de las simulaciones.
6. Establecer prácticas operacionales que permitan la mejor estimación posible de distribuciones granulométricas.

1.4. Alcances o Limitaciones

1. La similitud de las simulaciones y la realidad está limitada a la capacidad de simulación, teniendo que lograr un equilibrio entre tiempo y precisión. Se exponen algunas diferencias en la Tabla 10.
2. Los datos simulados provienen de estimaciones y no necesariamente representan la verdadera granulometría de la tronadura estudiada.
3. Tanto el muestreo físico, como la estimación mediante análisis de imágenes expuestos en esta Memoria, se enfocan solo en tronaduras de producción.

Capítulo II

Análisis Crítico del Estado del Arte y Fundamentos

2.1. Tronadura

La tronadura es una de las cuatro operaciones más importantes de la minería, el objetivo de esta es quebrar la roca in situ y producir una determinada distribución granulométrica para que luego sea transportada. El producto de la tronadura puede ser el producto final del proceso, en el caso de utilizar mineral ROM o ir directo a botadores. También, puede ser transportado hacia chancadores y molinos para disminuir aún más su tamaño.

En gran minería el proceso de tronadura es ampliamente utilizado debido a su bajo costo de aplicación y a su capacidad de abarcar grandes volúmenes de roca, siendo más económico y eficaz que una ruptura mecánica de la roca in situ.

En esta sección se muestra cómo son los mecanismos de ruptura de la roca durante el proceso de voladura, también se describe a grandes rasgos cómo se ven los resultados de una tronadura y finalmente, se explica cómo esta operación afecta procesos posteriores. De ahí la relevancia de tener un buen control de los resultados de esta.

2.1.1. Mecanismos de fragmentación

El proceso de tronadura posee dos grandes protagonistas, uno es la energía de tensión, producida por la detonación de la carga explosiva, y el otro la energía de burbuja o de los gases, producto de la expansión de los gases [1] [2].

En la literatura se describen varios mecanismos de ruptura de la roca durante el desarrollo de la tronadura misma. A continuación, se exponen de manera breve dichos mecanismos de ruptura:

- Trituración de la roca: en el instante posterior a la detonación de la carga explosiva la presión ejercida por la onda de choque supera ampliamente la resistencia dinámica de la roca, lo que la fractura intensamente en la zona más cercana al explosivo.

- Agrietamiento radial: a medida que la onda de choque se propaga por la roca, se produce una intensa compresión radial que induce esfuerzos tangenciales, lo que a su vez genera tracción en la roca provocando su ruptura. Este tipo de ruptura se produce inmediatamente después de la zona de trituración.
- Reflexión de la onda de choque: momento en que la onda, que se propaga por la roca, llega a una cara libre y esta se refleja generando dos ondas, una de tracción y otra de cizallamiento.
- Extensión y apertura de las grietas: luego del paso de la onda de choque, la alta presión de los gases provoca un campo de tensión alrededor del pozo. Posterior a esto, la expansión de los gases producto de la detonación avanza por las grietas radiales generadas anteriormente, provocando un mayor fracturamiento. Es importante que los gases no escapen (por el taco o por diaclasas, por ejemplo) para que la tronadura obtenga buenos resultados.
- Fracturación por liberación de carga: la roca se encuentra sometida a gran presión producto de los esfuerzos compresivos de la onda de choque y el efecto de los gases, por lo que al momento de que estos escapen de la roca se produce un desconfinamiento que afecta a un gran volumen de ella con esfuerzos de tracción y cizalle, generando un mayor fracturamiento.
- Fracturación por cizallamiento: cuando existen diferencias de estratos en la roca se produce un agrietamiento entre estos por el paso de la onda de choque a través de los planos.
- Rotura por flexión: el efecto de la presión de los gases hace que la roca se comporte como una viga doblemente empotrada, entre el taco y la pata, la que debido a la presión de los gases se deforma y fractura.
- Rotura por colisión: la presión de los gases golpea la roca desprendida, produciendo que los fragmentos de roca colisionen entre sí, generando nuevas fracturas en ellas y contribuyendo al fracturamiento de la tronadura.

Estos ocho mecanismos de ruptura de la roca actúan desde el momento de la detonación de la columna de explosivo en adelante. Los distintos mecanismos de ruptura están presentes en diferentes tiempos durante la explosión y en mayor o menor medida dependiendo de las propiedades de la roca. También, a veces se superpone un mecanismo sobre otro durante unos milisegundos.

En la Figura 1 se muestra cómo ocurren estos mecanismos de fragmentación luego de la detonación de la carga explosiva.

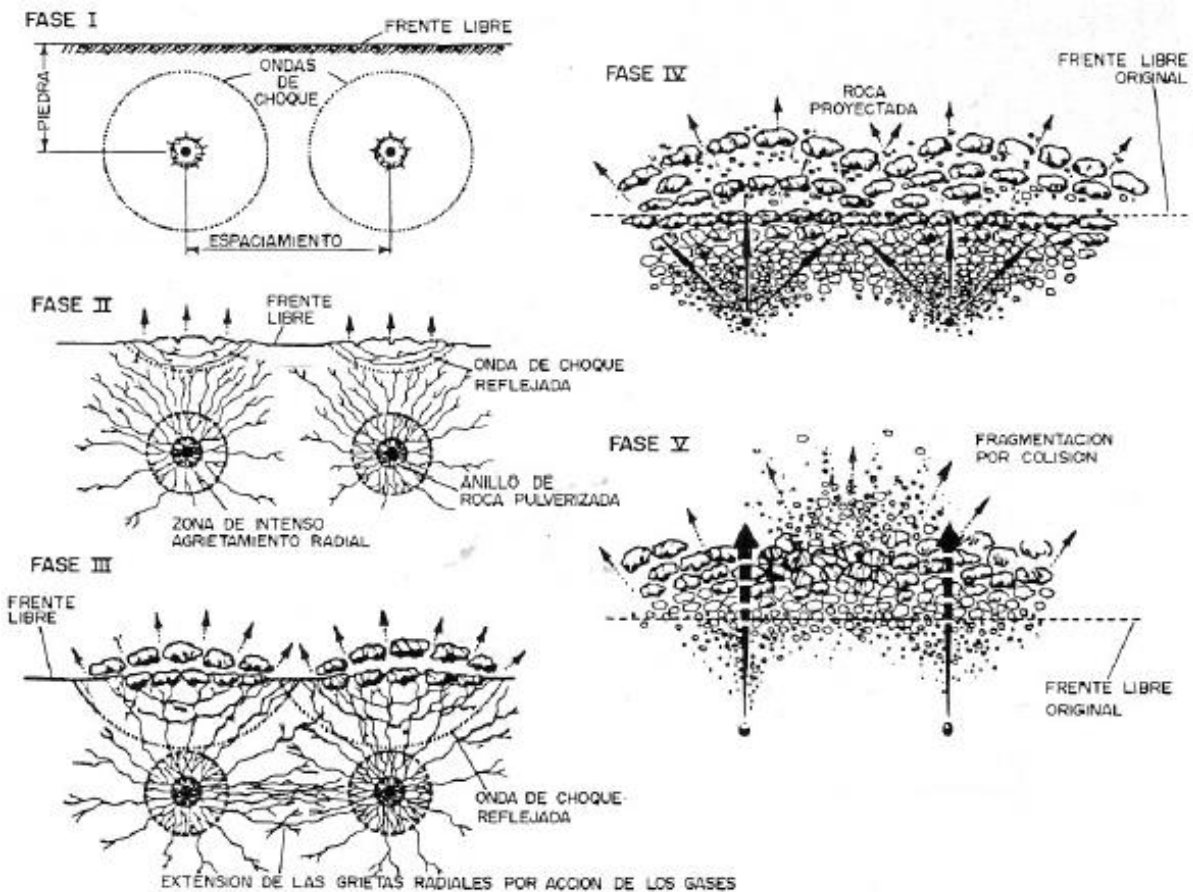


Figura 1. Esquema de mecanismos de fragmentación [1].

Durante la Fase I, la gran energía producida por la detonación del explosivo supera ampliamente la resistencia de la roca, produciendo un intenso fracturamiento alrededor de la columna de explosivo. En la Fase II, la onda explosiva viaja a través de la roca generando grietas radiales debido a los esfuerzos tangenciales generados por el avance de la onda. Posteriormente, en la Fase III, la onda compresiva llega a la cara libre reflejándose en dirección opuesta, lo que genera esfuerzos de tracción. Además, la alta presión y expansión de los gases producto de la detonación comienzan a abrir las grietas radiales generadas en las fases anteriores. Estos esfuerzos de tracción fracturan la roca intensamente debido a que esta presenta una baja resistencia a la tracción en comparación a su resistencia a la compresión (alrededor de un décimo de esta). Luego, en la Fase IV, producto de la onda reflejada de tracción y la expansión de gases que han fracturado intensamente la roca, se produce una descompresión violenta de esta, generando esfuerzos de tracción más grandes que terminan por completar el proceso de ruptura de la roca. Finalmente, en la Fase V, la violenta descompresión de la roca

ha generado un movimiento del material, lo que a su vez provoca impactos entre rocas aumentando el fracturamiento de estas.

2.1.2. Fragmentación

Modelos de fracturamiento muestran que, en una voladura típica de una mina metalífera de superficie, como es el caso de estudio analizado en esta Memoria, se pueden ver tres regiones con distintas fragmentaciones. Estas tres zonas se detallan a continuación y van acompañadas de la Figura 2 y Figura 3. La primera, muestra una vista en sección (A) y en planta (B) de un pozo de tronadura y la segunda, una imagen tomada del terreno que demuestra lo explicado en la figura anterior [3] [4].

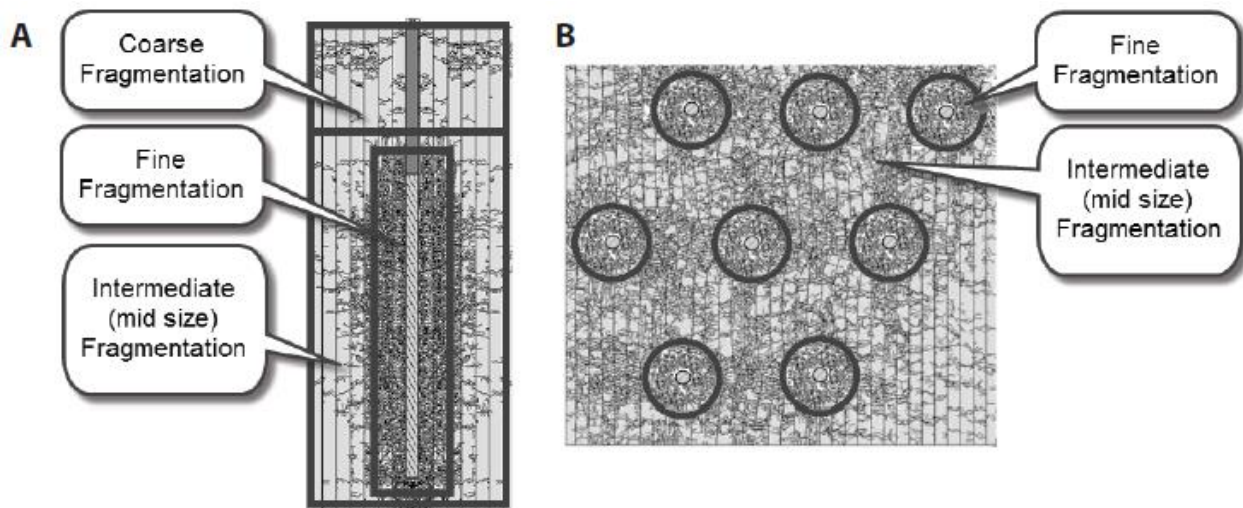


Figura 2. Zonas de fragmentación según modelamiento [3].

- Región gruesa (coarse fragmentation): esta zona de distribución de tamaño gruesa está delimitada por la zona típica del taco del pozo de tronadura, extendiéndose a lo largo del paño de tronadura a la altura del taco, lo cual también es visible en la Figura 3.
- Región fina (fine fragmentation): la zona con la fragmentación fina corresponde a la que está directamente en contacto con la carga explosiva y sus alrededores, la cual está compuesta por roca triturada producto de la detonación de la carga explosiva.

- Región intermedia (intermediate fragmentation): esta última zona posee una distribución de tamaño intermedia y se ubica entre los pozos de tronadura, justo debajo de la zona del taco.



Figura 3. Zonas de fragmentación en terreno [3].

Lo expuesto anteriormente también es posible verlo en la Figura 4 que representa las distintas zonas de fracturamiento para un solo pozo de tronadura. En ella se pueden apreciar 5 zonas [5].

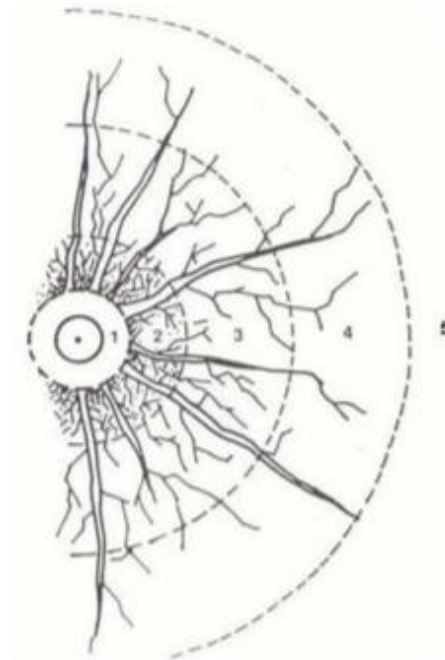


Figura 4. Fracturamiento en un pozo de tronadura [5].

1. Zona de fluencia plástica (expansión del pozo por la onda de detonación).
2. Zona de aplastamiento o trituración.
3. Zona de grietas radiales.
4. Zona poco fracturada.
5. Zona sin fracturación.

2.1.3. Material rodado

Tomando en consideración la Sección [2.1.2] donde se explica y se muestra que el material más grueso de una tronadura se encuentra en la parte superior de la pila tronada, de igual forma se puede advertir en la Figura 3 que existe material grueso a los pies de la frente. El material grueso presente en la región de material fino e intermedio, suponiendo que la tronadura se realizó correctamente, corresponde a rocas que han caído desde la parte superior de la pila hacia la parte inferior. Esta caída de material o material rodado se produce por efectos de la fuerza gravitacional, llevando las rocas más grandes de la parte alta de la pila a la pata.

El material rodado no siempre será una cantidad fija, sino que depende principalmente de dos factores, el primero es la tronadura en sí, donde una tronadura de mayor potencia (factor de carga, por ejemplo) o una tronadura que busque un mayor desplazamiento de mineral tendrá una mayor cantidad de material rodado en su parte inferior. El segundo factor que genera la caída de material es el efecto de la pala a la hora de cargar los camiones, en este caso, la zona que esté siendo cargada presentará mayor cantidad de material rodado.

El fenómeno descrito anteriormente es muy importante para el desarrollo de esta Memoria, puesto que es uno de los factores determinantes en las simulaciones realizadas, por esto el énfasis en la explicación.

2.1.4. Impacto en procesos posteriores

Como se mencionó anteriormente la tronadura es parte de una cadena de operaciones las cuales usan como materia prima los resultados obtenidos de este proceso. En este caso, la roca fragmentada debe cumplir ciertas condiciones para el correcto funcionamiento de los equipos y procesos aguas abajo. A continuación, se explica cómo los resultados de la tronadura afectan a las operaciones que le siguen, carguío y transporte y conminución.

- Carguío y Transporte: la distribución granulométrica procedente de la tronadura afecta directamente a los equipos de carguío y transporte. El factor de llenado del balde de la pala y de la tolva del camión pueden variar dependiendo de la fragmentación; por ejemplo, una granulometría más gruesa con bolones provocará factores de llenado menores que una fragmentación más fina, además de traer consigo problemas de seguridad. También, al tener una distribución más fina el proceso de carguío será más sencillo [6]. Por otro lado, una fragmentación muy fina puede generar un excesivo levantamiento de polvo lo cual puede acarrear problemas de seguridad y medioambiente. Por último, a modo de ejemplo, en la Tabla 1, se muestra cómo la relación *RS (tamaño relativo) afecta el factor de llenado de la pala [1].

Tabla 1. Factor de llenado de pala según RS [1].

ROCA FRACTURADA O FRAGMENTADA		FACTOR DE LLENADO
DESCRIPCION	TAMAÑO RS	
Muy bien volada, suelos	$\leq 1/8$	0,8 - 1,0
Bien volada	1/4 - 1/8	0,7 - 0,9
Bloques gruesos de roca prevolada	1/4 - 1/2	0,5 - 0,8
Roca mal volada o fragmentada	$\geq 1/2$	0,4 - 0,6

* RS es la relación entre el tamaño del bloque y la dimensión crítica de un lado de la pala (puede considerarse la más pequeña).

- Conminución: el proceso de conminución se ve bastante afectado por los resultados de la operación de tronadura. Una manera sencilla de analizarlo es con la ecuación de Bond (Ecuación 1), donde se ve que la alimentación del chancador afecta el consumo de energía de este.

$$E = 10 \times Wi \times F \times \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right)$$

Ecuación 1. Ecuación de Bond.

donde $E \left[\frac{kWh}{T} \right]$, corresponde a la energía específica consumida por el chancador o molino, $Wi \left[\frac{kWh}{T} \right]$ al índice de Bond de la roca, F a un factor de ajuste de escalado industrial, $P_{80} [\mu m]$ al 80% del tamaño pasante del producto de la conminución y $F_{80} [\mu m]$ al 80% del tamaño pasante de la alimentación al equipo.

Un proceso de tronadura optimizado para la planta puede disminuir costos asociados a la energía del chancador. Cabe destacar que se puede aplicar más o menos energía en la tronadura para obtener curvas que se adapten mejor a los requisitos de la planta, se debe tener en cuenta también que los explosivos son más baratos que la energía de utilizada por el chancador o molino. Los molinos y chancadores cuentan con curvas de alimentación ideal que son donde alcanzan su máximo rendimiento, es por ello que se debe apuntar a estas curvas de alimentación. Cada planta de conminución tiene sus requerimientos, por lo que es muy importante que la fragmentación por tronadura se realice de manera estratégica para hacerla coincidir con las necesidades de la planta. Por otro lado, también se destaca que no solo una buena distribución granulométrica garantiza un buen rendimiento de la planta, sino que el fracturamiento interno de la roca también afecta el proceso y esto a su vez es producto de la tronadura [7].

Teniendo conocimiento, a grandes rasgos, sobre cómo los resultados de las tronaduras afectan a los procesos posteriores se vuelve necesario que ésta tenga un buen desempeño. Por tal razón, una buena estimación de la curva de distribución granulométrica toma valor, ya que, una correcta estimación puede predecir problemas o beneficios de las operaciones aguas abajo. Cabe destacar que los resultados de la tronadura no necesariamente son mejores si la fragmentación es más fina, sino que deben estar optimizados para que los procesos posteriores funcionen de manera correcta en su conjunto.

2.2. Medición de fragmentación

Como se observó en la Sección [2.1.4] la tronadura es una operación muy importante para los procesos posteriores, por lo que es necesario mantener un control de sus resultados. Es por esto que, a lo largo de los años, se han utilizado distintos métodos para medir y predecir la distribución granulométrica de las voladuras. Estos métodos se pueden clasificar en dos categorías: directos e indirectos [8] [9] [10]. Cada uno de los métodos tiene sus ventajas y desventajas, de modo que la facilidad de implementación, costo y precisión de los distintos métodos permite escoger entre ellos y es lo que los mantiene vigentes a todos en la actualidad. En la Figura 5 se muestra un esquema en el cual se aprecian las dos ramas mencionadas anteriormente.

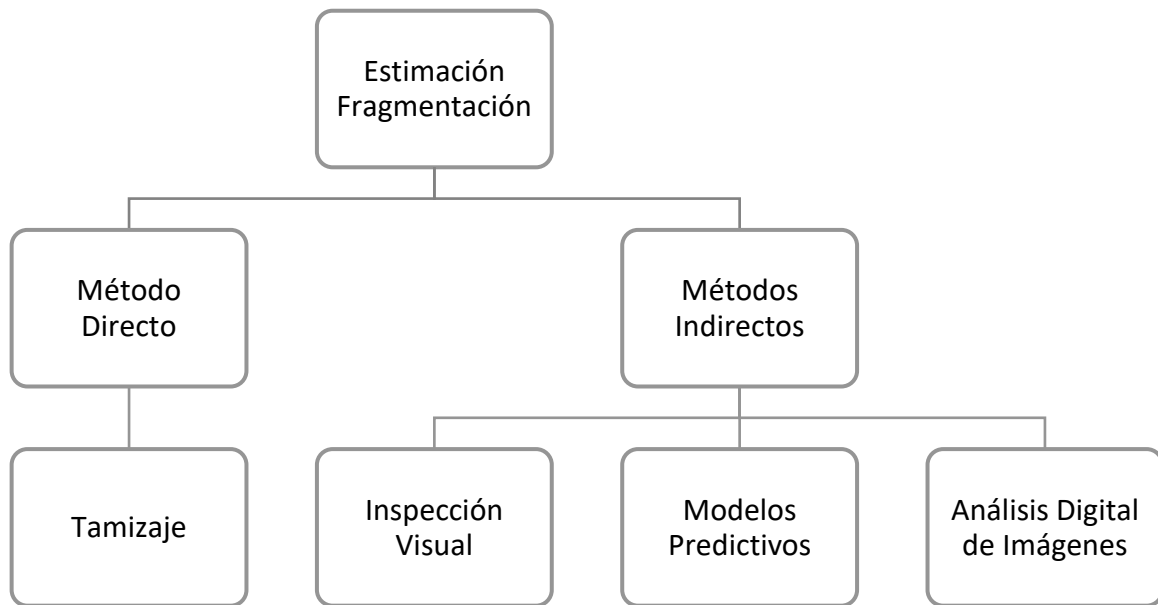


Figura 5. Métodos de estimación de fragmentación.

2.2.1. Métodos directos

El método directo es principalmente un tamizaje del material tronado. Consiste en una separación física mediante gravedad, en la cual el material se hace pasar por harneros, los cuales tienen aberturas establecidas. Al pasar la roca por los distintos harneros se produce la separación del material, donde las rocas con un tamaño mayor a la abertura del harnero quedan retenidas, logrando con ello obtener la curva de fragmentación del material en cuestión.

Este proceso es el que genera resultados más precisos, pero tiene otros inconvenientes como son las dificultades técnicas de la realización, teniendo que retirar material tronado en camiones. Otra desventaja que posee este método son los altos costos asociados al tamizado de grandes volúmenes de roca; por esto mismo, dependiendo de la cantidad, el análisis de todas las muestras de material tronado puede requerir mucho tiempo. Para obtener las muestras de material de la frente de tronadura se debe utilizar equipo que está destinado a la producción (palas y camiones) por lo que se interrumpe la producción de la mina. Además, este método presenta un inconveniente aún mayor, y es que a pesar de que el resultado de los tamizajes es bastante preciso no es posible establecer totalmente la representatividad de la muestra, ya que las tronaduras de producción poseen millones de toneladas y no siempre es posible lograr tamizar una muestra que sea representativa de la tronadura. Además, a la hora de tomar muestras, dado los

grandes volúmenes de ellas se tiende a mezclar material de otras zonas, sin poder delimitar bien la porción que se quiere muestrear [9] [10] [11].

En resumen, el alto costo, requerimiento de tiempo y la detención de la producción llevaron a desarrollar y volver cada vez más comunes los métodos indirectos de estimación de fragmentación.

2.2.2. Métodos indirectos

En esta sección se abordan los tres métodos indirectos mencionados en la Figura 5: inspección visual, modelos predictivos y análisis digital de imágenes.

El primer método indirecto es la inspección visual de la pila de tronadura. Como el nombre lo sugiere se observa la pila en busca de bolones o material fino. Los resultados de este método son bastante imprecisos y subjetivos, por lo tanto, no debe emplearse de manera cuantitativa, sino sólo cualitativamente, por ejemplo, buenos o malos resultados. Este método al ser solo observacional es rápido y prácticamente sin costo, además de que no interfiere en la producción de la mina [10] [11].

El segundo método es ampliamente utilizado en la industria minera y corresponde al uso de modelos predictivos basados en fórmulas empíricas, los cuales se apoyan también, en funciones matemáticas que describen de manera correcta la fragmentación de la roca, como lo son Rosin-Rammler, Swebrec, Weibull, entre otras [12] [13]. Los modelos predictivos más conocidos o utilizados son el Kuz-Ram, Crush Zone Model, SveDeFo, entre otros [9] [11] [14]. Estos utilizan parámetros de entrada propios de la roca y la voladura, como por ejemplo: el factor de carga, burden y espaciamiento, largo del taco y de la carga, altura de banco y parámetros geomecánicos de la roca como fallas preexistentes, densidad, dureza, etc. Este método presenta como ventaja que no interrumpe la producción y no posee costos asociados, pero sus resultados no siempre son precisos.

Finalmente, el tercer método, correspondiente al análisis digital de imágenes es el que mejores resultados entrega de los tres. Dicho método busca estimar las curvas de fragmentación del material mediante el análisis computacional de fotografías, el cual se realiza con softwares que a partir de imágenes determinan la fragmentación en la fotografía y con ello de la tronadura. Dentro de los softwares más utilizados se encuentran: *PowerSieve*, *Wipfrag*, *Split Online*, *Gold-Size*, entre otros. En la actualidad este método no solo se utiliza para medir la distribución

granulométrica en la frente, sino que también se utiliza para medir la fragmentación en la pala, el camión y en la correa del chancador. En este último caso, los resultados al medir la fragmentación en correas transportadoras son mejores, principalmente, porque en ella está todo el material expuesto y es más fácil de fotografiar en su totalidad [15], a diferencia del que se encuentra en la pila, pala o camión. El análisis digital de imágenes ha adquirido bastante importancia en los últimos años. Incluso se ha evaluado la utilización de drones para tomar imágenes aéreas de las pilas y con ello obtener la fragmentación de la frente de manera constante y en tiempo real [16]. El uso del análisis de imágenes requiere manejar con cuidado los lugares donde se toman las fotografías, el cómo se toman estas fotografías y el análisis y procesamiento mismo de las imágenes; todo esto para evitar obtener resultados erróneos, que no sean representativos o que estén sesgados [17].

Como en todo proceso de estimación, existen ventajas y desventajas. Dentro de las ventajas del análisis digital de imágenes destacan las siguientes [8] [18] [19]:

- El proceso de muestreo se puede realizar de manera rápida, pudiendo tomar múltiples imágenes en un corto periodo de tiempo.
- Es un proceso no invasivo con el mineral, ya sea en pilas, pala, camión, correa, etc. No se altera la zona fotografiada.
- Es un método de bajo costo ya que no requiere de gran inversión de equipos en comparación con el tamizaje. Puede requerir la compra de licencias de software y equipo fotográfico o instalación de equipos en correas, palas o tolvas.
- La toma de muestras no interfiere mayormente con la producción.
- Se puede analizar gran cantidad de muestras en poco tiempo, disminuyendo la variabilidad de los resultados.
- El procesamiento de imágenes se puede automatizar.

Algunas desventajas o problemas asociados a este método de estimación de distribución granulométrica son las siguientes:

- Puede haber sesgo en la toma de imágenes.
- Solo se analiza la superficie que se desea muestrear, sin poder penetrar hacia el interior, ya sea de la pila, pala o camión. En correas no se presenta tanto este problema, puesto que la distribución del material es más uniforme.
- Existe pérdida de información y por ende un error asociado, ya que el proceso se realiza en 2D y entrega un resultado válido para 3D.
- No se pueden medir finos; sin embargo, se pueden incluir con funciones matemáticas.

- Debe haber buena iluminación y no debe haber obstrucciones como polvo o neblina.
- Se asume una densidad constante para todo el proceso.

2.3. Análisis Digital de Imágenes con Software *PowerSieve*

El software *PowerSieve* es una herramienta de análisis de fragmentación basada en imágenes. Los requisitos de entrada son imágenes que se han escalado o que tienen una escala disponible en ella. A partir de estas se busca asignarles un tamaño a las partículas dentro de la imagen para posteriormente entregar una curva de fragmentación de la fotografía [20].

El software *PowerSieve* extrae la distribución del área proyectada de las partículas en las imágenes. Este es un análisis 2D y no intenta extrapolar a una tercera dimensión. La clasificación de partículas se basa en la dimensión del eje menor, equivalente al diámetro mínimo de Feret (distancia entre dos líneas paralelas que son tangente a la partícula, Figura 6), de las partículas [21].



Figura 6. Diámetro de Feret [21].

2.3.1. Protocolo de muestreo

A la hora de tomar fotografías en el terreno es importante estandarizar el proceso para así evitar errores sistemáticos en el muestreo de la tronadura. Dado que estas imágenes son la materia prima de los softwares de procesamiento de imágenes, como lo es *PowerSieve*, es vital tener en cuenta los siguientes puntos [17] [20] [22] [23]:

- Escala: se debe usar una escala conocida y fácil de detectar en cada una de las fotografías, por ejemplo, una pelota o algún objeto esférico es siempre recomendable ya que desde cualquier ángulo la pelota siempre tendrá las mismas dimensiones. En caso de utilizar otro objeto se debe asegurar de que este no esté alterado por perspectivas o distorsiones del lente de la cámara. También es posible usar la calibración de la cámara, sabiendo cuáles son las dimensiones de la imagen a cierta distancia. Se recomienda que la escala nunca sea menor a la quinceava parte de la imagen, esto principalmente para evitar errores de delimitación. Además, se señala que a mayor tamaño de escala menor es el error (pero se debe considerar no obstruir la imagen demasiado), debido a que es más fácil delimitar la escala con mayor precisión.
- Ángulo: el ángulo con el que se toma la imagen es muy importante, ya que este debe ser perpendicular al ángulo en el que se encuentra el mineral apilado (ángulo de reposo de la roca tronada). Los softwares de análisis de imágenes en su mayoría no pueden procesar cambios de escala a lo largo de la fotografía producto de la perspectiva, por lo que es recomendable evitar tomar imágenes muy inclinadas. En la Figura 7 se puede apreciar cómo distintos ángulos de muestreo afectan las curvas de distribución granulométrica de la misma pila. Tomar imágenes con un ángulo adecuado puede significar una disminución del error de estimación, aproximadamente entre un 5% a un 25% [24].

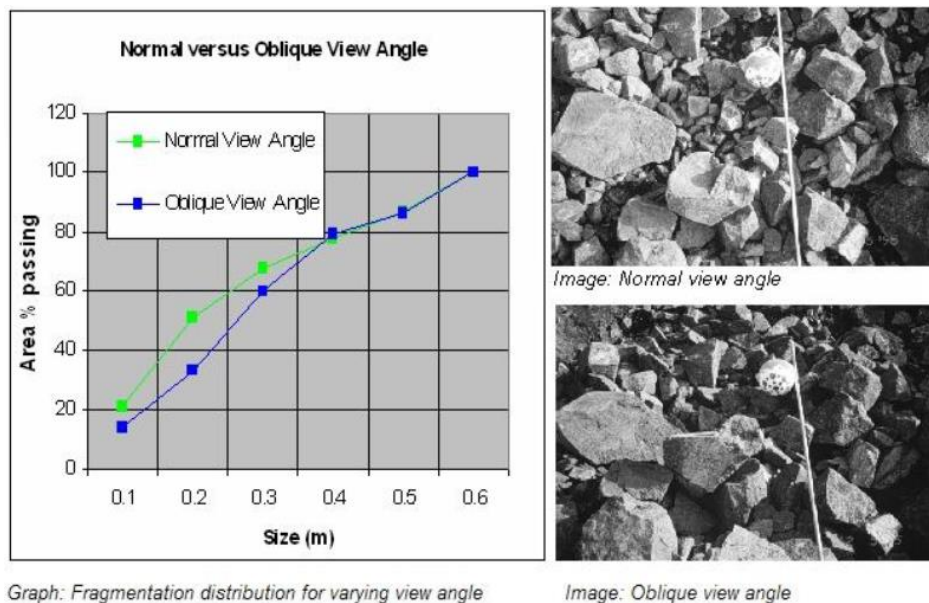


Figura 7. Comparación distintos ángulos de fotografía [20].

- **Distancia:** la distancia a la cual la fotografía es tomada puede afectar el procesamiento de la imagen, ya que, si la fotografía es tomada demasiado cerca de la pila, puede no contener los fragmentos más grandes, o estos pueden abarcar gran parte de la fotografía, evitando que aparezcan fragmentos de distintos tamaños. En caso contrario, cuando la imagen es tomada desde una distancia lejana y sin el zoom adecuado se puede subestimar la cantidad de fino, dado que este no se encuentra correctamente definido y será difícil delimitarlo. Otro punto importante es que en caso de tomar fotografías con zoom a gran distancia es necesario utilizar un trípode, puesto que, las imágenes se pueden distorsionar por el movimiento de la cámara. Se debe considerar que todos los fragmentos deben aparecer en las fotografías, por lo que la distancia (o el zoom aplicado) a la que se tome la muestra dependerá de cada voladura. Una voladura más gruesa permitirá tomar muestras más lejanas, en cambio una más fina requerirá acercarse más a la frente.
- **Muestreo:** el protocolo o esquema de muestreo es uno de los aspectos más relevantes para estimar de buena manera la curva de distribución granulométrica de una tronadura. El esquema debe ser totalmente aleatorio e imparcial, sin sobre muestrear una zona o buscar determinados fragmentos finos o gruesos, ya que esto puede generar sesgos en los resultados y volverlos inválidos o no representativos. También se puede estructurar el muestreo, pero hay que ser cuidadoso de no caer en sesgos.
- **Iluminación:** la iluminación es un factor importante, puesto que las imágenes deben tener buena definición y para ello la iluminación debe permitir distinguir bien cada partícula. Una imagen oscura o muy clara necesitará más preprocesamiento para lograr obtener buenos resultados. Por lo tanto, la fotografía debe tener un buen balance de luz. Idealmente la luz debe estar perpendicular a la frente para que así no se produzcan sombras en la imagen por efecto de los mismos fragmentos. También se debe considerar la visibilidad en la zona a fotografiar, por ejemplo, si se toman imágenes lejanas con zoom no debe haber presencia de polvo o neblina en la zona para así asegurar la calidad de la imagen.
- **Calidad de la imagen:** imágenes de mejor calidad tendrán mejores resultados que imágenes de menor calidad, esto porque el preprocesamiento de buenas

imágenes es más sencillo para imágenes con mejor definición. La calidad de la imagen no solo se ve afectada por los puntos anteriores, donde el ángulo de la fotografía, la distancia, y la iluminación juegan un papel importante, sino que también por la cámara misma. Una imagen mal enfocada o de baja resolución puede entorpecer el proceso. Este punto, actualmente, se puede obviar de cierta manera, debido a que las cámaras actuales poseen buenas resoluciones y enfoques automáticos.

2.3.2. Procesamiento de imágenes *PowerSieve*

Para el procesamiento de imágenes con el software *PowerSieve* se recurre al Manual de Procesamiento que incluye el programa [25]. A continuación, se describen los pasos a seguir para determinar las curvas de distribución granulométrica a partir de imágenes de roca tronada. Las imágenes deben ser de buena calidad y deben haber sido tomadas considerando las indicaciones de la Sección [2.3.1] para minimizar sesgos o errores en sus resultados.

Antes de comenzar con el preprocesamiento de imágenes es necesario crear un proyecto (Figura 8) en el cual se agreguen las muestras. Al crear el proyecto se detalla el nombre y el autor, además, se puede incluir información sobre dónde se realizó la voladura o las condiciones de ésta, por ejemplo. También aquí, se selecciona el tamaño de la malla o los incrementos que tendrá el tamiz con el cual se evalúan todas las imágenes. Se puede seleccionar una escala lineal de incrementos o se puede utilizar una personalizada. Los resultados se entregarán en función de estos tamices seleccionados.

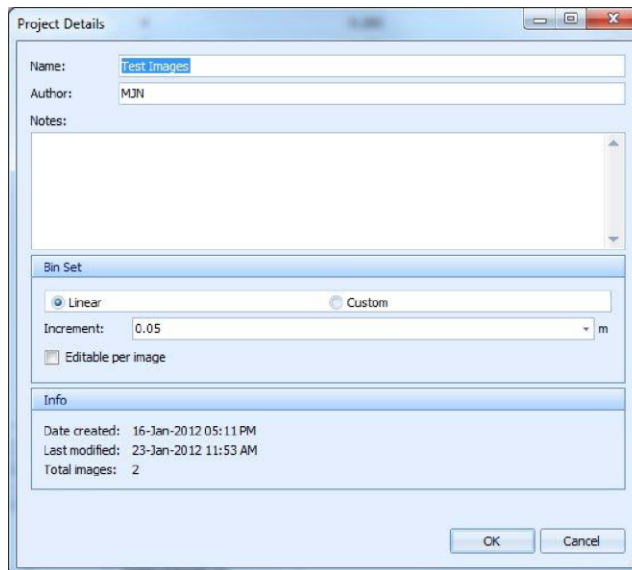


Figura 8. Panel para crear proyecto [25].

Una vez que el proyecto está creado, se procede a cargar las imágenes que se van a procesar. Estas imágenes se pueden agrupar dentro del proyecto en carpetas para facilitar su análisis. Luego de que las imágenes están cargadas, se procede al preprocesamiento de estas. El preprocesamiento consta de 5 etapas o pasos que se detallan a continuación:

- **Details:** en la pestaña de detalles (Figura 9) se anota toda la información de la muestra que pueda ayudar a identificarla posteriormente. Incluye, por ejemplo, dónde fue la voladura, el operador, el tipo de roca y cualquier información que pueda ser relevante.

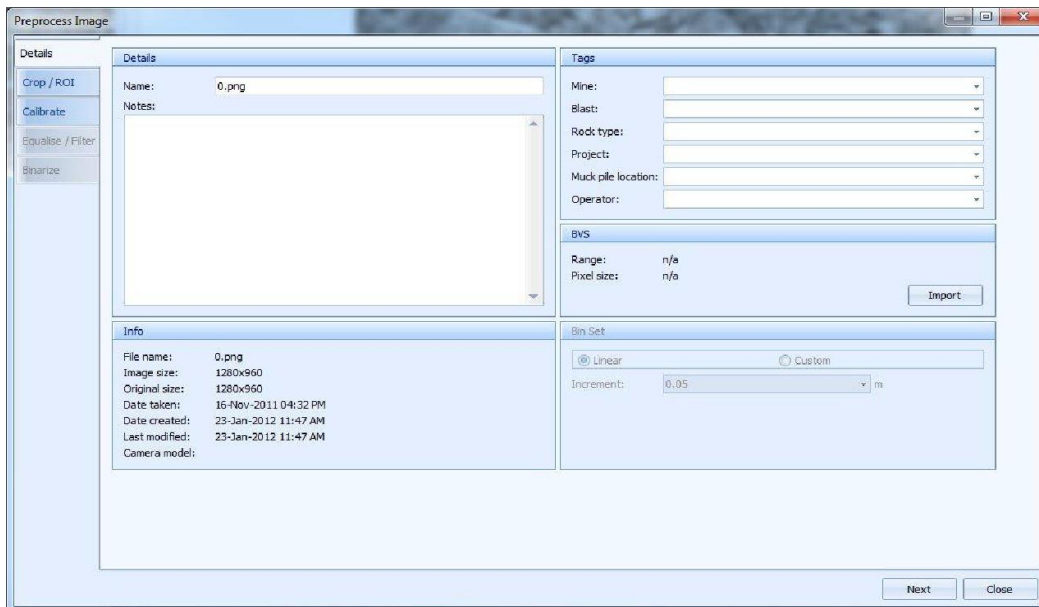


Figura 9. Pestaña Details preprocesamiento PowerSieve [25].

- *Crop/ROI*: en esta pestaña se permite cortar, por ejemplo, bordes o zonas de la imagen que uno no quiere procesar. También se puede seleccionar una región de interés (region of interest / ROI) que permite remover rocas que uno no quiere que sean procesadas (Figura 10). Es importante señalar que, si una partícula tiene su eje mayor definido por el límite de la imagen, ésta no será incluida en el análisis.

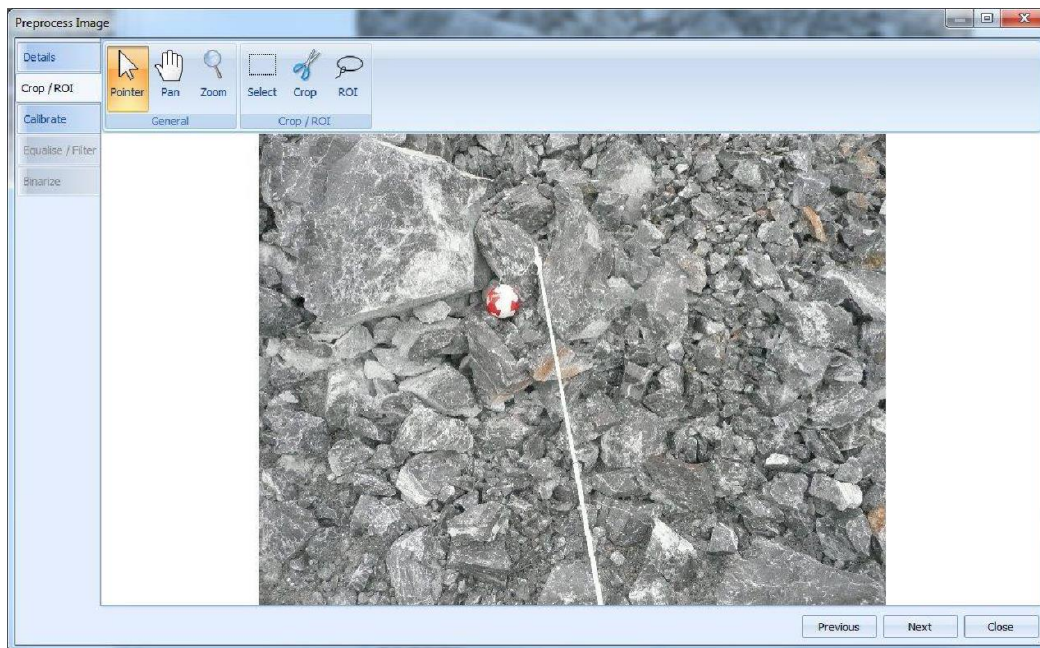


Figura 10. Pestaña *Crop/ROI* preprocesamiento *PowerSieve* [25].

- *Calibrate*: la tercera pestaña corresponde al proceso de calibrado, ventana donde se define la escala de la imagen. Aquí se le asigna una dimensión a la muestra de X metros/píxel. Esta parte es muy importante puesto que determina los resultados posteriores y, por lo mismo, la escala debe ser fijada con rigurosidad. Una vez fijada la escala, ésta se aplica para toda la imagen ya que no se toma en cuenta ninguna posible distorsión o perspectiva en ella. También es posible fijar escalas circulares, como una pelota, o lineales; en la Figura 11 se pueden apreciar ambas escalas.

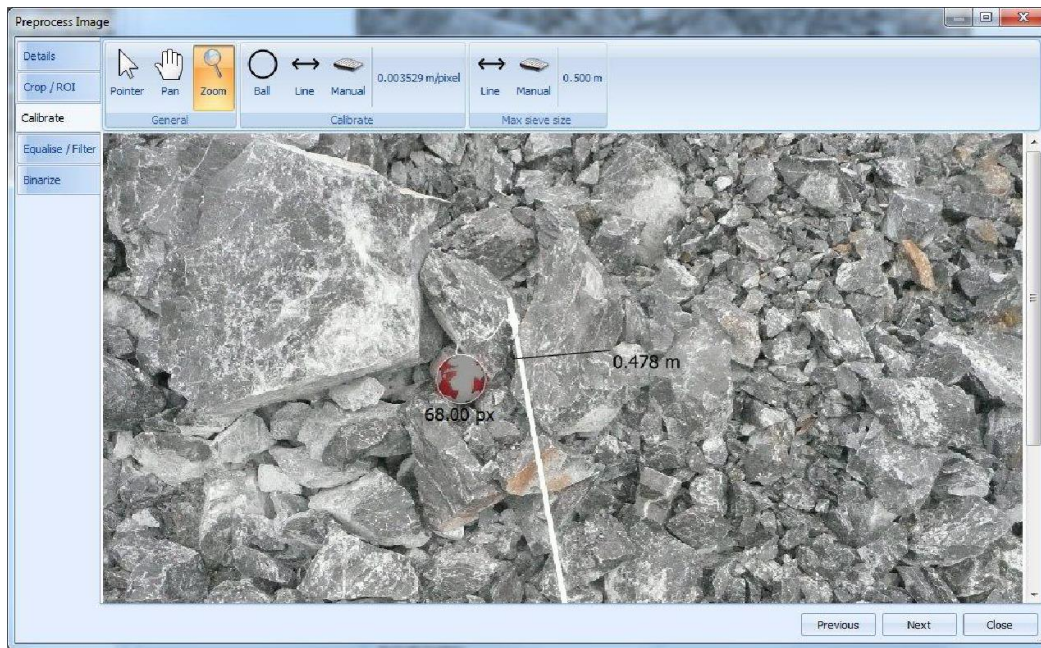


Figura 11. Pestaña Calibrate preprocesamiento PowerSieve [25].

- **Equalize:** esta pestaña (Figura 12) permite aplicarle una ecualización a la imagen. El manual detalla que en la mayoría de los casos esto ayuda con el contraste de la imagen pero que en otras incrementa las texturas de la fotografía lo cual dificulta su posterior procesamiento. Por este motivo, el ecualizado no siempre se debe utilizar. El objetivo del ecualizado es mejorar la distinción entre el fondo y las partículas mediante el cambio de contraste que se aplica a la imagen.

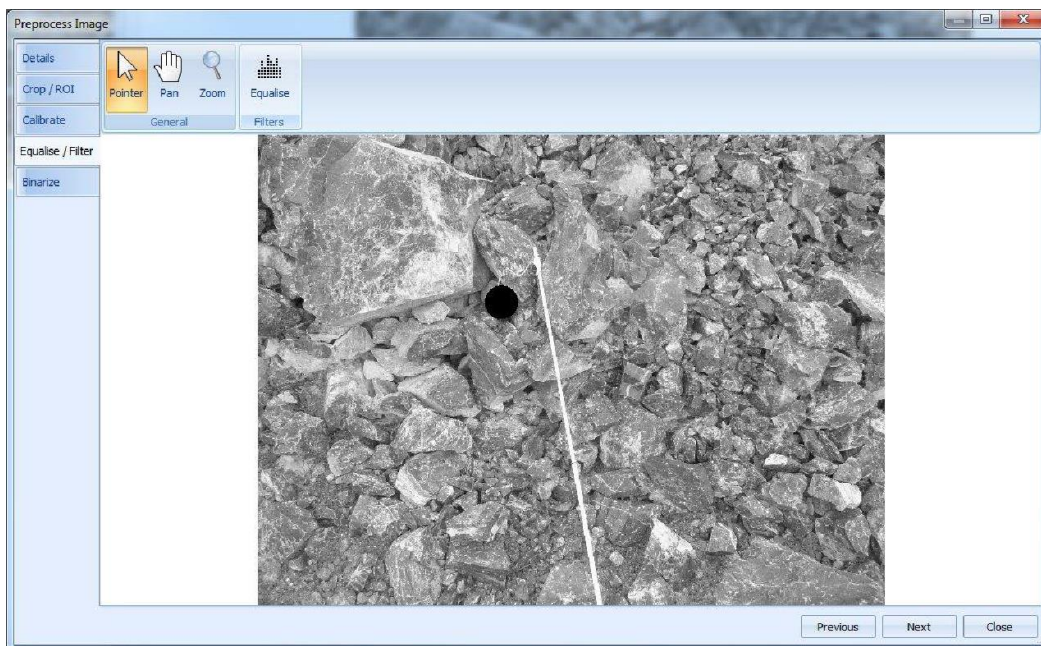


Figura 12. Pestaña Equalize preprocesamiento PowerSieve [25].

- *Binarize*: la última pestaña, antes de terminar el preprocesamiento es la de binarizado. Ésta permite crear una imagen binaria de la original, donde las rocas deben ser blancas y tanto el borde de las partículas como el fondo deben ser totalmente negros. Durante este proceso de binarizado se permite cambiar el *threshold*, el cual varía los límites de las partículas, erosionándolos o dilatándolos. Un valor más alto implica límites más gruesos (dilatados) y un valor más bajo, límites más delgados (erosionados). Este parámetro depende totalmente de la muestra que se esté preprocesando. Con el valor del *threshold* definido se procede a modificar la imagen manualmente. Es posible utilizar distintas herramientas para arreglar problemas que pueden haber ocurrido durante el binarizado de la imagen. Estas modificaciones van desde remover pixeles negros o blancos que hayan quedado en zonas que no correspondan, delimitar fragmentos que no hayan quedado bien definidos o demarcar zonas que deben ser negras o blancas, dependiendo del caso. También permite incorporar zonas de finos en el procesamiento (estos no fueron utilizados para esta Memoria), las que luego se ajustan con funciones Rosin-Rammler o Swebrec. Las modificaciones descritas anteriormente pueden hacerse a comodidad del usuario. Cuantas más modificaciones se hagan, se generarán resultados más precisos, pero, también, se consumirá más tiempo. Por último, el programa muestra tres tipos de imagen: original, binarizada e híbrida (combinación de las dos anteriores). En la Figura 13 se observa la interfaz de la pestaña y todo lo mencionado anteriormente.

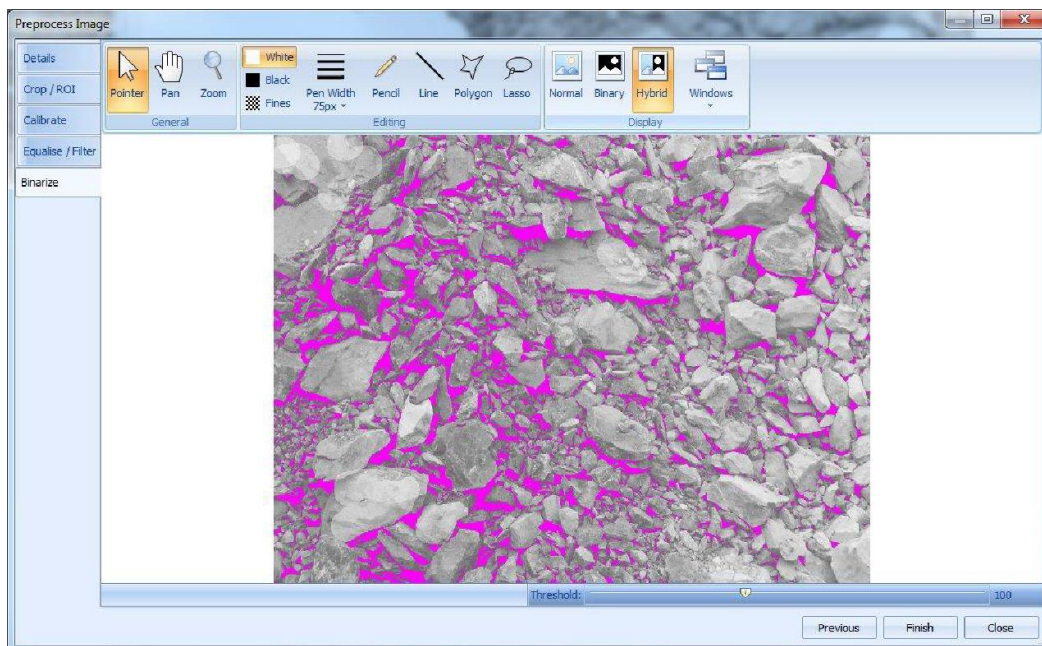


Figura 13. Pestaña Binarize preprocesamiento PowerSieve [25].

Con todas las etapas del preprocesamiento completadas se procede a procesar la imagen. El software *PowerSieve* entrega resultados para cada una de las muestras, para las carpetas o grupos de muestras que el usuario haya hecho o para el proyecto completo. Los resultados entregados son los siguientes:

- *Bin Viewer*: en esta ventana se puede ver cómo las rocas de la imagen caen o pasan por cada tamiz. Principalmente, esto es sólo una visualización y puede ser exportada como animación. (Figura 14)

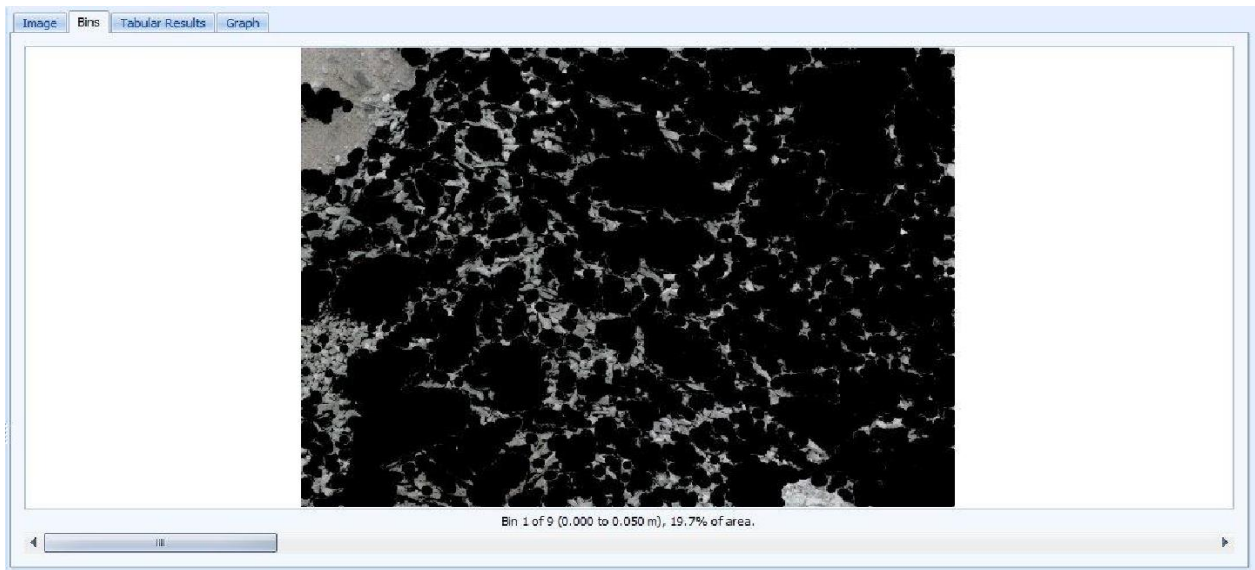


Figura 14. Resultados Bin Viewer PowerSieve [25].

- *Tabular Results*: esta pestaña entrega los resultados de análisis de manera numérica, puede ser exportada como *Excel* o *CSV*. Los resultados del procesamiento se ven detallados de la siguiente manera: en área retenida en cada tamiz, en porcentaje pasante según cada tamiz y también ajustadas para una función Rosin-Rammler o Swebrec con sus respectivos parámetros. En la Figura 15 se observa cómo se presentan estos resultados.

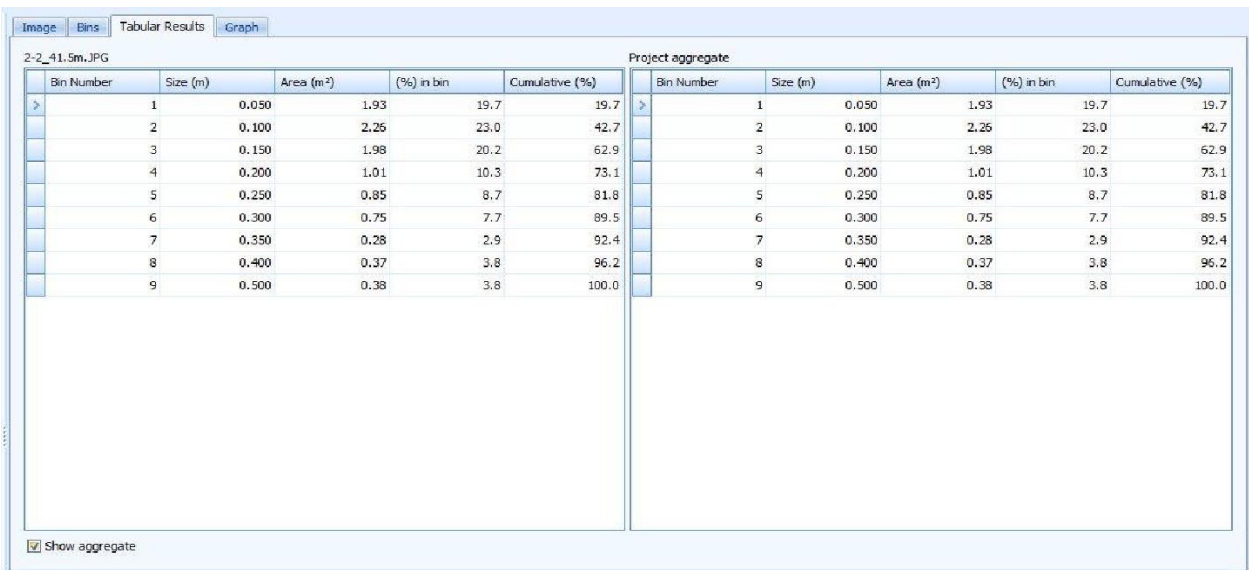


Figura 15. Resultados Tabular Results PowerSieve [25].

- **Graph Results:** finalmente, los *Tabular Results* pueden verse de manera gráfica en esta pestaña (Figura 16). También, muestra las distribuciones entregadas por el software y ajustadas por una función Rosin-Rammler o Swebrec.

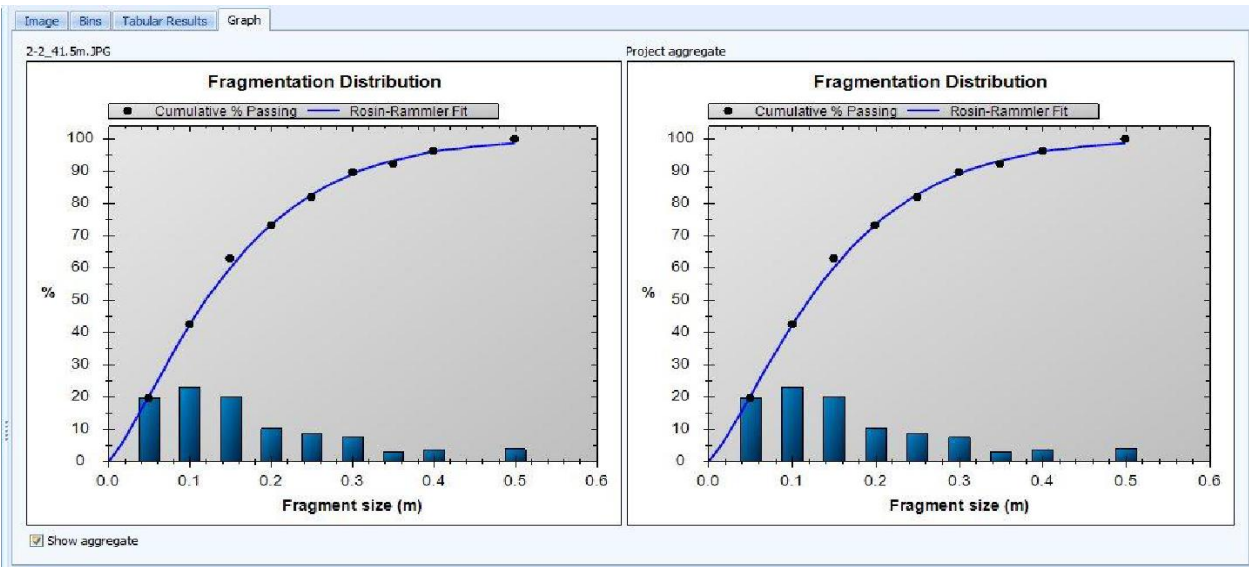


Figura 16. Resultados Graph Results PowerSieve [25].

2.4. Software *Rocky*® DEM

En esta sección se da una breve introducción de los softwares que usan el método de elementos discretos (DEM) y luego se detallan los aspectos teóricos más relevantes del software *Rocky*® para esta Memoria.

2.4.1. Método de elementos discretos

Las simulaciones buscan diseñar un modelo para luego experimentar en él, logrando con ello entender su comportamiento en el tiempo y así obtener experiencias que permitan mejorar el funcionamiento de distintos procesos.

Las simulaciones con el método de elementos discretos son capaces de estudiar modelos complejos de partículas compuestas por sólidos a granel que pueden tener diferentes propiedades, como: tamaños, formas, densidades, etc., en un sistema controlado, entregando información de su comportamiento en el tiempo. Las partículas se analizan como elementos discretos, siendo cada una un cuerpo rígido e independiente uno del otro [26].

A lo largo de la historia del método de elementos discretos destacan algunos hitos que han llevado a los softwares DEM a lograr nuevos avances, abriendo y ampliando su uso en distintos campos al volverlos más versátiles y confiables. Los hitos más destacados son los siguientes [26] [27]:

- En el año 1971 se crea el primer DEM que buscaba estudiar modelos en el campo de la minería y mecánica de rocas.
- Luego en el año 1979 se extiende el DEM al estudio de suelos o materiales granulares, abriendo así el uso del método a industrias como la agricultura, química, farmacia, alimentos, entre otras.
- En 1992 se define el método de elementos discretos como cualquier programa de computadoras que:
 - Permite el desplazamiento finito, rotación y desprendimiento de cuerpos discretos (modelos de ruptura).
 - Reconoce nuevos contactos durante el proceso de simulación.
- A partir de la década de los 90 y en adelante, la cantidad de publicaciones basadas en el método de elementos discretos ha aumentado exponencialmente. Esto se debe a la gran cantidad de usos que poseen estos softwares, pudiendo ser útiles en variadas industrias y procesos.

En el método de elementos discretos se utilizan dos tipos de ecuaciones que describen el movimiento y rotación de partículas (Newton-Euler) y las que determinan los contactos entre partícula-partícula y partícula-entorno.

2.4.2. Aspectos teóricos DEM

En el método de elementos discretos cada partícula puede tener dos tipos de movimientos: de traslación y de rotación. Estos movimientos, se ven afectados por las interacciones con otras partículas y con el entorno. Además, DEM considera que todos los elementos del sistema son no deformables por lo que se pueden regir bajo dos ecuaciones fundamentales, Newton-Euler, donde la ecuación de Newton describe la traslación de la partícula y las de Euler la rotación [28].

A partir de las ecuaciones para cada partícula y conociendo todas las variables involucradas y las condiciones de borde para la integración de las ecuaciones diferenciales, es posible determinar el movimiento de cualquier partícula y con ello el comportamiento de todo el sistema particulado.

La ecuación que describe el movimiento de traslación es la de la segunda ley de Newton (Ecuación 2). Donde m_i es la masa de la partícula, \vec{x}_i corresponde a la posición, \vec{F}_i a la fuerza neta de la partícula (sin tomar en cuenta la gravedad) y \vec{g} a la aceleración de gravedad.

$$m_i \frac{d^2 \vec{x}_i}{dt^2} = \vec{F}_i + m_i \vec{g}$$

Ecuación 2. Ecuación de traslación de partícula.

Luego la Ecuación 3, de Euler, describe el movimiento de rotación de la partícula. Donde I_i corresponde al momento de inercia de la partícula, $\vec{\omega}_i$ a la velocidad angular y \vec{T}_i al torque neto de la partícula.

$$I_i \frac{d \vec{\omega}_i}{dt} = \vec{T}_i$$

Ecuación 3. Ecuación de rotación de partícula.

Estas ecuaciones están descritas de manera general por lo que pueden ser resueltas para cualquier geometría.

2.4.3. Interacción de partículas

Las partículas en el método de elementos discretos, como se mencionó anteriormente, son sólidos rígidos que no se deforman, entonces las fuerzas actuantes en las interacciones partícula-partícula o partícula-entorno, que correspondería a la deformación por contacto del sólido en la realidad, quedan definidas en función de la superposición al momento del contacto. En la Figura 17 se muestra un ejemplo de la superposición generada entre dos partículas, donde δ corresponde a la superposición. Esta superposición también puede generarse en el contacto partícula-entorno.

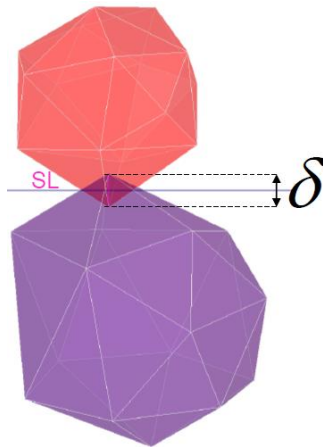


Figura 17. Ejemplo superposición de partículas [29].

La superposición al momento del contacto es interpretada por el software *Rocky*® como una fuerza de contacto, esta fuerza de contacto puede ser normal, tangencial o adhesiva. Para el desarrollo de la Memoria solo se consideran las fuerzas de contacto normal y tangencial. Para clasificar las distintas fuerzas de contacto utilizadas en esta Memoria se deben cumplir los siguientes requisitos en cada uno de los casos [29]:

- Fuerza de contacto normal:
 - Ser repulsiva.
 - Permitir la disipación de energía; esto quiere decir que el coeficiente de restitución esté en el intervalo entre 0 a 1.
 - La forma del perfil de deformación, superposición en el caso DEM, debe ser similar al experimental.
 - Se define por valores de superposición y desplazamiento de contacto normal.

- Fuerza de contacto tangencial:
 - Representar el comportamiento de fricción de Coulomb.
 - Permitir coeficientes de fricción dinámicos y estáticos.
 - Se define en función de valores de superposición y desplazamiento de contacto tangencial.

2.4.4. Modelo de contacto

El software *Rocky*® presenta variados modelos de fuerzas de contacto para cada una de sus fuerzas actuantes: normal, tangencial y adhesiva, donde cada una tiene un uso dependiendo de lo que se quiere modelar. Cada modelo tiene sus propias restricciones y no se pueden combinar libremente entre ellos ya que algunos no son compatibles entre sí, por lo tanto, el software no lo permite. A continuación, se muestran los distintos modelos que posee el software para cada una de las fuerzas de contacto y sus respectivas limitaciones de combinación:

- Modelos de contacto de fuerza normal:
 - Hysteretic Linear Spring (HLS)
 - Linear Spring Dashpot (LSD)
 - Hertzian Spring Dashpot (HSD)

- Modelos de contacto fuerza tangencial:
 - Linear Spring Coulomb Limit (LSCL) – Acepta HLS y LSD
 - Coulomb Limit (CL) – Acepta HLS, LSD y HSD
 - Mindlin-Deresiewicz (MD) – Acepta HSD

- Modelos de contacto fuerza adhesiva:
 - Constant Adhesive (CT) – Acepta HLS, LSD y HSD
 - Linear Adhesive (LN) – Acepta HLS, LSD y HSD
 - Leeds Adhesive (LD) – Acepta HLS
 - JKR – Acepta HSD

2.4.5. Simulación de partículas

Durante la simulación con el método de elementos discretos, cada partícula es evaluada independientemente bajo la Ecuación 2 y Ecuación 3, pero estas partículas se pueden ver afectadas por fuerzas externas, ya sean choques con otras partículas o choques con el entorno, entonces estas ecuaciones quedan como la Ecuación 4 y Ecuación 5, respectivamente (al momento del contacto):

$$\Sigma \vec{F} = \vec{F}_{cuerpo} + \vec{F}_{superficie} = m \frac{d^2}{dt^2} x_i = m \vec{a}$$

Ecuación 4. Ecuación de traslación con contacto.

$$\Sigma \vec{M} = \vec{M}_{cuerpo} + \vec{M}_{superficie} = \vec{I}_i \frac{d}{dt} \vec{\omega}_i + (\vec{I}_i \times \vec{\omega}_i)$$

Ecuación 5. Ecuación de rotación con contacto.

donde en la \vec{F}_{cuerpo} y \vec{M}_{cuerpo} corresponden a las fuerzas y momentos propios del cuerpo, $\vec{F}_{superficie}$ y $\vec{M}_{superficie}$ son las fuerzas y momentos que actúan en el momento del contacto entre dos partículas o una partícula y la superficie. También, $(\vec{I}_i \times \vec{\omega}_i)$ corresponde al momento angular de la partícula. Cabe destacar que las fuerzas y momentos de superficie sólo actúan cuando la partícula entra en contacto con otro sólido.

A continuación, se muestra una lista de las distintas fuerzas que pueden incidir en la sumatoria total de fuerzas expresada anteriormente. En ella se detallan fuerzas propias del cuerpo y fuerzas de superficie:

- Fuerzas propias del cuerpo
 - Gravedad
 - Campos magnéticos
 - Arrastre
 - Campos electrostáticos
- Fuerzas de superficie
 - Fuerzas de contacto
 - Fuerzas de adhesión y cohesión

En los casos estudiados en esta Memoria, las fuerzas que afectan los cuerpos son solamente la de gravedad, en el caso de las fuerzas propias del cuerpo, y la fuerza de contacto en las fuerzas de superficie, ya que no existen fluidos en el modelo y por ende no hay fuerza adhesiva ni de cohesión.

2.4.6. Esquema de iteración

Los softwares DEM presentan el siguiente esquema de iteraciones (Figura 18, el cual se repite para cada partícula. El primer paso es determinar los contactos que afectan a la partícula en un tiempo determinado. Luego, proceden a resolver la Ecuación 4 y Ecuación 5, finalmente, resuelven los estados integrados de estas ecuaciones. Con los estados integrados resueltos, el software conoce la posición, velocidad y aceleración de la partícula evaluada. Por último, si el tiempo analizado corresponde al tiempo final se detiene la iteración para esa partícula y el software procede a la evaluación de la siguiente. En caso de haber terminado con todas las partículas del sistema modelado, procede a calcular los contactos para la primera partícula, pero en un $t + \Delta t$.

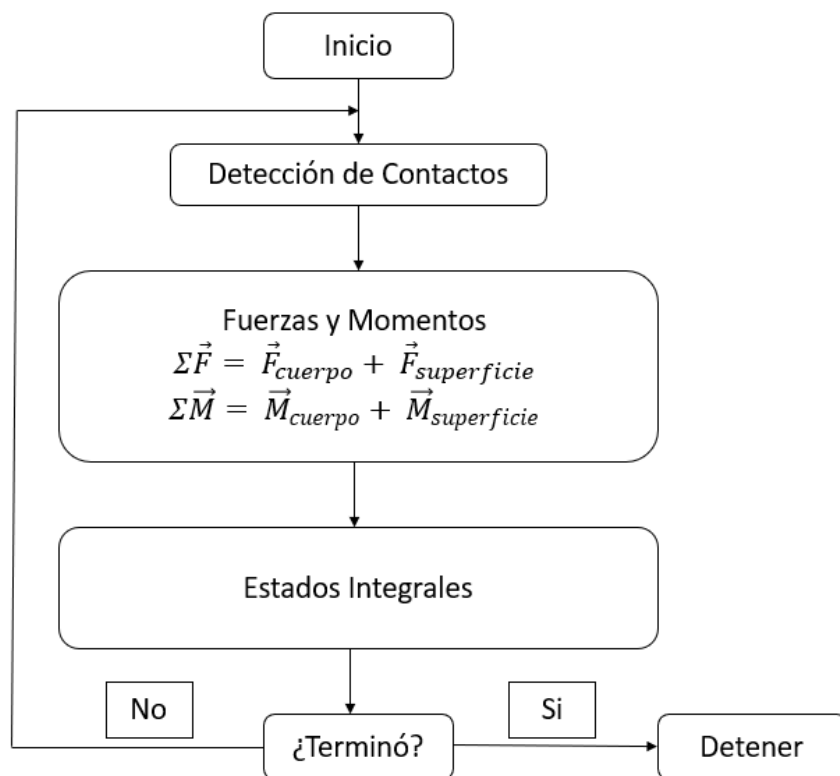


Figura 18. Esquema de iteraciones software Rocky® [27].

2.4.7. Parámetros

El software Rocky® necesita de una serie de parámetros de entrada para poder realizar las simulaciones. En la Tabla 2, se muestran algunos de los

parámetros más importantes y en negrita se detallan los que se ingresaron, en particular, en las simulaciones realizadas en esta Memoria [30] [31].

Tabla 2. Parámetros a ingresar en Rocky® [30].

Physics	Contact Model
	Gravity Direction
Geometry	Import Meshed Geometry
	Inlet Surface
	Wear Parameter
Motion Frame	Motion Type
	Duration
	Velocity and acceleration
Material (Particles & Boundary)	Density
	Young's Modulus
Material Interaction	Friction
	Restitution
	Adhesion
Particles	Shape
	Size
	Rolling Resistance
CFD Coupling	None, One Way, or Two-Way
Input	Mass Flow Rate
Domain Settings	Periodic Boundary Direction
Solver Settings	Simulation Time
	Hardware (CPU, GPU, Multi-CPU)
	Energy Spectra
	Time to collect wear statistics

Capítulo III

Metodología

El trabajo de esta Memoria tiene como objetivo desarrollar un plan que mejore las estimaciones, mediante análisis digital de imágenes, de las curvas granulométricas de roca procedente de tronadura, a partir de simulaciones de elementos discretos.

Para ello, se plantea la siguiente metodología resumida en cuatro pasos principales, los que se detallan a continuación y serán explicados en mayor profundidad en las secciones siguientes:

- Definición del caso de estudio: en esta sección se entregan las principales características del caso de estudio, conformando la base del trabajo realizado.
- Simulación casos de estudio: se abordan temas tales como: la geometría utilizada y la simulación con el software, los parámetros ingresados y cómo se transitó del caso de estudio a la simulación.
- Muestreo casos de estudio: se explica cómo fue el procedimiento para muestrear los resultados obtenidos en cada una de las simulaciones realizadas en el software *Rocky*®.
- Análisis digital de imágenes casos de estudio: se explican los pasos seguidos a la hora de analizar las imágenes en el software *PowerSieve*, luego del procesamiento de cada imagen se obtienen las curvas de fragmentación de cada una de las muestras. Posterior a esto se procede a analizar los resultados en el siguiente capítulo.

Adicional a estos cuatro pasos se agrega una última sección, la es un análisis comparativo de los componentes de la realidad que se pueden apreciar o no en los modelos simulados.

3.1. Definición Caso Base

El primer paso para alcanzar el objetivo principal es definir el caso base que se evalúa a lo largo de este trabajo. Se decide tomar como caso base una voladura de producción de un banco de 15 metros de altura, realizada en una mina en Chile,

la cual corresponde a una roca tipo pórfido dacítico (clasificada como roca dura) la que posee las siguientes características, señaladas en la Tabla 3.

Tabla 3. Propiedades roca caso de estudio.

Propiedad	Valor	Unidad
Densidad	2.57	<i>Ton/m³</i>
UCS	130	<i>MPa</i>
Módulo de Young	55	<i>GPa</i>
Esponjamiento	35 - 40	%
Ángulo de reposo	35 - 40	°
Módulo de Poisson	0.24	-

Las condiciones en las cuales fue realizada la voladura fueron las siguientes: malla de tronadura de 9 x 9 metros, los pozos tuvieron un diámetro de 12 ¼ pulgadas, un taco de 5 metros, un factor de carga de 334 *gr/T* y un factor de energía de 0.95 *MJ/T*. Luego de la tronadura se estimó la curva granulométrica del producto, la cual se detalla en la Tabla 4 y se ve de manera gráfica en la Figura 19. Esta distribución granulométrica es utilizada como caso de estudio y a partir de ella se realizan todos los procedimientos y análisis posteriores.

Tabla 4. Distribución granulométrica original caso base.

Tamaño [pulgadas]	Fracción acumulada [%]
18.66	100
11.38	90
8.15	80
6.77	70
5.51	60
4.45	50
3.62	40
2.87	30
2.24	20
1.69	10

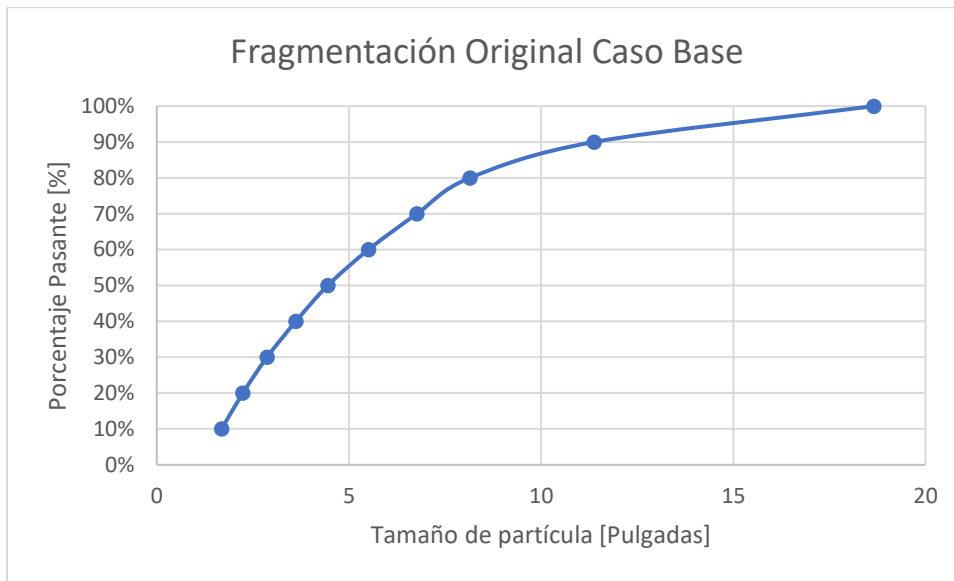


Figura 19. Curva granulométrica original caso base.

Después de la tronadura, la pila alcanzó una altura entre 17 a 18 metros por sobre el nivel del piso y fue catalogada por el personal que la realizó como una tronadura “con buena fragmentación, buena presencia de finos y con material grueso procedente de la zona del taco”.

Dada la gran cantidad de partículas obtenidas al utilizar la curva de distribución granulométrica de la Tabla 4, es necesario generar una modificación de la misma, con el objetivo de disminuir el número de partículas, lo que a su vez genera un alto impacto en la disminución de los tiempos de simulación del modelo realizado en el software *Rocky®*. Este cambio de la granulometría está justificado en el hecho de que, a la hora de medir la distribución granulométrica mediante toma de imágenes en la frente de carguío, el valor aproximado más pequeño de cada partícula que se mide es de 2 pulgadas. Este dato fue entregado y aprobado por personal experto y corresponde a criterios utilizados en terreno. Debido a esta condición es que se toma el valor de 2 pulgadas como tamaño mínimo dentro del modelo, lo cual cambia la distribución granulométrica original a la que se ve en la Tabla 5 y Figura 20.

Tabla 5. Distribución granulométrica caso base modificado.

Tamaño [pulgadas]	Fracción acumulada [%]
18.66	100
11.38	90
8.15	80
6.77	70
5.51	60
4.45	50
3.62	40
2.87	30
2.24	20
2.00	15.64
1.69	0

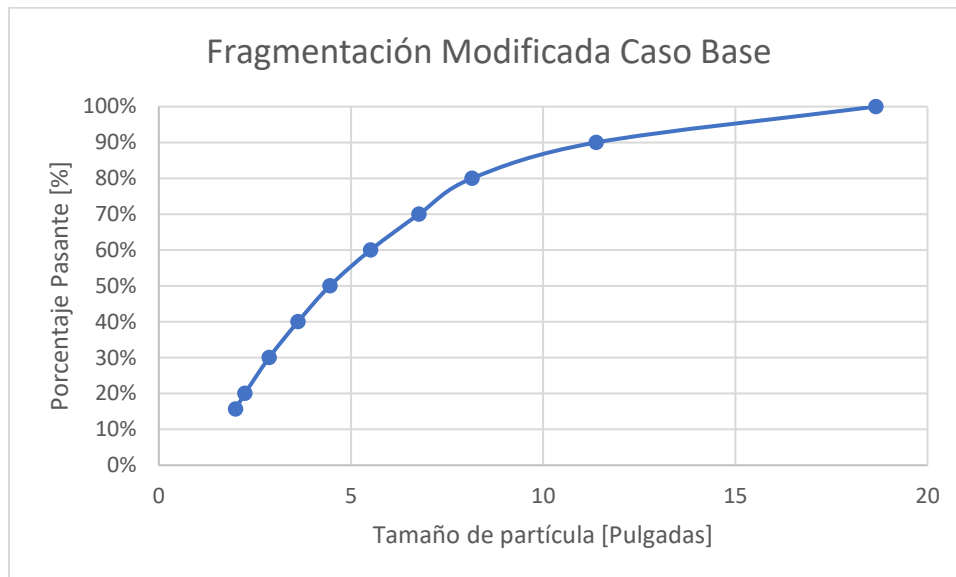


Figura 20. Curva granulométrica caso base modificado.

Como se mencionó anteriormente, el tamaño más pequeño de partícula corresponde a 2 pulgadas, dado el criterio de tamizaje del software *Rocky*®. Al ingresar los datos de la Tabla 5 en el software, se vería que el 15.64% del material que ingresa al modelo tiene un tamaño exacto de 2 pulgadas. Esto es importante ya que en el modelo no existen partículas de tamaños menores al último tamaño expresado en la granulometría.

3.2. Simulación Casos de Estudio

3.2.1. Aspectos generales

Dada la dificultad de predecir la fragmentación por voladura, esta Memoria plantea que a partir de un caso base y la selección de una variable que permita evaluar distintos escenarios del proceso de tronadura, identificando la variabilidad de la operación misma, se puede generar una estrategia de muestreo que permita una mejor estimación de la distribución granulométrica procedente de esta operación.

Debido a las grandes dimensiones y a la gran cantidad de variables presentes en el proceso de tronadura, como son, por ejemplo: los distintos tipos de rocas, mineralizaciones, fallas, contactos, presencia de agua, entre otras; sumado a las infinitas combinaciones de mallas y explosivos, se hace imposible simular el proceso completo de voladura, ya que todos estos factores afectan dicha operación. Es por ello que se decide realizar un modelo acotado de una tronadura, el cual permita simular el proceso en tiempos más limitados y admita un fácil análisis posterior de las simulaciones realizadas, pero buscando replicar el proceso con la mayor información posible.

Respecto a lo mencionado en la Sección anterior [3.1], donde se define el caso base, la tronadura de la cual procede la distribución granulométrica se realizó bajo una malla de 9 x 9 metros. Tomando en consideración la malla y la imposibilidad de simular el área afectada por un pozo de tronadura, debido al gran volumen y el elevado número de partículas necesarias, se decide modelar solo la frente de carguío de la tronadura, dividiéndola en tramos de 2 metros de ancho. Dicho esto, una vez identificada la variable a cambiar en cada modelo, se realizan cinco simulaciones por cada modelo, con el fin de obtener una muestra de al menos un pozo de tronadura.

3.2.2. Geometría

La geometría del modelo se define en función de las pruebas realizadas anteriormente, con el fin de lograr un equilibrio entre la cantidad de partículas, su distribución en el espacio y los tiempos de simulación.

Tomando en cuenta lo dicho en el párrafo anterior, la geometría utilizada para las simulaciones busca recrear una frente de carguío con un ángulo de 40° . La frente, además, posee una altura de 17 metros de alto vertical. También, la geometría tiene un ancho interior de dos metros, a lo largo de toda la abertura, un punto de entrada de partículas en su parte superior de 1×2 metros y una base de 1.5×2 metros. Adicionalmente, se le incluye una base cuadrada de 20×20 metros para sostener la geometría y evitar que el material salga del modelo por la parte de abajo.

Los valores antes mencionados, el ángulo, la altura y el ancho, son elegidos debido a su impacto en el volumen de la geometría a llenar, siendo la altura y el ángulo valores que se encuentran dentro de lo medido en la voladura del caso de estudio, y que reducen el volumen total de la geometría, facilitando su simulación.

En la Figura 21, Figura 22 y Figura 23 se muestran las vistas en planta, longitudinal e isométrica, respectivamente, de la geometría utilizada en las simulaciones, además, cada figura incluye las medidas correspondientes. Finalmente, se incluye en la Figura 24 una visualización del sólido producido por la geometría.

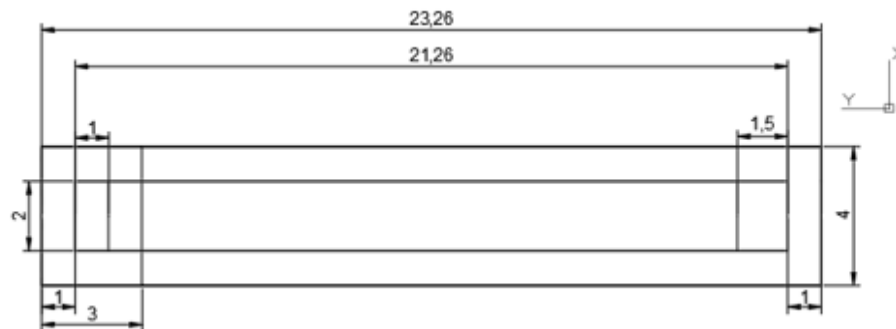


Figura 21. Vista en planta geometría caso de estudio.

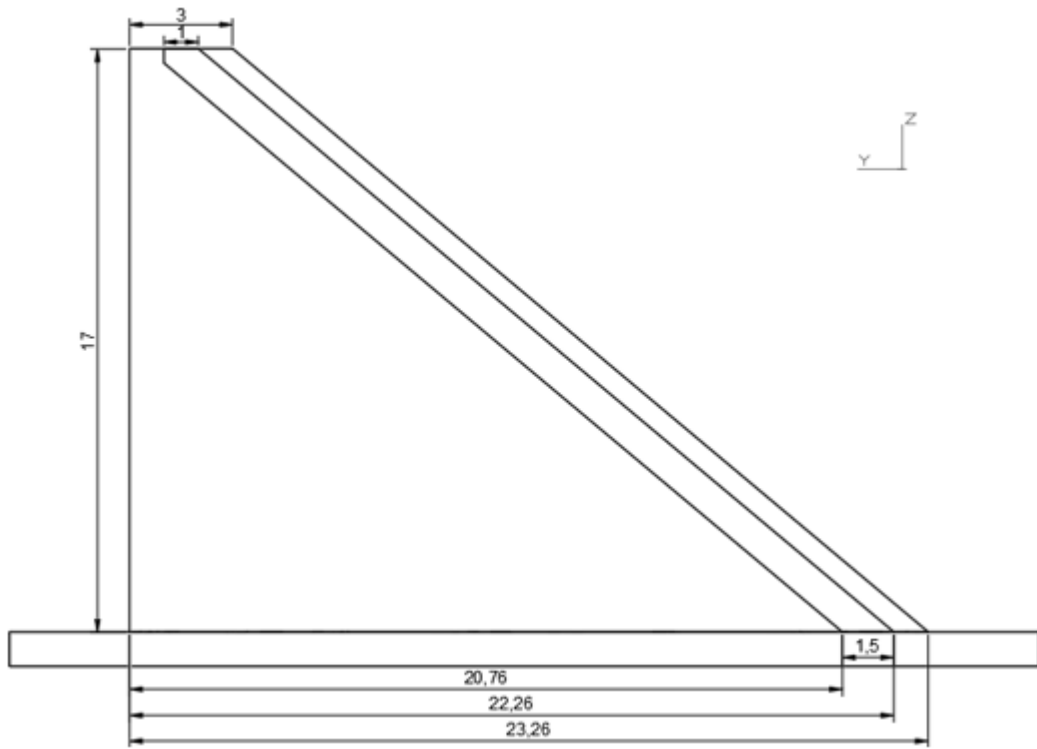


Figura 22. Vista longitudinal geometría caso de estudio.

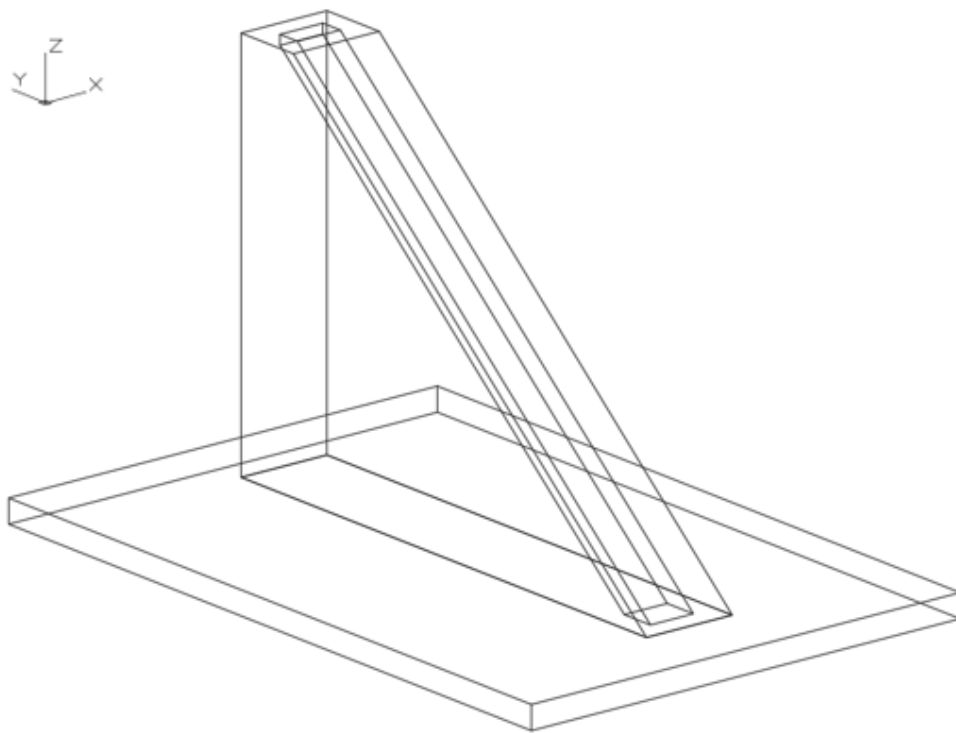


Figura 23. Vista isométrica geometría caso de estudio.

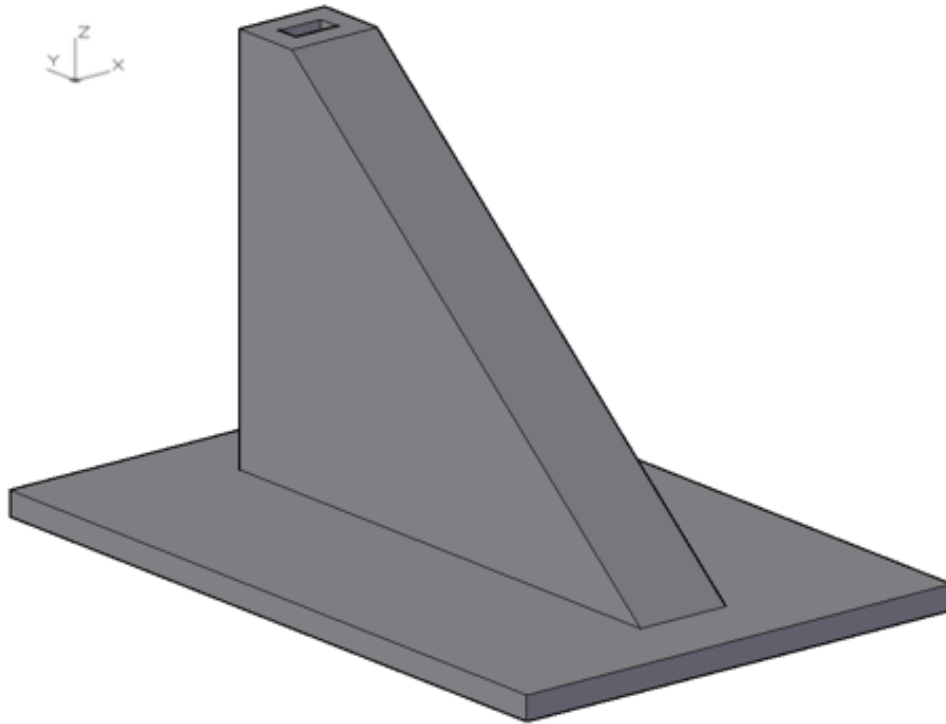


Figura 24. Vista isométrica (sólido) geometría caso de estudio.

Como se muestra en las figuras anteriores, la geometría cuenta con una abertura interior, este sólido se importa al software *Rocky*® y luego es llenada con partículas correspondientes a la granulometría de los casos de estudio que se detallan en la Sección siguiente [3.2.3]. El volumen interior por llenar es de 50.79 metros cúbicos.

3.2.3. Variable a cambiar

Como fue mencionado en la Sección [2.1.3] las condiciones de la tronadura y/o del proceso de carguío pueden producir que se deslice más o menos material grueso proveniente del taco o parte superior de la frente hacia la parte inferior de la misma, produciéndose una mezcla de mineral de fragmentación más gruesa con tamaños más pequeños. Por ello se define el material que rueda desde la parte superior de la frente como la variable a cambiar en las distintas simulaciones, ya que, es visible a la hora de muestrear la frente como se explica en la Sección [3.3]. Al elegir esta variable de material rodado se pretende representar de mejor manera la variabilidad de una tronadura a otra, o de un proceso de carguío a otro, puesto que impacta directamente en el análisis de imágenes.

Para definir esta variable a cambiar, se procede de la siguiente manera: se separa la curva granulométrica del caso de estudio en dos partes, una de material grueso, y otra de fragmentación fina e intermedia. Esta separación se realiza bajo un supuesto simple, dado que el material grueso proviene de la parte del taco del pozo de tronadura (lo cual se respalda en la clasificación que se le dio al caso base, donde se señala que el material grueso proviene de la zona del taco) se considera que la proporción gruesa de la voladura corresponde aproximadamente a la altura del taco.

Puesto que la altura del banco original es de 15 metros y el taco abarca los últimos 5 metros superiores del pozo, la proporción queda definida por 1:2. Esto indica que aproximadamente 1/3 del material total será grueso y 2/3 corresponderá a material de tamaño entre fino e intermedio. Tomando esto en consideración y dado que la curva de distribución granulométrica viene dividida en tramos de 10% se decide tomar el 30% de la parte superior de la curva como material grueso y, el 70% restante como material fino y de tamaño medio.

En la Figura 25 se puede ver de manera gráfica la curva granulométrica del caso base separada para cada una de las categorías definidas anteriormente (material grueso y material fino e intermedio) y la curva original a modo de comparación.

A partir de esta modificación al caso base expuesta en la Figura 25, que no considera el material rodado, se generan 3 casos de estudio los cuales incluyen el concepto de material rodado expuesto en la Sección [2.1.3] siendo esta la variable a cambiar en las distintas simulaciones que se realizan. Estos tres casos de estudio incluirán, dentro de su fracción de material fino e intermedio, un porcentaje de material grueso, el cual es descontado de la parte superior de la frente de carguío para así mantener la fragmentación del modelo completo, inalterada. Esta proporción es de 10% – 20% – 30% del material grueso total. Entonces, las curvas granulométricas para los casos 1, 2 y 3, respectivamente, quedan representadas en la Figura 26.

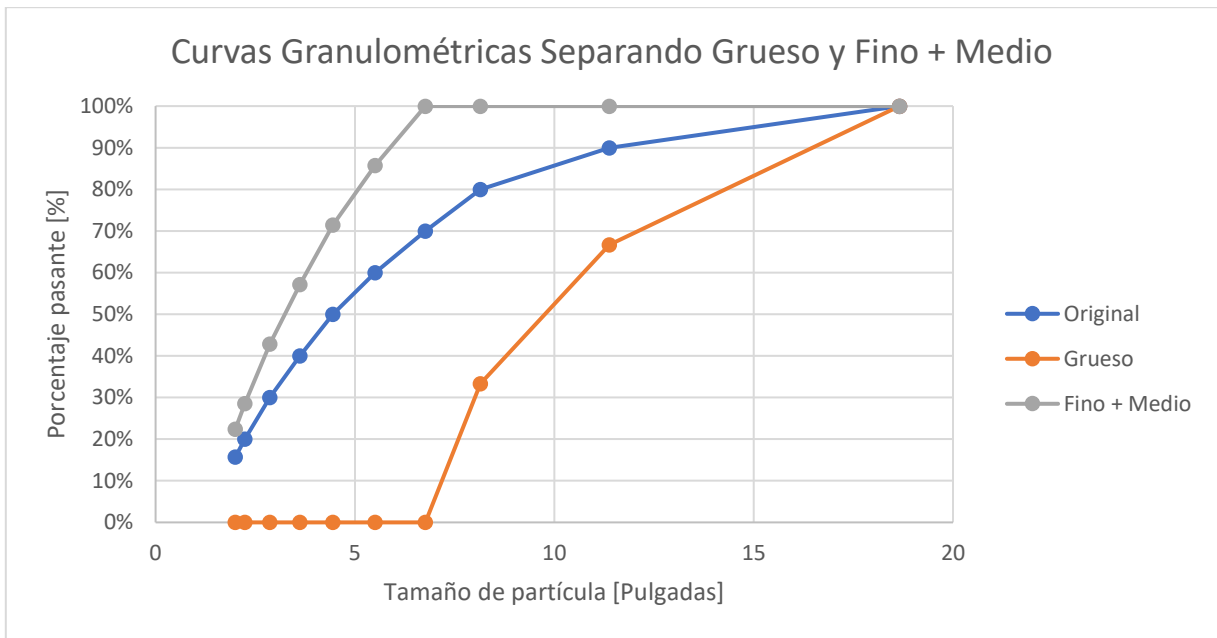


Figura 25. Curva granulométrica caso de estudio separada por categoría.

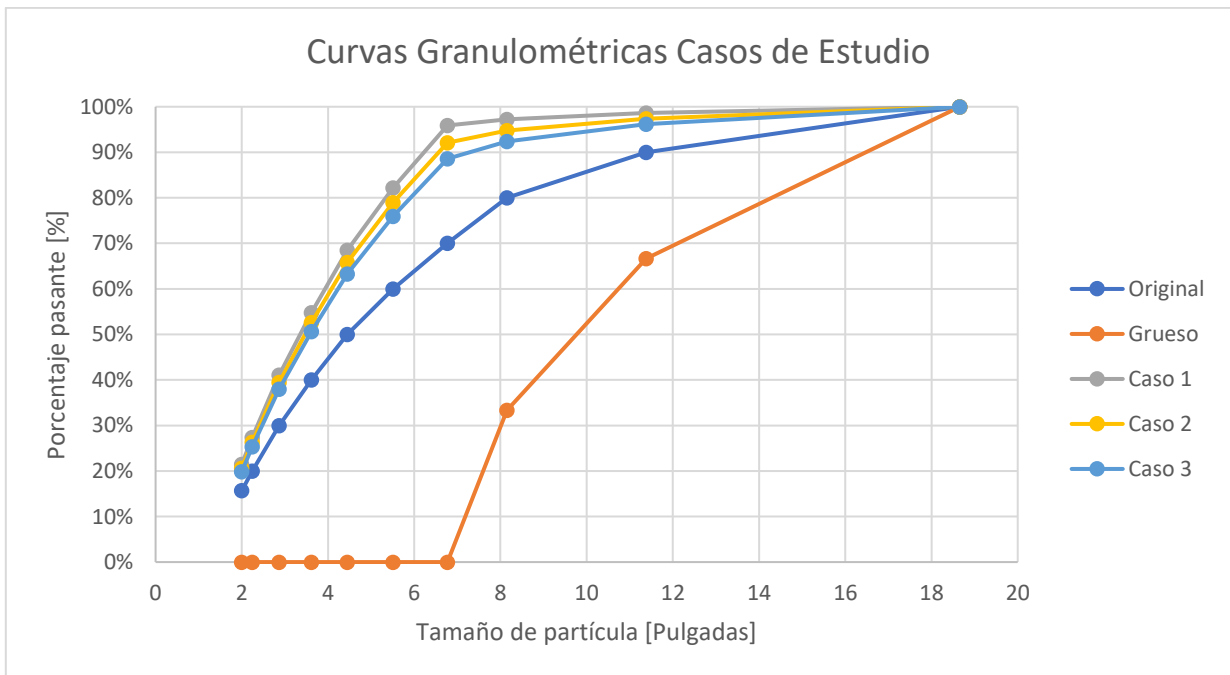


Figura 26. Curvas granulométricas casos de estudio.

Es importante señalar que no se agrega ningún tipo de fragmentación distinta a la curva del caso base, por lo que la curva de fragmentación global es la misma que en el caso base, solo se cambian las proporciones de material grueso, fino e intermedio en las distintas áreas del modelo. Estos cambios, en cantidad de

material, se ven reflejados en los tiempos de llenado de cada tipo de fragmentación, lo cual es abordado en la Sección siguiente [3.2.4].

Para facilitar el entendimiento en las secciones posteriores y en el capítulo de resultados, desde ahora se hará referencia a los tres casos de estudio distintos como:

- Material Rodado 10%
- Material Rodado 20%
- Material Rodado 30%

Cada uno de ellos se realizó cinco veces con el fin de conseguir muestras de al menos un pozo de tronadura como se explicó en la sección anterior. En total se realizan 15 simulaciones contemplando los tres modelos y serán denominadas repetición 1 a 5 para cada caso de estudio.

3.2.4. Simulaciones y parámetros

En esta sección se explica cómo se realizó la simulación en el software *Rocky*®, abordando los parámetros ingresados y el proceso mismo de simulación.

Una vez definidos los modelos que se van a simular se procede a ingresar los parámetros solicitados por el software *Rocky*®, vistos en la Sección [2.4.7], para realizar las simulaciones. Como se señaló en la Tabla 3, los parámetros propios de la roca ingresados al software fueron detallados al definir el caso base. Adicional a los parámetros propios del material que se desea simular, el software requiere ingresar un modelo para las fuerzas normal, tangencial y adhesiva. Se selecciona una combinación entre el modelo de fuerza normal Linear Spring Dashpot, tanto por el comportamiento incompresible de la roca, como por ser más rápido que los otros modelos disponibles, y el modelo de fuerza tangencial Coloumb Limit, especialmente por la diferencia de tiempos de simulación que presenta con otros modelos de fuerza tangencial disponibles, siendo muy beneficioso, ya que genera tiempos más breves de simulación. Por último, se descarta el uso del modelo de fuerza adhesiva debido a que no existe la influencia de fluidos u otras partículas distintas que requieran de la utilización de esta fuerza adhesiva.

A continuación, en la Tabla 6, se presentan los parámetros ingresados en el software, siendo esta un complemento de la Tabla 3. En ella, los coeficientes de fricción estático, dinámico y de restitución corresponden a las interacciones partícula - partícula y partícula - geometría, considerando que la geometría es también roca

tronada, por lo tanto, es igual en ambos casos. También, se incluye dentro de los parámetros ingresados el *Numerical Softening Factor*, el cual es un ponderador que permite disminuir los tiempos de simulación.

Tabla 6. Parámetros ingresados a Rocky.

Propiedad	Valor	Unidad
Densidad	2.57	T/m^3
UCS	130	MPa
Módulo de Young	55	GPa
Esponjamiento	35 - 40	%
Ángulo de reposo	35 - 40	°
Módulo de Poisson	0.24	-
Coef. fricción estático	0.4 - 0.5	-
Coef. fricción dinámica	0.7	-
Coef. de restitución	0.4 - 0.5	-
Numerical Softening Factor	0.001	-

Las propiedades descritas en la Tabla 6 corresponden a la caracterización del mineral realizada por la mina, donde los Módulos de Young y Poisson coinciden o son levemente mayores a los descritos en la literatura [32] [33] [34], estos dependen fuertemente de la roca de cada zona, ya que, en cada lugar varía su composición, alteración, condiciones estructurales, etcétera. Por otro lado los coeficientes de fricción y de restitución se encuentran dentro de los recomendados por el software. Estos parámetros son típicamente obtenidos a partir de los siguientes ensayos o pruebas [35]:

- Densidad: Pesaje e inmersión.
- UCS: Ensayo de compresión uniaxial.
- Módulo de Young y Poisson: Ensayo de compresión uniaxial.
- Ángulo de reposo: Derrame vertical con balde sin fondo.
- Coeficientes de fricción: Plano inclinado.
- Coeficiente de restitución: Impacto de caída libre.

Una vez definidas las características y el comportamiento de las partículas en el modelo se procede a seleccionar el tipo de partícula que ingresa a la simulación. Para entregarle variabilidad al modelo y utilizar las herramientas que entrega el software *Rocky®*, se usan dos tipos de partículas en el modelo, las cuales vienen dentro del catálogo de partículas del software. La Figura 27 corresponde a una partícula tipo poliedro no redondeado, la cual cuenta con 10 aristas, y la Figura 28 corresponde a un poliedro redondeado, poseedora de 40 aristas. Estas rocas

entran en el modelo en igual proporción, siendo cada una la mitad del material total en la simulación. Cabe destacar que, al agregar más partículas, ya sea con formas similares o formas más complejas, genera un aumento en los tiempos de simulación. Es por esto que se utilizan solo dos tipos de partículas para los modelos con el fin de obtener mayor variabilidad en las simulaciones y la toma de datos, pero sin añadir demasiada complejidad al modelo, evitando tiempos excesivos de simulación.

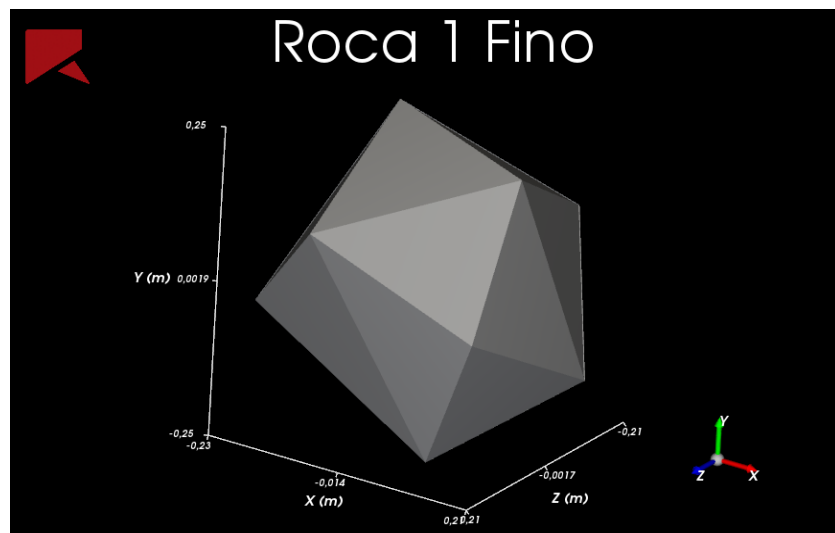


Figura 27. Partícula poliédrica no redondeada.

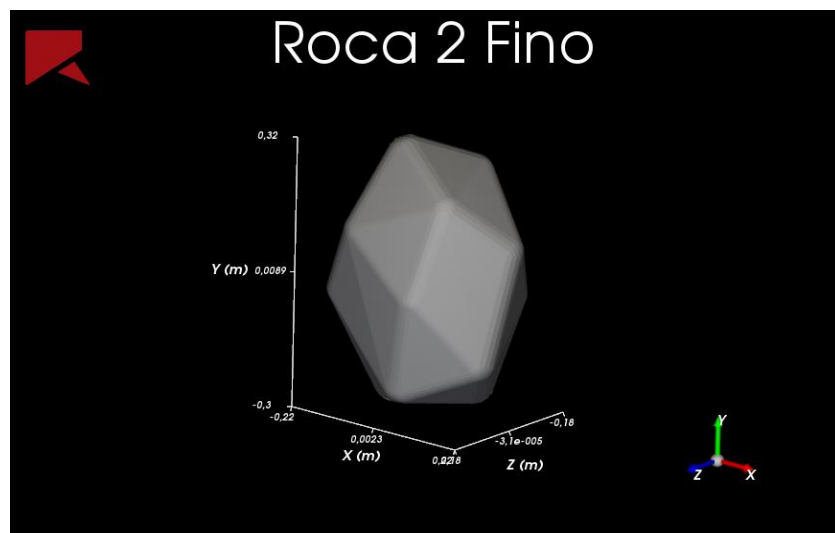


Figura 28. Partícula poliédrica redondeada.

Dadas las características físicas de las partículas seleccionadas, el material tiene un esponjamiento aproximado de 40%, lo que concuerda con los definidos en

el caso base. Conociendo el esponjamiento y la densidad de las partículas se procede a calcular los flujos de partículas necesarios para llenar la geometría propuesta en la sección anterior.

Como se mencionó anteriormente, el modelo es llenado por la parte superior debido al efecto de la gravedad impuesta en la simulación. Para ello el material entra por la abertura superior para depositarse en la zona inferior de la geometría hasta alcanzar el borde de la parte alta del modelo, tiempo en el cual se considera lleno y la simulación terminada.

El volumen interior de la geometría, que debe ser llenado, es de 50.79 metros cúbicos. Por otro lado, considerando el esponjamiento del mineral de 40%, la densidad pasa de ser de $2.57 T/m^3$ (roca in-situ) a $1.54 T/m^3$ (roca tronada o esponjada), dando un total de 78.32 toneladas de mineral que debe ingresar al modelo. Dividiendo el flujo en dos partes (una para cada tipo de partícula), da como resultado que se debe ingresar al modelo un total de 39.16 toneladas de partículas de cada tipo.

El siguiente paso es seleccionar el tiempo de llenado, para ello se toman 10 segundos en los que el modelo pasa de estar vacío a completamente lleno. Este tiempo se escogió en base a prueba y error, donde tiempos más prolongados generaban tiempos de simulación muy extensos y tiempos más cortos provocaban un “tapón” (debido al gran flujo de partículas en la entrada) en la parte superior de la geometría, impidiendo el paso de partículas y generando derrames fuera de la geometría.

Tomando en cuenta las consideraciones anteriores, el flujo por cada tipo de partícula es de $14097.33 T/hr$.

También, se debe tomar en cuenta la disposición espacial de las partículas definida en la Sección [2.1.2] y la variable a cambiar descrita en la Sección [3.2.3], donde el material fino e intermedio (correspondiente al 70% más fino de la distribución de tamaño) más el material rodado, según cada uno de los tres casos de estudio distintos, se deposita en la parte inferior de la geometría y el 30% más grueso restante, en la parte superior (descontando el porcentaje de material rodado), generando la segregación descrita en la Sección [2.1.3]

El último paso para comenzar la simulación es definir los tiempos durante los cuales las partículas de las distintas distribuciones de tamaño entran al modelo. En los párrafos anteriores ya se definió el flujo de entrada de cada tipo de partícula y la proporción en la que debe entrar el material grueso y fino e intermedio en cada uno de los tres casos de estudio.

En la Tabla 7 se muestran los tiempos de entrada de cada flujo, para material fino e intermedio y grueso, además se consideran márgenes, los cuales son cortos periodos de tiempo que sirven para que el material entrante se asiente en el modelo y no se genere una mezcla de material en la entrada. Estos márgenes se aplican entre el momento en que deja de entrar material fino e intermedio y comienza a entrar fragmentación más gruesa. También se considera un tiempo de margen al final para que todas las partículas que entraron al modelo queden estáticas.

Tabla 7. Tiempos de entrada de partículas.

Tiempo [s]	Material rodado 10%	Material rodado 20%	Material rodado 30%
Entrada fino + int	7.3	7.6	7.9
Margen	0.2	0.2	0.2
Entrada grueso	2.7	2.4	2.1
Margen	0.2	0.2	0.2
Total	10.4	10.4	10.4

Teniendo en cuenta estos márgenes, más el tiempo en que las partículas entran en el modelo, cada simulación tiene una duración de 10.4 segundos en total.

3.2.5. Resumen simulaciones

Una vez definidos los parámetros de entrada del software, la geometría del modelo, la distribución espacial de las partículas que se desean simular y los tiempos de simulación, se procede a ejecutar las simulaciones para cada uno de los tres casos de estudio.

Tomando en cuenta que para cada caso de estudio lo mínimo que se requiere simular es un pozo de tronadura y considerando que son tres modelos o casos de estudio distintos, material rodado 10%, 20% y 30%, se realizan 5 simulaciones por modelo, dando un total de 15 simulaciones.

Dada la variabilidad de cada una de las simulaciones, se muestra en la Tabla 8 la cantidad de partículas por cada uno de los modelos. La ejecución de cada una de las simulaciones tardó un tiempo promedio de 64 horas, dando un total de uso de software aproximado para las 15 repeticiones de 960 horas, lo que se traduce en 40 días totales.

Tabla 8. Cantidad de partículas por simulación.

Repetición	Material rodado 10%	Material rodado 20%	Material rodado 30%
1	181848	181846	181829
2	181867	181790	181835
3	181987	181837	181848
4	181867	181870	181905
5	181811	181897	181965

3.3. Muestreo Casos de Estudio

Una vez que las simulaciones han concluido, se procede a la toma de datos o muestras. En la Figura 29 se muestra cómo se ve una de las simulaciones instantes antes de terminar, se puede apreciar la segregación del tamaño fino e intermedio en la parte inferior del modelo y las rocas más gruesas en la parte superior del modelo como se muestra en la Figura 3 y concuerda con lo descrito en la Sección [2.1.2] y [3.2.3].

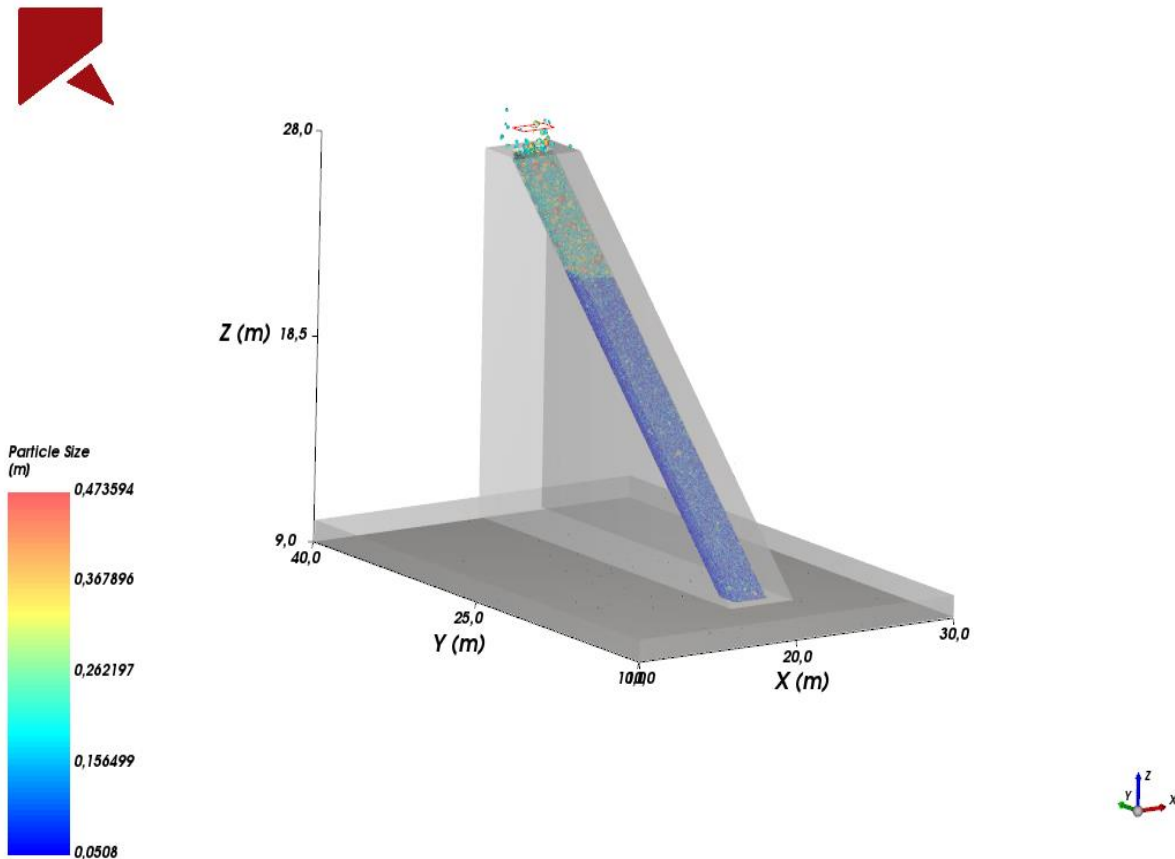


Figura 29. Ejemplo de simulación terminada (MR 10% Rep. 1).

Con todas las simulaciones terminadas se realiza el proceso de muestreo de cada uno de los tres casos de estudio y sus repeticiones. Dado que se desea comparar la eficiencia de la estimación de curvas de distribución granulométrica, es necesario obtener muestras tomadas a lo largo de toda la frente de carguío en cada simulación. Dichas muestras son fotografías del modelo a distintas alturas, las que permiten abarcar la totalidad de la frente, logrando así evaluar la tronadura de manera vertical (de la parte inferior a la parte superior del modelo) en cada repetición.

Para ello, se estandarizó un protocolo de muestreo que permita tomar las mismas imágenes en todas las repeticiones de los tres casos de estudio y así automatizar de cierta manera el proceso de análisis de imágenes, evitando discrepancias o errores.

Las imágenes que se le tomaron a los modelos tienen una dimensión de 2x2 metros y se toman de manera perpendicular a la frente. El modelo tiene una altura de 17 metros y posee un ángulo de frente de 40°, considerando que las fotografías tomadas de la frente se realizan de manera perpendicular a esta, se deben tomar 13 imágenes por cada una de las repeticiones, dando un total de 195 muestras para los tres casos de estudio. En la Tabla 9, se detalla la posición del centro de cada una de las fotografías tomadas dentro de los modelos. Además, en la Figura 30 se ve una vista frontal de la frente simulada donde se detallan las posiciones donde fueron tomadas la imágenes.

Tabla 9. Posición fotografías para muestreo.

Muestra	X [m]	Y [m]	Z [m]
1	20	15.01	10.64
2	20	16.54	11.93
3	20	18.07	13.21
4	20	19.60	14.50
5	20	21.13	15.79
6	20	22.67	17.07
7	20	24.20	18.36
8	20	25.73	19.64
9	20	27.26	20.93
10	20	28.79	22.21
11	20	30.33	23.50
12	20	31.86	24.78
13	20	33.39	26.07

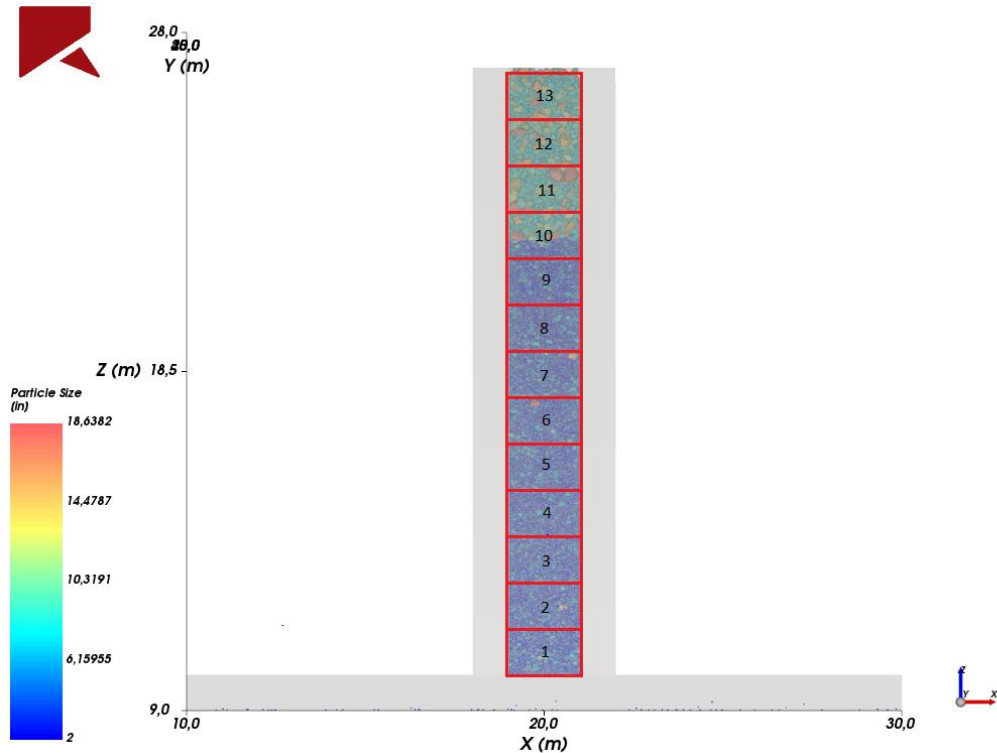


Figura 30. Posición fotografías para muestreo, vista frontal de la frente

Es importante señalar que el tamaño de las fotografías tomadas como muestra fue elegido para maximizar la recuperación de información de los modelos, ya que estos tienen un ancho de dos metros al igual que las fotografías. También, el ancho del modelo mismo fue escogido considerando que la imagen tomada debe ser representativa de la pila. Esto explica la elección de las dimensiones y por qué no se utilizó, por ejemplo, una geometría más angosta que hubiera permitido realizar simulaciones en un tiempo menor, pero que hubiese generado problemas debido a que las partículas más grandes abarcarían gran parte del área de las fotografías tomadas. También, con una geometría más angosta se producen “colgadas” o espacios sin relleno en el modelo. Por otro lado, las imágenes permiten contener a los fragmentos más grandes dentro de la simulación y, a su vez, no pierden definición para los fragmentos más pequeños.

Las Imágenes obtenidas de este proceso de muestreo son luego sometidas a un análisis con el software *PowerSieve* para obtener la distribución granulométrica de cada una de ellas.

3.4. Análisis Digital de Imágenes Casos de Estudio

Como resultado de las simulaciones y del proceso de muestreo se obtienen 13 imágenes por cada simulación, siendo 65 fotografías en total para cada caso de estudio, teniendo un total de 195 imágenes al sumar los tres casos de estudio. A estas muestras se les realiza un análisis digital de imágenes para obtener las curvas de distribución granulométrica del material presentes en ellas. El análisis de imágenes se realiza con el software *PowerSieve* siguiendo el Manual de Procesamiento mencionado en la Sección [2.3.2] y consta de los siguiente pasos a continuación, los cuales son explicados con mayor detalle en los párrafos posteriores:

- Crear el proyecto.
- Escalado de imágenes.
- Ecuilización de fotografías (opcional).
- Selección del *threshold*.
- Binarizado.
- Delimitación manual (opcional).
- Procesamiento.

El primer paso es crear el proyecto e importar las 195 imágenes (Figura 31) al software *PowerSieve*, luego, el siguiente paso, como se detalla en el Manual, es establecer la escala dentro de la imagen. Dado que las dimensiones de las imágenes son conocidas y para todas las muestras son iguales, esta escala se fija desde un extremo de la imagen a otro con un ángulo recto. En la Figura 32 se observa que la escala en todas las fotografías fue ubicada en el centro de la muestra. De extremo a extremo la imagen posee 800 píxeles y dado que tiene un ancho de 2 metros se tiene que hay 0.0025 metros/píxel en todas las imágenes.

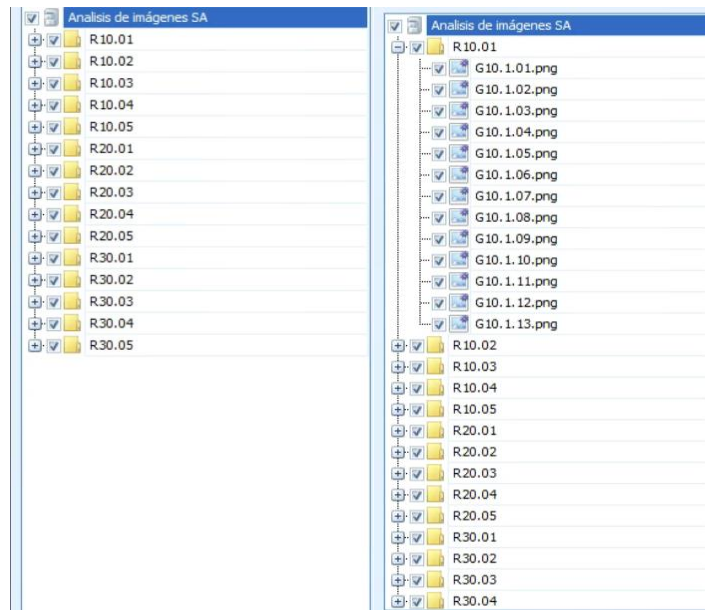


Figura 31. Muestras importadas en PowerSieve.

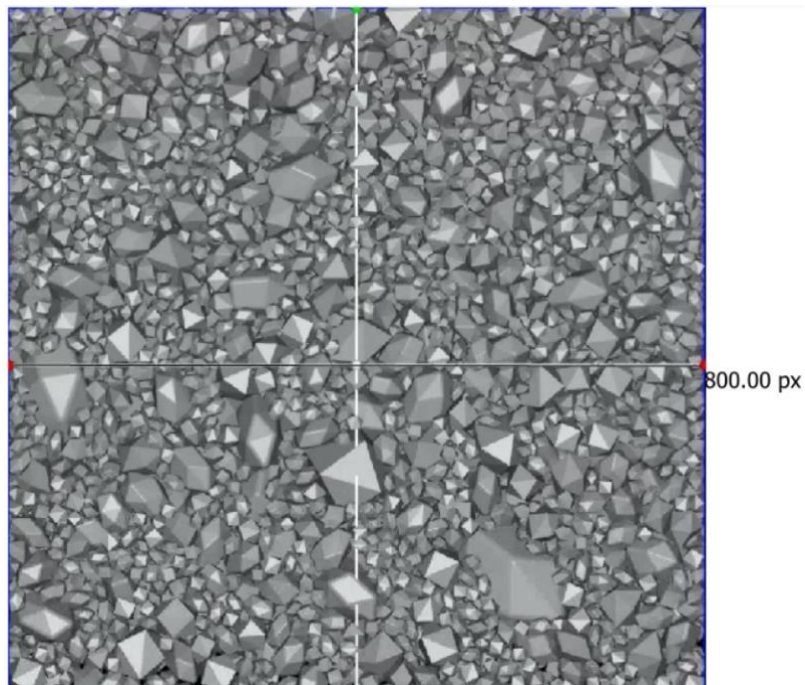


Figura 32. Escala en muestra en PowerSieve.

Tras definir la escala, el manual sugiere ecualizar la fotografía. El proceso de ecualización, en estos casos, ayuda con el contraste de las imágenes, lo que luego es beneficioso para las etapas posteriores; por lo tanto, es aplicado en todas las muestras. En la Figura 33 se comparan cuatro fotografías, en la parte superior se

puede ver al lado izquierdo la primera fotografía (de abajo hacia arriba del modelo) tomada en la repetición 1 del material rodado 10% y, al lado derecho, la última fotografía (parte superior del modelo) de la misma simulación; en la parte inferior se ven las mismas imágenes de arriba, pero ecualizadas por el software. Al comparar las muestras se puede observar cómo el ecualizar la imagen genera que los puntos más oscuros de la muestra se vuelvan más negros y las partes iluminadas sean más claras.

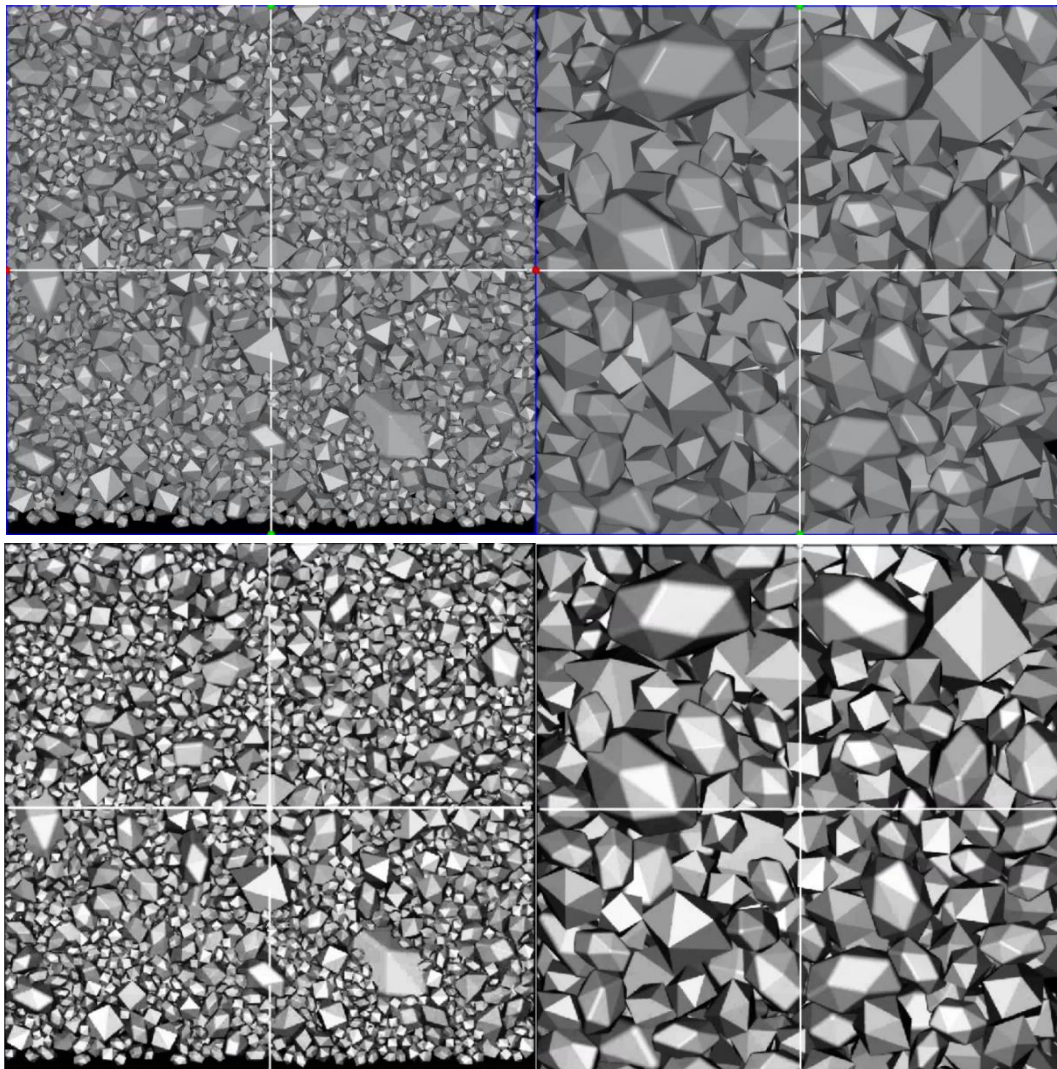


Figura 33. Comparación imágenes sin (arriba) y con (abajo) ecualización.

Una vez ecualizada las imágenes, se procede a seleccionar el *threshold* y binarizar la imagen. Al binarizar la imagen las partículas quedan de color blanco y el fondo de color negro, dentro del fondo negro se incluyen partículas que no se pueden ver completamente, que se encuentran en la parte posterior de la imagen semi cubiertas por otras partículas, o zonas y fragmentos que no se definen muy

bien, estas partes negras por lo tanto no representan fragmentos. En la Figura 34 se muestra una comparación entre los dos valores de *threshold* utilizados; en las imágenes de arriba se aplicó un *threshold* de 20 y en las de abajo un *threshold* de 45. Las muestras, al igual que en la figura anterior, de la izquierda y derecha corresponden a la muestra inferior y superior del caso de estudio 10% repetición 1, respectivamente.

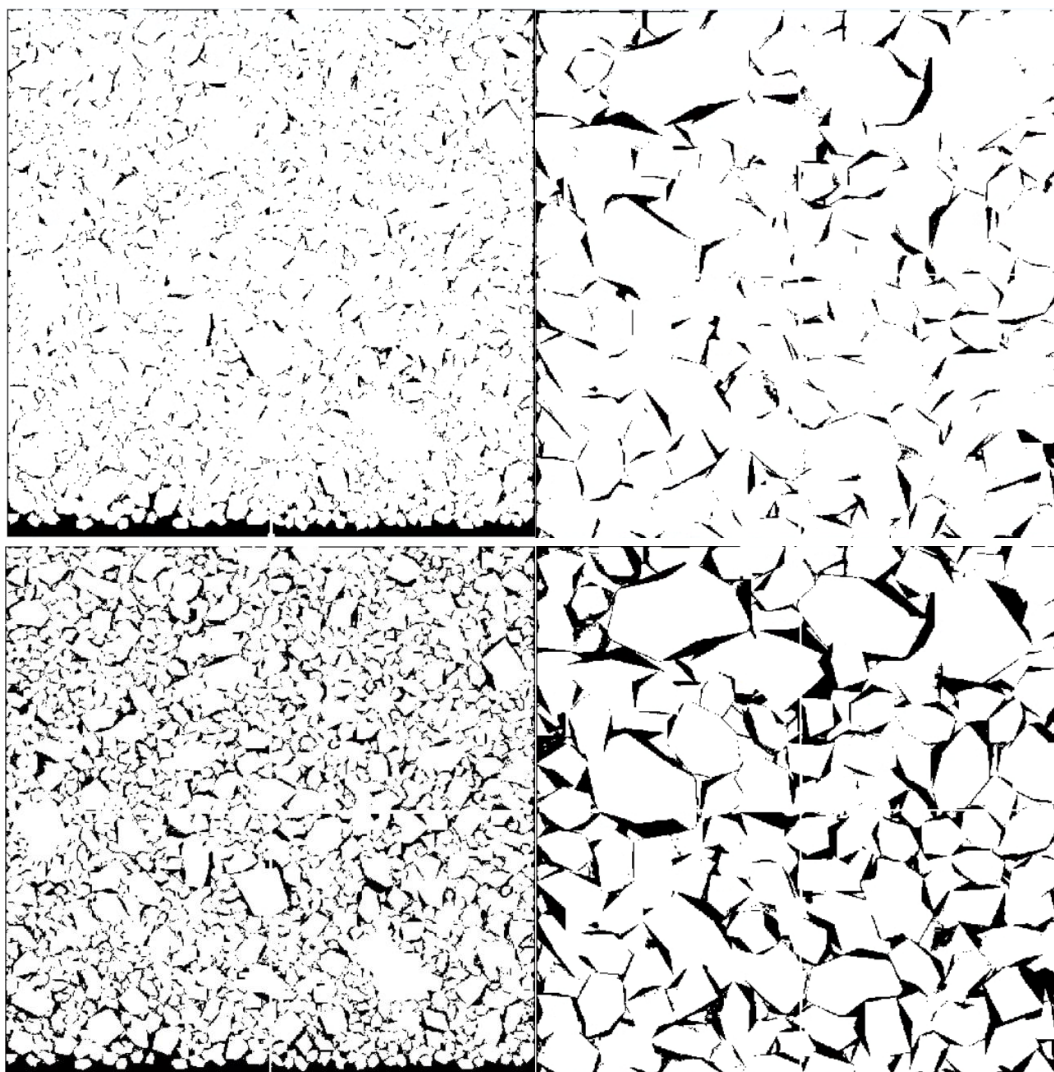


Figura 34. Comparación *threshold* de 20 (arriba) y 45 (abajo).

Un *threshold* más bajo implica que los límites sean más “blandos” (erosionados), lo cual dificulta la detección de partículas si estos no están bien definidos; en cambio un *threshold* más alto vuelve más visibles (dilatados) los límites entre partículas, generando con ello una mejor definición de estas en algunos casos. Un *threshold* excesivamente alto puede provocar pérdida de información, ya que los

bordes se vuelven más grandes, perdiendo de esta manera la definición de los fragmentos.

El valor del *threshold* utilizado en el análisis de imágenes varía siempre entre 20 y 45, siendo el valor más bajo, generalmente, para muestras que presentan visiblemente una distribución granulométrica más fina y 45 en el caso de que la muestra tuviese mineral más grueso a la vista. Esto se debe principalmente a que la delimitación de los fragmentos es mejor para cada uno de los casos como se expuso anteriormente.

Con el *threshold* definido, el último paso antes de procesar la muestra es corregir o delimitar la imagen manualmente. Este proceso se realizó en todas las imágenes, en mayor o menor medida, dependiendo de las necesidades de la muestra. Con este proceso de delimitación manual se busca generar mejores resultados, ya que a veces la delimitación automática no logra diferenciar los límites de ciertas partículas debido a condiciones de iluminación o superposición de los fragmentos, por ejemplo.

Para la delimitación manual se utilizaron las muestras en modo híbrido. Este modo cambia el color del fondo (negro), que es donde no hay partículas definidas, por un tono rosado y las partículas (que van de color blanco en la imagen binarizada) se ven como la imagen ecualizada. En la Figura 35 se puede ver cómo el modo híbrido afecta a las imágenes, facilitando el preprocesamiento manual de las mismas (estas tienen la misma distribución que las figuras anteriores).

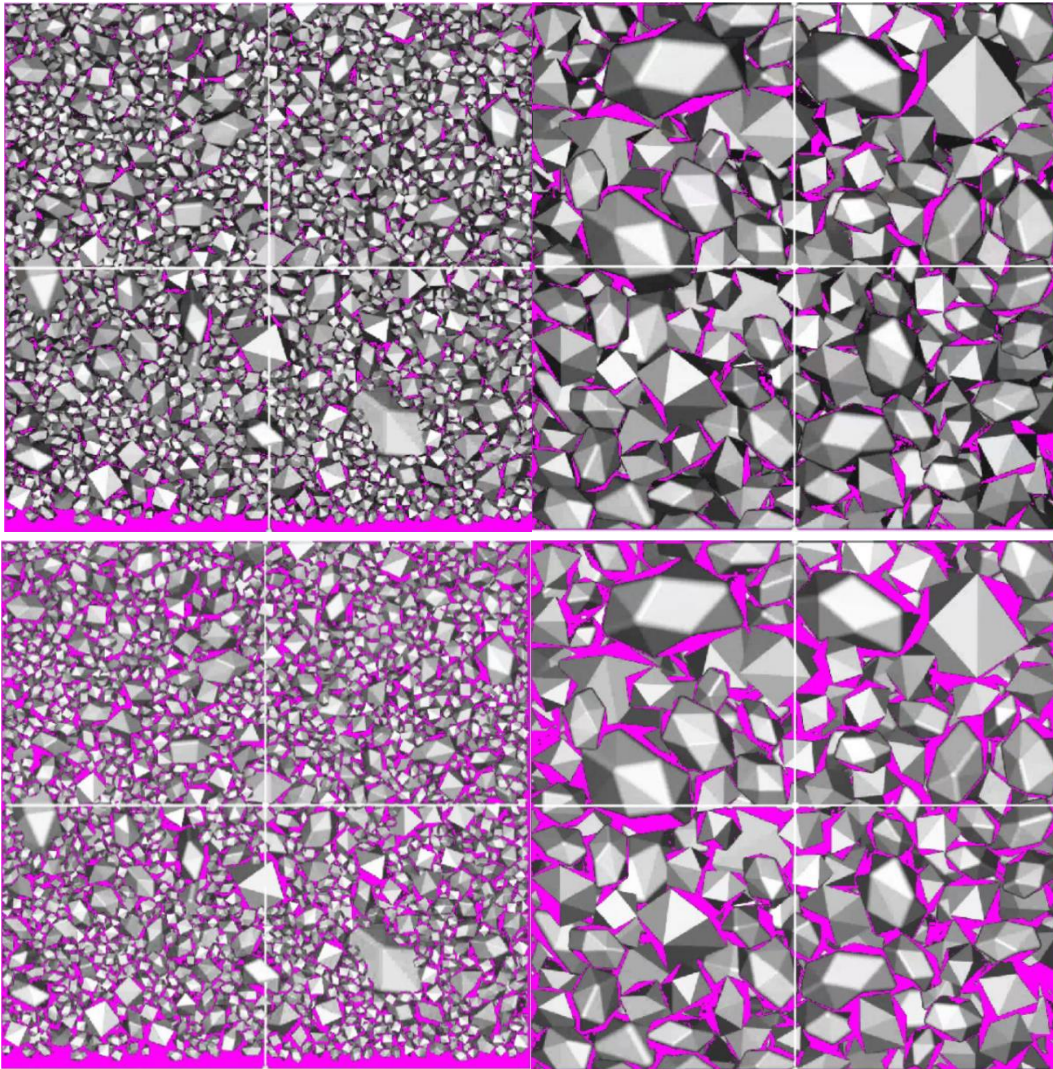


Figura 35. Comparación imágenes híbridas, *threshold* 20 (arriba) y 45 (abajo).

Una vez concluido el proceso de definición de escala, selección de *threshold* y delimitación manual, se procede a procesar la imagen. Posteriormente el software entrega una curva granulométrica correspondiente a la imagen procesada según los tamaños de material presentes en la fotografía clasificados por su diámetro de Feret, como se ve en la Sección [2.3].

Al terminar de analizar las 195 imágenes se obtienen 195 curvas de fragmentación distintas, siendo ellas, la materia prima de esta Memoria.

3.5. Análisis Comparativo Realidad versus Simulación

Por razones de capacidad computacional es imposible generar un modelo de una tronadura en el cual se abarquen todos los aspectos que afectan el proceso de voladura en la realidad. Es por esto que los casos de estudio representan modelos acotados de los resultados de una tronadura. En esta sección, se busca hacer una comparación de los aspectos de una tronadura real versus los aspectos que se aplican en los modelos utilizados para las simulaciones de esta Memoria.

A la hora de validar los resultados obtenidos por las simulaciones hechas en el software *Rocky®*, se debe considerar los aspectos señalados en la Tabla 10.

Tabla 10. Análisis comparativo realidad versus simulación

Comparación	Realidad	Simulación
Considera Factores de la Roca	Si, los resultados dependen de las condiciones de la roca a lo largo del macizo.	No, se simula a partir de los resultados de una tronadura y no simula la tronadura como tal.
Considera Factores del Protocolo de Tronadura	Si, los resultados dependen de cómo se realice la voladura.	No, se simula a partir de los resultados de una tronadura y no simula la tronadura como tal.
Presenta Distribución Homogénea Horizontal	Si, pero depende de los posibles cambios de la roca y/o protocolo de tronadura en el eje horizontal.	Si.
Presenta Distribución Homogénea Vertical	No, presenta fragmentación más gruesa en la zona del taco.	No, presenta fragmentación más gruesa en la zona del taco.
Distribución Granulométrica Total	Pueden variar localmente si cambian los factores de la roca o de la tronadura.	Es igual para todas las simulaciones.
Altura de la Pila Tronada Variable	Si, puede variar según la secuencia de disparo de la tronadura.	No, se utiliza una geometría estándar para todas las simulaciones.
Forma Material Fragmentado	Todas las partículas son distintas entre sí.	Existen dos formas de partículas dentro del modelo.
Material Rodado	Depende de la tronadura (movimiento mineral) y/o del proceso de carguío.	Se discretiza en intervalos de 10%, 20% y 30% del material grueso.

Analizando más detalladamente la Tabla 10, los modelos realizados en el software *Rocky*® solo buscan simular los resultados de la tronadura y no del proceso mismo. Es por esto que, no se logra evaluar en las simulaciones cómo un cambio en el protocolo de tronadura, por ejemplo, cambio de malla, explosivo, factor de carga, entre otros, logra afectar los resultados de esta. Esto mismo aplica para el cambio en los factores de la roca, donde, por ejemplo, cambios en litología, mineralización, presencia de agua, fallas, etc. no serían posible verlos en la simulación.

Las distintas distribuciones, horizontal y vertical, ya fueron vistas en la Sección [2.1.2]. En la simulación se considera un tipo de roca homogénea, sin cambios en los parámetros de la roca, y por ende una distribución homogénea en el eje X, por otro lado, presenta variaciones de su fragmentación en el eje Y producto del proceso de tronadura mismo. Finalmente, la distribución granulométrica en la tronadura puede cambiar por condiciones de la roca o de la tronadura, teniendo distintas fragmentaciones en distintas zonas, en cambio en la simulación se utiliza la distribución del caso base para todos los modelos.

La altura de la pila varía dependiendo de la secuencia de disparo, esto porque los distintos equipos de carguío tiene diferentes necesidades. Una secuencia de disparo con tiempo cortos entre pozos generará una pila con menor desplazamiento, es decir, más alta y compacta. Por otro lado, tiempos más prolongados entre disparos provocarán una pila con mayor desplazamiento, teniendo esta menor altura y una mayor extensión horizontal. En la Figura 36 se puede ver las alturas de la pila solicitadas por cada equipo de carguío.

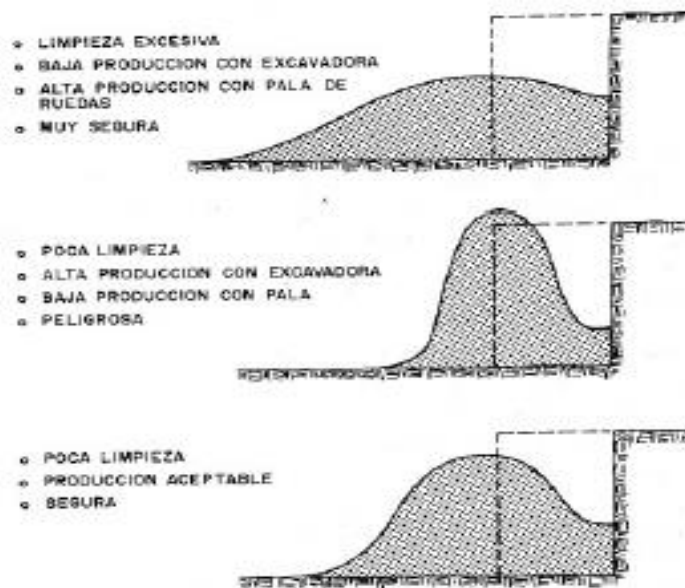


Figura 36. Perfiles de la pila de roca tronada [1].

En los modelos simulados solo existen dos tipos de partículas, una representa rocas angulosas (Figura 27) y la otra rocas más redondeadas (Figura 28), en cambio en la realidad existen infinitas geometrías resultantes del proceso. Por último, el material rodado producto del movimiento de la pila o por el proceso de carguío de la pala en las simulaciones se discretiza en tres intervalos, con tal de evitar cambios en la distribución granulométrica original, esto se ve en la Sección [2.1.3] y [3.2.3].

Capítulo IV

Resultados y Discusión de Resultados

4.1. Previo al Procesamiento de Imágenes

Previo al procesamiento de todas las muestras con el software *PowerSieve* se evaluó, a grandes rasgos, cómo afecta a la curva de distribución granulométrica entregada por el programa, el hecho de procesar las imágenes de manera automática, sin el proceso de delimitación manual o delimitándolas manualmente. Para ello se compararon dos casos, primero se procesó la imagen de manera automática, sin delimitación manual, y luego se realizó la delimitación manual de los fragmentos en las zonas que era necesario. Finalmente se procesó la imagen con los fragmentos mejor delineados. Los casos evaluados fueron las muestras 1 y 13 del Material rodado 10% repetición 1, las cuales fueron elegidas porque representan una distribución fina e intermedia y gruesa, respectivamente.

En la Figura 37 y Figura 38 se muestra la diferencia de las distribuciones granulométricas entre el procesamiento de imágenes automático y las que fueron delimitadas manualmente. Esto, como se mencionó anteriormente en la Sección [2.3.2], depende de cada muestra y se realiza en mayor o menor medida según cada caso.

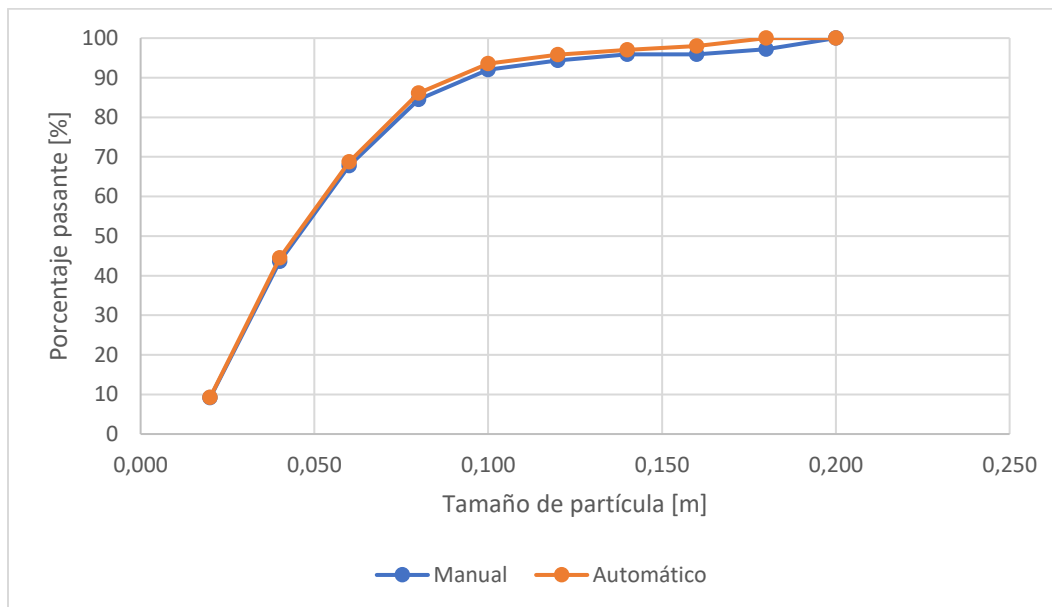


Figura 37. Distribución granulométrica procesamiento automático vs manual. R10% 1 Rep 1-1.

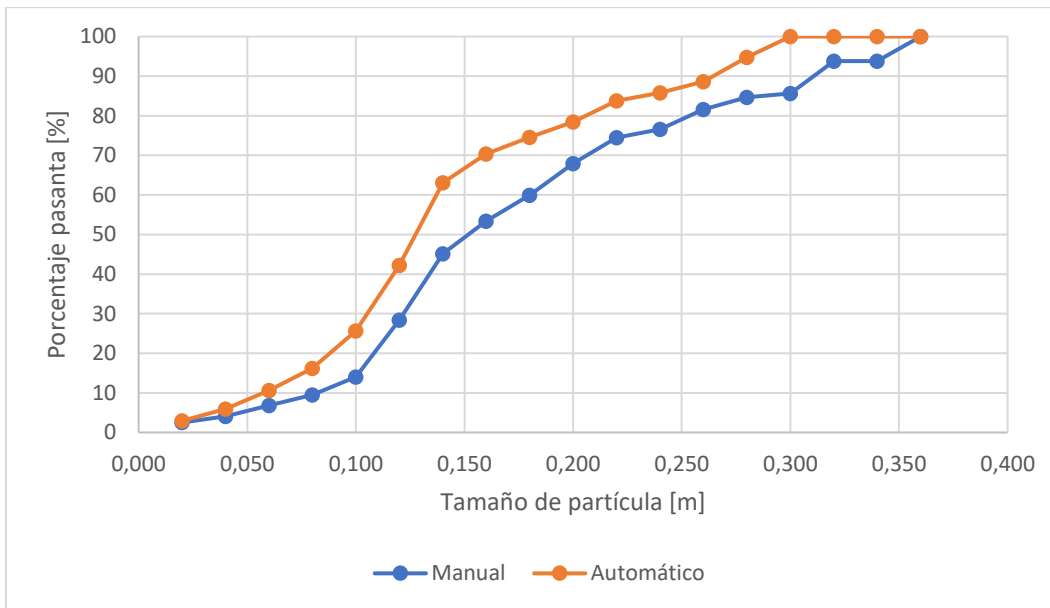


Figura 38. Distribución granulométrica procesamiento automático vs manual. R10% Rep 1-13.

En la Figura 37 no se aprecian diferencias significativas en las curvas de fragmentación. De hecho, la variación promedio punto a punto es solo de 1.3%; en cambio en la Figura 38, sí se observa un cambio significativo en la forma de curva de distribución granulométrica, teniendo una variación promedio de 8.9% entre sus puntos. Estos resultados apuntan a que es necesario delimitar los fragmentos manualmente, sobre todo cuando la granulometría es visiblemente más gruesa.

Tomando en cuenta lo anterior, todas las muestras son delimitadas de manera manual previo a su procesamiento por el software. Esto se realiza en pro de obtener la mayor cantidad de información y que esta sea lo más precisa posible. Por otro lado, no se establece un tiempo o protocolo de delimitación manual, ya que si una imagen tiene sus fragmentos bien definidos y no presenta problemas de delimitación, el tiempo de trabajo en ella es menor que en una imagen que posee más zonas “grises”, donde se requiere un tiempo mayor de delimitación.

Es importante mencionar que el tiempo de delimitación de cada muestra no debe ser excesivo porque los resultados no mejorarán en gran medida luego de cierto tiempo de trabajo en la imagen [20].

4.2. Resultados Análisis Digital de Imágenes *PowerSieve*

Con el software *PowerSieve* se procesaron 195 imágenes correspondientes a las muestras de las 5 repeticiones de cada caso de estudio simulado. Durante el preprocesamiento de las imágenes no toda la imagen termina siendo procesada, puesto que se generan sectores negros, los cuales corresponden a fondo de la imagen o partículas incompletas, por ejemplo. En total se procesaron 658.67 metros cuadrados de la totalidad de las muestras correspondiente a 780 m^2 , dando un promedio de 3.38 metros cuadrados por cada imagen procesada o un 84.5% del total de las imágenes. Es imposible aprovechar el 100% de una fotografía ya que es necesario generar, al menos, las delimitaciones de las partículas para poder obtener las curvas de distribución de las imágenes. También, se destaca que el aprovechamiento de la imagen dependerá de la distribución de la voladura. Por ejemplo, una tronadura con una fragmentación muy amplia no permitirá delimitar bien los finos, debido a la gran presencia de bolones, dejando zonas más grandes de color negro.

A continuación, se presentan las curvas de fragmentación promedio (figuras y tablas) resultantes del análisis de imágenes de cada una de las repeticiones de los casos de estudio evaluados. En el Anexo A: Figuras Resultados Casos de Estudio por Repetición y Anexo B: Tablas Resultados Casos de Estudio por Repetición se pueden ver las curvas y tablas, respectivamente, de distribución granulométrica de cada una de las imágenes analizadas para cada una de las repeticiones de los tres casos de estudio (15 figuras y 15 tablas en total). La Tabla 11 y Figura 39 corresponden a los resultados promedio de las 5 repeticiones del Material Rodado 10%, la Tabla 12 y Figura 40 al Material Rodado 20% y la Tabla 13 y Figura 41 al Material Rodado 30%. En estas figuras se incluye también la distribución granulométrica del caso base.

Tabla 11. Fragmentación promedio por repetición Material Rodado 10%.

Tamaño [m]	Repetición 1 [%]	Repetición 2 [%]	Repetición 3 [%]	Repetición 4 [%]	Repetición 5 [%]
0.020	7.84	7.41	5.47	7.54	7.43
0.040	32.08	30.36	23.37	31.31	31.14
0.060	51.68	50.67	45.86	52.57	51.84
0.080	63.35	61.85	60.19	64.18	63.29
0.100	70.83	69.28	68.48	71.71	71.12
0.120	77.62	74.23	73.61	77.78	77.05
0.140	83.12	80.08	79.34	83.88	83.20
0.160	86.72	83.79	84.08	87.16	87.49
0.180	89.09	87.15	87.25	89.23	90.25
0.200	90.74	90.13	90.41	91.61	91.73
0.220	92.62	91.61	92.73	93.79	93.32
0.240	94.01	92.81	93.61	95.05	94.51
0.260	95.17	94.18	94.72	95.95	96.33
0.280	96.25	95.56	96.27	97.06	97.52
0.300	97.07	97.02	97.40	98.38	97.61
0.320	98.61	97.91	98.04	99.09	98.72
0.340	99.56	98.97	99.12	99.52	99.52
0.360	100.00	100.00	100.00	99.52	99.54
0.380	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
0.400	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
0.420	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
0.440	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

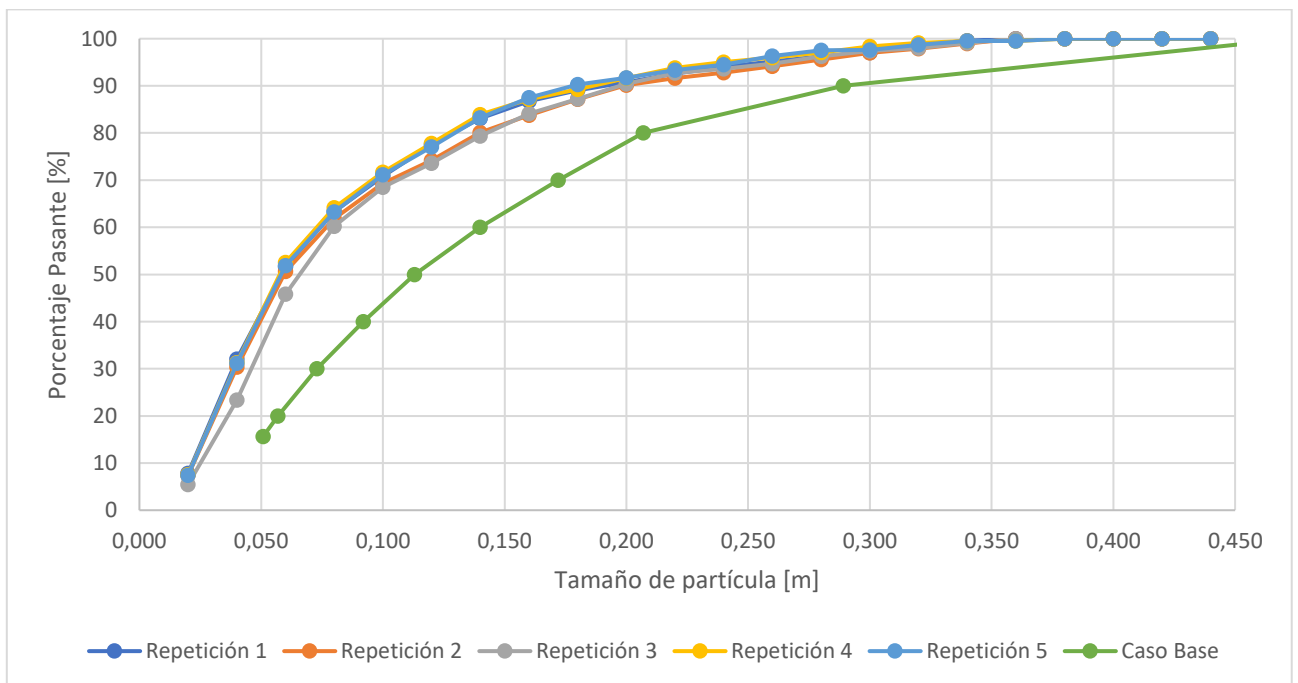


Figura 39. Fragmentación promedio por repetición Material Rodado 10%.

Tabla 12. Fragmentación promedio por repetición Material Rodado 20%.

Tamaño [m]	Repetición 1 [%]	Repetición 2 [%]	Repetición 3 [%]	Repetición 4 [%]	Repetición 5 [%]
0.020	7.90	3.81	4.35	8.63	8.84
0.040	32.84	18.90	20.61	34.00	35.58
0.060	52.28	42.80	44.69	53.61	55.00
0.080	63.99	59.22	59.21	64.30	65.81
0.100	70.81	70.26	69.34	71.44	73.41
0.120	75.91	77.07	75.49	77.55	78.39
0.140	82.03	83.11	80.64	83.04	83.26
0.160	86.81	87.14	85.39	86.75	86.44
0.180	89.54	89.92	88.87	88.92	89.21
0.200	91.24	91.69	91.37	90.51	92.13
0.220	92.92	93.36	93.36	93.26	93.71
0.240	94.20	95.91	94.35	94.04	95.25
0.260	94.86	97.43	95.59	94.63	96.25
0.280	95.79	98.21	97.14	96.22	97.10
0.300	96.70	99.09	97.77	98.16	97.98
0.320	97.52	99.52	97.87	98.87	99.43
0.340	97.81	100.00	98.63	98.87	99.46
0.360	97.83	100.00	99.43	99.38	100.00
0.380	99.32	100.00	100.00	100.00	100.00
0.400	99.32	100.00	100.00	100.00	100.00
0.420	99.32	100.00	100.00	100.00	100.00
0.440	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

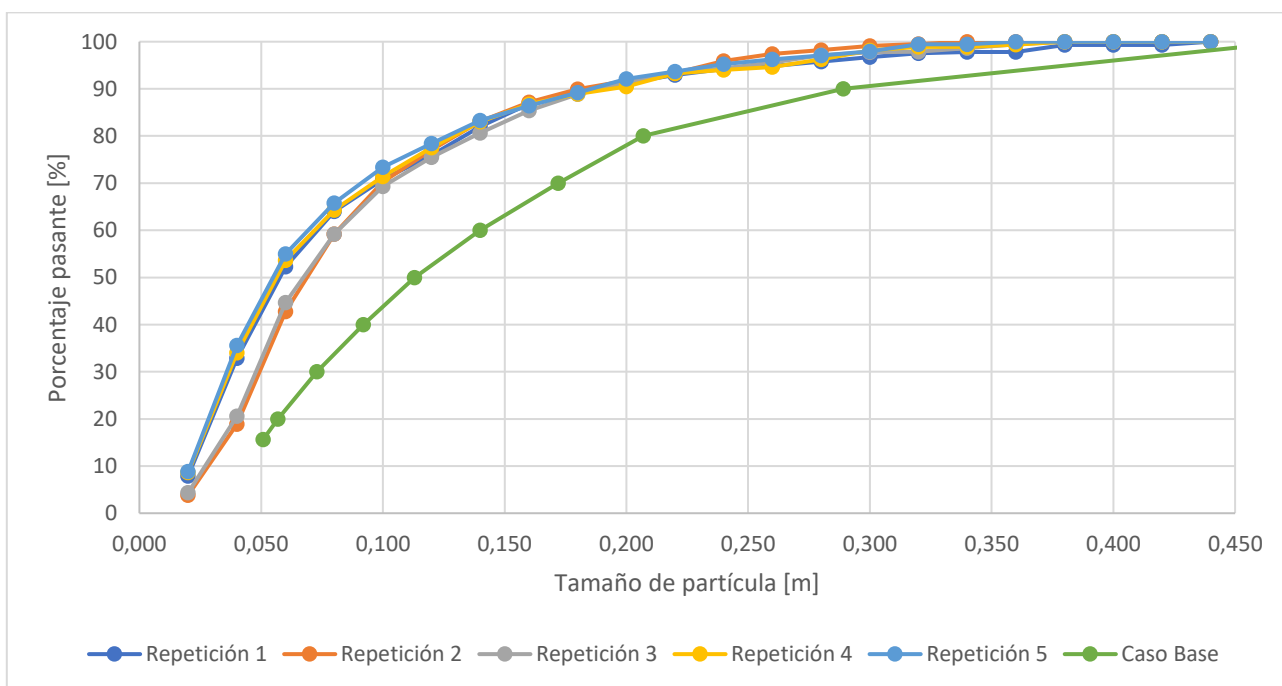


Figura 40. Fragmentación promedio por repetición Material Rodado 20%.

Tabla 13. Fragmentación promedio por repetición Material Rodado 30%.

Tamaño [m]	Repetición 1 [%]	Repetición 2 [%]	Repetición 3 [%]	Repetición 4 [%]	Repetición 5 [%]
0.020	8.06	4.56	8.07	7.87	7.85
0.040	32.63	20.38	32.40	32.02	29.83
0.060	53.04	43.92	51.06	51.21	49.77
0.080	64.00	58.49	61.76	62.03	61.96
0.100	72.00	69.38	69.30	69.28	70.71
0.120	76.54	74.91	74.05	74.12	76.84
0.140	81.58	80.44	78.40	79.73	82.26
0.160	86.45	85.31	83.05	83.86	85.92
0.180	89.35	88.37	86.27	87.46	89.26
0.200	91.09	90.33	89.06	90.09	91.01
0.220	93.45	92.67	91.52	92.00	92.85
0.240	94.29	94.61	93.80	94.30	93.72
0.260	95.51	95.72	95.16	95.62	95.70
0.280	96.50	96.71	95.67	96.55	97.33
0.300	96.99	97.44	97.56	98.30	97.80
0.320	98.07	98.55	98.39	98.53	98.66
0.340	99.05	100.00	100.00	99.01	98.68
0.360	100.00	100.00	100.00	99.01	99.03
0.380	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
0.400	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
0.420	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
0.440	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

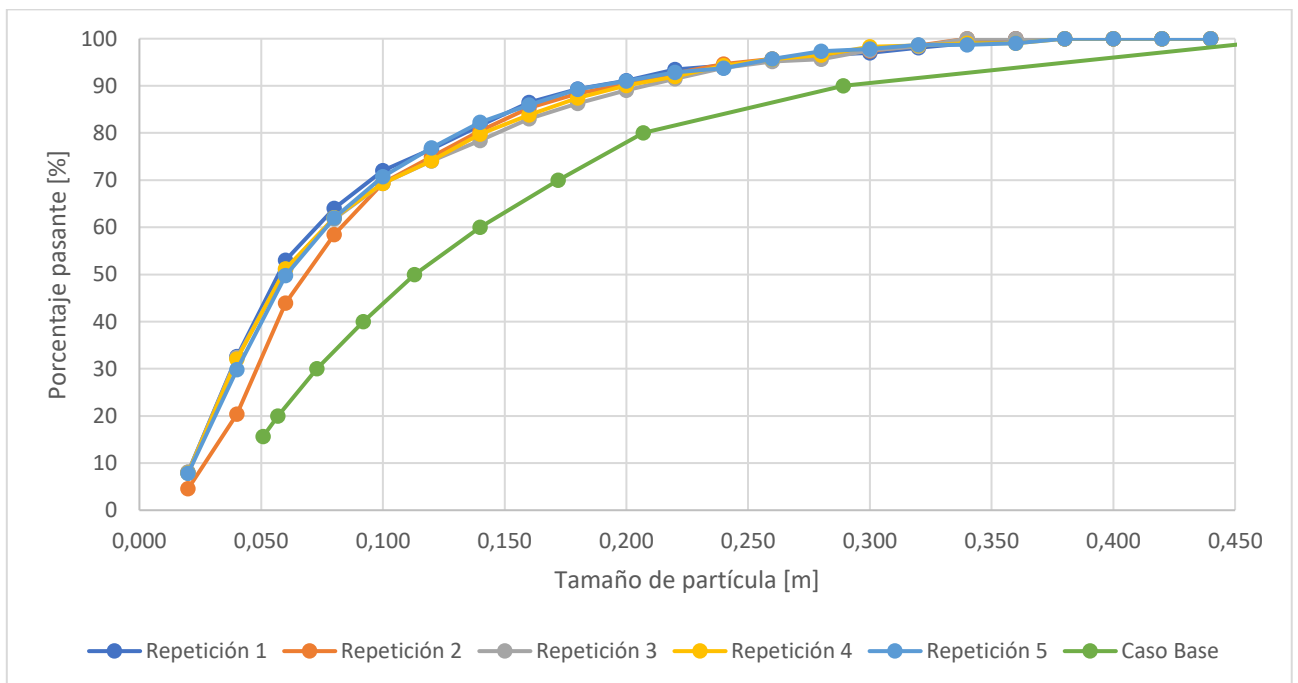


Figura 41. Fragmentación promedio por repetición Material Rodado 30%.

Finalmente, en la Tabla 14 y Figura 42, se observa la fragmentación promedio para cada uno de los casos de estudio contrastada con la distribución de tamaño del caso base.

Tabla 14. Resultados fragmentación promedio por caso de estudio.

Tamaño [m]	MR 10% [%]	MR 20% [%]	MR 30% [%]
0.020	7.12	6.64	7.22
0.040	29.59	28.16	29.26
0.060	50.47	49.51	49.68
0.080	62.53	62.41	61.59
0.100	70.25	71.00	70.12
0.120	76.00	76.84	75.29
0.140	81.87	82.39	80.48
0.160	85.79	86.50	84.93
0.180	88.55	89.30	88.15
0.200	90.91	91.39	90.32
0.220	92.80	93.31	92.50
0.240	93.98	94.75	94.15
0.260	95.24	95.76	95.54
0.280	96.51	96.90	96.56
0.300	97.49	97.94	97.61
0.320	98.46	98.62	98.44
0.340	99.33	98.95	99.36
0.360	99.82	99.32	99.62
0.380	100.00	99.86	100.00
0.400	100.00	99.86	100.00
0.420	100.00	99.86	100.00
0.440	100.00	100.00	100.00

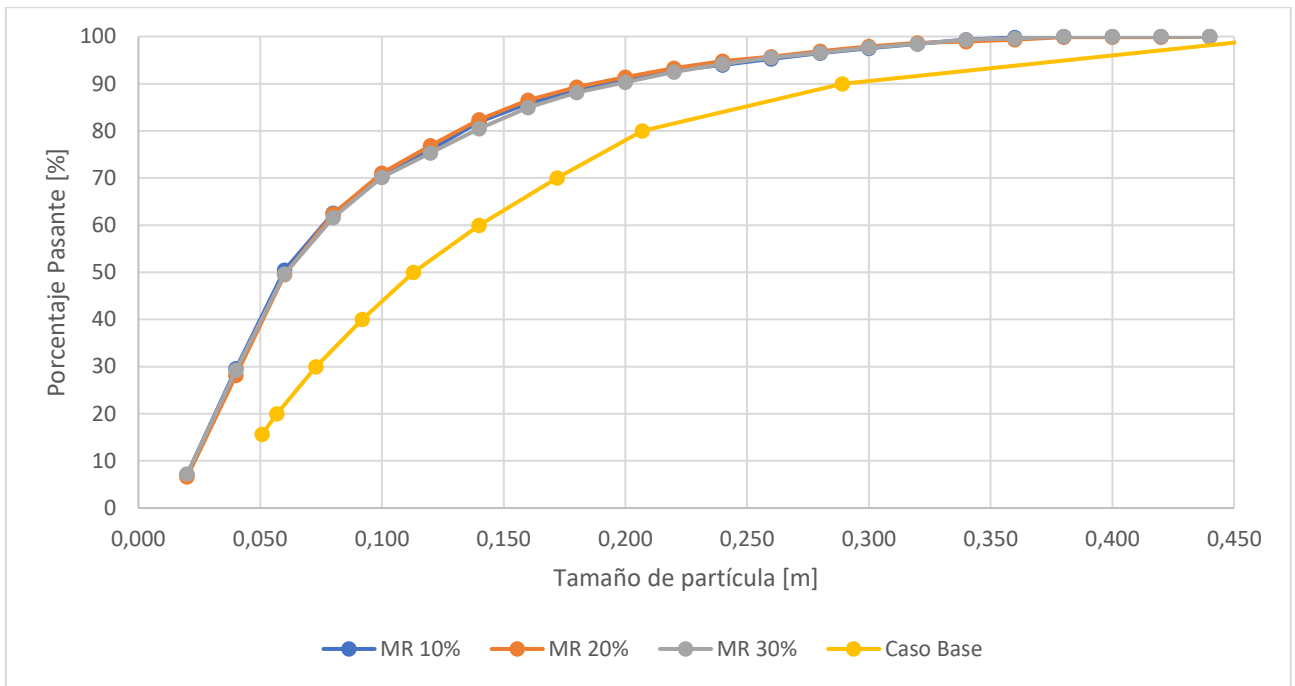


Figura 42. Resultados fragmentación promedio por caso de estudio.

4.3. Discusión de Resultados

4.3.1. P_{80} estimado

Generalmente un buen estimador de la fragmentación de una tronadura es el P_{80} , por ello, en esta sección se evalúan solo los P_{80} de los distintos casos de estudio. Se destaca que no se analiza el comportamiento de las curvas sino que solamente la estimación del P_{80} .

Al analizar directamente los resultados obtenidos por el proceso de estimación de curvas granulométricas mediante análisis de imágenes de la Sección anterior [4.2], se observa en las figuras que existe un sesgo en los tres casos de estudio. Las curvas estimadas tienen una tendencia a ser más finas que la del caso base. El P_{80} aproximado del caso base es de 21 cm; en cambio, en las curvas estimadas para los tres modelos se tiene un P_{80} cercano a los 14 cm.

Como se mencionó anteriormente, y es posible apreciar en los resultados de la Sección [4.2], la diferencia entre el P_{80} real y el estimado en la imágenes es de aproximadamente un -33%. A continuación, en la Figura 43, Figura 44 y Figura 45,

se expone la diferencia porcentual entre el P_{80} medido en cada muestra de cada repetición y el P_{80} real, para el Material Rodado 10%, 20% y 30%, respectivamente.

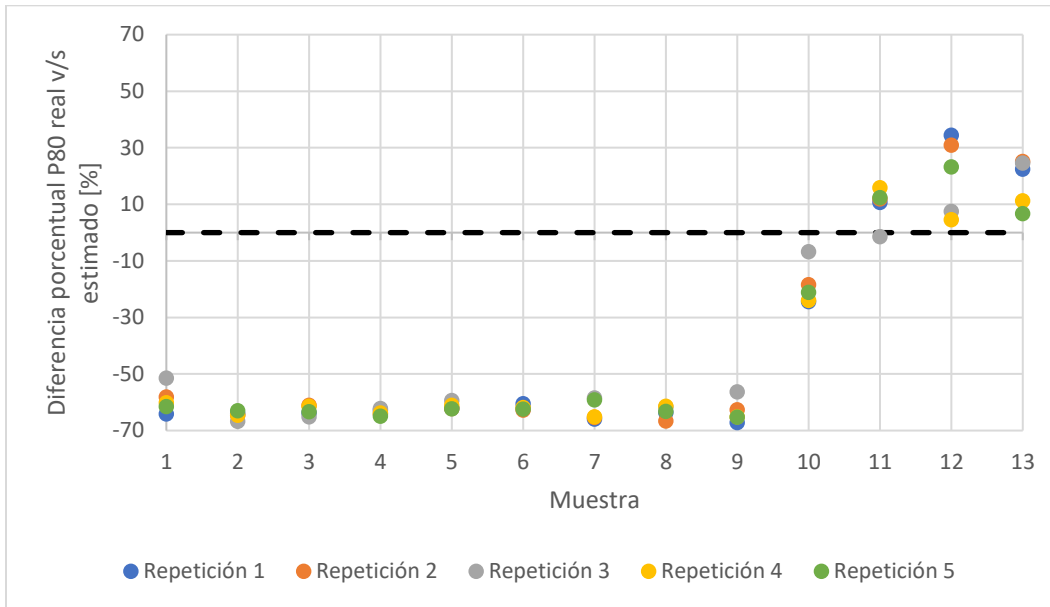


Figura 43. Diferencia porcentual entre P_{80} real y estimado de cada muestra de cada repetición del Material Rodado 10%.

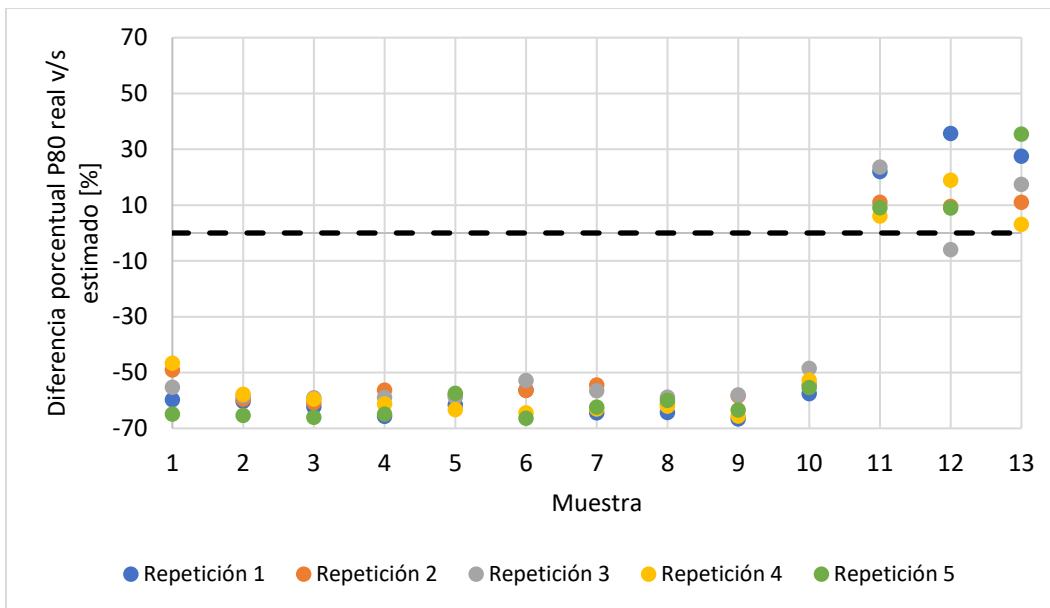


Figura 44. Diferencia porcentual entre P_{80} real y estimado de cada muestra de cada repetición del Material Rodado 20%.

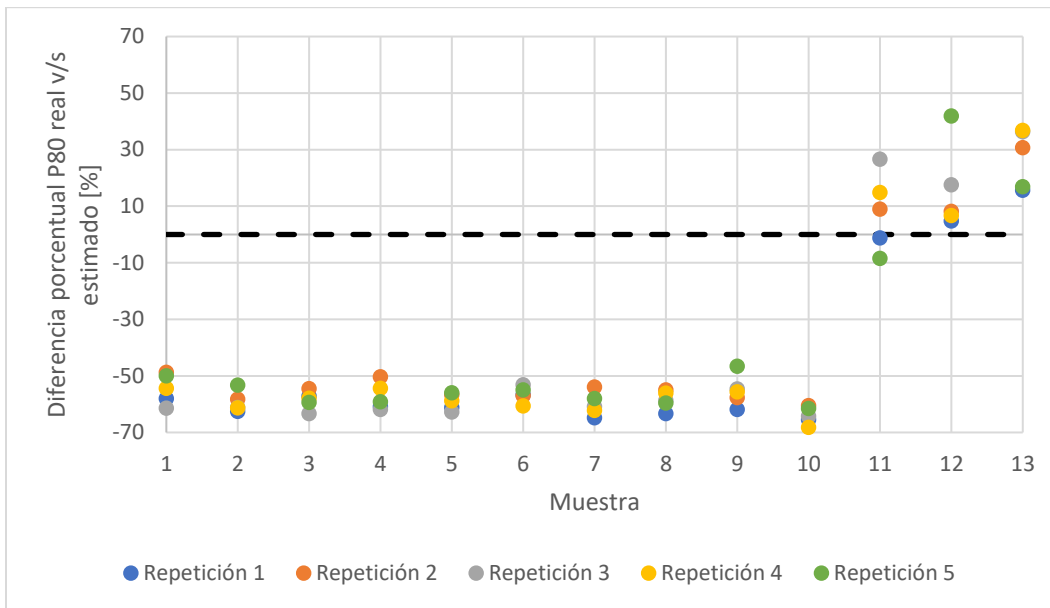


Figura 45. Diferencia porcentual entre P_{80} real y estimado de cada muestra de cada repetición del Material Rodado 30%.

De las figuras antes vistas se desprende que las imágenes tomadas a los pies de la frente (muestras 1 a 10 - 11), correspondientes a material fino e intermedio, tienen un P_{80} estimado mucho menor al P_{80} real, teniendo variaciones del orden del -50% a -60% del tamaño real. Por otro lado, las imágenes superiores (muestras 10 - 11 a 13), correspondientes a las muestras de material grueso, tienen mejores resultados, pero con mayor dispersión, teniendo variaciones entre -10% al 40% del tamaño real.

En la Figura 43 es posible ver, a diferencia de las otras dos figuras, que la muestra 10 posee mejores resultados que sus pares en el Material Rodado 20% y 30%. Esto se debe a que esta muestra es de material grueso y no mixta o fino e intermedio como es el caso del Material Rodado 20% y 30% (esto se ve en la Sección siguiente [4.3.2]), respectivamente. Esto concuerda con lo expuesto anteriormente, las imágenes con distribución de tamaño más grueso obtienen estimaciones del P_{80} más cercanas a la real, pero con mayor variabilidad.

Finalmente, se muestra en la Figura 46 un gráfico de cajas y bigotes que resume por cada caso de estudio las diferencias porcentuales absolutas de las estimaciones del P_{80} de las muestras versus el P_{80} real del caso base. En esta figura es posible ver que la caja del Material Rodado 10% es más grande que las de los otros casos de estudio. Esto se debe a que la muestra 10, como se ve en la Figura 43, posee errores de estimación menores (más cercanos a 0) que sus pares en los

otros dos casos de estudio, lo que da como resultado que el primer cuartil sea menor, generando una caja inferior más amplia con respecto a el Material Rodado 20% y 30%. Por otro lado, las cajas en el Material Rodado 20% y 30% se centran en un error alto cercano al 60%, ya que la mayor parte de las muestras presentan un error en torno a ese valor.

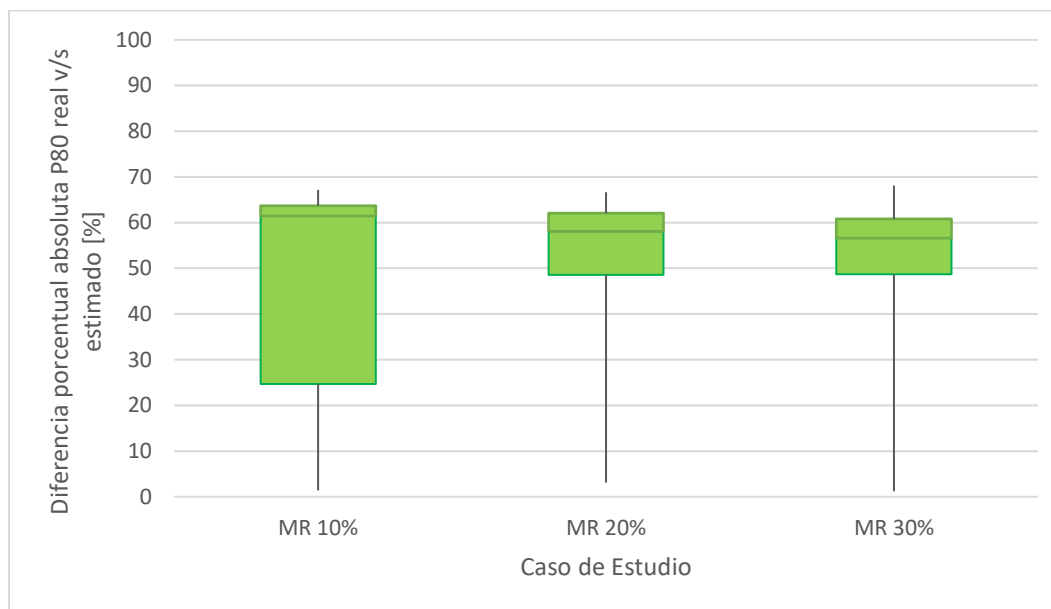


Figura 46. Diferencia porcentual absoluta entre P80 real y estimado todas las muestras por cada caso de estudio.

Luego, en la Tabla 15 se muestra la frecuencia acumulada y el porcentaje acumulado para distintas diferencias porcentual absoluta de las estimaciones del P_{80} de todas las muestras de cada caso de estudio con respecto al P_{80} real. También, en la Figura 47, Figura 48 y Figura 49 se muestran los histograma de la Tabla 15 para los errores porcentuales absolutos de estimación del P_{80} medido en las muestras y el P_{80} real de cada caso de estudio.

Tabla 15. Diferencia porcentual absoluta entre P80 real y estimado por caso de estudio.

Dif. Porcentual Absoluta [%]	Material Rodado 10%		Material Rodado 20%		Material Rodado 30%	
	Frec. Acumulada	Porcentaje Acumulado	Frec. Acumulada	Porcentaje Acumulado	Frec. Acumulada	Porcentaje Acumulado
10	5	7.69	6	9.23	6	9.23
20	11	16.92	10	15.38	10	15.38
30	18	27.69	13	20.00	11	16.92
40	20	30.77	15	23.08	14	21.54
50	20	30.77	18	27.69	18	27.69
60	26	40.00	43	66.15	45	69.23
70	65	100.00	65	100.00	65	100.00

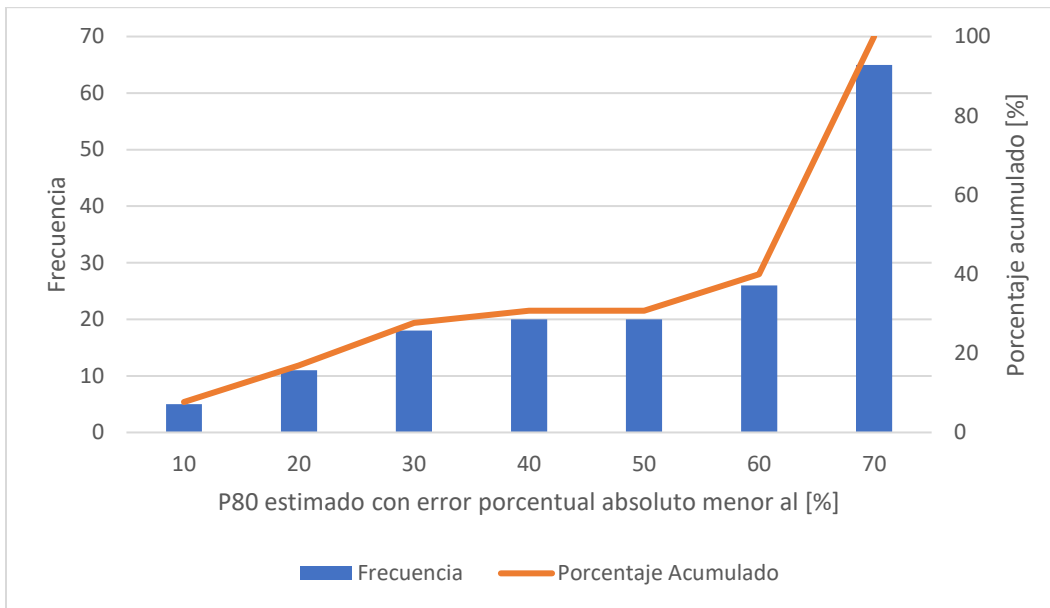


Figura 47. Histograma de frecuencia del error porcentual absoluto para el P80 estimado del Material Rodado 10%.

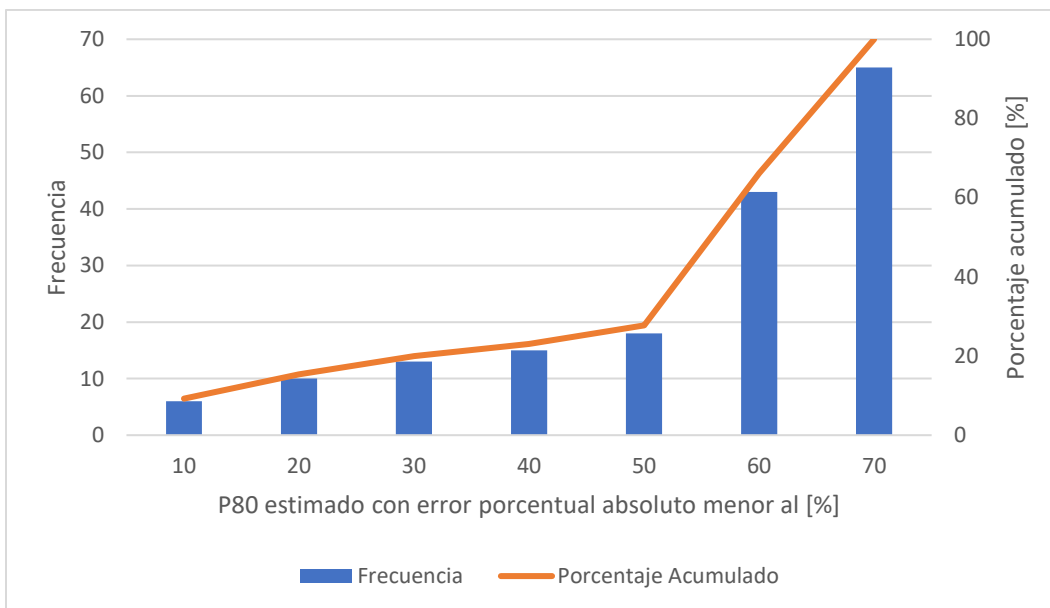


Figura 48. Histograma de frecuencia del error porcentual absoluto para el P80 estimado del Material Rodado 20%.

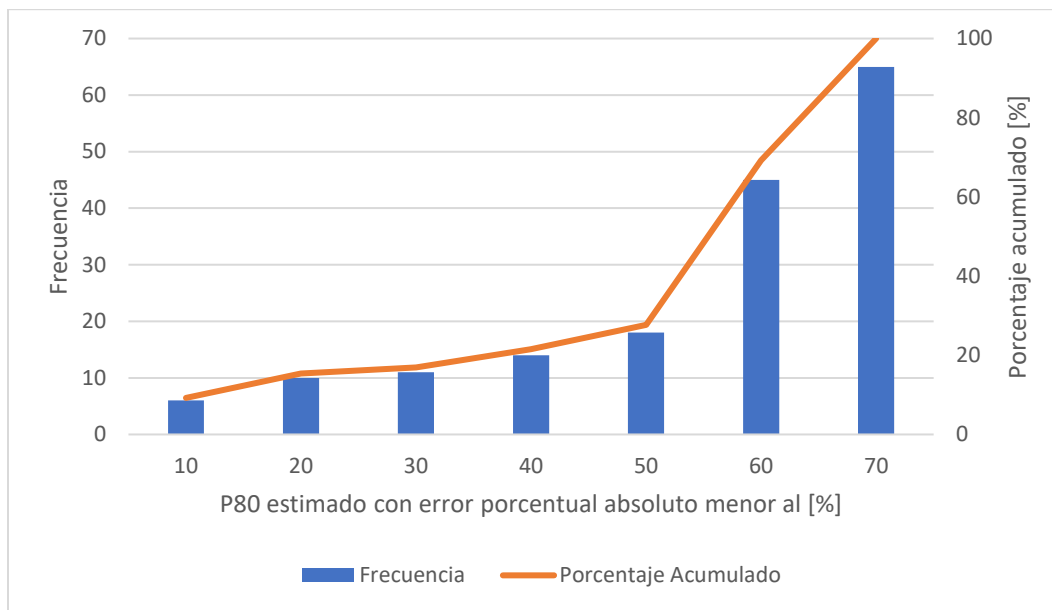


Figura 49. Histograma de frecuencia del error porcentual absoluto para el P80 estimado del Material Rodado 30%.

En los histogramas y la Tabla 15 se puede ver que en los tres casos de estudio entre el 7% y el 9% de las muestras poseen un error absoluto de estimación del P_{80} menor al 10%. Por otro lado, entre el 30% y 60% de las muestras poseen un error de estimación absoluto mayor al 60% en los tres casos de estudio. Cabe destacar que las muestras con mejores estimaciones corresponden a fotografías con fragmentación visiblemente más gruesa, correspondientes a las muestras de la parte superior de la pila. Luego en la Tabla 16 se presenta el resumen de los tres casos de estudio combinados, donde se puede ver que el 8.72% de las muestras poseen un error absoluto de estimación menor al 10% con respecto del P_{80} real. Se debe destacar también que más del 40% de las muestras poseen un error absoluto de estimación del P_{80} superior a 60%. En la Figura 50 se muestra un histograma similar a los anteriores, pero, incluye las muestras de todos los casos de estudio.

Tabla 16. Diferencia porcentual absoluta entre P80 real y estimado de todos los casos de estudio.

Dif. Porcentual Absoluta [%]	Frec. Acumulada	Porcentaje Acumulado
10	17	8.72
20	31	15.90
30	42	21.54
40	49	25.13
50	56	28.72
60	114	58.46
70	195	100.00

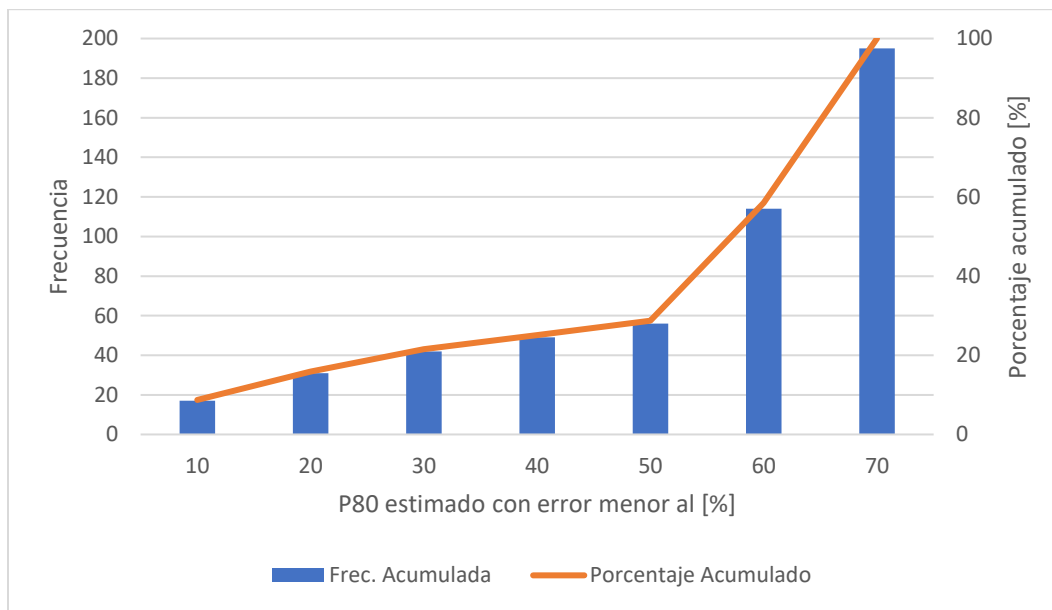


Figura 50. Histograma de frecuencia del error porcentual absoluto para el P80 estimado de todos los casos de estudio.

4.3.2. Uso de ponderadores

A pesar del sesgo evidente en las distribuciones granulométricas que es posible ver en las tres curvas, los resultados obtenidos por el análisis de imágenes fueron aproximadamente los mismos en promedio para los tres casos de estudio. Esto refleja que el análisis de imágenes entrega resultados similares independiente de la distribución espacial del material y que tiene una tendencia a converger a cierta distribución de tamaños, siempre y cuando se analice todo el material, sin sobre muestrear ninguna zona.

Para comparar las curvas obtenidas se utiliza el error cuadrático medio (ECM), el cual indica qué tan cercano es el valor estimado con el real. En la Tabla 17 se muestra el ECM y el coeficiente de correlación para la curva generada por todas las muestras de cada repetición promediadas en cada caso de estudio. En ella, se aprecia que las estimaciones tienen un alto ECM con respecto a la curva del caso base. Esto se debe a que las estimaciones se encuentran bastante alejadas de la curva original. Por otro lado, presentan un buen coeficiente de correlación, cercano a 1, lo que indica que las curvas tienen un comportamiento similar, pero desplazado. Este valor de ECM en cada repetición se utilizará para comparar la efectividad de las medidas tomadas para buscar una mejor estimación de las curvas de fragmentación.

Tabla 17. ECM y coeficiente de correlación por repetición y casos de estudio para curvas promedio.

	Material Rodado 10%		Material Rodado 20%		Material Rodado 30%	
	ECM	Coef. Corr.	ECM	Coef. Corr.	ECM	Coef. Corr.
Repetición 1	0.509	0.990	0.499	0.990	0.518	0.992
Repetición 2	0.430	0.996	0.462	0.976	0.406	0.986
Repetición 3	0.395	0.992	0.419	0.986	0.423	0.997
Repetición 4	0.543	0.989	0.529	0.992	0.443	0.996
Repetición 5	0.526	0.988	0.578	0.992	0.481	0.989
Promedio	0.481	0.991	0.498	0.987	0.454	0.992

En busca de mitigar el sesgo resultante del proceso de análisis de imágenes se propone utilizar ponderadores para cada una de las muestras en cada una de las repeticiones de los tres casos de estudio. El uso de ponderadores cobra sentido debido al modo en que el software de análisis de imágenes procesa las muestras, donde no se busca generar una tercera dimensión a partir de imágenes 2D. Esto provoca que los resultados tengan un sesgo por pérdida de información, por ejemplo, imaginando una partícula cuadrada de 1x1 y de 2x2, la más grande será 4 veces más pesada que la más pequeña, al escalar esto a una tercera dimensión, la más grande será 8 veces más pesada que la pequeña. De acuerdo con esto, es que se busca mejorar la estimación de curvas granulométricas mediante el uso de ponderadores en las muestras.

En primera instancia, los ponderadores buscan reducir el error de estimación, para ello, se utiliza la herramienta *Solver* de *Excel*, la cual tiene como objetivo minimizar el ECM modificando los ponderadores de cada muestra.

En la Tabla 18, Tabla 19 y Tabla 20 se detallan los ponderadores obtenidos para cada muestra en cada repetición de los tres casos de estudio. En los tres casos se aprecia que los ponderadores son más altos en la parte alta de la pila, donde se encuentra la fragmentación más gruesa (concuerta con el ejemplo de las partículas cuadradas antes señalado). En el Material Rodado 10% las rocas más grandes comienzan a aparecer desde la muestra 10 y en los otros dos casos restantes desde la muestra 11. Es por ello que el primer caso de estudio incluye la muestra 10 dentro de sus ponderadores más altos.

Tabla 18. Ponderadores por muestra Material Rodado 10%.

Material Rodado 10%	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13
Repetición 1	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	0.17	0.41
Repetición 2	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.40	0.00
Repetición 3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.74	0.15	0.00	0.11
Repetición 4	0.00	0.00	0.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.53	0.00
Repetición 5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.62	0.04	0.34	0.00
Ponderadores Prom.	0.13	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.31	0.11	0.29	0.10

Tabla 19. Ponderadores por muestra Material Rodado 20%.

Material Rodado 20%	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13
Repetición 1	0.00	0.00	0.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.26	0.06	0.32
Repetición 2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.66	0.00	0.00
Repetición 3	0.18	0.00	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.24	0.00	0.36
Repetición 4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.27	0.00	0.00	0.00	0.72	0.01	0.00
Repetición 5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.46	0.21
Ponderadores Prom.	0.04	0.00	0.12	0.00	0.11	0.02	0.05	0.00	0.00	0.00	0.38	0.11	0.18

Tabla 20. Ponderadores por muestra Material Rodado 30%.

Material Rodado 30%	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13
Repetición 1	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.68	0.00	0.12
Repetición 2	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.70	0.00	0.05
Repetición 3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.42	0.00	0.18
Repetición 4	0.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.46
Repetición 5	0.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.46	0.13
Ponderadores Prom.	0.21	0.01	0.00	0.00	0.01	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.36	0.11	0.19

El valor del ECM y el coeficiente de correlación de las curvas resultantes, al aplicarle a cada muestra los ponderadores descritos anteriormente, se detalla en la Tabla 21. En ella, se aprecia que los valores de ECM disminuyeron considerablemente, lo cual era el objetivo planteado con el *Solver*, teniendo una mejora promedio del ECM de 96.7%, 96.8% y 96.5% para el Material Rodado 10%, 20% y 30%, respectivamente. Esa es la mejor estimación posible con las muestras tomadas, pero es impracticable en la realidad, ya que no se conoce la distribución granulométrica del material tronado, por lo cual no se puede optimizar. De ahora en adelante se busca generalizar el uso de ponderadores.

Tabla 21. ECM y coeficiente de correlación por repetición y casos de estudio para curvas con ponderadores.

	Material Rodado 10%		Material Rodado 20%		Material Rodado 30%	
	ECM	Coef. Corr.	ECM	Coef. Corr.	ECM	Coef. Corr.
Repetición 1	0.016	0.996	0.011	0.995	0.017	0.997
Repetición 2	0.018	0.994	0.027	0.997	0.017	0.995
Repetición 3	0.013	0.996	0.012	0.997	0.021	0.993
Repetición 4	0.019	0.997	0.011	0.996	0.016	0.993
Repetición 5	0.014	0.995	0.020	0.996	0.008	0.997
Promedio	0.016	0.995	0.016	0.996	0.016	0.995

Teniendo en cuenta que el caso anterior es la mejor combinación de ponderadores que minimizan el ECM y por lo tanto entregan la mejor estimación, de todas maneras, se concluye que el uso de ponderadores si puede ayudar a mejorar la estimación.

Luego, con el objetivo de generalizar más el uso de ponderadores, se procede a generar ponderadores promedio para cada caso de estudio. Estos ponderadores promedio se obtienen sumando los ponderadores de cada muestra en cada repetición y luego normalizándolos para que su suma de 1 (en la última fila de la Tabla 18, Tabla 19 y Tabla 20 se detallan los ponderadores promedio de cada caso de estudio).

Con los ponderadores promedio definidos, se procede a ponderar todas las muestras de cada repetición con ellos, según cada caso de estudio. Los resultados obtenidos para la estimación de curvas granulométricas utilizando los ponderadores promedio se detallan en la Tabla 22. En ella, se observa que los resultados obtenidos por los ponderadores promedios son mejores que promediando las curvas de todas las muestras.

Tabla 22. ECM y coeficiente de correlación por repetición y casos de estudio para curvas con ponderadores promedio.

	Material Rodado 10%		Material Rodado 20%		Material Rodado 30%	
	ECM	Coef. Corr.	ECM	Coef. Corr.	ECM	Coef. Corr.
Repetición 1	0.020	0.997	0.014	0.994	0.025	0.997
Repetición 2	0.024	0.993	0.038	0.996	0.019	0.996
Repetición 3	0.028	0.994	0.019	0.996	0.030	0.990
Repetición 4	0.039	0.997	0.030	0.998	0.023	0.993
Repetición 5	0.022	0.997	0.032	0.995	0.070	0.998
Promedio	0.027	0.995	0.027	0.996	0.034	0.995

La mejora media del ECM es de 94.5%, 94.7% y 92.6% para el Material Rodado 10%, 20% y 30%, respectivamente. Obviamente, la mejora para cada caso de estudio es menor que en el caso anterior, ya que se usan ponderadores promedios para cada muestra y no el óptimo que minimiza el ECM (caso anterior). Nuevamente se demuestra que el uso de ponderadores mejora la estimación en un alto porcentaje.

Dado que los ponderadores promedios de cada caso de estudio siguen siendo bastante específicos para cada muestra, se procede a generar unos ponderadores globales para los tres modelos, los cuales ponderan cada muestra por un único valor independiente del caso de estudio. Estos ponderadores globales se detallan en Tabla 23. Estos ponderadores globales no toman en cuenta la distribución en el espacio de las partículas, por lo que aplican a todos los casos de estudio.

Tabla 23. Ponderadores globales por muestra.

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13
Ponderadores MR 10%	0.13	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.31	0.11	0.29	0.10
Ponderadores MR 20%	0.04	0.00	0.12	0.00	0.11	0.02	0.05	0.00	0.00	0.00	0.38	0.11	0.18
Ponderadores MR 30%	0.21	0.01	0.00	0.00	0.01	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.36	0.11	0.19
Ponderadores globales	0.13	0.00	0.06	0.00	0.04	0.04	0.02	0.00	0.00	0.10	0.28	0.17	0.16

Los resultados obtenidos del uso de los ponderadores globales en cada muestra se señalan en la Tabla 24. Nuevamente los resultados obtenidos son mejores que la estimación mediante el promedio de todas las muestras, teniendo mejoras medias de un 93.7%, 93.5% y 90.5% para el Material Rodado 10%, 20% y 30%, respectivamente.

Tabla 24. ECM y coeficiente de correlación por repetición y casos de estudio para curvas con ponderadores globales.

	Material Rodado 10%		Material Rodado 20%		Material Rodado 30%	
	ECM	Coef. Corr.	ECM	Coef. Corr.	ECM	Coef. Corr.
Repetición 1	0.025	0.996	0.014	0.995	0.046	0.997
Repetición 2	0.026	0.993	0.045	0.996	0.027	0.997
Repetición 3	0.031	0.994	0.019	0.997	0.027	0.991
Repetición 4	0.032	0.997	0.038	0.998	0.030	0.994
Repetición 5	0.037	0.996	0.046	0.996	0.085	0.999
Promedio	0.030	0.995	0.033	0.996	0.043	0.996

Luego, en busca de volver el uso de los ponderadores más amplio para todos los casos de estudio se procede a agrupar las muestras según la fragmentación que

hay en ellas (inspección visual y posterior verificación con las curvas en el Anexo A: Figuras Resultados Casos de Estudio por Repetición). Para el Material Rodado 10%, las muestras del 1 al 9 corresponden a material fino e intermedio y las muestras 10 a 13 a fragmentación más gruesa. Por otra parte, los casos Material Rodado 20% y 30% presentan distribuciones de tamaño fina e intermedia en sus muestras 1 a 10 y gruesa en las 11 a 13. Tomando esto en cuenta se genera un ponderador único para muestras finas e intermedia y otro para muestras gruesas en cada caso de estudio. Estos ponderadores únicos se obtienen mediante la suma de los ponderadores promedio de cada una de las muestras de cada categoría antes descrita y luego normalizando para que la suma de ellos de uno. En la Tabla 25 se muestran los ponderadores únicos utilizados (donde F+I es fragmentación fina e intermedia y G es fragmentación gruesa).

Tabla 25. Ponderadores únicos por casos de estudio.

	F + I	G
Material Rodado 10%	0.19	0.81
Material Rodado 20%	0.34	0.66
Material Rodado 30%	0.34	0.66

Teniendo los ponderadores únicos definidos, se procede a evaluar una combinación completa (full factorial) entre una muestra fina e intermedia y una muestra gruesa, ponderada por el ponderador correspondiente para cada categoría, para cada repetición en cada caso de estudio. Se evalúan 180 (9x4x5) combinaciones en el Material Rodado 10% y 150 (10x3x5) en el Material Rodado 20% y otras 150 (10x3x5) en al Material Rodado 30%, dando un total de 480 combinaciones entre los tres casos de estudio.

En la Tabla 26, Tabla 27 y Tabla 28, se entrega un resumen estadístico de los resultados de los ECM obtenidos por el uso de ponderadores únicos en cada una de las combinaciones antes descrita. En ellas destaca la mejora promedio de los ECM inclusive para ponderadores más generales como los utilizados. Los ECM disminuyeron en promedio entre un 63% y un 92%, lo que es una importante mejora de la estimación con respecto al promedio de las muestras.

Tabla 26. Estadísticas ECM ponderadores únicos Material Rodado 10%.

MR 10%	Promedio	Máximo	Mínimo	Desviación
Repetición 1	59.15	82.11	35.91	15.43
Repetición 2	51.63	78.82	24.12	18.26
Repetición 3	59.36	76.68	25.32	14.16
Repetición 4	73.50	92.52	22.46	28.14
Repetición 5	71.61	88.83	39.95	17.99
Total	63.05	92.52	22.46	20.92

Tabla 27. Estadísticas ECM ponderadores únicos Material Rodado 20%.

MR 20%	Promedio	Máximo	Mínimo	Desviación
Repetición 1	95.75	96.85	93.71	0.72
Repetición 2	88.13	94.13	78.92	4.26
Repetición 3	90.04	94.81	82.01	4.72
Repetición 4	92.81	97.60	89.37	2.37
Repetición 5	93.50	95.89	90.81	1.61
Total	92.05	97.60	78.92	4.09

Tabla 28. Estadísticas ECM ponderadores únicos Material Rodado 30%.

MR 30%	Promedio	Máximo	Mínimo	Desviación
Repetición 1	88.69	93.06	80.30	3.93
Repetición 2	86.44	93.62	75.07	5.13
Repetición 3	87.61	94.08	76.51	5.66
Repetición 4	88.22	90.51	83.14	1.84
Repetición 5	68.50	95.69	18.32	29.80
Total	83.89	95.69	18.32	15.75

De los resultados del uso de ponderadores únicos para cada tipo de muestra, se hace énfasis que la mejora mínima que hubo fue de un 18.32% con respecto al promedio de todas las muestras de una repetición de un caso de estudio. Por otro lado, la mejora más alta que hubo fue de 97.6% lo que indica que el error de estimación, en ese caso, fue mínimo. Se destaca que estos resultados son solamente utilizando dos muestras (una para cada ponderador único).

El Material Rodado 10% fue el que obtuvo la menor mejora para el uso de los ponderadores únicos, esto se explica por dos motivos. En primer lugar, fue evaluado con distintos ponderadores únicos, los que entregan una importancia mayor a las imágenes con fragmentación gruesa. Esto sugiere que no es la mejor ponderación en comparación con los otros casos. En segundo lugar, la muestra 10 (Figura 51) presenta una distribución mixta entre grueso y fino e intermedio, ya que

justo en la mitad está el contacto entre estas dos fragmentaciones; por lo que, al incluirla como muestra de distribución gruesa genera que los finos incluidos en esta imagen cobren mayor importancia, lo que se traduce en un mala desempeño debido a una incorrecta categorización de la imagen.

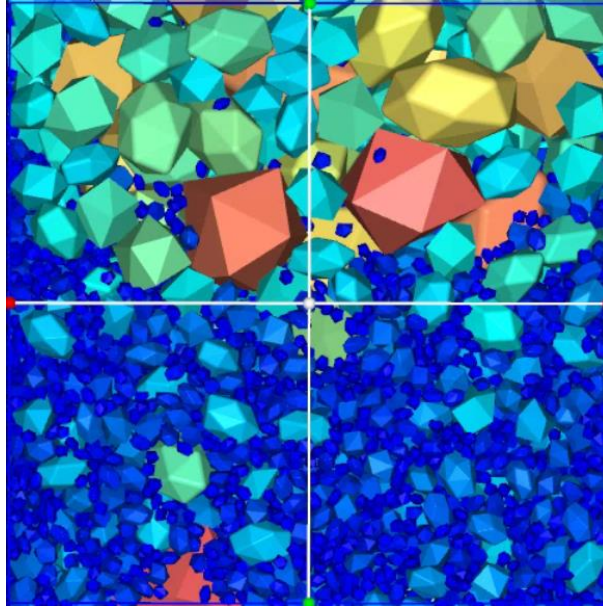


Figura 51. Contacto distribuciones granulométricas. Muestra 10 Material Rodado 10% Rep. 3

En el caso del Material Rodado 20% las imágenes se encuentran muy bien categorizadas, o son finas e intermedia o gruesas. El contacto entre estas fragmentaciones queda levemente en el borde de la muestra 9 (Figura 52) por lo que no ocurre (o en menor medida) lo expuesto en el párrafo anterior. Finalmente, para el Material Rodado 30%, en la muestra 11 (Figura 53) ocurre levemente una mezcla de fragmentaciones, por ello se explica la baja en el desempeño de los ponderadores únicos en la estimación con respecto al Material Rodado 20%.

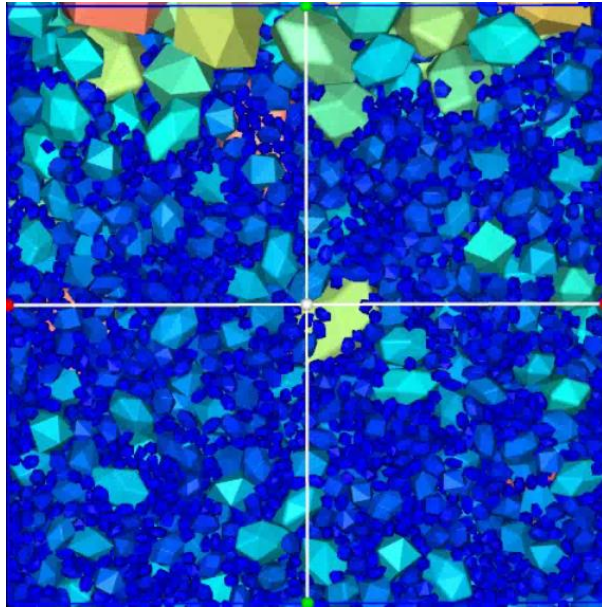


Figura 52. Contacto distribuciones granulométricas. Muestra 9 Material Rodado 20% Rep. 5.

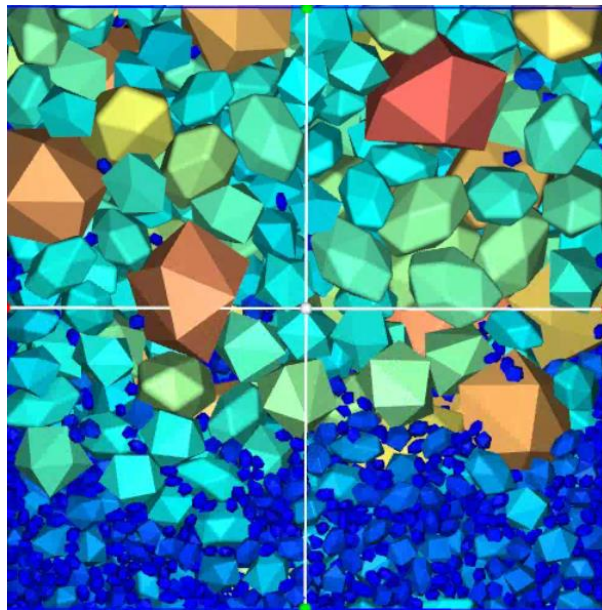


Figura 53. Contacto distribuciones granulométricas. Muestra 10 Material Rodado 30% Rep. 2.

Lo expuesto en los párrafos anteriores explica también, la gran diferencia entre el mínimo y el máximo en el Material Rodado 10% y 30%. De la misma manera se explica la desviación estándar más alta en estos mismos casos de estudio.

También, se busca conocer el impacto de la cantidad de muestras en la estimación, entonces, se promedian las muestras de cada repetición según su categoría (fina e intermedia y gruesa) para luego ponderarlas por el ponderador único antes descrito.

En la Tabla 29 se detallan los resultados obtenidos por el uso de ponderadores únicos para curvas promedio por categoría en cada repetición de cada caso de estudio. En ella se aprecia que los ECM son bastante bajos y los coeficientes de correlación son cercanos a 1, lo que corresponde a una buena estimación.

Tabla 29. ECM y coeficiente de correlación por repetición y caso de estudio para curvas promedio por categoría con ponderadores únicos.

	Material Rodado 10%		Material Rodado 20%		Material Rodado 30%	
	ECM	Coef. Corr.	ECM	Coef. Corr.	ECM	Coef. Corr.
Repetición 1	0.021	0.996	0.015	0.994	0.031	0.994
Repetición 2	0.043	0.991	0.048	0.995	0.017	0.995
Repetición 3	0.044	0.993	0.024	0.996	0.021	0.993
Repetición 4	0.028	0.996	0.031	0.997	0.016	0.993
Repetición 5	0.028	0.995	0.027	0.995	0.008	0.997
Promedio	0.033	0.994	0.029	0.995	0.019	0.995

Al contrastar la Tabla 29 con la Tabla 26, Tabla 27 y Tabla 28 se ve que los valores de ECM mejoraron considerablemente en el caso de estudio 1 y 3, teniendo una mejora en el Material Rodado 10% de 93.2% versus 63.1%, en el Material Rodado 20% 94.2% versus 92.1% y en el Material Rodado 30% 95.9% versus 83.9%. Esto implica que la cantidad de muestras afecta considerablemente la estimación de curvas granulométricas. Se concluye que el uso de curvas promedio por categoría ayudaría a mejorar la estimación de fragmentación.

En la Figura 54, Figura 55 y Figura 56 se ve gráficamente los resultados expuestos en la Tabla 29 y, al compararlas con las figuras de resultados promedios (Figura 39, Figura 40 y Figura 41), se ve una considerable mejora de la estimación gracias al uso de estos ponderadores y la categorización de las imágenes.

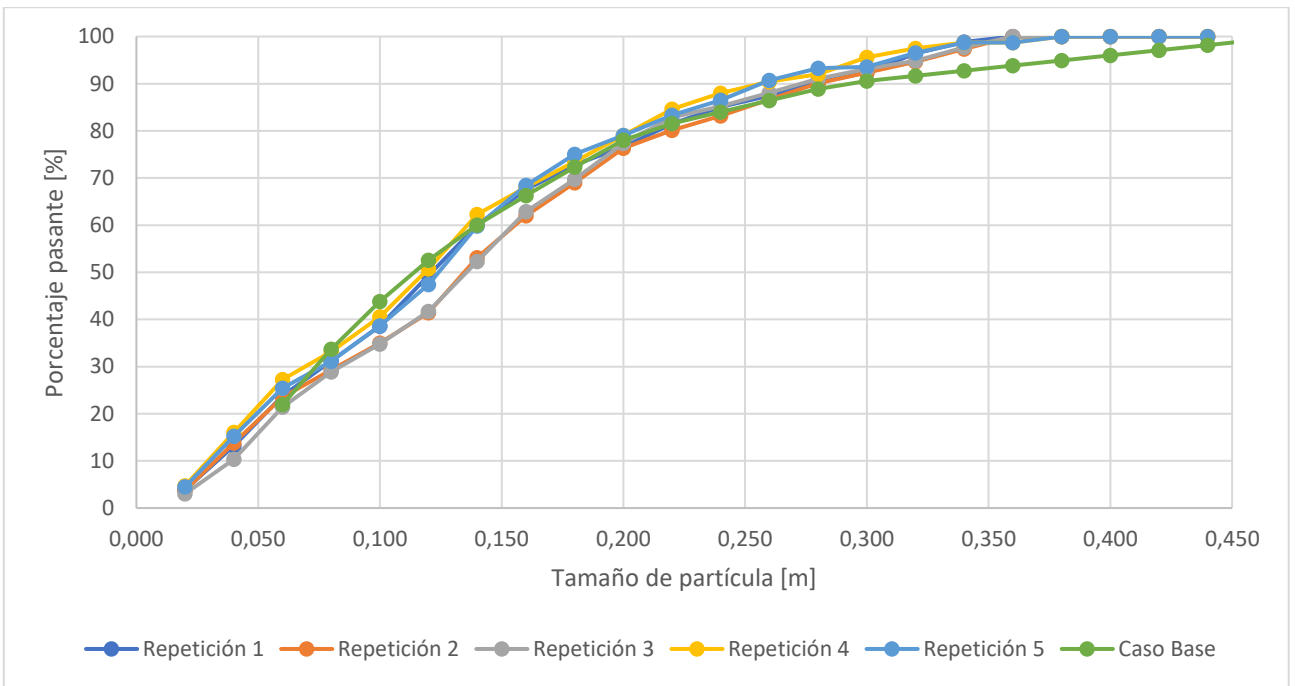


Figura 54. Fragmentación curvas promedio por categoría con ponderador único por repetición Material Rodado 10%.

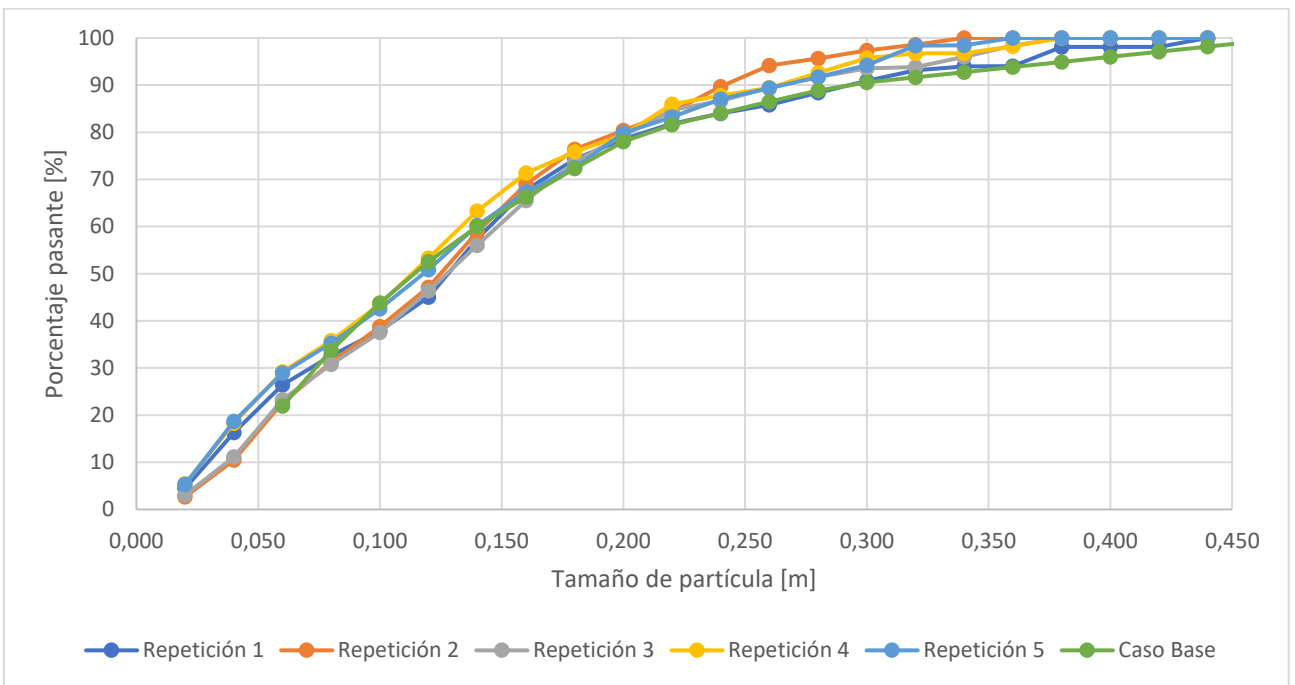


Figura 55. Fragmentación curvas promedio por categoría con ponderador único por repetición Material Rodado 20%.

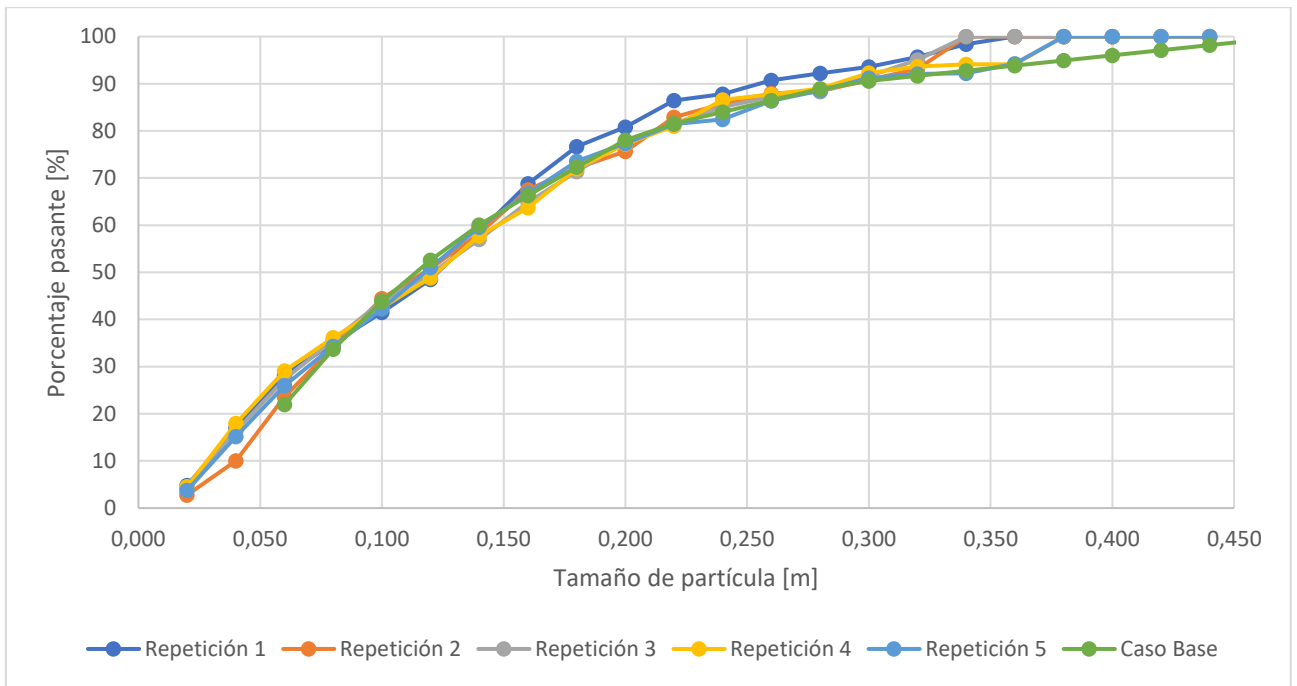


Figura 56. Fragmentación curvas promedio por categoría con ponderador único por repetición Material Rodado 30%.

Finalmente, al igual que en el párrafo anterior, se quiere evaluar el impacto de la cantidad de muestras, es por esto que se evalúa cada caso de estudio como un todo, considerando todas sus muestras (65 por modelo) y también se considera el uso de ponderadores únicos para cada categoría de fragmentación.

En la Tabla 30 se muestran los resultados obtenidos por el procedimiento antes descrito, en el cual se promedian todas las muestras de cada categoría para cada caso de estudio y se ponderan por los ponderadores únicos. En la Figura 57 se puede ver los resultados de manera gráfica.

Tabla 30. Resultados fragmentación por caso de estudio con ponderadores únicos por categoría.

Tamaño [m]	MR 10% [%]	MR 20% [%]	MR 30% [%]
0.020	3.96	4.17	4.40
0.040	13.68	14.92	15.70
0.060	24.22	26.04	27.09
0.080	30.67	33.06	34.42
0.100	37.43	39.96	41.15
0.120	45.97	48.41	47.90
0.140	57.30	59.04	56.83
0.160	65.67	68.16	65.76
0.180	71.90	74.57	73.02
0.200	77.61	79.48	77.92
0.220	82.41	83.97	82.91
0.240	85.52	86.98	85.83
0.260	88.58	89.59	88.61
0.280	91.30	91.95	90.75
0.300	93.38	94.27	93.70
0.320	95.94	96.06	95.85
0.340	98.23	96.98	98.43
0.360	99.52	98.04	98.94
0.380	100.00	99.60	100.00
0.400	100.00	99.60	100.00
0.420	100.00	99.60	100.00
0.440	100.00	100.00	100.00

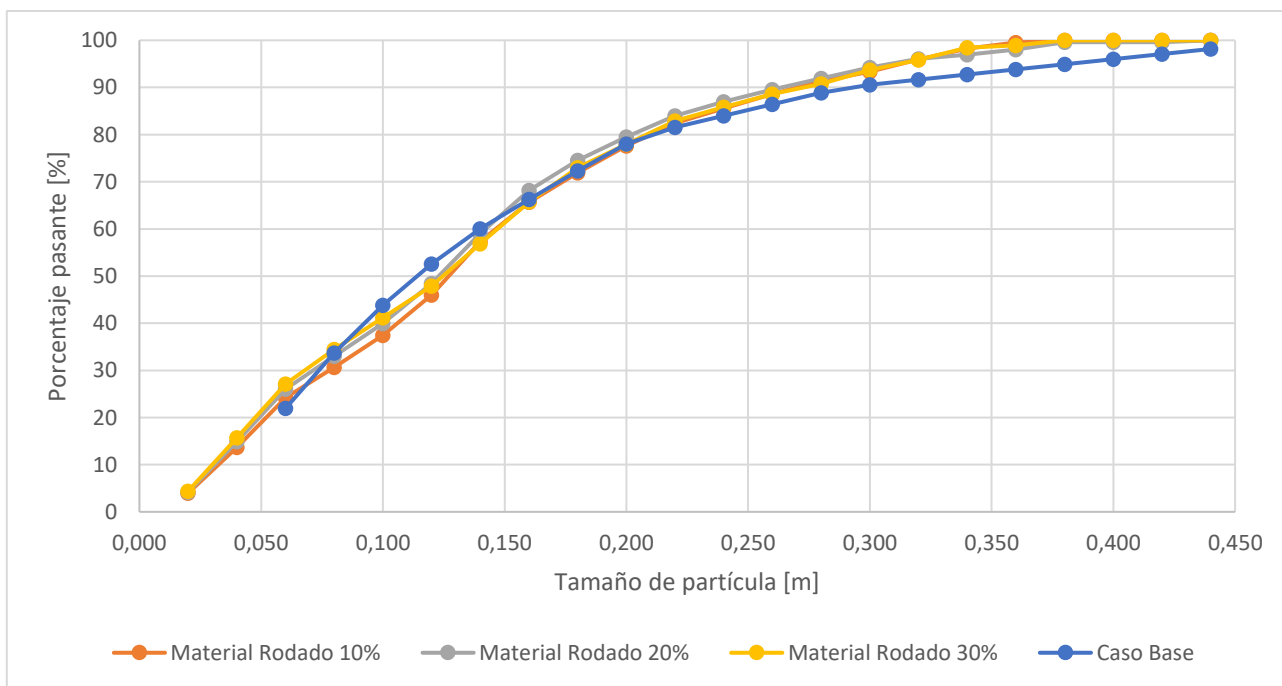


Figura 57. Fragmentación promedio por caso de estudio con ponderadores únicos por categoría.

Las curvas de la figura anterior muestran una estimación bastante precisa con respecto a la curva del caso base. Los valores del ECM de cada caso de estudio son de: 0.0262, 0.0208 y 0.0219 para el Material Rodado 10%, 20% y 30%, respectivamente. Esto quiere decir que la utilización de todas las muestras de cada modelo ponderadas por los ponderadores únicos tuvieron una mejoría de 94.5%, 95.8% y 95.2% para cada caso de estudio, respectivamente, con respecto al promedio de todas las muestras en cada caso.

Al comparar los resultados obtenidos para el uso de todas las muestras en un caso de estudio y el uso de las muestras de una sola repetición en cada caso de estudio se obtiene que el aumento en la cantidad de imágenes (13 imágenes de una repetición versus 65 imágenes del caso de estudio completo) mejora la estimación, pero no de manera drástica, lo que lleva a pensar que los resultados convergen en una cierta cantidad de imágenes. Se debe considerar entonces, que a medida que se agregan imágenes, la variabilidad del promedio de ellas disminuye, lo que vuelve más precisos los resultados obtenidos, pero dado que convergen en una distribución no se deben utilizar demasiadas muestras.

El aumentar la cantidad de imágenes solo mejoró la estimación hasta un 3.6%; por lo tanto, para los casos estudiados, aumentar el número de imágenes procesadas en 5 veces no es recomendable (de 13 a 65) en términos de tiempo de toma de imágenes y procesamiento de ellas, ya que los resultados con menos imágenes son suficientemente precisos.

Por otra parte, el aumento de dos imágenes (una fina e intermedia y una gruesa) a 13 imágenes (correspondientes a una repetición) si influyó considerablemente en la estimación de la fragmentación, aumentando la precisión de esta.

Se destaca que, el uso de ponderadores más grandes en las imágenes con distribución granulométrica más gruesa colaboró en el mejoramiento de la estimación de fragmentación de la tronadura. Pero este no debe ser excesivo, como se vio en el Material Rodado 10%, donde disminuyó su precisión al usar pocas imágenes.

4.4. Muestreo Físico Representativo

Parte del objetivo del trabajo realizado en esta memoria es sentar las bases de un muestreo físico representativo. Para ello, basándose en los resultados de la tronadura expuestos en la Sección [2.1.2] y en cómo se plantean los modelos simulados en la Sección [3.2] se tiene que la distribución granulométrica en el eje horizontal de la tronadura es relativamente homogénea a distintas alturas. Esto siempre y cuando la tronadura sea evaluada en la zona de producción, como lo es el caso estudiado. Esto porque, como se mencionó anteriormente, no se evalúan los bordes de la tronadura donde puede haber pozos de precorte o buffer, los cuales tienen distintos resultados de fragmentación. Solo se evalúan pozos de producción, ya que, estos tienen condiciones de carga de explosivo similares a lo largo del paño de tronadura, a menos que cambien las condiciones de la roca.

Tomando en cuenta la distribución espacial del material tronado, donde, en la horizontal la distribución granulométrica es homogénea y, por otro lado, la fragmentación en el eje vertical presenta una segregación producto de la voladura misma, tamaños más gruesos arriba, en la zona del taco, y partículas de tamaño fino e intermedio desde la zona del taco hacia abajo. Por esta condición es que se plantea que la manera de obtener buenos resultados para muestrear una tronadura y analizarla mediante tamizado es muestreando el eje vertical de una porción en su totalidad para así obtener todos los tamaños de roca presentes en la pila.

Sabiendo que se debe muestrear una porción del eje vertical completamente, dado que este presenta todas las distribuciones de tamaño presentes en la voladura, se debe saber cuál es la porción que muestrear. Considerando la Sección [3.3] donde se define que el tamaño que deben tener las imágenes debe ser el suficiente para contener al menos el fragmento más grande sin que este ocupe gran parte de la fotografía, entonces se propone utilizar esta condición como requisito mínimo a la hora de muestrear la frente de carguío.

Por otro lado, se tiene en la actualidad que el proceso de muestreo de la pila para la medición de fragmentación mediante tamizado se realiza con equipos de carguío y transporte, es decir, con palas o cargadores frontales y camiones. Esto presenta un gran problema a la hora de muestrear la frente. Por un lado, se detiene la producción, debido al uso de estos equipos, lo cual es inevitable, ya que se deben usar estos equipos dado el gran volumen de material a muestrear. También, el proceso de carguío de camiones mediante palas o cargadores frontales no está exento de errores de muestreo, donde el principal problema que se presenta en el muestro de la pila es la mezcla de material. Esta mezcla de material se produce por

el proceso de carguío mismo, donde al momento de retirar una baldada de la pila cae material adyacente, por efecto de la gravedad, a la zona que se intenta muestrear, generando una contaminación de la muestra. Considerando que el material que cae desde los costados hacia la zona de muestreo viene desde la parte superior, este debe ser de fragmentación gruesa en su mayoría (por venir de la zona del taco). Se debe tomar en cuenta también la forma en que la pala realiza las baldadas, donde puede estar siguiendo patrones tipo abanico (horizontales), buscando material fino de la parte inferior o grueso en la parte superior, lo que lleva a un sesgo del material muestreado.

Tomando en cuenta lo expuesto en el párrafo anterior, la mejor manera de muestrear la pila es tomando una sección vertical de esta, pero dada la tecnología de hoy en día es muy difícil aislar la zona que se quiere muestrear, produciendo así errores en el proceso de muestreo que pueden llevar a una incorrecta estimación de la fragmentación de una tronadura. El plan de muestrear una sección vertical se basa en el supuesto de que la tronadura de producción tiene una distribución homogénea en la horizontal y segregación en la vertical, y por ello se puede extrapolar los resultados de la muestra a un área cercana a la zona muestreada. Sin embargo, no se considera, al igual que en la simulación, que puede haber factores externos al protocolo de voladura, como cambios en las propiedades de la roca, fallas, diaclasas, entre otros, que pueden afectar la distribución granulométrica de la tronadura. Es por esto que el alcance horizontal que puede tener los resultados de una muestra está limitado a que las condiciones tanto del protocolo de tomadura (malla, explosivo, factor de carga, taco, etc.), como las condiciones de la roca, sigan siendo las mismas a lo largo del paño de tronadura.

Capítulo V

Conclusión y Recomendaciones

5.1. Conclusiones

La estimación de la fragmentación de una tronadura mediante análisis de imágenes requiere ser cuidadoso y prolijo a la hora de tomar las muestras, las cuales deben cumplir ciertos requisitos para asegurar su buen procesamiento, como lo son calidad, ángulo, iluminación, representatividad, entre otros.

El procesamiento de imágenes tiene implícita una pérdida de información, ya que se estima una distribución de tamaños de tres dimensiones a partir de imágenes en dos dimensiones. El software *PowerSieve* solo entrega las curvas de distribución granulométrica de las muestras a partir de un análisis 2D sin interpolar a una tercera dimensión. Esto genera una pérdida de la profundidad, lo que a su vez provoca un error sistemático a la hora de medir la fragmentación mediante imágenes procesadas computacionalmente, generando con ello un sesgo.

Previo al procesamiento de las muestras es importante revisar las imágenes para evaluar si estas necesitan un preprocesamiento adicional, ya que una incorrecta delimitación de los fragmentos en ellas puede traer resultados erróneos.

Al analizar los resultados promedio de las repeticiones de cada caso de estudio, se ve que todas las curvas poseen un sesgo significativo, el cual desplaza la curva a una distribución granulométrica más fina. Estas curvas promedio tienen un P_{80} aproximado de 14 cm versus el original que es de 21 cm. Cabe destacar que todas las curvas tienen un coeficiente de correlación cercano a 1, lo que indica que las curvas estimadas tienen un comportamiento similar a la curva de distribución granulométrica original a pesar del sesgo que hay en ellas. A pesar de ello, todos los resultados tienden a converger a una sola curva de fragmentación. Esto lleva pensar que no es necesario tomar tantas muestras para obtener resultados representativos.

El P_{80} estimado de las muestras tiene un error medio de -33% con respecto al P_{80} real. Las muestras categorizadas como distribución granulométrica fina e intermedia (muestras inferiores) poseen errores de estimación mayores, pero constantes, aproximadamente del -50% a -60% del valor real. En cambio, las muestras categorizadas como material grueso (muestras superiores) tienen

estimaciones del P_{80} con mayor dispersión, pero más cercanos al valor real, con una variabilidad de entre el -10% y el 40% del valor real.

Al analizar el P_{80} de todas las muestras es posible ver que aproximadamente el 9% de ellas tiene estimaciones del P_{80} con errores absolutos de estimaciones menores al 10%, por otro lado, el 40% tiene errores de estimación superiores al 60%. Los análisis antes descritos solo toman en cuenta el valor del P_{80} sin evaluar el comportamiento de la curva de fragmentación completa.

Existe un sesgo evidente en los resultados del análisis de imágenes producto de la pérdida de información antes descrita. Esto hace necesario equilibrar las muestras con tal de volver las estimaciones más cercanas a la realidad. Para esto, se propone el uso de ponderadores, los cuales ponderan las distintas muestras por diferentes valores según sea el caso. El procedimiento inicia desde casos específicos, los cuales tienen ponderadores que optimizan las estimaciones; estas buscan que las muestras sean lo más parecido a la realidad. En estos casos se obtiene mejoras de la estimación entorno al 96.5% con respecto al promedio de las de las curvas resultantes del análisis de imágenes.

Luego, con el objetivo de generalizar más el uso de ponderadores, se procede a generar ponderadores promedio para las muestras en cada caso de estudio, los cuales tienen mejoras de la estimación de entre 92.6% a un 94.7%. Luego se generan combinaciones de ellos, hasta llegar a los ponderadores únicos. A esto se le agrega una categorización de las imágenes por fragmentación, lo que se combina con los ponderadores únicos para lograr una mejor estimación a partir de las muestras de los modelos.

Es fundamental que la categorización de las imágenes sea la correcta. Esto porque, la mejora menos significativa que hubo al combinar una imagen gruesa y otra fina e intermedia ponderadas por los ponderadores únicos fue de un 18% aproximadamente, cuando las imágenes no estaban bien categorizadas. En cambio, el uso de dos imágenes bien categorizadas con ponderadores únicos, permitía obtener mejoras de la estimación hasta en un 97%.

La evaluación de la cantidad de muestras necesarias para obtener buenos resultados de estimación arrojó que: la cantidad de muestras procesadas si afecta la estimación, pero esto tiene un límite, ya que al utilizar cinco veces la cantidad de muestras (evaluar el caso de estudio completo) versus usar las muestras de una repetición (13 imágenes), solo obtuvo una mejora del 3.6% en la estimación, lo que no significó mejoras importantes. Por otro lado, el uso de 13 muestras en lugar de dos si mejoró notablemente la estimación en hasta un 30% en promedio.

También, se observó que a medida que se utilizan ponderadores menos personalizados para cada repetición el error de estimación tiende a aumentar, pero la estimación mediante el uso de ponderadores sigue siendo significativamente mejor que el promedio de las muestras evaluado al principio.

El uso de los distintos ponderadores, expuestos anteriormente, puede mejorar la estimación de las curvas granulométricas, mediante análisis de imágenes, procedentes de tronadura, entre un 18.3% a un 97.6% solo considerando el uso de una imagen de material fino e intermedio (parte baja de la voladura) y una de fragmentación gruesa (parte alta o taco de la tronadura), pero con una alta desviación de resultados. Se debe considerar también, que un aumento en el número de imágenes generará menor variabilidad entre el promedio de las muestras, lo que provoca una mejor estimación de la fragmentación. Es por esto que se vuelve necesario encontrar un equilibrio en la cantidad de muestras tomadas y procesadas.

Se propone como práctica operacional ponderar las muestras obtenidas en terreno por los ponderadores únicos del Material Rodado 20% y 30%, ya que son los que obtuvieron las mejoras más altas y son iguales para ambos casos de estudio. Estos ponderadores son de 0.34 para muestras finas e intermedia y 0.66 para muestras gruesas. Estos ponderadores obtuvieron mejoras del orden del 95% de la estimación respecto al promedio de las muestras cuando se utilizaron curvas promedio de las muestras por categoría.

También, se entrega una propuesta de muestreo físico representativo de una pila de tronadura, esta se basa en los supuestos utilizados en el planteamiento de las simulaciones. Estos supuestos consideran que en una tronadura de producción la fragmentación resultante en el eje horizontal es relativamente homogénea a distintas altura, por otro lado, existe una segregación de tamaños en el eje vertical.

Finalmente, se propone entonces, muestrear una porción del eje vertical, que contenga al menos el tamaño más grande de partícula resultante de la voladura, para así obtener todos los tamaños de rocas de la tronadura. Se debe tomar en cuenta que los métodos de muestreo de hoy en día no permiten muestrear de esta manera sin someter las muestras a un error debido a la imposibilidad de aislar correctamente la zona a muestrear. Además, los resultados de este plan de muestreo son extrapolables, bajo los supuestos antes descrito, a la zona circundante, esto siempre y cuando las condiciones de la voladura y de la roca no cambien.

5.2. Recomendaciones

Con respecto a la simulación de los modelos, el mayor inconveniente que hubo fueron los tiempos de simulación de cada uno. Entonces, como los tiempos de simulación fueron tan altos, aproximadamente 40 días para las 15 repeticiones entre los tres casos de estudio, se recomienda, subdividir los modelos en distintas simulaciones, haciendo que el número de partículas sea menor en cada caso, y, en consecuencia, hagan que los tiempos de simulación bajen. Además, al realizar pequeños modelos de uno más grande es posible que el conjunto de ellos logre replicar de mejor manera lo que ocurre en la realidad sin tener que generar simplificaciones mayores de la realidad.

En segundo lugar, se recomienda para estudios a futuros, encontrar el número de fotografías de cada categoría de fragmentación con el cual los resultados del análisis digital de imágenes convergen. Con ello se evita tener que procesar imágenes que no serán útiles para la estimación y además se puede saber cuántas imágenes son necesarias para determinar una curva promedio con poca variabilidad independiente del posible sesgo que haya en ellas.

Bibliografía

- [1] C. Lopez Jimeno, Manual de Perforación y Voladuras de Rocas, Instituto Tecnológico GeoMinero de España, 2014.
- [2] A. A. Music Garrido, Diagnostico y Optimización de Disparos en Desarrollo Horizontal, Mina El Teniente, Santiago: Universidad de Chile, 2007.
- [3] S. J. Hawke y L. A. Dominguez, A Simple Technique for Using High Energy in Blasting, Sydney: 11th Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, 2015.
- [4] C. Muñoz, J. Alarcón, F. Contreras y D. Toro, Application of Blast-Based Mine-To-Leach Model in Barrick Zaldívar, London: Blasting in Mines, 2013.
- [5] J. Bernaola Alonso, J. Castilla Gómez y J. Herrera Herbert, Perforación y Voladura de Rocas en Minería, Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid, 2013.
- [6] M. A. Quiroga Acuña, Análisis de la Perforación y Tronadura en El Soldado, Santiago: Universidad de Chile, 2013.
- [7] J. Alarcón, «¿Cómo la Fragmentación de Voladura Impacta los Procesos Planta?,» Orica, Santiago, 2014.
- [8] S. A. Muñoz Gómez, Evaluación y Calibración de Software para la Obtención de Granulometría Mediante Análisis Digital de Imágenes, Concepción: Universidad de Concepción, 2019.
- [9] M. Babaeian, M. Ataei, F. Sereshk, F. Sotoudeh y S. Mohammadi, A New Framework for Evaluation of Rock Fragmentation in Open Pit Mines, Sahrood: Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2018.
- [10] M. Nefis y K. Talhi, A Model Study to Measure Fragmentation by Blasting, Algeria: Mining Science, 2016.
- [11] F. Sereshki, Blast Fragmentation Analysis Using Image Processing, Shahrood: International Journal of Mining and Geo-Engineering, 2016.
- [12] J. Sanchidrián, ¿Qué función representa mejor la distribución granulométrica de la roca fragmentada?, Universidad Politécnica de Madrid: Madrid, 2013.

- [13] F. Ouchterlony, The Swebrec© function: linking fragmentation by blasting and, Mining Technology, 2005.
- [14] A. Scott y I. Onederra, Characterising Rock Mass Properties for FragmentationModelling, Sidney: 11th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, 2015.
- [15] N. H. Maerz, Optical Sizing Analysis of Blasted Rock: Lessons Learned, Vienna: Vienna Conference Proceedings, 2007.
- [16] T. Barnford, K. Esmaeili y A. P. Schoelling , A Real-Time Analysis of Rock Fragmentation Using UAV Technology, Toronto: International Journal of Mining Reclamation and Environment, 2017.
- [17] G. C. Hunter, C. McDermontt, N. J. Miles, A. Singh y M. J. Scoble, A Review of Image Analysis Techniques for Measuring, Amsterdam: Mining Science and Technology, 1990.
- [18] C. E. Lastra Moya, Efectos en el Macizo Rocoso y en la Fragmentación Inducidos por Tronadura en Túneles, Santiago: Universidad de Chile, 2014.
- [19] J. Sanchidrián, P. Segarra, F. Ouchterlony y L. M. López, On the Accuracy of Fragment Size Measurement by Image Analysis in Combination with Some Distribution Functions, Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2008.
- [20] Orica Mining Services, PowerSieve 3 Fragmentation Analysis Training Guide V1, 2012.
- [21] Universidad Nacional Del Sur, «Procesamiento de Sólidos, Capítulo II: Propiedades de una partícula,» Departamento de Ingeniería Química, Buenos Aires, 2013.
- [22] A. Barona Ferrer, Evaluación del Funcionamiento de Sistemas de Análisis Digital de Imágenes - Wipfrag (Edición Manual) y Split Online, Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía, 2014.
- [23] P. D. Zúñiga Torres, Diseño de Tronaduras y su Impacto en el Costo Mina de Compañía Minera Cerro Negro, Santiago: Universidad de Chile, 2015.

- [24] H. Yaghoobi, H. Mansouri, M. A. Ebrahimi Farsangi y H. Nazamabadi-Pour, Evaluation of Perspective Error in Digital Image Processing Method for Size Distribution of Blasted Muck-Pile, Kerman: Iranian Journal of Mining Engineering, 2018.
- [25] Orica Mining Services, PowerSieve 3 User Guide V2, 2010.
- [26] P. O. Mascaró Provoste, Calibración de un Programa Basada en el Método de Elementos Discretos para Modelar el Desgaste Abrasivo a Partir de Mediciones Experimentales, Santiago: Universidad Técnica Federico Santa María, 2017.
- [27] ESSS, Lecture 01 - DEM Introduction, Rocky DEM, 2017.
- [28] A. A. Duque Vega, Rediseño en Punto de Transferencia de Correas Transportadoras de Mineral de Cobre, Mediante Método de Elementos Discretos (DEM), Santiago: Universidad de Chile, 2016.
- [29] ESSS, Lecture 02 - DEM Fundamentals, Rocky DEM, 2017.
- [30] S. Sarkar, G. Hanauer de Lima y A. Potapov, Predictive Optimization of SAG Mill Wear Using Rocky, ESSS, 2017.
- [31] ESSS, User Manual Rocky, Rocky DEM, 2015.
- [32] J. M. Cavieres Flores, «Enrejado de Vetillas y su Relación con Propiedades de Resistencia y Deformación de la Roca Huesped de la Mineralización, en Mina El Teniente, VI Región del General Libertador Bernardo O'Higgins,» Universidad de Concepción, Concepción, 2019.
- [33] I. P. Rojas Churkovic, «Reología y Fábrica de la Mineralización Primaria, Yacimiento El Teniente,» Universidad de Chile, Santiago, 2014.
- [34] C. R. Windsor, P. Cavieres, E. Villaescusa y J. Pereira, «Rock Stress Tensor Measurements at El Teniente, Chile,» 2006.
- [35] E. Horn, «The Calibration of Material Properties of Use in Discrete Element Models,» University of Stellenbosch, Department of Mechanical and Mechatronic Engineering, Stellenbosch, 2012.

Anexos

Anexo A: Figuras Resultados Casos de Estudio por Repetición

Resultados Material Rodado 10%:

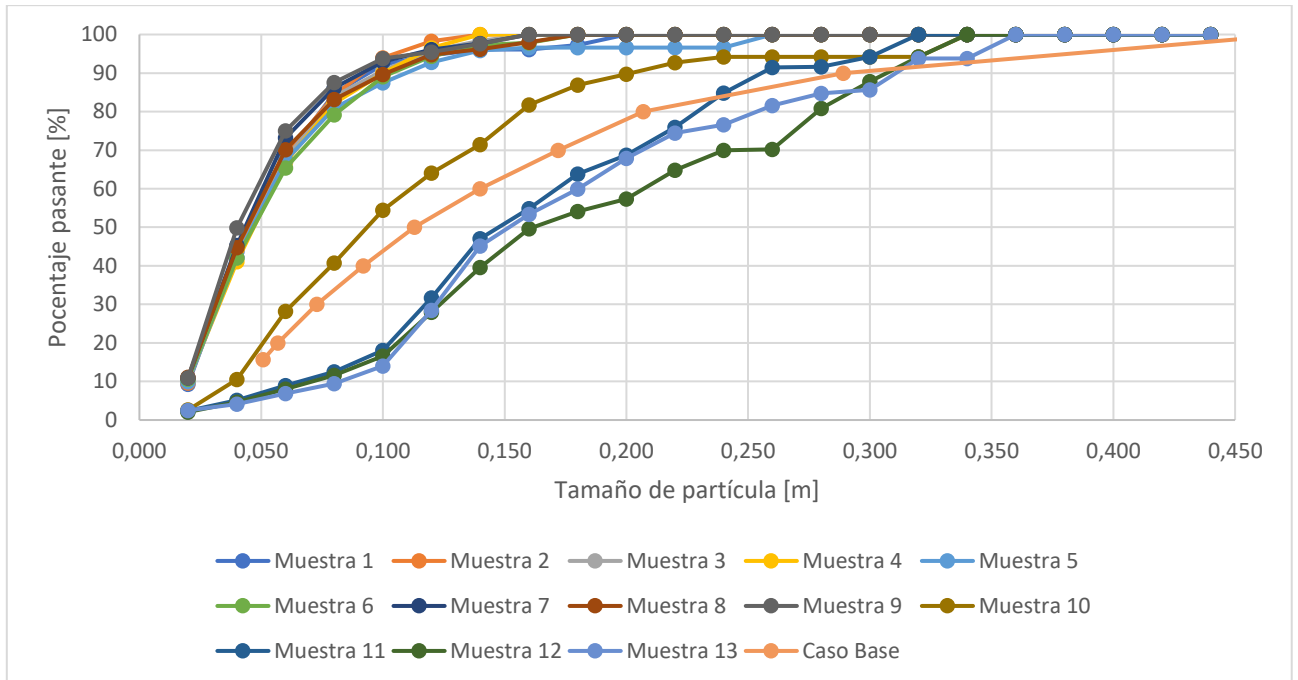


Figura 58. Resultados fragmentación Material Rodado 10% Rep. 1.

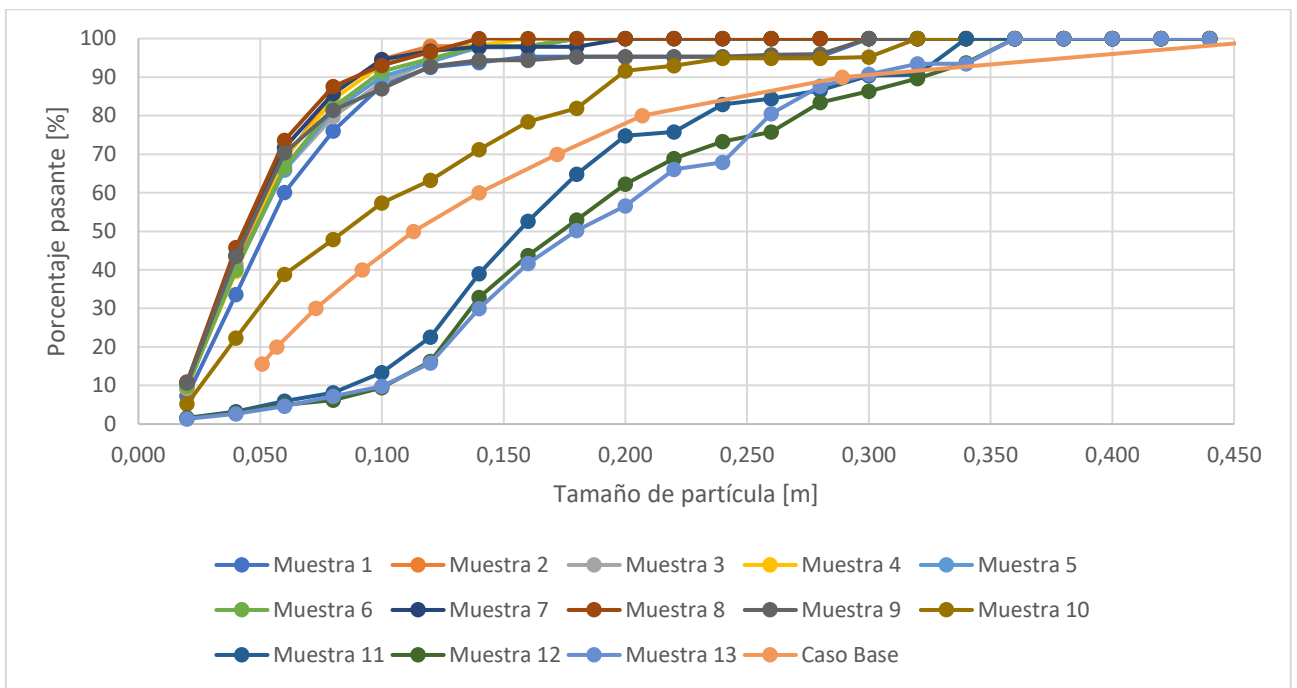


Figura 59. Resultados fragmentación Material Rodado 10% Rep. 2.

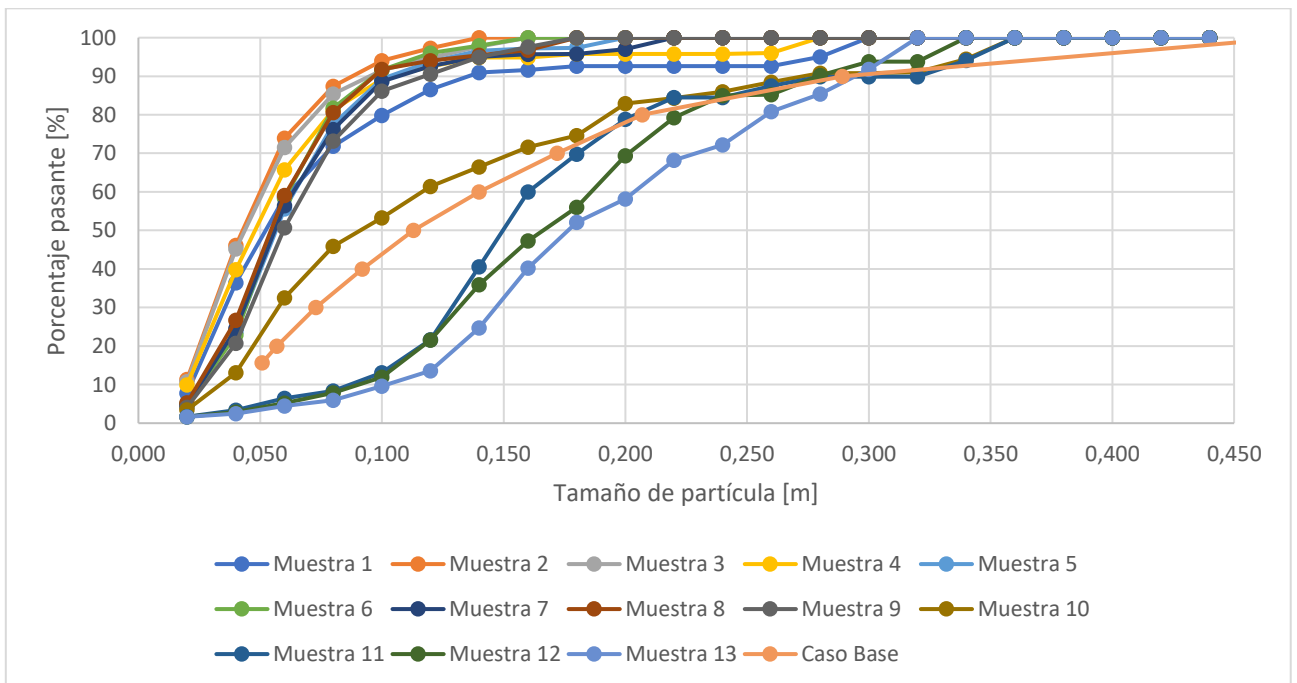


Figura 60. Resultados fragmentación Material Rodado 10% Rep. 3.

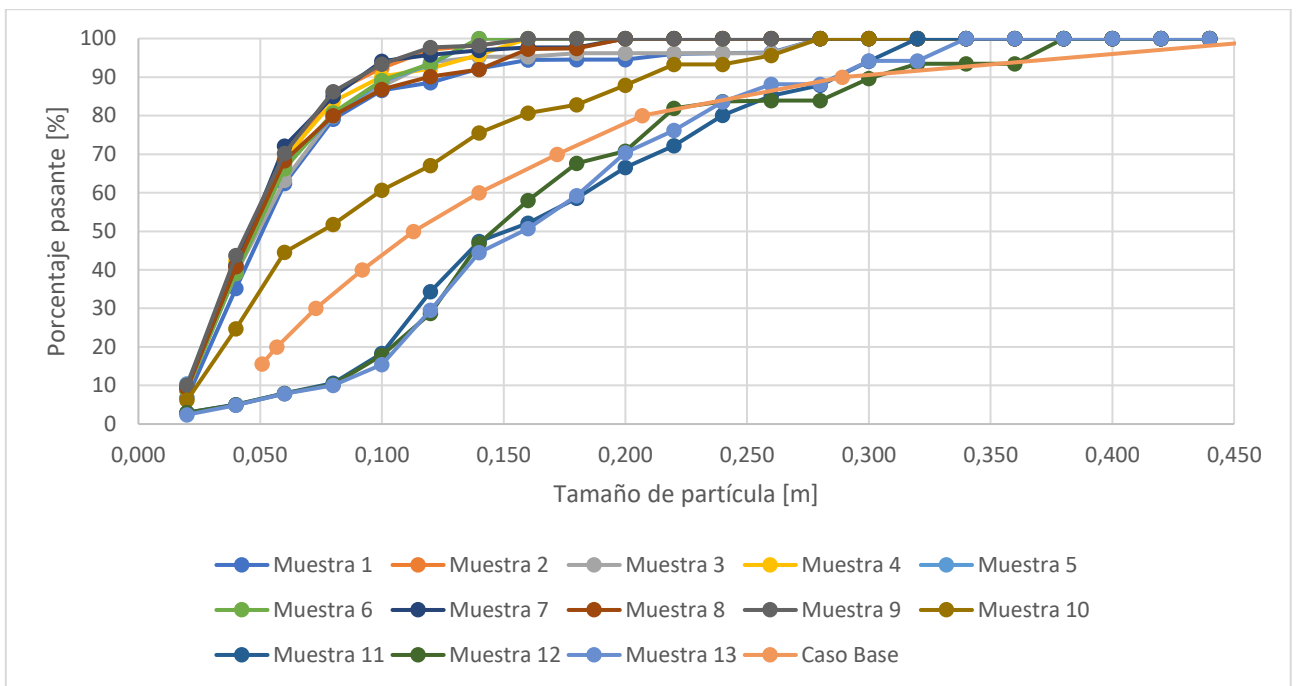


Figura 61. Resultados fragmentación Material Rodado 10% Rep. 4.

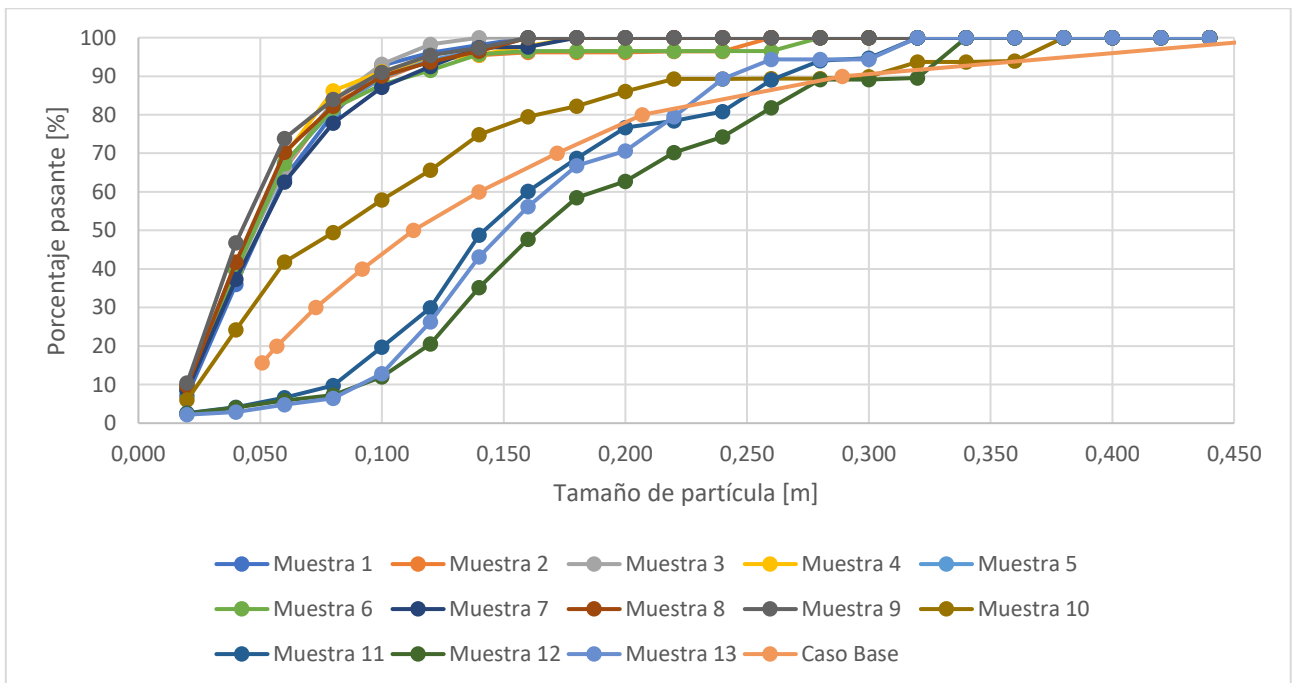


Figura 62. Resultados fragmentación Material Rodado 10% Rep. 5.

Resultados Material Rodado 20%:

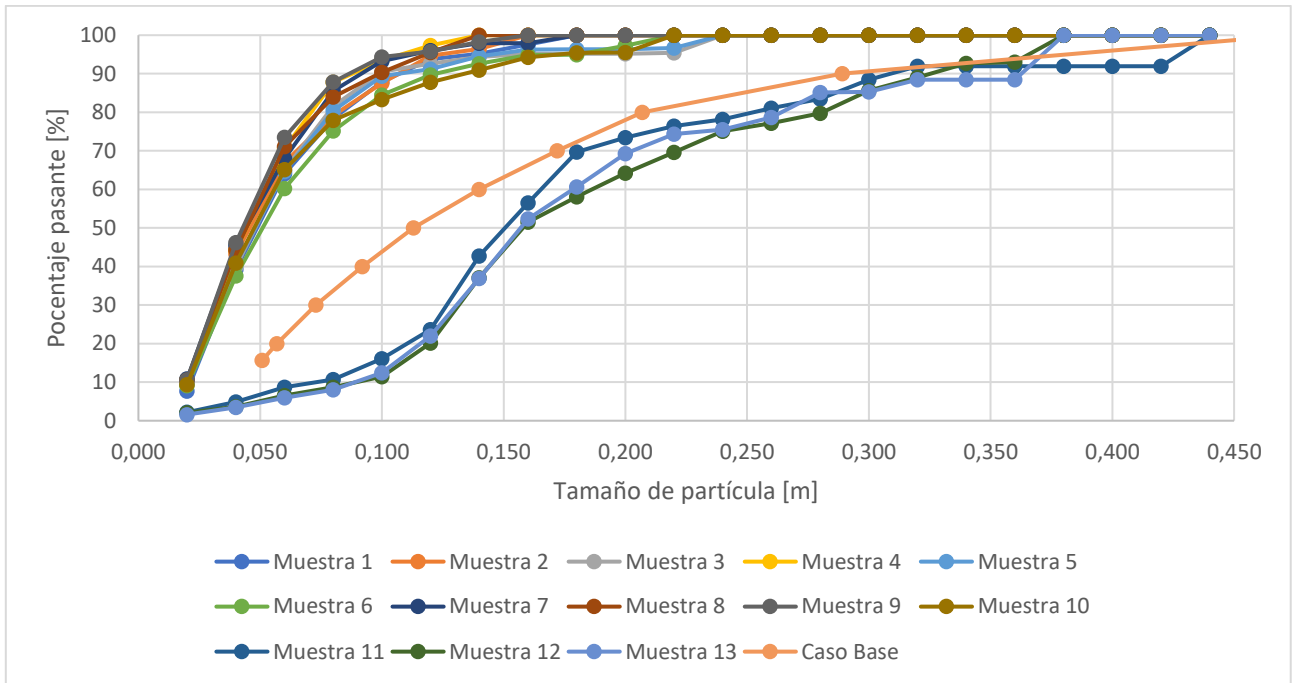


Figura 63. Resultados fragmentación Material Rodado 20% Rep. 1.

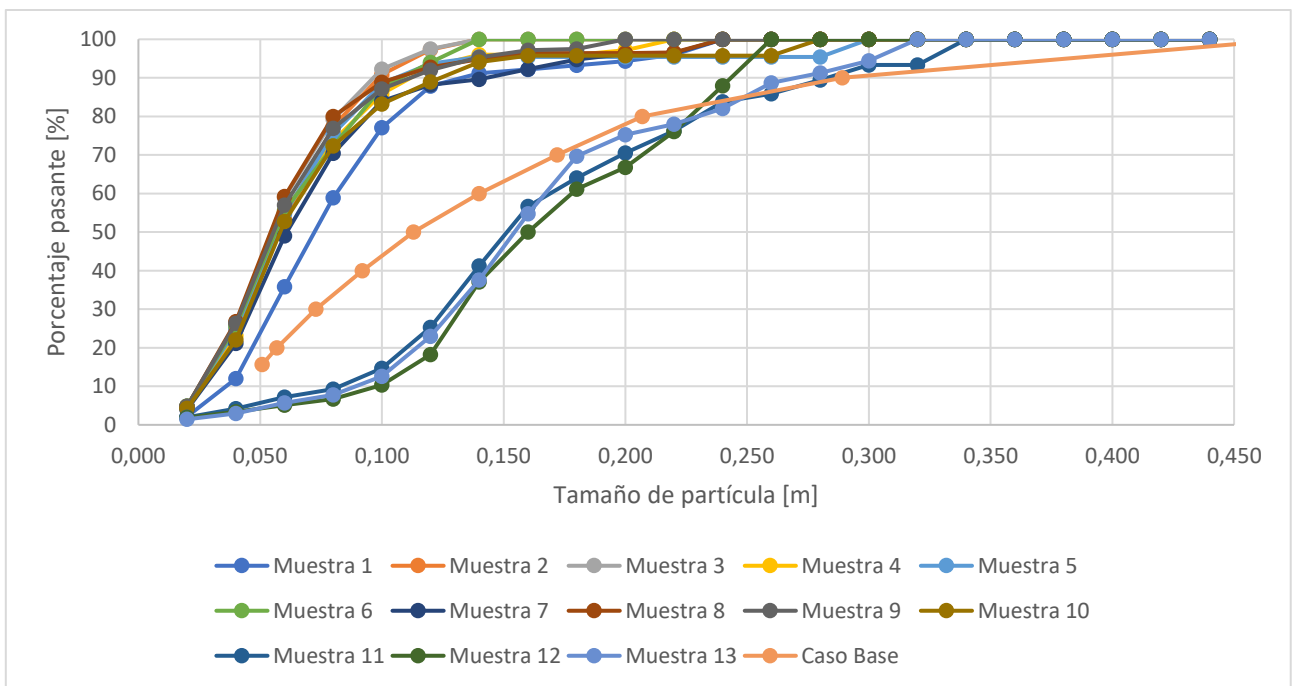


Figura 64. Resultados fragmentación Material Rodado 20% Rep. 2.

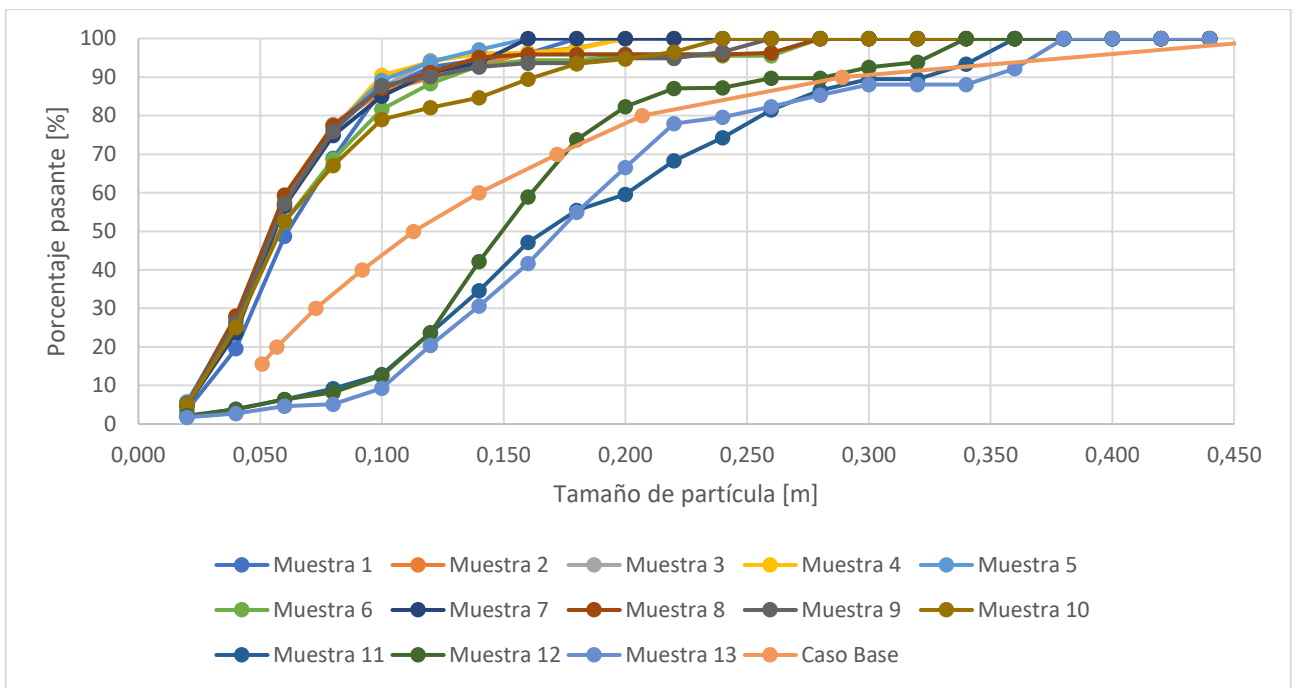


Figura 65. Resultados fragmentación Material Rodado 20% Rep. 3.

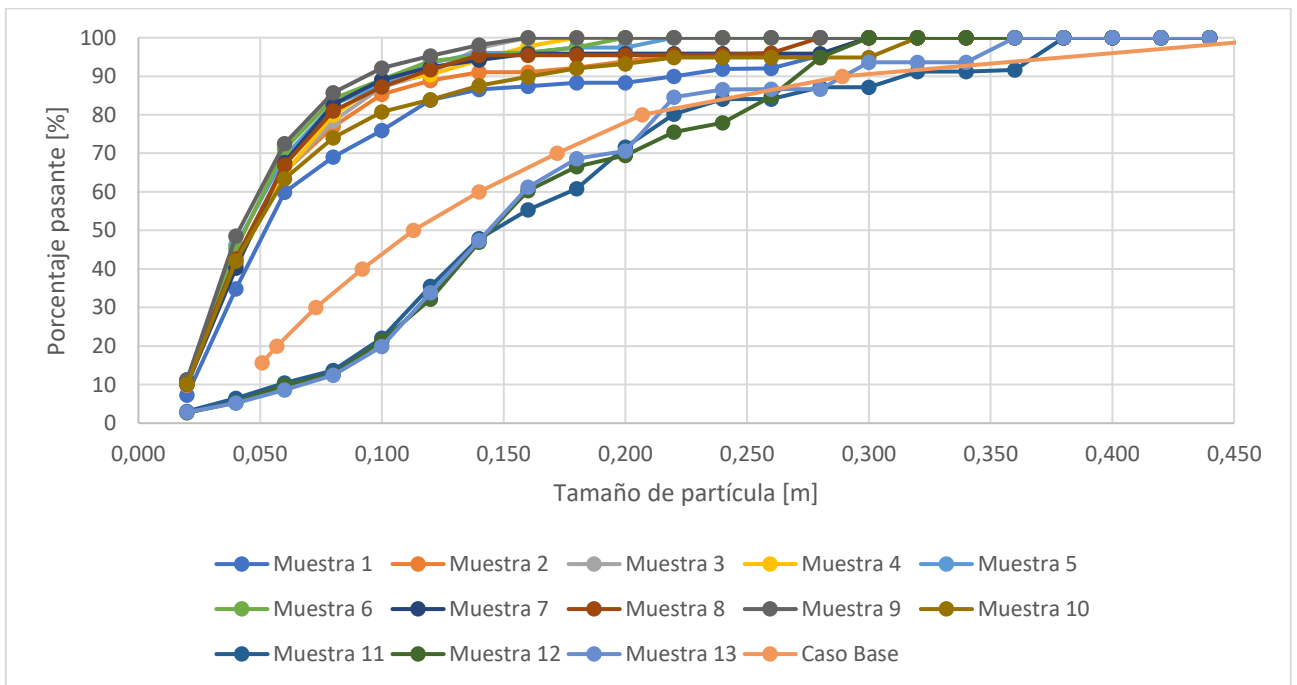


Figura 66. Resultados fragmentación Material Rodado 20% Rep. 4.

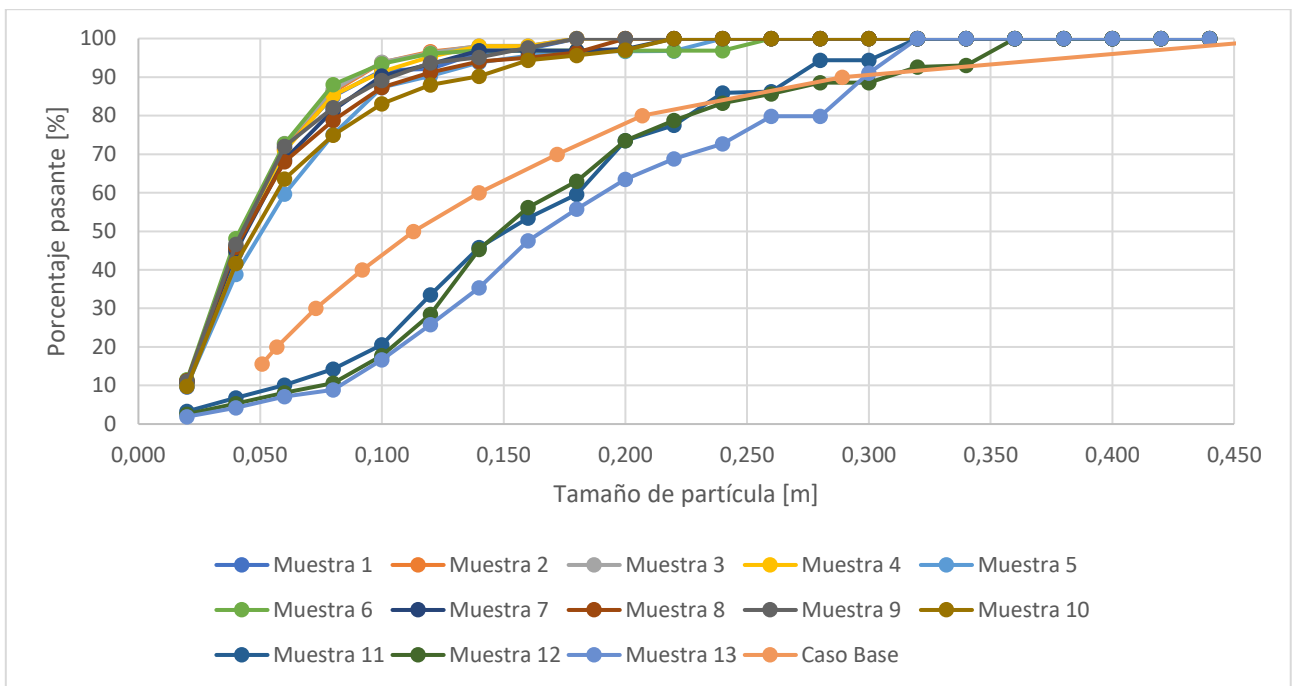


Figura 67. Resultados fragmentación Material Rodado 20% Rep. 5.

Resultados Material Rodado 30%:

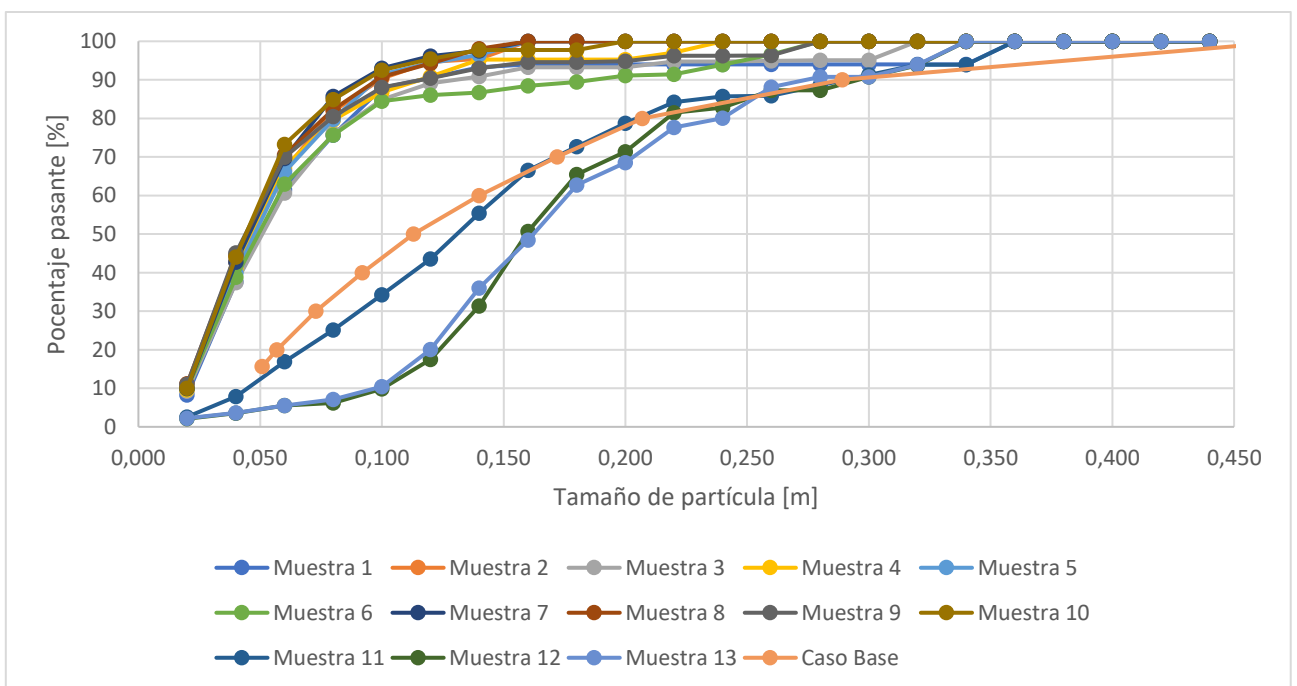


Figura 68. Resultados fragmentación Material Rodado 30% Rep. 1.

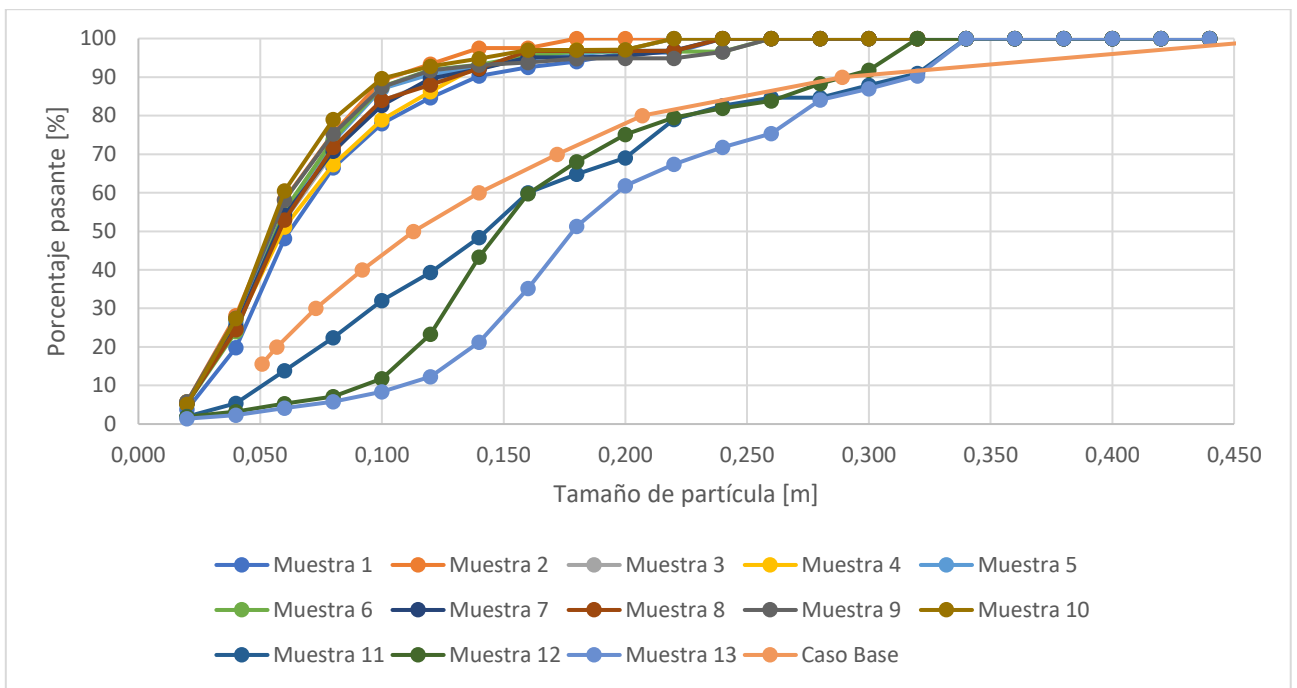


Figura 69. Resultados fragmentación Material Rodado 30% Rep. 2.

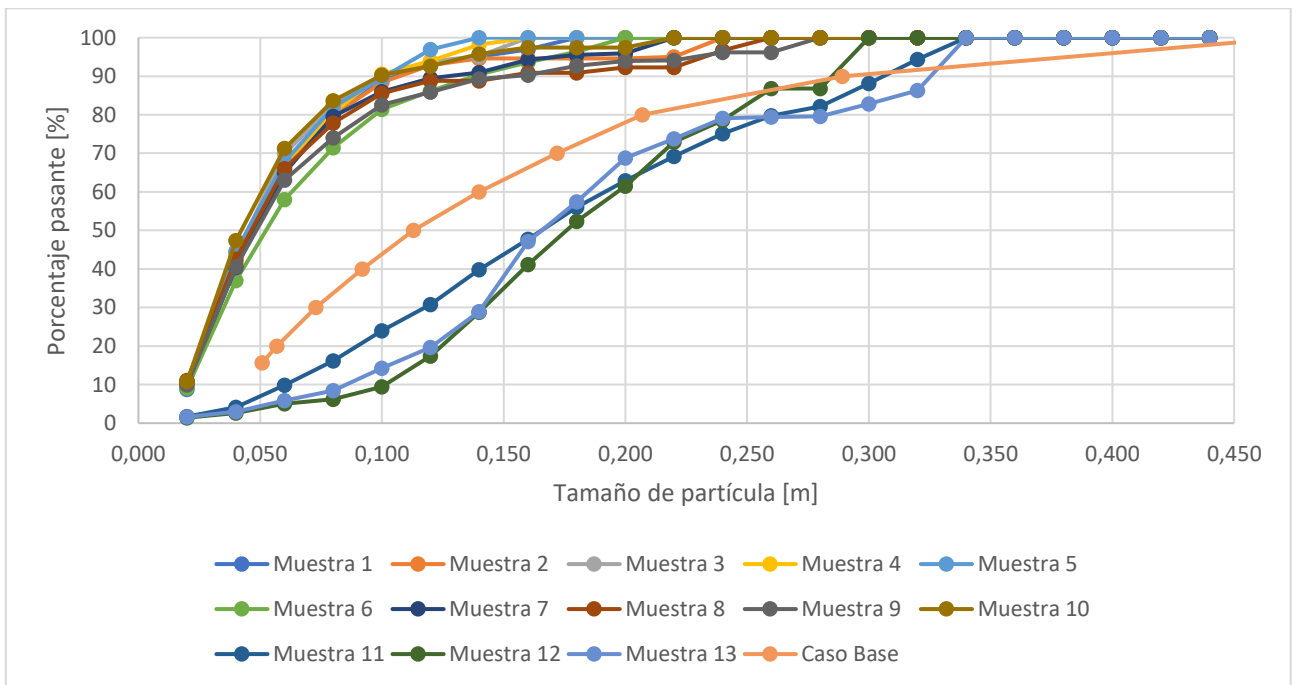


Figura 70. Resultados fragmentación Material Rodado 30% Rep. 3.

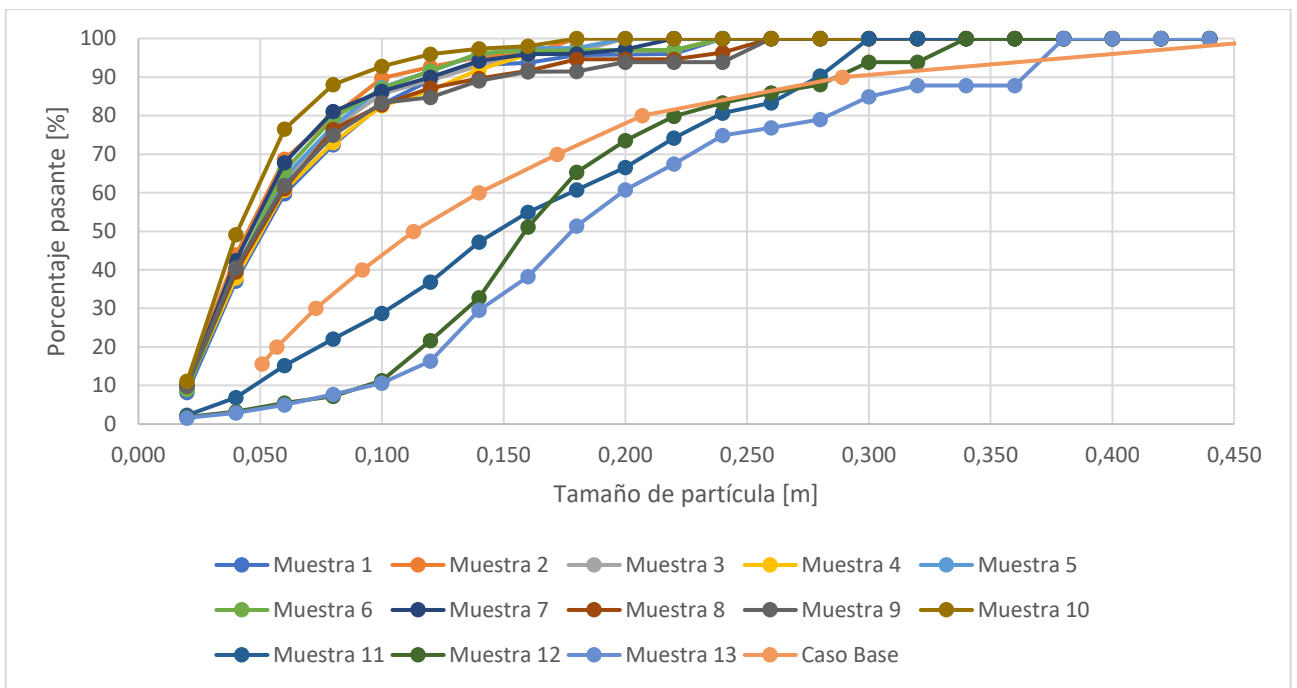


Figura 71. Resultados fragmentación Material Rodado 30% Rep. 4.

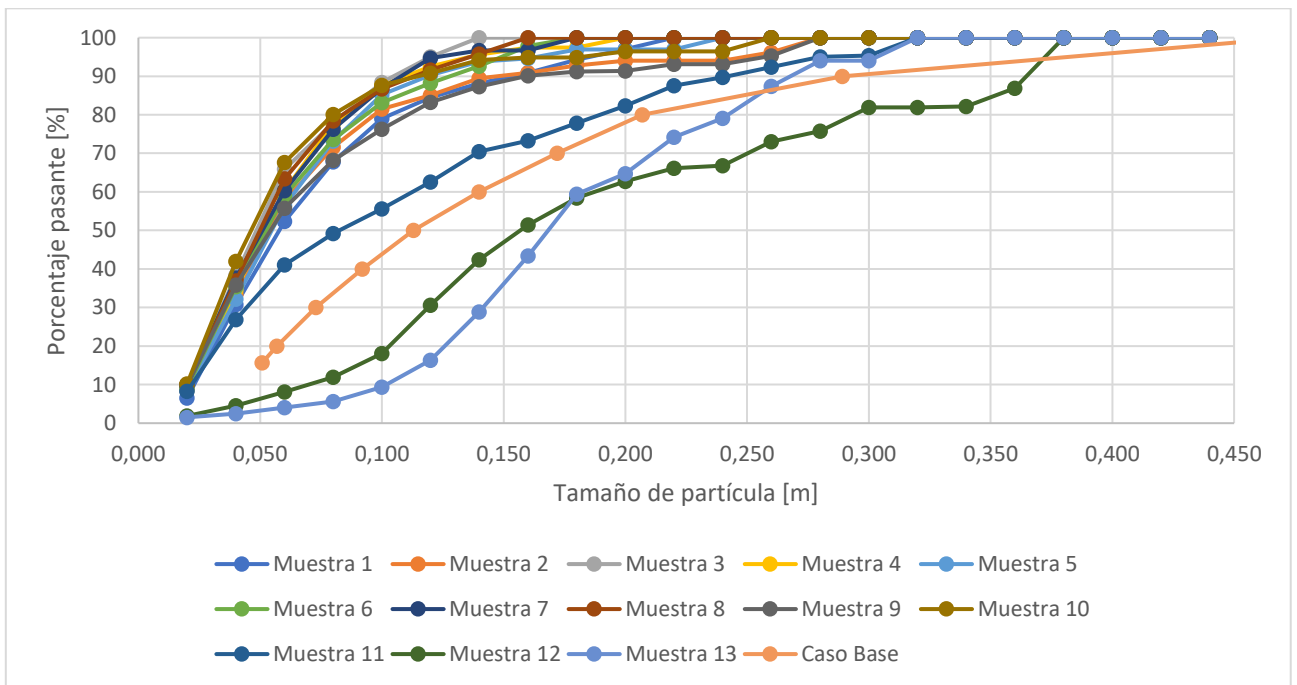


Figura 72. Resultados fragmentación Material Rodado 30% Rep. 5.

Anexo B: Tablas Resultados Casos de Estudio por Repetición

Tabla 31. Resultados Análisis de Imágenes Material Rodado 10% Rep. 1

Tamaño [m]	Muestra 1 [m ²]	Muestra 2 [m ²]	Muestra 3 [m ²]	Muestra 4 [m ²]	Muestra 5 [m ²]	Muestra 6 [m ²]	Muestra 7 [m ²]	Muestra 8 [m ²]	Muestra 9 [m ²]	Muestra 10 [m ²]	Muestra 11 [m ²]	Muestra 12 [m ²]	Muestra 13 [m ²]
0.020	0.31	0.32	0.34	0.35	0.33	0.36	0.37	0.38	0.37	0.10	0.08	0.07	0.08
0.040	1.15	1.16	1.06	1.03	1.08	1.06	1.16	1.13	1.31	0.30	0.10	0.09	0.05
0.060	0.81	0.82	0.85	0.86	0.84	0.78	0.94	0.86	0.85	0.67	0.13	0.12	0.09
0.080	0.56	0.51	0.54	0.51	0.46	0.46	0.44	0.44	0.42	0.47	0.12	0.13	0.08
0.100	0.25	0.33	0.22	0.26	0.22	0.33	0.23	0.22	0.21	0.51	0.19	0.17	0.14
0.120	0.08	0.15	0.17	0.22	0.18	0.18	0.11	0.17	0.06	0.36	0.48	0.40	0.45
0.140	0.05	0.06	0.08	0.12	0.10	0.10	0.05	0.05	0.07	0.28	0.54	0.40	0.52
0.160	0.00		0.06		0.03	0.02	0.08	0.06	0.08	0.39	0.27	0.35	0.25
0.180	0.04				0.00	0.07		0.07		0.19	0.31	0.16	0.20
0.200	0.09				0.00					0.10	0.17	0.11	0.25
0.220					0.00					0.11	0.25	0.26	0.20
0.240					0.00					0.06	0.31	0.18	0.07
0.260					0.11					0.00	0.23	0.01	0.16
0.280										0.00	0.01	0.37	0.10
0.300										0.00	0.09	0.24	0.03
0.320										0.00	0.20	0.22	0.25
0.340										0.22		0.20	0.00
0.360													0.19
0.380													
0.400													
0.420													
0.440													
Área total	3.34	3.35	3.33	3.35	3.35	3.36	3.38	3.37	3.37	3.76	3.49	3.49	3.11

Tabla 32. Resultados Análisis de Imágenes Material Rodado 10% Rep. 2.

Tamaño [m]	Muestra 1 [m ²]	Muestra 2 [m ²]	Muestra 3 [m ²]	Muestra 4 [m ²]	Muestra 5 [m ²]	Muestra 6 [m ²]	Muestra 7 [m ²]	Muestra 8 [m ²]	Muestra 9 [m ²]	Muestra 10 [m ²]	Muestra 11 [m ²]	Muestra 12 [m ²]	Muestra 13 [m ²]
0.020	0.26	0.33	0.34	0.35	0.35	0.35	0.38	0.38	0.37	0.19	0.06	0.06	0.05
0.040	0.93	1.15	1.09	1.06	1.09	1.08	1.16	1.22	1.15	0.64	0.06	0.05	0.05
0.060	0.94	0.97	0.92	1.05	0.91	0.95	0.98	0.97	0.94	0.62	0.10	0.08	0.07
0.080	0.57	0.61	0.49	0.54	0.54	0.55	0.49	0.49	0.38	0.34	0.08	0.05	0.09
0.100	0.42	0.32	0.32	0.32	0.31	0.33	0.31	0.19	0.20	0.35	0.19	0.12	0.10
0.120	0.16	0.12	0.20	0.13	0.14	0.12	0.08	0.12	0.20	0.22	0.34	0.26	0.23
0.140	0.04	0.00	0.12	0.05	0.14	0.12	0.04	0.12	0.06	0.30	0.60	0.63	0.53
0.160	0.05	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00		0.00	0.27	0.49	0.41	0.44
0.180	0.00	0.07	0.08		0.08	0.07	0.00		0.03	0.13	0.44	0.35	0.32
0.200	0.00						0.08		0.00	0.36	0.36	0.35	0.24
0.220	0.00								0.00	0.05	0.04	0.25	0.35
0.240	0.00								0.00	0.07	0.26	0.16	0.07
0.260	0.00								0.02	0.00	0.05	0.09	0.47
0.280	0.00								0.01	0.00	0.08	0.29	0.27
0.300	0.17								0.14	0.01	0.14	0.11	0.11
0.320										0.18	0.01	0.13	0.10
0.340											0.34	0.15	0.00
0.360												0.24	0.24
0.380													
0.400													
0.420													
0.440													
Área total	3.55	3.55	3.56	3.55	3.54	3.58	3.50	3.50	3.50	3.73	3.62	3.78	3.75

Tabla 33. Resultados Análisis de Imágenes Material Rodado 10% Rep. 3.

Tamaño [m]	Muestra 1 [m ²]	Muestra 2 [m ²]	Muestra 3 [m ²]	Muestra 4 [m ²]	Muestra 5 [m ²]	Muestra 6 [m ²]	Muestra 7 [m ²]	Muestra 8 [m ²]	Muestra 9 [m ²]	Muestra 10 [m ²]	Muestra 11 [m ²]	Muestra 12 [m ²]	Muestra 13 [m ²]
0.020	0.26	0.38	0.36	0.33	0.18	0.18	0.17	0.20	0.16	0.12	0.06	0.06	0.06
0.040	0.96	1.16	1.16	1.00	0.71	0.66	0.74	0.80	0.62	0.35	0.06	0.05	0.03
0.060	0.74	0.93	0.89	0.87	1.19	1.31	1.19	1.20	1.12	0.70	0.11	0.08	0.07
0.080	0.44	0.45	0.47	0.52	0.82	0.87	0.73	0.80	0.84	0.48	0.07	0.10	0.05
0.100	0.27	0.22	0.21	0.27	0.44	0.36	0.46	0.41	0.48	0.27	0.17	0.15	0.13
0.120	0.23	0.11	0.11	0.11	0.17	0.16	0.15	0.09	0.16	0.29	0.30	0.35	0.14
0.140	0.15	0.09	0.10	0.08	0.11	0.07	0.09	0.05	0.16	0.18	0.67	0.52	0.39
0.160	0.02		0.08	0.00	0.02	0.08	0.02	0.05	0.10	0.19	0.69	0.41	0.54
0.180	0.03			0.03	0.01		0.00	0.12	0.09	0.11	0.34	0.32	0.42
0.200	0.00			0.00	0.10		0.05			0.30	0.32	0.49	0.21
0.220	0.00			0.00			0.11			0.05	0.20	0.36	0.35
0.240	0.00			0.00						0.06	0.00	0.21	0.14
0.260	0.00			0.01						0.09	0.11	0.01	0.30
0.280	0.08			0.13						0.08	0.08	0.18	0.16
0.300	0.17									0.00	0.00	0.13	0.22
0.320										0.01	0.00	0.00	0.29
0.340										0.12	0.15	0.23	
0.360										0.20	0.21		
0.380													
0.400													
0.420													
0.440													
Área total	3.35	3.34	3.37	3.36	3.73	3.69	3.72	3.72	3.73	3.60	3.53	3.63	3.49

Tabla 34. Resultados Análisis de Imágenes Material Rodado 10% Rep. 4.

Tamaño [m]	Muestra 1 [m ²]	Muestra 2 [m ²]	Muestra 3 [m ²]	Muestra 4 [m ²]	Muestra 5 [m ²]	Muestra 6 [m ²]	Muestra 7 [m ²]	Muestra 8 [m ²]	Muestra 9 [m ²]	Muestra 10 [m ²]	Muestra 11 [m ²]	Muestra 12 [m ²]	Muestra 13 [m ²]
0.020	0.24	0.30	0.31	0.33	0.36	0.30	0.32	0.32	0.34	0.20	0.09	0.10	0.08
0.040	0.97	1.06	1.04	1.12	1.05	1.03	1.07	1.09	1.14	0.61	0.07	0.07	0.08
0.060	0.94	0.97	0.83	0.91	0.88	0.93	1.05	0.95	0.90	0.65	0.09	0.10	0.10
0.080	0.58	0.63	0.58	0.51	0.43	0.50	0.44	0.41	0.55	0.24	0.08	0.07	0.07
0.100	0.26	0.22	0.26	0.22	0.31	0.29	0.31	0.23	0.24	0.29	0.24	0.24	0.18
0.120	0.07	0.16	0.21	0.07	0.15	0.15	0.05	0.12	0.15	0.21	0.50	0.35	0.46
0.140	0.12	0.04	0.05	0.12	0.23	0.22	0.04	0.06	0.02	0.28	0.41	0.59	0.48
0.160	0.08	0.06	0.00	0.15			0.03	0.18	0.06	0.17	0.15	0.36	0.20
0.180	0.00		0.03				0.00	0.01		0.07	0.20	0.31	0.28
0.200	0.00		0.00				0.08	0.09		0.17	0.25	0.10	0.36
0.220	0.05		0.00							0.18	0.18	0.36	0.19
0.240	0.01		0.00							0.00	0.25	0.06	0.24
0.260	0.01		0.00							0.08	0.16	0.01	0.15
0.280	0.12		0.13							0.15	0.09	0.00	0.00
0.300											0.20	0.18	0.20
0.320											0.18	0.13	0.00
0.340												0.00	0.19
0.360												0.00	
0.380												0.21	
0.400													
0.420													
0.440													
Área total	3.44	3.45	3.45	3.44	3.42	3.42	3.38	3.45	3.40	3.30	3.14	3.22	3.25

Tabla 35. Resultados Análisis de Imágenes Material Rodado 10% Rep. 5.

Tamaño [m]	Muestra 1 [m ²]	Muestra 2 [m ²]	Muestra 3 [m ²]	Muestra 4 [m ²]	Muestra 5 [m ²]	Muestra 6 [m ²]	Muestra 7 [m ²]	Muestra 8 [m ²]	Muestra 9 [m ²]	Muestra 10 [m ²]	Muestra 11 [m ²]	Muestra 12 [m ²]	Muestra 13 [m ²]
0.020	0.23	0.31	0.29	0.32	0.32	0.31	0.29	0.32	0.35	0.20	0.08	0.08	0.07
0.040	0.95	1.10	1.03	1.03	1.07	1.00	0.97	1.07	1.21	0.60	0.05	0.05	0.02
0.060	0.91	0.81	0.90	0.98	0.87	0.92	0.85	0.95	0.90	0.57	0.08	0.06	0.06
0.080	0.54	0.58	0.59	0.57	0.46	0.47	0.52	0.40	0.34	0.25	0.10	0.05	0.05
0.100	0.41	0.21	0.32	0.17	0.28	0.21	0.31	0.26	0.23	0.28	0.31	0.16	0.20
0.120	0.11	0.17	0.17	0.10	0.15	0.12	0.18	0.12	0.15	0.25	0.32	0.27	0.41
0.140	0.06	0.04	0.06	0.04	0.08	0.14	0.17	0.09	0.06	0.30	0.59	0.48	0.52
0.160	0.06	0.03		0.08	0.11	0.03	0.01	0.12	0.09	0.15	0.36	0.41	0.40
0.180		0.00		0.07		0.00	0.08			0.09	0.27	0.35	0.33
0.200		0.00				0.00				0.13	0.25	0.14	0.12
0.220		0.01				0.00				0.10	0.06	0.24	0.27
0.240		0.00				0.00				0.00	0.08	0.13	0.30
0.260		0.12				0.00				0.00	0.26	0.24	0.15
0.280						0.11				0.00	0.16	0.24	0.00
0.300										0.02	0.02	0.00	0.00
0.320										0.12	0.17	0.01	0.17
0.340										0.00		0.34	
0.360										0.01			
0.380										0.20			
0.400													
0.420													
0.440													
Área total	3.28	3.39	3.36	3.35	3.34	3.31	3.38	3.33	3.31	3.27	3.13	3.24	3.07

Tabla 36. Resultados Análisis de Imágenes Material Rodado 20% Rep. 1.

Tamaño [m]	Muestra 1 [m ²]	Muestra 2 [m ²]	Muestra 3 [m ²]	Muestra 4 [m ²]	Muestra 5 [m ²]	Muestra 6 [m ²]	Muestra 7 [m ²]	Muestra 8 [m ²]	Muestra 9 [m ²]	Muestra 10 [m ²]	Muestra 11 [m ²]	Muestra 12 [m ²]	Muestra 13 [m ²]
0.020	0.25	0.33	0.32	0.35	0.32	0.30	0.36	0.35	0.35	0.31	0.08	0.07	0.06
0.040	1.04	1.08	1.02	1.09	1.01	0.95	1.15	1.12	1.18	1.06	0.10	0.06	0.07
0.060	0.82	0.77	0.83	0.85	0.78	0.76	0.75	0.89	0.90	0.81	0.14	0.10	0.09
0.080	0.47	0.40	0.55	0.55	0.52	0.50	0.59	0.43	0.48	0.43	0.07	0.07	0.07
0.100	0.31	0.27	0.30	0.18	0.29	0.31	0.26	0.21	0.22	0.18	0.20	0.10	0.15
0.120	0.19	0.23	0.07	0.13	0.06	0.17	0.09	0.17	0.05	0.15	0.28	0.30	0.34
0.140	0.05	0.06	0.06	0.09	0.11	0.10	0.06	0.15	0.08	0.11	0.71	0.59	0.52
0.160	0.08	0.12	0.03		0.06	0.07	0.00		0.06	0.11	0.51	0.50	0.54
0.180	0.08		0.00		0.00	0.00	0.07			0.04	0.49	0.23	0.29
0.200			0.00		0.00	0.08				0.00	0.14	0.22	0.30
0.220			0.01		0.01	0.09				0.15	0.11	0.19	0.18
0.240			0.15		0.11						0.06	0.19	0.04
0.260											0.11	0.07	0.11
0.280											0.09	0.09	0.23
0.300											0.18	0.21	0.01
0.320											0.13	0.12	0.11
0.340											0.00	0.13	0.00
0.360											0.00	0.01	0.00
0.380											0.00	0.24	0.41
0.400											0.00		
0.420											0.00		
0.440											0.30		
Área total	3.29	3.26	3.33	3.23	3.27	3.33	3.33	3.32	3.31	3.34	3.71	3.48	3.51

Tabla 37. Resultados Análisis de Imágenes Material Rodado 20% Rep. 2.

Tamaño [m]	Muestra 1 [m ²]	Muestra 2 [m ²]	Muestra 3 [m ²]	Muestra 4 [m ²]	Muestra 5 [m ²]	Muestra 6 [m ²]	Muestra 7 [m ²]	Muestra 8 [m ²]	Muestra 9 [m ²]	Muestra 10 [m ²]	Muestra 11 [m ²]	Muestra 12 [m ²]	Muestra 13 [m ²]
0.020	0.07	0.16	0.16	0.16	0.17	0.17	0.14	0.16	0.17	0.15	0.06	0.06	0.05
0.040	0.33	0.68	0.72	0.63	0.67	0.71	0.59	0.75	0.74	0.61	0.07	0.05	0.05
0.060	0.81	0.99	1.14	1.10	1.02	1.02	0.97	1.10	1.05	1.05	0.10	0.05	0.09
0.080	0.78	0.83	0.69	0.63	0.70	0.57	0.74	0.71	0.69	0.67	0.07	0.05	0.07
0.100	0.62	0.46	0.45	0.42	0.44	0.52	0.47	0.30	0.35	0.37	0.17	0.11	0.16
0.120	0.37	0.22	0.18	0.24	0.17	0.22	0.15	0.13	0.17	0.20	0.34	0.24	0.35
0.140	0.11	0.09	0.09	0.11	0.06	0.20	0.05	0.07	0.12	0.18	0.51	0.58	0.49
0.160	0.03			0.00	0.00		0.09	0.05	0.06	0.06	0.49	0.40	0.58
0.180	0.04			0.00	0.00		0.09	0.00	0.01	0.00	0.23	0.34	0.50
0.200	0.04			0.04	0.00		0.05	0.00	0.09	0.00	0.20	0.17	0.19
0.220	0.06			0.10	0.00		0.00	0.00		0.00	0.18	0.29	0.09
0.240	0.14				0.00		0.12	0.12		0.00	0.24	0.37	0.14
0.260					0.00					0.00	0.07	0.37	0.22
0.280					0.00					0.15	0.11		0.09
0.300					0.15						0.13		0.10
0.320											0.00		0.19
0.340											0.21		
0.360													
0.380													
0.400													
0.420													
0.440													
Área total	3.38	3.45	3.43	3.42	3.39	3.40	3.46	3.40	3.45	3.43	3.17	3.10	3.37

Tabla 38. Resultados Análisis de Imágenes Material Rodado 20% Rep. 3.

Tamaño [m]	Muestra 1 [m ²]	Muestra 2 [m ²]	Muestra 3 [m ²]	Muestra 4 [m ²]	Muestra 5 [m ²]	Muestra 6 [m ²]	Muestra 7 [m ²]	Muestra 8 [m ²]	Muestra 9 [m ²]	Muestra 10 [m ²]	Muestra 11 [m ²]	Muestra 12 [m ²]	Muestra 13 [m ²]
0.020	0.12	0.17	0.18	0.19	0.20	0.17	0.17	0.18	0.18	0.17	0.07	0.07	0.06
0.040	0.54	0.71	0.76	0.73	0.73	0.71	0.65	0.79	0.71	0.69	0.06	0.05	0.03
0.060	0.99	1.11	0.99	1.06	1.09	0.95	1.14	1.08	1.06	0.95	0.09	0.08	0.06
0.080	0.69	0.67	0.71	0.62	0.60	0.56	0.63	0.62	0.64	0.50	0.09	0.06	0.02
0.100	0.60	0.30	0.32	0.48	0.42	0.45	0.35	0.33	0.40	0.41	0.12	0.14	0.13
0.120	0.20	0.13	0.24	0.12	0.16	0.23	0.21	0.14	0.08	0.11	0.36	0.37	0.36
0.140	0.06	0.11	0.05	0.08	0.11	0.16	0.09	0.13	0.09	0.09	0.37	0.61	0.33
0.160	0.06	0.12	0.00	0.00	0.10	0.05	0.22	0.03	0.03	0.16	0.42	0.56	0.35
0.180	0.13	0.04	0.00	0.03		0.00		0.00	0.00	0.14	0.28	0.49	0.42
0.200		0.09	0.00	0.09		0.04		0.00	0.04	0.04	0.14	0.28	0.37
0.220			0.00			0.00		0.00	0.00	0.06	0.29	0.16	0.36
0.240			0.00			0.00		0.00	0.06	0.12	0.20	0.01	0.05
0.260			0.00			0.00		0.02	0.12		0.24	0.08	0.09
0.280			0.13			0.15		0.13			0.17	0.00	0.10
0.300											0.10	0.09	0.09
0.320											0.00	0.04	0.00
0.340											0.13	0.20	0.00
0.360											0.22		0.13
0.380													0.25
0.400													
0.420													
0.440													
Área total	3.39	3.45	3.40	3.40	3.40	3.48	3.45	3.44	3.42	3.45	3.36	3.32	3.20

Tabla 39. Resultados Análisis de Imágenes Material Rodado 20% Rep. 4.

Tamaño [m]	Muestra 1 [m ²]	Muestra 2 [m ²]	Muestra 3 [m ²]	Muestra 4 [m ²]	Muestra 5 [m ²]	Muestra 6 [m ²]	Muestra 7 [m ²]	Muestra 8 [m ²]	Muestra 9 [m ²]	Muestra 10 [m ²]	Muestra 11 [m ²]	Muestra 12 [m ²]	Muestra 13 [m ²]
0.020	0.23	0.31	0.33	0.34	0.35	0.34	0.31	0.35	0.34	0.32	0.09	0.09	0.09
0.040	0.87	0.97	0.98	0.93	1.09	1.09	0.94	0.99	1.14	1.01	0.10	0.08	0.07
0.060	0.79	0.74	0.73	0.74	0.72	0.81	0.86	0.76	0.73	0.67	0.12	0.14	0.10
0.080	0.29	0.36	0.42	0.47	0.42	0.41	0.47	0.44	0.40	0.33	0.10	0.09	0.12
0.100	0.22	0.26	0.28	0.26	0.16	0.16	0.20	0.19	0.20	0.21	0.25	0.28	0.23
0.120	0.25	0.11	0.11	0.06	0.17	0.15	0.11	0.14	0.10	0.10	0.40	0.34	0.42
0.140	0.09	0.07	0.21	0.12	0.08	0.04	0.06	0.12	0.09	0.12	0.37	0.47	0.41
0.160	0.03	0.00	0.08	0.11	0.00	0.03	0.05	0.00	0.06	0.07	0.22	0.42	0.42
0.180	0.03	0.04		0.07	0.04	0.05	0.00	0.00		0.07	0.17	0.20	0.22
0.200	0.00	0.05			0.00	0.08	0.00	0.00		0.04	0.32	0.09	0.06
0.220	0.05	0.06			0.08		0.00	0.00		0.05	0.26	0.19	0.42
0.240	0.06	0.00					0.00	0.00		0.00	0.12	0.08	0.06
0.260	0.01	0.00					0.00	0.02		0.00	0.00	0.21	0.00
0.280	0.11	0.00					0.00	0.12		0.00	0.09	0.32	0.00
0.300	0.15	0.14					0.13			0.00	0.00	0.16	0.21
0.320										0.16	0.12		0.00
0.340											0.00		0.00
0.360											0.01		0.19
0.380											0.25		
0.400													
0.420													
0.440													
Área total	3.16	3.10	3.14	3.10	3.12	3.14	3.12	3.13	3.05	3.15	2.99	3.17	3.04

Tabla 40. Resultados Análisis de Imágenes Material Rodado 20% Rep. 5.

Tamaño [m]	Muestra 1 [m ²]	Muestra 2 [m ²]	Muestra 3 [m ²]	Muestra 4 [m ²]	Muestra 5 [m ²]	Muestra 6 [m ²]	Muestra 7 [m ²]	Muestra 8 [m ²]	Muestra 9 [m ²]	Muestra 10 [m ²]	Muestra 11 [m ²]	Muestra 12 [m ²]	Muestra 13 [m ²]
0.020	0.30	0.34	0.34	0.33	0.31	0.36	0.34	0.35	0.35	0.31	0.10	0.08	0.06
0.040	1.07	1.07	1.06	1.05	0.88	1.12	1.06	1.07	1.11	1.00	0.11	0.08	0.07
0.060	0.84	0.77	0.82	0.80	0.64	0.76	0.73	0.69	0.79	0.69	0.10	0.09	0.09
0.080	0.41	0.46	0.42	0.45	0.47	0.47	0.40	0.33	0.31	0.36	0.13	0.08	0.05
0.100	0.21	0.23	0.22	0.19	0.38	0.16	0.28	0.26	0.22	0.25	0.19	0.22	0.25
0.120	0.01	0.08	0.07	0.12	0.09	0.08	0.10	0.12	0.14	0.15	0.40	0.34	0.29
0.140	0.13	0.04	0.06	0.08	0.11	0.02	0.11	0.09	0.04	0.07	0.38	0.52	0.30
0.160	0.03	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.03	0.08	0.13	0.23	0.34	0.39
0.180	0.08	0.06	0.06	0.06	0.04	0.00	0.00	0.04	0.08	0.04	0.19	0.21	0.26
0.200					0.00	0.00	0.01	0.11		0.04	0.43	0.33	0.24
0.220					0.00	0.00	0.08			0.09	0.12	0.16	0.17
0.240					0.10	0.00					0.26	0.14	0.12
0.260						0.10					0.01	0.07	0.22
0.280											0.25	0.09	0.00
0.300											0.00	0.00	0.35
0.320											0.17	0.13	0.28
0.340												0.01	
0.360												0.22	
0.380													
0.400													
0.420													
0.440													
Área total	3.09	3.05	3.04	3.09	3.07	3.07	3.11	3.09	3.12	3.13	3.08	3.11	3.16

Tabla 41. Resultados Análisis de Imágenes Material Rodado 30% Rep. 1.

Tamaño [m]	Muestra 1 [m ²]	Muestra 2 [m ²]	Muestra 3 [m ²]	Muestra 4 [m ²]	Muestra 5 [m ²]	Muestra 6 [m ²]	Muestra 7 [m ²]	Muestra 8 [m ²]	Muestra 9 [m ²]	Muestra 10 [m ²]	Muestra 11 [m ²]	Muestra 12 [m ²]	Muestra 13 [m ²]
0.020	0.27	0.32	0.32	0.33	0.34	0.34	0.33	0.37	0.37	0.34	0.09	0.07	0.08
0.040	0.98	1.10	0.96	1.07	1.00	0.98	1.10	1.11	1.13	1.15	0.19	0.05	0.05
0.060	0.79	0.79	0.79	0.91	0.88	0.82	0.90	0.86	0.83	0.99	0.33	0.07	0.07
0.080	0.47	0.50	0.53	0.42	0.46	0.43	0.54	0.39	0.35	0.39	0.30	0.02	0.06
0.100	0.41	0.28	0.30	0.25	0.39	0.30	0.24	0.28	0.25	0.26	0.33	0.13	0.12
0.120	0.09	0.14	0.15	0.14	0.10	0.05	0.11	0.12	0.08	0.10	0.34	0.27	0.34
0.140	0.09	0.02	0.06	0.15	0.07	0.02	0.05	0.13	0.09	0.08	0.43	0.49	0.56
0.160	0.02	0.15	0.08	0.00	0.12	0.06	0.08	0.06	0.05	0.00	0.40	0.68	0.43
0.180	0.00		0.00	0.00		0.03			0.00	0.00	0.22	0.52	0.50
0.200	0.00		0.00	0.00		0.06			0.01	0.08	0.22	0.21	0.20
0.220	0.00		0.05	0.06		0.01			0.05		0.20	0.36	0.32
0.240	0.00		0.00	0.10		0.08			0.00		0.05	0.05	0.08
0.260	0.00		0.00			0.09			0.00		0.01	0.16	0.28
0.280	0.00		0.01			0.12			0.12		0.10	0.00	0.10
0.300	0.00		0.00								0.10	0.12	0.00
0.320	0.00		0.17								0.10	0.10	0.11
0.340	0.00										0.00	0.22	0.21
0.360	0.20										0.22		
0.380													
0.400													
0.420													
0.440													
Área total	3.32	3.32	3.41	3.42	3.36	3.39	3.36	3.32	3.32	3.38	3.63	3.52	3.50

Tabla 42. Resultados Análisis de Imágenes Material Rodado 30% Rep. 2.

Tamaño [m]	Muestra 1 [m ²]	Muestra 2 [m ²]	Muestra 3 [m ²]	Muestra 4 [m ²]	Muestra 5 [m ²]	Muestra 6 [m ²]	Muestra 7 [m ²]	Muestra 8 [m ²]	Muestra 9 [m ²]	Muestra 10 [m ²]	Muestra 11 [m ²]	Muestra 12 [m ²]	Muestra 13 [m ²]
0.020	0.14	0.21	0.21	0.21	0.21	0.20	0.20	0.21	0.22	0.19	0.08	0.07	0.05
0.040	0.59	0.82	0.74	0.72	0.77	0.69	0.73	0.72	0.81	0.84	0.13	0.05	0.03
0.060	1.05	1.10	1.03	0.96	1.08	1.16	1.08	1.08	1.14	1.24	0.33	0.07	0.07
0.080	0.68	0.63	0.66	0.60	0.68	0.68	0.61	0.71	0.64	0.70	0.33	0.07	0.06
0.100	0.42	0.50	0.50	0.43	0.52	0.50	0.44	0.47	0.45	0.40	0.37	0.17	0.10
0.120	0.25	0.16	0.18	0.27	0.14	0.16	0.26	0.15	0.16	0.12	0.28	0.42	0.14
0.140	0.21	0.15	0.15	0.25	0.06	0.05	0.09	0.16	0.05	0.08	0.35	0.73	0.33
0.160	0.08	0.00	0.08	0.07	0.09	0.08	0.11	0.17	0.02	0.08	0.44	0.60	0.50
0.180	0.05	0.09	0.07	0.07	0.04	0.04	0.00	0.00	0.04	0.00	0.19	0.30	0.58
0.200	0.08		0.00	0.00	0.05	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.16	0.26	0.38
0.220	0.00		0.00	0.11	0.11	0.00	0.05	0.00	0.00	0.11	0.38	0.16	0.20
0.240	0.13		0.11			0.00	0.12	0.12	0.06		0.14	0.09	0.16
0.260						0.13			0.13		0.08	0.07	0.13
0.280											0.00	0.16	0.32
0.300											0.12	0.13	0.10
0.320											0.12	0.30	0.12
0.340											0.35		0.35
0.360													
0.380													
0.400													
0.420													
0.440													
Área total	3.70	3.67	3.75	3.71	3.75	3.69	3.70	3.80	3.74	3.76	3.85	3.66	3.63

Tabla 43. Resultados Análisis de Imágenes Material Rodado 30% Rep. 3.

Tamaño [m]	Muestra 1 [m ²]	Muestra 2 [m ²]	Muestra 3 [m ²]	Muestra 4 [m ²]	Muestra 5 [m ²]	Muestra 6 [m ²]	Muestra 7 [m ²]	Muestra 8 [m ²]	Muestra 9 [m ²]	Muestra 10 [m ²]	Muestra 11 [m ²]	Muestra 12 [m ²]	Muestra 13 [m ²]
0.020	0.29	0.36	0.30	0.35	0.35	0.31	0.34	0.36	0.32	0.35	0.06	0.05	0.06
0.040	1.06	1.03	1.01	1.07	1.11	0.93	0.96	1.03	0.99	1.19	0.09	0.04	0.05
0.060	0.79	0.81	0.79	0.79	0.76	0.71	0.79	0.77	0.73	0.78	0.22	0.09	0.10
0.080	0.49	0.46	0.37	0.43	0.46	0.45	0.47	0.38	0.36	0.40	0.24	0.04	0.09
0.100	0.29	0.29	0.22	0.33	0.25	0.33	0.20	0.25	0.28	0.22	0.30	0.12	0.21
0.120	0.14	0.15	0.12	0.11	0.24	0.16	0.11	0.11	0.11	0.08	0.26	0.29	0.19
0.140	0.07	0.06	0.04	0.14	0.10	0.14	0.05	0.00	0.11	0.10	0.34	0.41	0.33
0.160	0.06	0.00	0.14	0.06		0.11	0.11	0.07	0.03	0.05	0.30	0.45	0.65
0.180	0.10	0.00				0.09	0.04	0.00	0.08	0.00	0.31	0.40	0.37
0.200		0.00				0.12	0.01	0.05	0.04	0.00	0.26	0.33	0.41
0.220		0.01					0.13	0.00	0.01	0.09	0.24	0.41	0.18
0.240		0.16						0.14	0.06		0.22	0.20	0.19
0.260								0.11	0.00		0.18	0.30	0.01
0.280									0.12		0.09	0.00	0.01
0.300											0.23	0.48	0.12
0.320											0.24		0.12
0.340											0.21		0.49
0.360													
0.380													
0.400													
0.420													
0.440													
Área total	3.29	3.33	3.00	3.30	3.26	3.35	3.20	3.26	3.24	3.27	3.79	3.60	3.57

Tabla 44. Resultados Análisis de Imágenes Material Rodado 30% Rep. 4.

Tamaño [m]	Muestra 1 [m ²]	Muestra 2 [m ²]	Muestra 3 [m ²]	Muestra 4 [m ²]	Muestra 5 [m ²]	Muestra 6 [m ²]	Muestra 7 [m ²]	Muestra 8 [m ²]	Muestra 9 [m ²]	Muestra 10 [m ²]	Muestra 11 [m ²]	Muestra 12 [m ²]	Muestra 13 [m ²]
0.020	0.27	0.34	0.33	0.32	0.32	0.30	0.33	0.33	0.33	0.36	0.08	0.06	0.06
0.040	0.94	1.07	0.93	0.96	1.00	1.02	1.08	0.98	1.01	1.23	0.17	0.05	0.05
0.060	0.74	0.80	0.75	0.76	0.80	0.87	0.84	0.72	0.71	0.89	0.30	0.07	0.07
0.080	0.41	0.36	0.46	0.42	0.43	0.45	0.44	0.51	0.44	0.37	0.25	0.06	0.10
0.100	0.34	0.32	0.28	0.32	0.33	0.26	0.17	0.21	0.28	0.15	0.24	0.14	0.10
0.120	0.21	0.09	0.11	0.13	0.14	0.15	0.12	0.14	0.05	0.10	0.30	0.35	0.20
0.140	0.13	0.08	0.12	0.18	0.14	0.16	0.14	0.08	0.14	0.05	0.37	0.38	0.46
0.160	0.02	0.03	0.11	0.13	0.05	0.02	0.06	0.07	0.08	0.02	0.28	0.62	0.31
0.180	0.07	0.13	0.01	0.04	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00	0.06	0.21	0.48	0.46
0.200	0.01		0.11	0.00	0.08	0.01	0.04	0.00	0.08		0.21	0.28	0.33
0.220	0.01			0.00		0.00	0.09	0.00	0.00		0.28	0.21	0.24
0.240	0.13			0.10		0.10		0.06	0.00		0.23	0.12	0.26
0.260								0.12	0.20		0.10	0.09	0.07
0.280											0.25	0.07	0.08
0.300											0.35	0.20	0.21
0.320												0.00	0.10
0.340												0.21	0.00
0.360													0.00
0.380													0.43
0.400													
0.420													
0.440													
Área total	3.25	3.21	3.22	3.36	3.29	3.33	3.32	3.32	3.32	3.23	3.62	3.39	3.52

Tabla 45. Resultados Análisis de Imágenes Material Rodado 30% Rep. 5.

Tamaño [m]	Muestra 1 [m ²]	Muestra 2 [m ²]	Muestra 3 [m ²]	Muestra 4 [m ²]	Muestra 5 [m ²]	Muestra 6 [m ²]	Muestra 7 [m ²]	Muestra 8 [m ²]	Muestra 9 [m ²]	Muestra 10 [m ²]	Muestra 11 [m ²]	Muestra 12 [m ²]	Muestra 13 [m ²]
0.020	0.22	0.29	0.32	0.29	0.29	0.30	0.32	0.32	0.33	0.33	0.26	0.06	0.06
0.040	0.83	0.83	0.93	0.87	0.80	0.86	0.91	0.87	0.87	1.03	0.60	0.09	0.04
0.060	0.74	0.82	0.90	0.86	0.82	0.77	0.74	0.86	0.66	0.83	0.45	0.11	0.06
0.080	0.53	0.47	0.39	0.58	0.57	0.48	0.52	0.49	0.41	0.40	0.26	0.12	0.06
0.100	0.38	0.33	0.34	0.33	0.41	0.31	0.35	0.27	0.27	0.24	0.20	0.20	0.14
0.120	0.19	0.12	0.22	0.17	0.17	0.17	0.25	0.16	0.23	0.10	0.22	0.40	0.26
0.140	0.13	0.15	0.16	0.10	0.12	0.14	0.07	0.14	0.13	0.11	0.25	0.38	0.47
0.160	0.09	0.05		0.06	0.03	0.17	0.00	0.14	0.10	0.02	0.09	0.29	0.55
0.180	0.12	0.06		0.00	0.08	0.07	0.11		0.04	0.00	0.15	0.22	0.60
0.200	0.09	0.04		0.09	0.00				0.00	0.05	0.14	0.14	0.20
0.220	0.10	0.00			0.00				0.06	0.00	0.17	0.11	0.36
0.240		0.00			0.10				0.00	0.00	0.07	0.02	0.19
0.260		0.07							0.07	0.11	0.09	0.20	0.31
0.280		0.13							0.16		0.08	0.09	0.25
0.300											0.01	0.19	0.00
0.320											0.15	0.00	0.22
0.340												0.01	
0.360												0.15	
0.380												0.42	
0.400													
0.420													
0.440													
Área total	3.42	3.37	3.25	3.35	3.38	3.28	3.27	3.25	3.33	3.24	3.20	3.19	3.76