

Medición del Tamaño de Partículas de Minerales Mediante Procesamiento Digital de Imágenes

Mg. Ing. Carlos Gustavo Rodríguez Medina ¹, Dr. Ing. Oscar Daniel Chuk ²,
Ing. Regina Bertero, Ing. Pablo Trigo

Instituto de Investigaciones Mineras. Facultad de Ingeniería.
Universidad Nacional de San Juan

Av. Libertador Gral. San Martín 1109 oeste. San Juan
0264-4211700 (int. 285 ¹, int. 389 ^{1,2})

grodriguez@unsj.edu.ar ¹, dchuk@unsj.edu.ar ²

RESUMEN

La determinación de la granulometría resulta de mucha importancia en una amplia gama de industrias y constituye un parámetro crítico en la fabricación de diversos productos [1]. Por tal motivo es necesario la medición del tamaño de partículas en los procesos de molienda de minerales. La misma afecta a los productos y a los procesos [2] y además está relacionada con el consumo energético de los molinos intervinientes en dicha operación, como así también con la calidad del producto que se elabora, entre otros. Estas impactan directamente en los costos de producción [3]. Si bien existen diferentes métodos y tecnologías para determinar el tamaño de partículas de minerales (a través de técnicas manuales o por medio de dispositivos electrónicos), en el presente trabajo se expone una alternativa efectiva, de bajo costo y que tiene la finalidad de ser utilizada en línea con el proceso de molienda (sin la necesidad de estar tomando muestras para ser enviadas a laboratorios), mediante técnicas de procesamiento digital de imágenes. Se ha trabajado en el desarrollo de un algoritmo que permite la aplicación de técnicas de

procesamiento digital de imágenes para poder medir el tamaño de partículas microscópicas de minerales, que se encuentran en el rango que va de los 50 μm hasta los 800 μm aproximadamente. determinándose propiedades geométricas como así también medidas estadísticas de interés para el proceso.

Palabras clave: Procesamiento de imágenes, Tamaño de partículas. Algoritmo.

CONTEXTO

El desarrollo que se expone a continuación se lleva a cabo en el marco de un Proyecto de Investigación y Desarrollo para Jóvenes Investigadores de la provincia de San Juan, denominado PROJOVI, titulado "*Medición de propiedades geométricas de minerales a través de visión artificial con aplicación a la industria minera*". La misma es una Convocatoria de Proyectos recientemente lanzada y financiada (en su segunda edición) en forma conjunta por la Universidad Nacional de San Juan y el Gobierno Provincial orientada a la formación de grupos de investigadores jóvenes menores de 40 años.

Adicionalmente, los integrantes del mencionado proyecto conforman un equipo mayor, con una trayectoria de varios años en investigación y desarrollo, y en el que actualmente se están ejecutando proyectos correspondientes a convocatorias nacionales, tal como los PDTs (Proyectos de Desarrollo Tecnológico y Social), financiados por el Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación productiva (Mincyt), proyectos de Asistencia Exportadora "*Manuel Belgrano*", financiados por la Secretaría de Políticas Universitarias (SPU), y Proyectos internos de Investigación y Creación financiados por la Universidad Nacional de San Juan (proyectos CICITCA) y acreditados por dicha Universidad y el Ministerio de Educación.

1. INTRODUCCIÓN

La determinación de la granulometría en forma automática en la industria minera es uno de los problemas fundamentales en los procesos de control de molienda del mineral, especialmente cuando se procesan varias toneladas de mineral en forma continua, para así tener un mejor control sobre la operación óptima de carga de los molinos, además de poder cumplir con exigencias de mercados [8].

En particular, los minerales industriales (minerales No Metalíferos tales como calcita, bentonita, y otros) son usados como insumos para muchas industrias, tal como la de los plásticos, las pinturas, la siderurgia, materiales de construcción, etc.

Actualmente existen diversos métodos e instrumentos para medir el tamaño de partículas, dependiendo del tamaño de las mismas.

Los dispositivos para la medición de partículas secas en el rango de tamaños de interés más difundidos son los basados en difracción laser. El inconveniente que presentan estos equipos es que suelen ser de costos muy elevados, por lo cual solo grandes laboratorios de algunas empresas o de grandes centros de investigación pueden adquirirlos. Además los dispositivos

que aplican esta técnica requieren que se conozcan las propiedades ópticas de las partículas que componen la muestra, tal como el índice de refracción, entre otros [3].

De manera alternativa se pueden aplicar las técnicas de procesamiento digital de imágenes para la medición de partículas secas. Los sistemas de visión artificial se presentan como un campo emergente en la medición de tamaños y propiedades geométricas de partículas. Así lo manifiestan los artículos [4] y [5], y tesis doctorales como [6].

Recientemente se cuenta en el mercado con algunos aparatos para la medición del tamaño de partículas basados en el análisis de imágenes [7], pero algunos trabajan la muestra "*fuera de línea*" con el proceso (requieren tomar una muestra y llevarla luego a un laboratorio para ser analizada), y en otros el rango de medición es algo limitado (de 1 a 300 μm). Además, estos dispositivos también son de costos elevados.

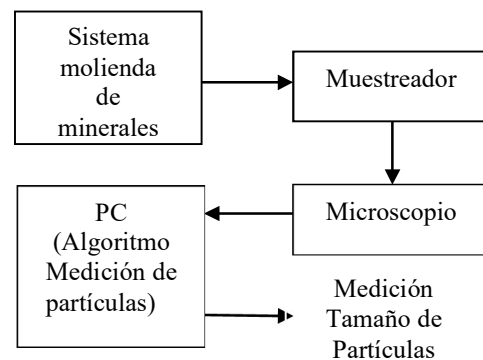


Figura 1. Sistema de visión artificial

El grupo de investigación se encuentra desarrollando un sistema de visión artificial el que va a permitir la medición de muestras "*on line*" con el proceso. Es decir, mediante un dispositivo muestreador inserto en los conductos de aire que transportan las partículas de mineral molido en un sistema de molienda, se toma una muestra y se captura la imagen a través de un microscopio USB. Esta imagen es tomada por una PC, la que a través de un algoritmo desarrollado específicamente mide el

tamaño y otras características de interés de la muestra. Los resultados podrán ser utilizados como entradas a un sistema de control automático de tamaño de partículas [3]. En la figura 1 se presenta un esquema del sistema de visión artificial mencionado.

El presente trabajo específicamente se limita a describir el algoritmo desarrollado para la determinación de tamaños de partículas y otras medidas estadísticas importantes para el proceso. El mismo ha sido escrito en lenguaje *M* de Matlab y permite analizar muestras de partículas secas de minerales no metalíferos en el rango de interés, y a un bajo costo.

Desarrollo del algoritmo

Los tamaños de partículas con los que se requiere trabajar se encuentran en el rango de los 50 a los 800 μm aproximadamente.

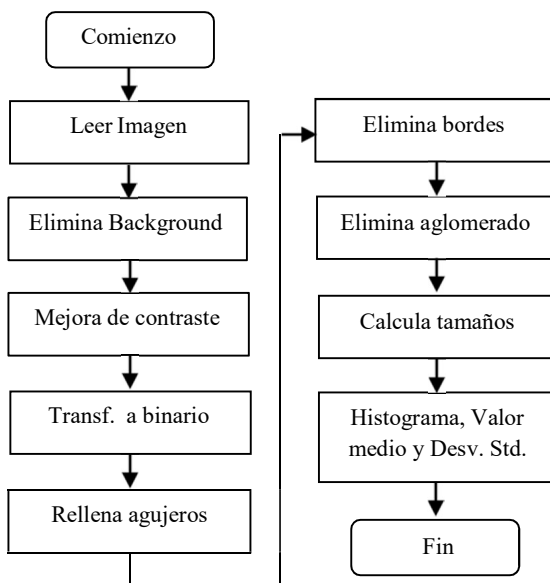


Figura 2. Diagrama de flujo del algoritmo desarrollado para medir tamaño de partículas de mineral.

Se captura la imagen a través del microscopio digital y se almacena en el disco de la PC para su procesamiento. En principio, se ha trabajado con la muestra esparcida sobre una superficie contrastante sobre la cual se toma la fotografía. Si se incorpora un dispositivo muestreador la

muestra puede ser analizada "on line" con el proceso, que en definitiva es lo que se desea realizar a través del sistema de Visión Artificial. Dado que el algoritmo ha sido implementado en Matlab, la manipulación de las imágenes es realizada en forma matricial. Por lo cual al leer la imagen, la misma se carga en memoria de forma matricial como una variable, formada por filas y columnas, cuya intersección determina la posición y el valor de cada pixel de la imagen (valor que varía entre 0 y 255).

La imagen capturada por el microscopio (figura 3.A) requiere de un procesamiento previo, con el fin de tener una imagen en condiciones para analizar y calcular el tamaño de las partículas. Como primer medida, se elimina el fondo de la imagen para descartar cualquier color y manchas que generen confusión con las partículas (figura 3.B). Luego se convierte la imagen a binario, es decir, mediante la determinación de un valor de umbral óptimo (valor de corte entre los grises más cercanos a los blancos o a los negros). Con el valor de umbral determinado se genera la imagen en blanco y negro presentada en la figura 3.C. Posteriormente el procesamiento continúa eliminando aquellas partículas que se hallan en el borde de la imagen, con la finalidad de que cuando se haga el cálculo de tamaño no se consideren aquellas partículas pegadas al borde y que pueden aparecer con un tamaño fraccionado, evitándose así introducir errores a los cálculos (figura 3.D).

También para descartar otro tipo de error, no se consideran aquellas partículas que se encuentran unidas unas con otras, denominadas usualmente como "aglomeradas". Para ello el algoritmo debe poder detectarlas, marcarlas y luego excluirlas del cálculo. En la figura 3.E. se han marcado con un color fucsia con el fin de que se puedan también distinguir visualmente con claridad, las que luego son eliminadas durante el procesamiento digital.

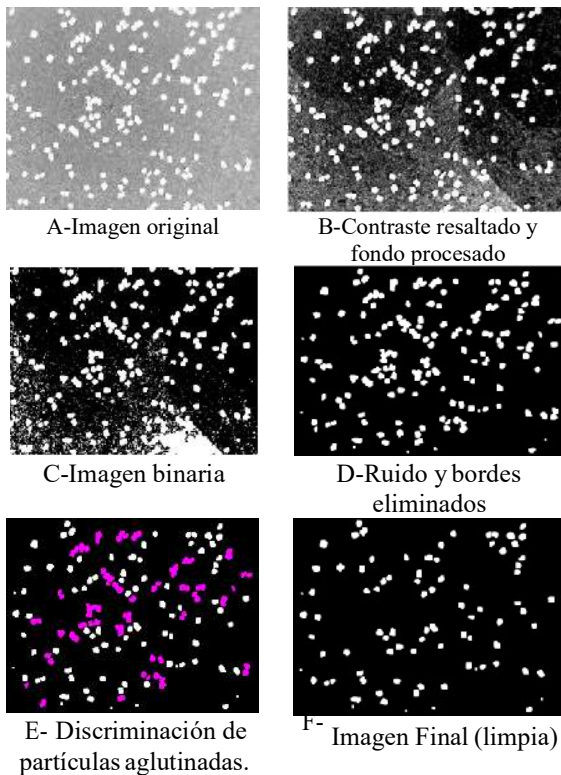


Figura 3. Procesamiento de imágenes a través del algoritmo para medir tamaño de partículas de mineral.

Se utiliza el cálculo definido como solidez S .

(Ecuación 1)

$$S = \frac{\text{Área del objeto}}{\text{Área de la envolvente convexa}}$$

Donde el *Área del objeto* es la cantidad de bits de color blanco acumulados en contacto entre sí dentro de un borde. El *Área de la envolvente convexa* es la cantidad de elementos binarios dentro del menor polígono convexo que rodea al objeto. La convexidad tiene una definición matemática concreta, pero se puede decir que es un polígono sin entradas cóncavas o bahías sobre sí mismo.

Para el caso del objeto A de la figura 4 se obtiene $S(A) = 0.8197$ mientras que para el objeto B – una partícula individual- el valor es $S(B) = 0.9622$. Estableciendo un valor de corte intermedio, típicamente $S = 0.9$, es posible discriminar objetos que deben ser incluidos en

las mediciones como partículas reales de los aglomerados que introducirían medidas erróneas.

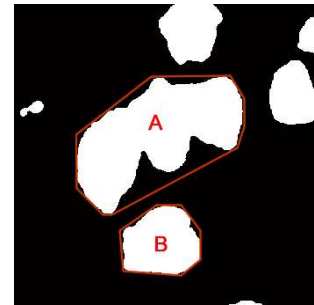


Figura 4. Objetos dentro de sus envolventes convexas.

En la figura 3.F. se visualiza la imagen final obtenida a través del algoritmo, luego de haber procesado la imagen original observada en la figura 3.A. La misma ya no contiene las partículas aglomeradas ni las pegadas a los bordes de la imagen a partir de la cual se determina el tamaño de las partículas.

El algoritmo determina el eje mayor y el eje menor de una elipse de área equivalente a la partícula, utilizando este último como tamaño equivalente. Dado que en el método patrón de los tamices, contra el cual se comparan los resultados, las partículas atraviesan los agujeros de los tamices a través de su eje menor.

2. LINEAS DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

En el Laboratorio de Control Automático del Instituto de Investigaciones Mineras (Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de San Juan) se realiza investigación y desarrollo respecto a la automatización de procesos de molienda de minerales hace casi dos décadas. Hace algunos años se viene desarrollando el Área de Procesamiento de Imágenes.

Actualmente se está trabajando en la medición de tamaños de partículas secas mediante un sistema de visión artificial que trabaje de manera *on-line* con el proceso de molienda y que permita el control automático del proceso. Otro de los ejes de investigación es la

caracterización de arenas especiales (forma, color, tamaños, clasificación del tipo de material, etc.) mediante el procesamiento de imágenes para ser utilizadas en la extracción de petróleo mediante el método de Fraking.

3. RESULTADOS OBTENIDOS Y ESPERADOS

El algoritmo desarrollado, además de la determinación del tamaño, también calcula y presenta gráficamente el histograma correspondiente. De esta manera se , aprecian los tamaños y las frecuencias o cantidades de partículas con tamaños similares en la imagen analizada.

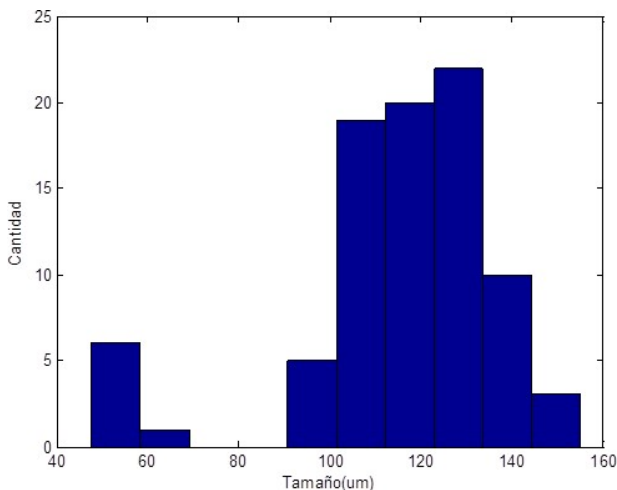


Figura 5. Histograma del tamaño de partículas de la muestra.

Tanto las imágenes de la figura 3 como el histograma de la figura 5, corresponden a una muestra de mineral molido de Calcita con tamaños de partículas entre los 106-150 µm, correspondientes a la clase granulométrica "100# +150#", de acuerdo a la tabla 1.

Esta tabla presenta una serie de muestras de diferentes clases granulométricas (clasificación de tamaños), determinados a través del método de los tamices, y las que se considerarán como muestras de medida patrón.

Al observar el histograma de la figura 5 se aprecia que la mayoría de las partículas se encuentran concentradas en dicho rango.

Clase	Tamaño (µm)
+20#	850
-20# +40#	850 - 420
-40# +70#	420 - 210
-70# +100#	210 - 150
-100# +150#	150 - 106
-150# +200#	106 - 75
-200# +325#	75 - 45
-325#	45

Tabla 1. Tamaños de muestras utilizadas.

Para esa misma prueba, el algoritmo determinó un *Valor Medio* de 114,75 µm y una *Desviación Estandar* de 22,26 µm. Dichos cálculos realizados también son comprobables gráficamente. Solo existe una pequeña cantidad de partículas medidas que están fuera del rango mencionado, lo cual puede deberse a ruido en la imagen analizada, contaminación de la muestra, y otras causas, lo que no resulta ser de importancia para los objetivos perseguidos.

Con el fin de validar los resultados obtenidos con la aplicación del algoritmo para la medición del tamaño de partículas, se han realizado diversas pruebas con diferentes *clases granulométricas* de mineral Calcita, de acuerdo a las indicadas en la tabla 1.

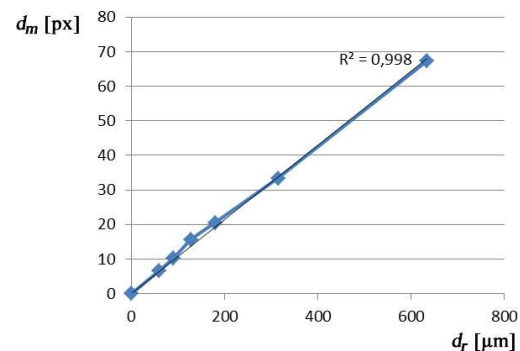


Figura 6. Tamaños de partículas reales vs. calculados

La figura 6 presenta una curva comparativa entre los tamaños reales " d_r ", de cada clase granulométrica usados como patrón [µm] y los diámetros equivalentes " d_m " calculados en píxeles [px]. Se puede observar una alta linealidad, lo que permite asegurar la validez del método tan solo con establecer una proporcionalidad entre ambas medidas. La calibración resulta un procedimiento sencillo.

Como conclusión, el algoritmo:

- Realiza la determinación de tamaños de partículas de la muestra contenida en cada imagen de manera confiable.

- Calcula y presenta el Histograma del tamaño de partículas de la muestra y medidas estadísticas de interés tal como el valor medio y la desviación estándar.

- Detecta y elimina la aglomeración de partículas.

- Integra un sistema de Visión Artificial de bajo costo que permitirá el análisis de partículas de mineral en forma "on line" con el proceso de molienda.

4. FORMACIÓN DE RECURSOS HUMANOS

El grupo de investigación se conforma por dos Ingenieros Electrónicos, con formación de posgrado de Doctorado y Maestría (cuya tesis fue defendida el año pasado), un Ingeniero en Minas, una Ingeniera Metalurgista cursando una Maestría en Metalurgia Extractiva, y un alumno recientemente egresado que está por comenzar su Doctorado en Procesamiento de Minerales.

En el seno del grupo, el año pasado un alumno de la carrera de grado de Ingeniería en Minas desarrolló una Beca de Investigación en la categoría Estudiantes avanzados y también llevó a cabo y presentó su tesina de grado.

El mencionado proyecto PROJOVI tiene como finalidad formar nuevos investigadores menores a 40 años, el que también se está ejecutando en el dicho grupo de investigación permitiendo sumar dos nuevos investigadores al equipo.

5. BIBLIOGRAFIA

[1] Sánchez M. A.; Nieto J.; Berrocal J. M. 2013. Un sistema de visión artificial para detectar y estimar el tamaño de rocas. Universidad de Salamanca.

[2] Malvern Instrument International. Tipos de instrumentos de medición de partículas actuales. 2017. <http://www.malvern.com/es/products/measurement-type/particle-size/>

[3] Rodriguez M., C. Gustavo; Chuk, O. Daniel; Bertero, Regina; Trigo, Pablo. Medición de propiedades geométricas de minerales a través de visión artificial con aplicación a la industria minera. Universidad Nacional de San Juan, Argentina. Informe de Avance de Proyecto PROJOVI. 2016.

[4] Igathinathane C.; Pordesimo L.O.; Columbus E.P.; Batchelor W.D.; Methuku S.R.; 2008. Shape identification and particles size distribution from basic shape parameters using Image computers and electronics in agriculture 63, 168–182.

[5] Kröner S., M.T. Doménech Carbó, 2013. Determination of minimum pixel resolution for shape analysis: Proposal of a new data validation method for computerized images. Powder Technology 245, 297–313.

[6] Andersson T, 2010. Estimating Particle Size Distributions Based on Machine Vision. Doctoral Thesis. Dept. of Computer Science and Electrical Engineering. Lulea University of Technology, Lulea, Sweden.

[7] Soto C. P.; Bollo M. C. Visión artificial en la minería con redes neuronales. Universidad Católica del Norte, Antofagasta, Chile.

[8] Corke P.; Roberts J.; Winstanley G. 1998. Vision Based Control for Mining Automation. IEEE Robotics and Automation Magazine. Vol 5, N 4. Pp: 44-49.