

Análisis comparativo de la distribución granulométrica de granos molidos en molino de bolas y molino de martillos.

Comparative evaluation of granulometric distribution in grains processed by ball and hammer Mills.

Stefanie Bonilla Bermeo^{1*} ; Fernando Noblecilla Arévalo² ; Iván Torres Tapia³ ; Carlos Valdiviezo Rogel⁴

Recibido: 25/10/2025 – Aceptado: 05/12/2025 – Publicado: 01/01/2026

Artículos de
Investigación



Artículos de
Revisión



Artículos de
Ensayos



* Autor para
correspondencia.



Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 (CC BY-NC-SA 4.0). Los autores conservan los derechos sobre sus artículos y pueden compartir, copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra, siempre que se reconozca la autoría, no se utilice con fines comerciales y se mantenga la misma licencia en obras derivadas.

Resumen.

La molienda de granos es fundamental en procesos industriales, donde la distribución granulométrica resultante incide directamente en la calidad del producto. El objetivo fue comparar la distribución granulométrica de maíz y soja procesados en molino de martillo, molino de bolas y su combinación. Se molieron muestras de maíz y soja utilizando tres configuraciones: molino de martillo, molino de bolas y la secuencia de ambos. El material obtenido se tamizó, determinándose los porcentajes retenidos por malla y calculándose los diámetros característicos (D10, D50, D90). Adicionalmente, se realizó análisis microscópico de partículas y ANOVA para evaluar diferencias significativas. El molino de martillo produjo distribuciones gruesas y heterogéneas, especialmente en soja (D50 \approx 2.9 mm). El molino de bolas generó un mayor porcentaje de finos en maíz (D50 \approx 1.38 mm), pero fue ineficaz para soja (D50 \approx 3.53 mm). La combinación de molinos logró la distribución más uniforme para ambos granos (D50 \approx 1.05-1.25 mm). El ANOVA no detectó diferencias significativas globales, aunque se observaron disparidades morfológicas y de distribución en el análisis por tamices. La combinación de molinos optimizó la distribución granulométrica, superando las limitaciones de cada equipo por separado.

Palabras clave.

Distribución granulométrica, Molino de martillo, Molino de bolas, Molienda de maíz, Molienda de soja.

Abstract.

The grinding of grains is fundamental in industrial processes, where the resulting particle size distribution directly impacts product quality. This study aimed to compare the granulometric distribution of corn and soybeans processed using a hammer mill, ball mill, and their combination. Samples of corn and soybeans were ground using three configurations: hammer mill, ball mill, and sequential milling with both. The resulting material was sieved to determine weight retained per mesh and calculate characteristic diameters (D10, D50, D90). Additional particle microscopy and ANOVA were performed to evaluate significant differences. The hammer mill produced coarse, heterogeneous distributions, especially for soybeans (D50 \approx 2.9 mm). The ball mill generated a higher proportion of fine particles in corn (D50 \approx 1.38 mm) but was ineffective for soybeans (D50 \approx 3.53 mm). The mill combination achieved the most uniform distribution for both grains (D50 \approx 1.05–1.25 mm). ANOVA detected no global significant differences, though morphological and distributional disparities were observed in sieve analysis. The combined milling approach optimized granulometric distribution, overcoming the limitations of each individual equipment.

Keywords.

Granulometric distribution, Hammer mill, Ball mill, Corn grinding, Soybean grinding.

1. Introducción

La reducción del tamaño de partículas es un proceso implementado en diversas industrias, que consiste en disminuir la dimensión física de los materiales sólidos mediante la aplicación de fuerzas mecánicas. Este proceso es esencial en operaciones como la mezcla, secado, la sinterización y las reacciones químicas, donde el tamaño de las partículas puede influir en la velocidad y uniformidad del proceso. Los equipos comúnmente utilizados para la reducción de tamaño incluyen molinos de bolas, molino de martillos, trituradoras de mandíbulas y molinos de rodillos. La elección del equipo adecuado depende de las propiedades del material y del tamaño de partícula deseado, siendo un factor crítico para la optimización de los procesos industriales. [1]

Asimismo, la distribución de partículas desempeña un papel fundamental, ya que afecta directamente la calidad y

las propiedades del producto final, como su flujo, compactación y disolución. El análisis granulométrico es una técnica esencial para evaluar la distribución de tamaño de partículas en un material pulverizado, y el tamiz es uno de los equipos más utilizados para este fin. La precisión en la clasificación de partículas es vital para garantizar la consistencia del producto. [2]

La molienda y la reducción de tamaño no solo permiten aumentar la superficie específica de los materiales, sino que también mejoran su reactividad y facilitan procesos posteriores como la disolución, la extracción de compuestos de interés y la homogeneización en mezclas. En la industria alimentaria, por ejemplo, un control adecuado de la granulometría contribuye a optimizar la textura, la solubilidad y la biodisponibilidad de nutrientes, mientras que en la industria farmacéutica la uniformidad del tamaño de partícula es clave para garantizar la

¹ Universidad de Guayaquil / stefanie.bonillab@ug.edu.ec ; <https://orcid.org/0000-0002-9391-3698>, Guayaquil; Ecuador.

² Investigador Independiente / fernandoanoblex18@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0005-1898-8373>, Guayaquil; Ecuador.

³ Investigador Independiente / ivanalejo17@gmail.com ; <https://orcid.org/0009-0008-9193-0524>, Guayaquil; Ecuador.

⁴ Universidad de Guayaquil / carlos.valdiviezor@ug.edu.ec; <https://orcid.org/0000-0002-6550-975>, Guayaquil, Ecuador.

dosificación y la liberación controlada de principios activos. [3]

En el ámbito de los materiales de construcción y minería, la eficiencia de los equipos de conminución, como molinos de bolas y de martillos, tiene un impacto directo en el consumo energético y en los costos de operación. Se estima que hasta un 50% de la energía total utilizada en una planta de procesamiento mineral corresponde a operaciones de molienda, lo que convierte a la selección del equipo y a la optimización de la granulometría en factores estratégicos para la sostenibilidad del proceso. [4] Además, la reducción excesiva de partículas puede generar pérdidas de material por formación de finos, afectando la eficiencia global del sistema.

El molino de martillos es uno de los equipos más empleados para la reducción de tamaño de granos debido a su simplicidad de diseño, bajo costo y alta capacidad de procesamiento. Su principio de funcionamiento se basa en el impacto repetido de martillos giratorios sobre las partículas, lo que genera fracturas rápidas y produce materiales con una granulometría relativamente heterogénea. Este tipo de molino es ampliamente utilizado en la industria alimentaria y de piensos, ya que permite procesar granos como maíz, trigo y soja de manera eficiente, aunque presenta la desventaja de generar un mayor contenido de finos y polvo. [5]

Por otro lado, el molino de bolas opera bajo el principio de impacto y fricción, donde esferas de acero u otro material de molienda giran dentro de un tambor cilíndrico, provocando la reducción gradual del tamaño de partícula. A diferencia del molino de martillos, este equipo permite obtener una distribución de partículas más controlada y fina, con menor variabilidad en el tamaño. Los molinos de bolas se utilizan ampliamente en la industria minera, cerámica y farmacéutica, así como en la investigación de nuevos materiales, aunque requieren mayor consumo energético y tiempos de operación más prolongados en comparación con los molinos de martillos. [6]

El análisis granulométrico mediante tamizado, difracción láser u otros métodos modernos se emplea como herramienta de control de calidad para establecer la distribución de tamaños en los productos procesados. La técnica de tamizado, aunque tradicional, sigue siendo una de las más empleadas debido a su bajo costo, simplicidad y reproducibilidad en comparación con métodos más sofisticados. La información obtenida de estos análisis permite establecer correlaciones entre la distribución de partículas y el comportamiento del material en procesos posteriores, garantizando la uniformidad del producto final y contribuyendo a la optimización de la cadena productiva. [7]

La elección entre un molino de martillos y un molino de bolas depende en gran medida del material a procesar y de

las propiedades deseadas en el producto final. [8] En el caso de los granos, el molino de martillos se prefiere por su rapidez y eficiencia en grandes volúmenes, mientras que el molino de bolas resulta más apropiado cuando se requiere una molienda fina y uniforme. Ambos equipos tienen un papel fundamental en la optimización de procesos industriales, y su comparación desde la perspectiva de la distribución granulométrica permite identificar ventajas competitivas y áreas de mejora en la reducción de tamaño de partículas. [9] En este contexto, resulta pertinente destacar la importancia de la molienda en granos de uso masivo como el maíz y la soja, cuyo procesamiento no solo responde a fines industriales, sino también a la optimización de la calidad nutricional y funcional de los productos derivados.

A pesar de la amplia utilización de los molinos de martillos y de bolas en distintas industrias, aún persisten vacíos en la comprensión comparativa de su eficiencia en la reducción de tamaño y en la distribución granulométrica final de granos como el maíz y la soja. Si bien ambos equipos cumplen funciones similares, las diferencias en su principio de operación, consumo energético y uniformidad del producto pueden influir significativamente en la calidad y el aprovechamiento de los granos procesados. Estudios recientes han destacado que los parámetros de molienda, como la velocidad de rotación, la carga de bolas o la apertura de cribas, inciden directamente en la distribución de partículas y en la calidad nutricional del producto final [10]. Investigaciones comparativas, han evidenciado que los molinos de martillos tienden a generar partículas más irregulares y un mayor contenido de finos, mientras que los molinos de bolas producen distribuciones más homogéneas [11], aunque con mayor consumo energético y tiempo de operación. Sin embargo, la mayoría de estos estudios se ha centrado en granos individuales o condiciones experimentales específicas, por lo que se requiere un análisis más integral que relacione ambos equipos bajo condiciones controladas y comparables. De este modo, la presente investigación busca aportar evidencia cuantitativa y actualizada que permita orientar decisiones técnicas y económicas en el procesamiento de maíz y soja, fortaleciendo la base científica para la selección del sistema de molienda más eficiente.

En el caso de granos como el maíz y la soja, ampliamente utilizados en la industria alimentaria y de piensos, la molienda desempeña un papel fundamental en la mejora de sus propiedades funcionales y nutricionales. En el maíz, el control de la granulometría influye en la digestibilidad del almidón y en la calidad de productos derivados como harinas y cereales, mientras que en la soja determina la disponibilidad de proteínas y lípidos, además de facilitar su incorporación en formulaciones balanceadas para alimentación animal. [12] Estudios han demostrado que la reducción adecuada del tamaño de partícula en estos granos no solo optimiza el rendimiento de los procesos de extracción y digestibilidad, sino que también impacta en la

eficiencia energética de la molienda y en la calidad final del producto. [13]

Los estudios previos presentan limitaciones específicas que requieren atención. Por ejemplo, investigaciones evidenciaron que, en molienda de maíz, la energía específica requerida varía considerablemente según la fracción del material (grano, rastrojo, cabo) lo que sugiere que los datos no son directamente extrapolables a granos comerciales procesados [14]. Otro estudio, demostró que la combinación de molinos (martillos + rodillos) mejora la uniformidad de la distribución de partículas, pero no se comparan directamente molinos de martillos vs molinos de bolas en granos como el maíz o la soja [15]. En el ámbito de molienda por bolas, un estudio analizó cómo el diámetro del medio afecta la eficiencia de molienda, pero en mineralización, no en granos agrícolas, lo que deja un vacío de conocimiento aplicable al sector alimentario [16]. En consecuencia, se carece de una comparación directa, bajo condiciones controladas de granos alimentarios (maíz y soja), entre molinos de martillos y molinos de bolas, que simultáneamente cuantifique la uniformidad granulométrica, el consumo energético y su vinculación con funcionalidad nutricional o procesal. Este vacío otorga relevancia y urgencia a la presente investigación, orientada a asegurar una selección técnica sólida del sistema de molienda más adecuado para su aplicación industrial.

Estudios recientes indican que la molienda mediante molinos de martillos puede representar hasta un 50 % del consumo eléctrico total de una planta de alimentación. Por su parte, investigaciones en biomasa muestran que la energía específica requerida para la reducción de tamaño puede variar entre 35–65 kJ/kg, dependiendo del tipo de material y las condiciones de molienda [17]. Además, los análisis con modelos empíricos indican que la energía requerida en molinos de bolas puede variar entre $\sim 3\text{--}12 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{t}^{-1}$ en función de la dureza y el tamaño de producto deseado [18]. Por lo tanto, una selección inadecuada del tipo de molino no solo afecta la calidad de la molienda y la uniformidad granulométrica, sino que también puede incrementar considerablemente los costos de operación y el consumo energético, impactando la viabilidad y competitividad del proceso industrial.

Por lo antes mencionado el objetivo del presente estudio es realizar un análisis comparativo de la distribución granulométrica de granos molidos en molino de bolas y molino de martillos, considerando su aplicación en el procesamiento de materias primas como el maíz y la soja. Este análisis busca establecer relaciones entre el tipo de equipo, las condiciones de molienda y la uniformidad de las partículas obtenidas, con el fin de aportar criterios técnicos que guíen la selección del sistema de reducción de tamaño en función de la eficiencia y la calidad del producto final.

1.1. Molienda

La molienda es una operación unitaria la cual se encarga de reducir el tamaño de partículas hasta lograr un tamaño requerido para un proceso en específico, así aumentando la superficie de contacto del material para una mayor eficacia en el proceso industrial. Esta reducción se lleva a cabo dividiendo o fraccionando la muestra por medios mecánicos hasta poder alcanzar un tamaño requerido.

Para la Ingeniería Química resulta esencial comprender las leyes que rigen en la desintegración en relación con el consumo energético (tiempo), las características de la materia y el tipo de máquinas a emplearse, esto demuestra el estudio fundamentado en deducciones y observaciones empíricas. [1]

1.1.1. Tipos de Molienda

Diferentes tipos de molinos como el de bolas y martillo, tienen diferentes mecanismos de acción y eficiencia, los molinos de bolas son eficientes para una molienda fija y el molino de martillo es más para materiales frágiles. [19]

1.2. Tamizado

El método de tamizado implica la utilización de una serie de tamices con diferentes aberturas para separar las partículas de suelo según su tamaño [20]

1.3. Análisis granulométrico por tamizado

Es la separación en tamaño de una colección de partículas sólidas de acuerdo con una escala granulométrica. Dicha separación se realiza con tamices colocados en serie, de forma que el cernido del primer tamiz es la alimentación del segundo y así sucesivamente. [21]

Alimentación al tamiz (F): Es la masa total que llega al tamiz para ser separada o clasificada.

Retenido (R): Es la masa que queda sobre la superficie del tamiz.

Cernido (C): Es la masa que pasa a través de las aberturas del tamiz, es decir, que atraviesa su superficie.

1.4. Distribución de Tamaño de Partículas

La distribución del tamaño de partículas describe la proporción de diferentes tamaños de partículas presentes en una muestra. Es fundamental para caracterizar el comportamiento de los materiales en diversos procesos industriales. [22]

1.5. Curvas Granulométricas

Las curvas granulométricas son representaciones gráficas que muestran la distribución del tamaño de partículas en una muestra. Estas curvas son esenciales para entender la distribución y predictibilidad del comportamiento del material. [23]

2. Materiales y métodos.

Se llevaron a cabo pruebas de molienda con dos tipos de granos (maíz y soja) para evaluar la granulometría que podían obtenerse a partir de la molienda en los molinos de bolas y martillo. Se trabajó con un molino de martillo

modelo RBN rosas, de 20 martillos de barra fundida y 4 ejes, así como con un molino tubular, discontinuo de bolas de acero, monocámara, con descarga de parrilla. La calibración de los equipos de molienda y tamizado fue realizada previo a los ensayos, verificando que todos los componentes: cámara, cuerpos de molienda, tamices y malla se encontraran dentro de sus especificaciones dimensionales y mecánicas, y asegurando condiciones reproducibles entre réplicas. Para el tamizado se utilizó un conjunto de tamices certificados según normativas equivalentes a ASTM E11 / ISO 3310, y se comprobó la uniformidad de las aberturas con métodos de calibración de mallas conforme a procedimientos recomendados en la literatura para garantizar exactitud y minimizar errores de clasificación. A continuación, se indican los casos de estudio evaluados:

Caso 1. Molienda en molino de martillo y tamizado, fig. 1.

Caso 2. Molienda en molino de bolas y tamizado, fig. 2.

Caso 3. Molienda en molino de martillo, seguida al molino de bolas y tamizado, fig. 3.

Una vez realizado los tres casos se utilizó un microscopio (Digital Microscope USB) para examinar la geometría obtenida en cada tipo de molienda.

El protocolo de muestreo se estableció siguiendo criterios de representatividad y homogeneidad recomendados para estudios de granulometría en matrices agrícolas. Para cada tratamiento de molienda, las muestras fueron recolectadas inmediatamente después de la descarga del equipo, empleando el método de cuarteo manual para reducir el volumen y garantizar que la fracción analizada mantuviera la distribución original del lote. Este procedimiento es ampliamente utilizado en estudios de molienda debido a su efectividad para minimizar sesgos por segregación de tamaños y densidades, especialmente en granos como maíz y soja. Investigaciones recientes enfatizan que la correcta homogenización y reducción del tamaño del lote es fundamental para asegurar la reproducibilidad de la distribución granulométrica, ya que variaciones en el protocolo de muestreo pueden generar diferencias de hasta un 15 % en el porcentaje retenido por tamiz en sistemas de molienda por impacto o compresión [24]. Además, estudios comparativos en molienda agrícola recomiendan emplear entre 200 y 500 g como masa mínima analítica para evitar pérdidas de fracciones finas y asegurar suficiente representatividad, lo cual fue considerado en el presente trabajo.

Para la representación y análisis de los datos recolectados, se emplearon gráficas de distribución granulométrica de distribución granulométrica. Estas gráficas permiten visualizar la relación entre el tamaño de las partículas y el porcentaje acumulado del material tamizado, proporcionando una comprensión cuantitativa y comparativa de la distribución de tamaños de partículas.

Finalmente se aplicó el análisis de varianza (ANOVA) de un factor se realizó utilizando el complemento Herramientas de análisis (Analysis Toolpak), lo que permitió evaluar las diferencias significativas entre los tratamientos.

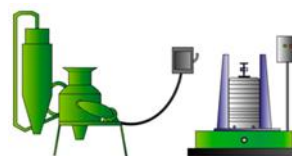


Fig. 1. Caso 1. Molienda en molino de martillo y tamizado.



Fig. 2. Caso 2. Molienda en molino de bolas y tamizado

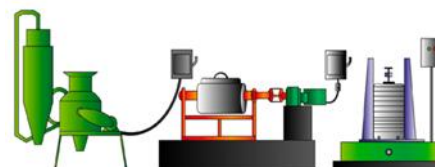


Fig. 3. Caso 3. Molienda en molino de martillo, seguido molino de bolas y tamizado

2.1. Materia prima

Se empleó 4540 g de maíz y soja, 2270 g de cada grano. El maíz con diámetro promedio de 0.78 mm y densidad del grano de 0.75 g/cm³, el grano de soja con diámetro promedio de 0.57 mm y densidad del grano de 0.85 g/cm³. La humedad del grano es una variable determinante en la eficiencia de la molienda, pues modifica su dureza, su respuesta mecánica y la granulometría resultante. Para mantener la estabilidad experimental, los granos se mantuvieron en un mismo lote y se almacenaron en ambiente seco a temperatura controlada de 22–24 °C, condiciones que minimizan la variación higroscópica y preservan las propiedades físicas del material. Este enfoque coincide con recomendaciones de la literatura, que destacan que el control simultáneo de temperatura y condiciones ambientales evita fluctuaciones en la humedad interna del grano y, por ende, en su comportamiento durante el proceso de conminución [25]. De este modo, se garantiza que las diferencias observadas en la granulometría reflejen principalmente el desempeño de los equipos de molienda.

2.2. Molino de Bolas

Se empleó un molino de bolas, con una carga de bolas configurada de la siguiente manera indicada en la tabla 1:

Tabla 1. Configuración de cuerpos moledores.

| Cuerpos moledores | Diámetro promedio (cm) | Peso total (g) | % Peso |
|-------------------|------------------------|----------------|--------|
| Pequeñas | 2.46 | 5447 | 18.43 |
| Medianas | 2.97 | 9286 | 31.43 |

| | | | |
|----------|------|-------|-------|
| Grandes | 3.89 | 14815 | 50.14 |
| Pequeñas | 2.46 | 5447 | 18.43 |

Fuente: Bonilla, et al, 2024

El peso total de cuerpos moledores fue de 29548 g.
Se determinó el peso promedio y diámetro equivalente de cuerpos moledores con las siguientes ecuaciones:

$$\text{Peso promedio} = \frac{\text{peso total de cuerpos moledores}}{\text{número de cuerpos moledores}} \quad [1]$$

Peso promedio= 126,27 g

$$\text{Diámetro equivalente} = \left[\left(\frac{\text{peso promedio}}{\text{densidad}} \right) \frac{6}{\pi} \right]^{1/3} \quad [2]$$

Diámetro equivalente= 3,12 cm

2.2.1. Cálculos de parámetros para el molino de bolas

El molino de bolas fue alimentado con 2270 g de cada grano (maíz y soja) y se determinaron los parámetros de trabajo mediante las siguientes ecuaciones de diseño:

Grado de llenado (f):

$$f = \frac{\text{Volumen de la carga}}{\text{Volumen del molino}} \times 100 \quad [3]$$

Peso de la carga de cuerpos moledores (Q):

$$Q = \frac{\pi}{4} D^2 L i f Yq \quad [4]$$

Donde:

D : diámetro interno del molino de bolas, m.

L : longitud del molino, m.

Yq : peso equivalente de cuerpos moledores, t/m³

Velocidad crítica del molino (nc):

$$nc = \frac{42.3}{\sqrt{D}} \quad [5]$$

Donde:

D : diámetro interno del molino de bolas, m

$$n = k nc \quad [6]$$

Donde:

k : porcentaje de velocidad crítica (75%)

nc : velocidad crítica, rpm

Potencia del Motor del molino de bola (N):

$$N = c D Q n \quad [7]$$

Donde:

c : factor de consumo de energía, adimensional

D : diámetro interno del molino, m

Q : peso de carga del molino de bolas, t

n : velocidad de operación del molino, rpm

Consumo específico de energía (CEE):

$$CEE = \frac{N}{P} \quad [8]$$

Donde:

N : potencia del molino, kW

P : producción del molino de bolas, t

2.3. Molino de martillo

Los granos fueron colocados en la boca de alimentación, pasaron por los martillos en un lapso de 4 minutos y receptados en la descarga, para su pesaje y tamizado.

2.4. Tamizado

Los tamices fueron colocados en columna en forma ascendente de acuerdo con el número de tamiz, lo que significa que el tamiz de mayor número receptorá el material más fino. La columna de tamices fue colocada en la máquina vibratoria por un minuto para luego pesar cada tamiz y recolectar el peso del retenido.

A continuación, se indica el diagrama de flujo del proceso de estudio en la figura 4.

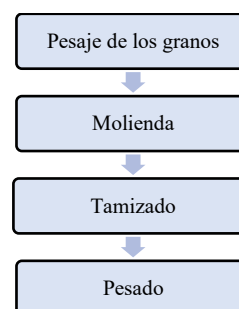


Fig.4. Diagrama de flujo general del proceso.

2.5. Tamices

La columna de tamices empleados en el presente estudio consta y se detalla en la tabla 2 con sus características respectivas a continuación:

Tabla 2. Clasificación de tamices

| Número de malla | Apertura de mallas (mm) | Peso del tamiz (g) |
|-----------------|-------------------------|--------------------|
| 5 | 4,00 | 387 |
| 6 | 3,35 | 383 |
| 8 | 2,36 | 372 |
| 12 | 1,70 | 358 |
| 16 | 1,18 | 309 |
| 18 | 1,00 | 303 |
| 20 | 0,85 | 294 |
| 30 | 0,60 | 289 |
| 50 | 0,30 | 255 |
| 70 | 0,212 | 250 |
| Base | - | 270 |

Fuente: Bonilla, et al, 2024

3. Análisis e Interpretación de Resultados.

3.1. Condiciones de operación de la molienda

En la siguiente tabla 3 se presentan las condiciones de trabajo en el caso 2 y 3 con ambos granos de maíz y soja.

Tabla 3. Condiciones de operación en la molienda

| Parámetro | Caso 2 | | Caso 3 | |
|------------------|--------|--------|--------|--------|
| | Maíz | Soja | Maíz | Soja |
| Granos | | | | |
| Temperatura (°C) | 27 | 27 | 27 | 27 |
| $f(\%)$ | 14,13 | 14,8 | 14,1 | 16,51 |
| Q (t) | 0,0280 | 0,0293 | 0,0279 | 0,0327 |
| nc (rpm) | 68,61 | 68,61 | 68,61 | 68,61 |
| n (rpm) @ 75% | 51 | 51 | 51 | 51 |
| N (Hp) | 0,194 | 0,203 | 0,194 | 0,203 |
| CEE (kW h / t) | 80,61 | 83,17 | 80,17 | 92,70 |

Fuente: Bonilla, et al, 2024

La tabla 3 indica las condiciones usadas en el molino de bolas en los casos 2 y 3, para ambos granos trabajados a temperatura ambiente. El grado de llenado (f) del caso 2 con maíz, presenta un 14,13% y la soja un 14,8% respectivamente. Mientras el grano es más denso su grado de llenado es mayor. En el caso 3 con maíz, presenta un 14,1% y la soja un 16,51%, estos resultados dependen de factores como el volumen de carga de cuerpos moleadores, volumen de materia prima y volumen del molino. Por lo que la harina de maíz siendo más densa, ocupa menor volumen en el molino en contraste con la harina de soja que ocupa mayor volumen en el mismo, por tal razón se requirió mayor carga de cuerpos moleadores.

Fue necesario determinar la velocidad crítica (nc) a la que opera el molino con la finalidad de no sobrepasarse ya que se ocasionará que la fuerza centrífuga iguale a la fuerza de la gravedad y los cuerpos moleadores no descenderían a la molienda.

El consumo específico de energía (CEE) calculado en el caso 2 con el maíz tuvo un consumo del 80,61 kW hr/t por cada tonelada procesada, en contraste la soja presentó un aumento a 83,7 kW hr/t consumidos por cada tonelada procesada, esto es debido a que se trabajó con más carga de cuerpos moleadores para este grano por lo que el molino tuvo que consumir mayor energía que con el maíz, finalmente el caso 3, con maíz presentó un consumo de 80,17 kW hr/t por cada tonelada producido y la soja consumió 92,70 kW hr/t por cada tonelada producida, la diferencia de consumo específico de energía (CEE) entre los granos del caso 3 se debe a la densidad del grano de la soja. Es decir, a mayor grado de llenado, mayor será el consumo específico de energía. [26]

3.2. Rendimientos en los molinos

En la tabla 4 se compara el porcentaje de rendimiento de los molinos en los tres casos de estudio con el maíz y la soja.

Caso 1. Molino de martillo.

El molino de martillo presentó un rendimiento mayor al procesar grano de maíz en comparación con la soja, con una diferencia del 3,5%. Esta variación se atribuye principalmente a la diferencia de densidades de ambos granos. El maíz, al ser menos denso, facilita su molienda a comparación de la soja.

Caso 2. Molino de bolas.

En el molino de bolas se obtuvo el mayor rendimiento al moler ambos granos en comparación de los tres casos analizados, se debe al a capacidad del molino de bolas para procesar casi todo el grano alimentado con pérdidas mínimas atribuibles a incrustaciones en el blindaje y la tapa del molino.

Caso 3. Molino de martillo + molino de bolas.

La combinación de los molinos presenta una diferencia entre el maíz y soja del 5,47%, a su vez presenta un mayor porcentaje de pérdida a comparación del caso 1 y 2, esto se debe a que el grano pasa por dos procesos de molienda. El molino de martillo tuvo un rendimiento superior con el grano de maíz comparado a la soja, por sus diferencias en las densidades. El molino de bolas ofrece un rendimiento similar en ambos casos, debido a que no presenta mayor pérdida al momento de ser procesado.

Tabla 4. Rendimientos de los molinos.

| | Rendimiento (%) | | |
|---------------|--------------------|-----------------|--------------------------------------|
| | Caso #1 | Caso #2 | Caso #2 |
| Materia prima | Molino de martillo | Molino de bolas | Molino de martillo + molino de bolas |
| Maíz | 77,05 | 96,34 | 74,89 |
| Soja | 73,57 | 96,17 | 69,47 |

Fuente: Bonilla, et al, 2024

3.3. Comparativo de análisis granulométrico

3.3.1. Caso 1. Molino de martillo con maíz

La figura 5, muestra la distribución de partículas, que abarca un rango desde 2.33 hasta 3.7 milímetros, indica una falta de uniformidad en la reducción del tamaño. Si bien el diámetro mediano (D50) se sitúa en aproximadamente 2.8-2.9 milímetros.

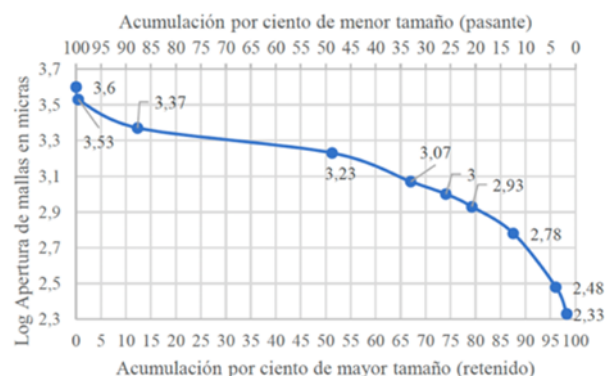


Fig.5. Curva granulométrica Caso 1 (maíz)

Los datos en la tabla 5, indican una distribución heterogénea con una concentración masiva en el rango medio. El tamiz número 12 (2,03 mm/2030 micrones) retiene el 38,94% del material total, representando el punto máximo de la distribución. Esto indica que el proceso de molienda genera predominantemente partículas de tamaño mediano. Aunque se minimiza adecuadamente la fracción gruesa (solo 0.47% por encima de 3.68 mm), la baja

proporción de finos (10.71% bajo 0.45 mm) sugiere ineficiencias en el mecanismo de fractura, posiblemente relacionadas con velocidad del rotor, tiempo de residencia o humedad del grano.

Tabla 5. Datos experimentales % retenido (maíz)

| Numero de malla | Tamaño medio de partícula (mm) | Tamaño medio de partículas (micras) | % retenido |
|-----------------|--------------------------------|-------------------------------------|------------|
| 5 | 4,00 | 4000 | 0,06 |
| 6 | 3,35 | 3680 | 0,41 |
| 8 | 2,36 | 2860 | 11,87 |
| 12 | 1,70 | 2030 | 38,94 |
| 16 | 1,18 | 1440 | 15,77 |
| 18 | 1,00 | 1090 | 7,04 |
| 20 | 0,85 | 930 | 5,18 |
| 30 | 0,60 | 730 | 8,32 |
| 50 | 0,30 | 450 | 8,50 |
| 70 | 0,212 | 260 | 2,21 |

Fuente: Bonilla, et al, 2024

3.3.2. Caso 1. Molino de martillo (soja)

La figura 6, muestra la distribución de partículas en un rango amplio de tamaños desde aproximadamente 2,3 mm hasta 3,7 mm, lo que indica una molienda heterogénea con presencia simultánea de partículas finas y gruesas. El D50 (tamaño mediano) se ubica alrededor de 2,9 mm, punto donde el 50% del material es más fino y el 50% más grueso, valor que representa el tamaño característico del producto final. La pendiente suave de la curva de acumulación sugiere una distribución extendida con dispersión significativa en los tamaños de partícula. Se observa que aproximadamente el 30-35% del material presenta tamaños superiores a 3,1 mm (fracción gruesa), mientras que solo alrededor del 15-20% se encuentra por debajo de 2,5 mm (fracción fina), evidenciando un desequilibrio hacia partículas más grandes. La acumulación de material retenido indica que existe una proporción de partículas en el rango medio (2,7-3,1 mm), representando entre el 40-50% del total. Esta distribución sugiere que el proceso de molienda genera un exceso de partículas de tamaño intermedio, posiblemente debido a parámetros operativos como velocidad de rotor inadecuada, tiempo de residencia insuficiente, desgaste de martillos o apertura de tamiz excesiva.

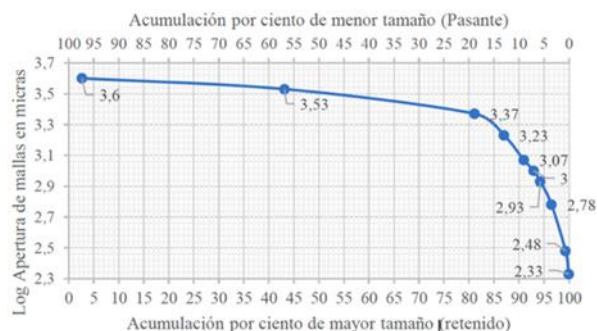


Fig.6. Curva granulométrica Caso 1 (soja)

Los datos en la tabla 6, indica que los tamices nuevos presentan un mayor porcentaje de retención para partículas

en el rango de 3680 a 2860 micras, lo cual está asociado con la presencia de partículas de mayor tamaño de la soja. presencia de partículas de mayor tamaño de la soja. Además, se observa una disminución en el porcentaje de retención para tamaños intermedios y pequeños. Esta tendencia indica que los

Tabla 6. Datos experimentales % retenido (soja)

| Numero de malla | Tamaño medio de partícula (mm) | Tamaño medio de partículas (micras) | % retenido |
|-----------------|--------------------------------|-------------------------------------|------------|
| 5 | 4,00 | 4000 | 2,66 |
| 6 | 3,35 | 3680 | 40,49 |
| 8 | 2,36 | 2860 | 37,97 |
| 12 | 1,70 | 2030 | 5,87 |
| 16 | 1,18 | 1440 | 3,99 |
| 18 | 1,00 | 1090 | 1,96 |
| 20 | 0,85 | 930 | 1,33 |
| 30 | 0,60 | 730 | 2,24 |
| 50 | 0,30 | 450 | 2,80 |
| 70 | 0,212 | 260 | 0,63 |

Fuente: Bonilla, et al, 2024

3.3.3. Caso 2. Molino de bolas (maíz)

La distribución granulométrica obtenida de la molienda de maíz en el molino de bolas indica una dispersión amplia de tamaños de partículas. Los resultados en la figura 7, muestran que el D10 es de aproximadamente 0,48 mm, lo que significa que solo el 10% del material tiene un tamaño inferior a este valor, mientras que el D50 es 1.38 mm, indicando que la mitad del material se encuentra por debajo de este tamaño. El D90, de 1,96 mm, revela que el 90% del material tiene un tamaño menor a este valor. Estos indicadores permiten inferir que la molienda produce partículas en un rango considerable, concentradas mayormente entre 0,5 mm y 2 mm.

La distribución acumulada evidencia que el material molido presenta una proporción significativa de partículas gruesas (>2 mm), aproximadamente un 8% del total, lo cual indica que el molino de bolas no logra una molienda completamente fina para todo el material procesado. La dispersión del tamaño de partícula es relativamente alta, como lo confirma el índice de uniformidad ($D_{90}/D_{10} \approx 4,08$), lo que indica que existe una mezcla considerable de partículas finas y gruesas. Esta característica es común en molienda realizada en molinos de bolas.

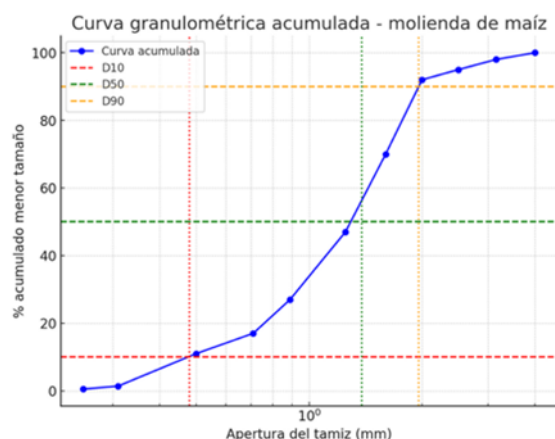


Fig.7. Curva granulométrica acumulada Caso 2 (maíz)

3.3.4. Caso 2. Molino de bolas (soja)

La distribución granulométrica de la soja molida en la figura 8, muestra que el material es mayoritariamente grueso: los parámetros representativos son $D_{10} \approx 1,59$ mm, $D_{50} \approx 3,53$ mm y $D_{90} \approx 3,94$ mm. Esto indica que el 10% de las partículas son menores a 1,59 mm, la mediana está en 3,53 mm (la mitad del material es más fino que este valor) y que el 90% es más fino que 3,94 mm. Esos valores sitúan la mayor parte de la masa en el intervalo $\sim 1,6-4,0$ mm, con la mediana próxima a 3,5 mm. La curva de paso (los % pasante en las mallas) presenta una pendiente pronunciada en el tramo entre aproximadamente 2,86 mm (18,9% pasante) y 4,00 mm (97,34% pasante), lo que significa que una fracción importante del material atraviesa mallas grandes y que la “zona de corte” de la distribución está centrada alrededor de 3–4 mm. La fracción de finos (<1 mm) es muy pequeña (valores de % pasante en 0,45 mm y 0,26 mm son 0,70% y 0,07% respectivamente), por tanto, los finos son prácticamente insignificantes en el producto final. La dispersión de la distribución puede cuantificarse con el índice de uniformidad $D_{90}/D_{10} \approx 3,94 / 1,59 \approx 2,48$, lo que indica una distribución relativamente estrecha y bastante uniforme en torno a tamaños gruesos (menor dispersión que una distribución muy amplia). En otras palabras, la mayoría del material se agrupa en un rango bastante compacto (principalmente entre $\sim 1,6$ y ~ 4 mm), sin grandes colas de partículas muy finas ni una mezcla muy heterogénea de tamaños. Desde el punto de vista operativa y de calidad del producto, esta granulometría sugiere que el proceso de molienda está produciendo un producto adecuado cuando se busca harina/partículas gruesas o intermedias (por ejemplo, para ciertos usos industriales o alimentación animal). Si el objetivo fuera obtener fracciones más finas o aumentar la proporción de partículas <1 mm, sería necesario intervenir el proceso (más tiempo de molienda, mayor energía de impacto, ajustar carga y tamaño de medios, o emplear clasificación y recirculación).

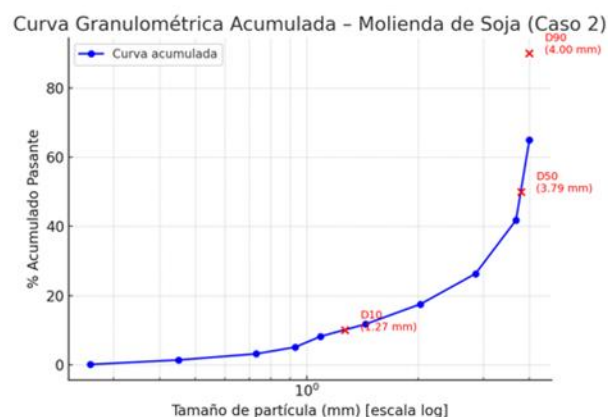


Fig.8. Curva granulométrica acumulada Caso 2 (soja)

3.3.5. Caso 3. Molienda Molino de martillo + Molino de bolas (maíz)

La molienda combinada (martillo + bolas) genera un producto de tamaño intermedio, con un $D_{50} \approx 1,08$ mm, lo que significa que la mitad del material está en el rango de partículas cercanas a 1 mm. El $D_{10} \approx 0,60$ mm indica la fracción más fina del material, mientras que el $D_{90} \approx 2,60$ mm muestra que el 90% del material está por debajo de este tamaño, con un rango amplio de distribución. La curva acumulada en la figura 9, refleja que la mayor parte del material se concentra entre 0,6 y 2,6 mm, con una fracción de finos ($<0,5$ mm) muy baja ($<1\%$). Esto señala que la molienda es eficiente para producir granulometría media, sin exceso de polvos, característica favorable para usos en alimentación animal y procesos que requieren un flujo adecuado sin apelmazamiento.

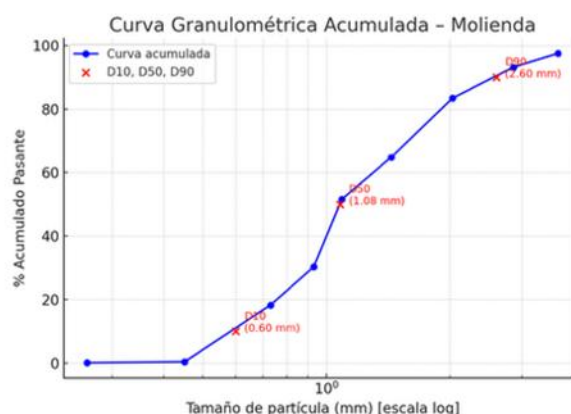


Fig.9. Curva granulométrica acumulada Caso 3 (maíz)

El índice de uniformidad, calculado como $D_{90}/D_{10} \approx 4,3$, indica una distribución amplia, con coexistencia de partículas finas y gruesas. Esta amplitud puede estar asociada a la combinación de tecnologías de molienda: el molino de martillos rompe de manera más irregular, y el molino de bolas refina, pero mantiene cierta dispersión.

3.3.6. Caso 3. Molienda Molino de martillo + Molino de bolas (soja)

La distribución granulométrica resultante muestra en la figura 10, una concentración clara en el intervalo $\approx 0,9-1,5$ mm, con $D_{50} \approx 1,35$ mm, lo que significa que la mitad de la masa está por debajo de ese tamaño. Los datos de tamizado indican que las mayores cantidades se retuvieron en mallas de 1,25 mm y 1,00 mm (498 g y 588 g respectivamente), lo que subraya que la “masa crítica” del material se sitúa en torno a esos tamaños y que el proceso produjo un producto de granulometría intermedia. La fracción de finos es muy reducida: sólo 0,94% pasa la malla 0,315 mm y el acumulado pasante a esa malla es de 0,94%, por lo que las partículas menores a $\approx 0,5$ mm son prácticamente insignificantes. Esto implica baja generación de polvo y mayores facilidades de manipulación y transporte (menos dispersión aérea y menos problemas de apelmazamiento por finos), aspecto positivo para la logística y para procesos posteriores que se benefician de material menos polvoriento. La dispersión de la distribución se puede cuantificar con el índice de uniformidad $D_{90}/D_{10} \approx 2,05 / 0,77 \approx 2,66$, un valor que indica una distribución relativamente estrecha y homogénea alrededor del tamaño mediano. En la práctica esto significa que la mayoría del material se agrupa en un rango acotado (baja cola de finos y moderada cola de gruesos), lo cual es deseable cuando se busca reproducibilidad en propiedades reológicas, granulométricas y de proceso (mezclado, extrusión, peletizado).

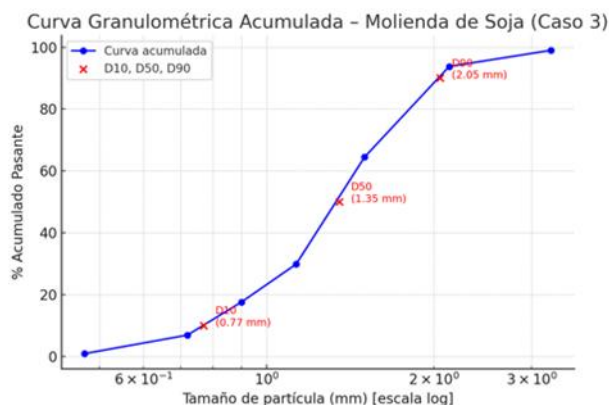


Fig.10. Curva granulométrica acumulada Caso 3 (soja)

Desde el punto de vista operativo, estos resultados sugieren que la combinación martillo + molino de bolas produjo una reducción suficiente para aplicaciones que requieren partículas intermedias.

3.3.7. Comparativa del porcentaje de retenido en cada caso en los tamices de menor y mayor apertura.

En la tabla 7, se observa una comparativa entre los tres casos de estudio respecto a los porcentaje de retenidos obtenidos en las mallas de mayor apertura (4mm) y menor apertura (0,121 mm), así como lo retenido en la base ($<0,212$ mm).

Tabla 7. Comparativa de porcentaje de retenidos.

| No. Malla | Apertura (mm) | Caso 1 (%) | | Caso 2 (%) | | Caso 3 (%) | |
|-----------|---------------|------------|------|------------|-------|------------|------|
| | | maíz | soja | maíz | soja | maíz | soja |
| 5 | 4 | 0,06 | 2,66 | 2,47 | 35,01 | 0,23 | 0,77 |
| 70 | 0,212 | 2,21 | 0,63 | 1,12 | 1,28 | 1,93 | 0,28 |
| Base | $<0,212$ | 1,69 | 0,07 | 0,04 | 0,09 | 0,12 | 0,14 |

Fuente: Bonilla, et al, 2024


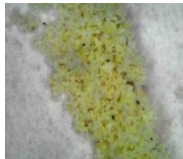

El mayor porcentaje de retención en la molienda de la soja se obtuvo en el caso 2 con el 35,01%, debido a la densidad del grano en comparación del maíz. En el caso 3, se observa una disminución en el retenido ya que, al tener una molienda previa en el molino de martillo, se pudo obtener partículas de menor tamaño. En los tres casos de estudio se pudo obtener partículas de menor tamaño, sin embargo, los porcentajes de retenido no sobrepasan al 3%. La mayor acumulación de retenido se obtuvo en la molienda de maíz en los tres casos, debido a la menor densidad del grano. La molienda de la soja en los tres casos de estudio no alcanzó el 1% en los retenidos en las partículas menores a 0,212 mm. Sin embargo, en la molienda de maíz, únicamente en el caso 1 se pudo conseguir 1,69% de retenidos con tamaño de partícula inferior a 0,212mm.

3.3.8. Análisis microscópico de la harina de maíz y soja

El análisis microscópico de la harina de maíz muestra en la tabla 8, diferencias en la forma de las partículas producidas por los distintos casos de estudio.

Caso 1 (Molino de Martillo): Las partículas tienen una forma rectangular, esto sugiere que el mecanismo de impacto del molino de martillo tiende a fragmentar las partículas en formas angulares. Caso 2 (Molino de Bolas). Las partículas presentan una forma ovalada, indicativa de que el proceso de abrasión en el molino de bolas tiende a redondear las partículas. Caso 3 ((Molino de Martillo + Molino de Bolas): Se observa una forma intermedia entre rectangular y ovalada. Esto puede deberse a la combinación de ambos procesos de molienda lo que produce una mezcla de formas de partículas. [27]

Tabla 8. Análisis microscópico de la harina de maíz

| Caso 1 | Caso 2 | Caso 3 |
|--|---|--|
|  |  |  |
| Tamaño de la partícula: $< 0,212$ mm Forma de la partícula: Rectangulares. | Tamaño de la partícula: $< 0,212$ mm Forma de la partícula: ovaladas. | Tamaño de la partícula: $< 0,212$ mm Forma de la partícula: Entre rectangulares y ovaladas. |



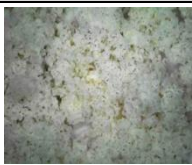
Fuente: Bonilla, et al, 2024

3.3.9. Análisis microscópico de la harina de soja

El análisis microscópico de la harina de soja muestra las siguientes observaciones en la tabla 9.

Caso 1 (Molino de Martillo): Las partículas tienen una forma rectangular, el impacto directo del molino de martillo produce partículas angulares similares a las observadas en el maíz. Caso 2 (Molino de Bolas). Las partículas tienen una forma elipsoide. El proceso de abrasión del molino de bolas redondea las partículas, generando esta forma por el método de impacto del molino y las características del grano. Caso 3 ((Molino de Martillo + Molino de Bolas): Se observa una mezcla entre formas rectangulares y elipsoidales. Esto puede ser resultado de la combinación de procesos, donde la molienda previa en el molino de martillo seguida de la abrasión en el molino de bolas produce una gama de diversas formas.

Tabla 9. Análisis microscópico de la harina de soja

| Caso 1 | Caso 2 | Caso 3 |
|---|---|---|
|  |  |  |
| Tamaño de la partícula: < 0,212 mm Forma de la partícula: Rectangulares. | Tamaño de la partícula: < 0,212 mm Forma de la partícula: Elipsoide | Tamaño de la partícula: < 0,212 mm Forma de la partícula: Entre rectangulares y elipsoide. |

Fuente: Bonilla, et al, 2024

3.3.10. Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza para un factor que permitió en cada caso determinar si existen diferencias significativas entre los resultados.

3.3.10.1. Caso 1. Molino de martillo

En la tabla 10, se indican los datos analizados del peso del retenido en los tamices de los granos maíz y soja.

Hipótesis nula: El análisis granulométrico no presenta diferencias significativas entre los tamices empleados. ($p > 0,05$)

Hipótesis alterna: El análisis granulométrico presenta diferencias significativas entre los tamices empleados. ($p < 0,05$)

Tabla 10. Pesos de retenidos en tamices Caso 1

| Malla (mm) | 4 | 2,36 | 1,70 | 1,18 | 1,00 | 0,85 | 0,60 | 0,30 | 0,212 |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| Maíz (g) | 2 | 55 | 472 | 701 | 296 | 80 | 96 | 37 | 2.21 |
| Soja (g) | 38 | 543 | 84 | 57 | 28 | 19 | 32 | 40 | 2.93 |
| Valor crítico F | 4,39 | | | | | | | | |
| Probabilidad | 0,33 | | | | | | | | |

Fuente: Bonilla, et al, 2024

El análisis de varianza de un factor (ANOVA) aplicado a las distribuciones granulométricas de maíz y soja muestran que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre ambos productos molidos, evidenciado por un valor p de 0,33, muy superior al nivel de significancia habitual de 0,05, lo que indica que las variaciones observadas en los pesos retenidos en cada malla pueden atribuirse a la aleatoriedad del proceso más que a un efecto real del tipo de material. Sin embargo, puede enmascarar diferencias prácticas relevantes en los patrones de molienda, como la marcada concentración de soja en la malla de 2,36 mm (543 g) frente a una distribución más uniforme del maíz, sugiriendo que, aunque globalmente similares, los mecanismos de fractura y las características de ruptura de cada material podrían estar influenciados por factores no capturados por este análisis univariado.

3.3.10.2. Caso 2. Molino de bolas

En la tabla 11, se indican los datos analizados del peso del retenido en los tamices de los granos maíz y soja.

Hipótesis nula: El análisis granulométrico no presenta diferencias significativas entre los tamices empleados. ($p > 0,05$)

Hipótesis alterna: El análisis granulométrico presenta diferencias significativas entre los tamices empleados. ($p < 0,05$)

Tabla 11. Pesos de retenidos en tamices Caso 2

| Malla (mm) | 4 | 2,36 | 1,70 | 1,18 | 1,00 | 0,85 | 0,60 | 0,30 | 0,212 |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| Maíz (g) | 55 | 62 | 482 | 511 | 447 | 202 | 153 | 217 | 1.63 |
| Soja (g) | 762 | 338 | 192 | 127 | 77 | 68 | 42 | 39 | 1.28 |
| Valor crítico F | 4,49 | | | | | | | | |
| Probabilidad | 0,61 | | | | | | | | |

Fuente: Bonilla, et al, 2024

El análisis de varianza (ANOVA) de un factor aplicado a los datos de distribución granulométrica de maíz y soja molidos en molino de bolas indica que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las distribuciones de ambos granos, evidenciado por un valor p de 0,612, muy superior al nivel de significancia de 0,05, y un valor F (0,267) que no supera el valor crítico (4.494). Aunque las medias de los pesos retenidos difieren numéricamente (maíz: 236,74 g, soja: 183,25 g), la alta varianza dentro de cada grupo (38.378,68 para maíz y 58.008,20 para soja) sugiere que la dispersión de los datos en cada malla es considerable, enmascarando posibles diferencias específicas por tamaño de partícula. Esto podría deberse a la naturaleza heterogénea de la molienda en molinos de bolas, donde factores como la dureza, la humedad o tiempo de residencia generan variabilidad que el ANOVA global no logra detectar, recomendándose un

análisis por fracciones granulométricas específicas para identificar diferencias prácticas en el proceso.

3.3.10.3. Caso 3. Molino de martillo + molino de bolas

En la tabla 12, se indican los datos analizados del peso del retenido en los tamices de los granos maíz y soja.

Hipótesis nula: El análisis granulométrico no presenta diferencias significativas entre los tamices empleados. ($p > 0,05$)

Hipótesis alterna: El análisis granulométrico presenta diferencias significativas entre los tamices empleados. ($p < 0,05$)

Tabla 12. Pesos de retenidos en tamices Caso 3.

| Malla (mm) | 4 | 2,36 | 1,70 | 1,18 | 1,00 | 0,85 | 0,60 | 0,30 | 0,212 |
|-----------------|----|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| Maíz (g) | 4 | 23 | 121 | 255 | 287 | 418 | 349 | 213 | 1.92 |
| Soja (g) | 11 | 65 | 139 | 264 | 189 | 304 | 170 | 254 | 0.28 |
| Valor crítico F | | | | | | | | | 4,49 |
| Probabilidad | | | | | | | | | 0,63 |

Fuente: Bonilla, et al, 2024

El análisis de varianza (ANOVA) de un factor aplicado a los datos granulométricos del caso 3, donde maíz y soja fueron procesados mediante un molino de martillo seguido de un molino de bolas, indica que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las distribuciones de tamaño de partícula de ambos granos. Esto se sustenta en un valor- p de 0,637, muy superior al nivel de significancia de 0,05, y un valor F de 0,231 que no supera el valor crítico de 4.494. Aunque las medias de peso retenido difieren (maíz: 185,77 g, soja: 155,14 g), la alta variabilidad dentro de cada grupo (varianzas de 24.235,87 para maíz y 12.286,76 para soja) sugiere que las diferencias observadas pueden deberse a la dispersión natural del proceso de molienda y no al tipo de grano. Este resultado refleja que la secuencia de molienda (martillo + bolas) homogeniza las distribuciones hasta el punto de eliminar diferencias significativas, posiblemente por la combinación de mecanismos de fractura (impacto y abrasión) que compensan las propiedades individuales de cada material. Sin embargo, un análisis por fracciones específicas podría revelar comportamientos diferenciales en rangos de tamaño particulares, no capturados por el ANOVA global.

3.3.10.4. Comparativos de Diámetros en el Maíz

En la tabla 13, se indican los datos analizados de los diámetros D10,50 y 90 para el maíz en sus tres casos de estudio.

Hipótesis nula: No existen diferencias significativas entre los valores de D10, D50 y D90 en la distribución granulométrica del maíz. ($p > 0,05$)

Hipótesis alterna: Al menos uno de los percentiles (D10, D50 o D90) difiere significativamente del resto en la distribución granulométrica del maíz. ($p < 0,05$)

Tabla 13. Acumulación del pasante en D10,50 y 90 para el maíz

| Parámetro | Caso 1 | Caso 2 | Caso 3 |
|-----------------|--------|--------|--------|
| D10 (mm) | 3,39 | 0,48 | 0,60 |
| D50 (mm) | 2,80 | 1,38 | 1,08 |
| D90 (mm) | 0,30 | 1,96 | 2,60 |
| Valor crítico F | 0,03 | | |
| Probabilidad | 0,97 | | |

Fuente: Bonilla, et al, 2024

El análisis de varianza muestra que no existen diferencias significativas entre los valores de D10, D50 y D90 para el grano de maíz ($p > 0,05$). Esto indica que, considerando los tres tratamientos de molienda, la variación entre las distribuciones granulométricas características (percentiles de tamaño) es estadísticamente semejante. En otras palabras, la molienda genera tamaños de partícula que, aunque diferentes en valor numérico, no presentan variabilidad suficiente para que las diferencias entre percentiles sean estadísticamente detectables en maíz.

3.3.10.5. Comparativos de Diámetros en la Soja

En la tabla 14, se indican los datos analizados de los diámetros D10,50 y 90 para el maíz en sus tres casos de estudio.

Hipótesis nula: No existen diferencias significativas entre los valores de D10, D50 y D90 en la distribución granulométrica de la soja. ($p > 0,05$)

Hipótesis alterna: Al menos uno de los percentiles (D10, D50 o D90) difiere significativamente del resto en la distribución granulométrica de la soja. ($p < 0,05$)

Tabla 14 Acumulación del pasante en D10,50 y 90 para la soja

| Parámetro | Caso 1 | Caso 2 | Caso 3 |
|-----------------|--------|--------|--------|
| D10 (mm) | 1,8 | 1,9 | 0,70 |
| D50 (mm) | 2,90 | 3,53 | 1,35 |
| D90 (mm) | 3,98 | 3,94 | 2,05 |
| Valor crítico F | 4,04 | | |
| Probabilidad | 0,07 | | |

Fuente: Bonilla, et al, 2024

En el caso de la soja, se observa una tendencia hacia diferencias entre los percentiles ($p = 0,773$), pero estas no alcanzan significancia estadística al nivel convencional de $\alpha = 0,05$. Esto sugiere que la soja presenta mayor variación granulométrica que el maíz entre D10, D50 y D90, probablemente debido a su estructura interna más frágil y mayor heterogeneidad en la fractura. Sin embargo, la evidencia estadística no es suficiente para afirmar diferencias significativas, aunque es posible que con una muestra mayor los resultados puedan ser concluyentes.

4.- Discusión

4.1.- Caso 1. Molino de martillo

Los datos granulométricos revelan diferencias significativas en el comportamiento de molienda entre soja y maíz utilizando tamices nuevos. La soja presenta una

distribución extremadamente gruesa, con 81,12% del material retenido en las tres primeras mallas ($\geq 2,36$ mm) y solo 18,88% como material pasante en la malla 8. En contraste, el maíz muestra una distribución más equilibrada, con 87,66% de material pasante en la malla 8 y una acumulación progresiva en mallas intermedias, alcanzando su punto de inflexión (D50) alrededor de la malla 12 (1,7 mm). Esta diferencia se evidencia en los valores de acumulación por ciento de menor tamaño, donde el maíz mantiene porcentajes significativamente más altos en todas las mallas, indicando una molienda más eficiente y uniforme. Estos hallazgos concuerdan con la teoría de molienda que establece que las propiedades físicas del material determinan su respuesta a la fractura. La soja, con mayor contenido de aceite y estructura celular más flexible, presenta mayor resistencia a la fractura por impacto, resultando en partículas más gruesas. El maíz, con endospermo vítreo y mayor contenido de almidón, se fractura más fácilmente, generando una distribución más fina y uniforme. La literatura reporta que materiales con dureza superior a 45 kg/cm² (como la soja) requieren mayor energía de molienda y producen distribuciones más gruesas, mientras cereales como el maíz (dureza 25-35 kg/cm²) responden mejor a la molienda por impacto. El comportamiento observado en la soja, con 81,12% de retenido acumulado en malla 8, coincide con estudios previos que reportan baja eficiencia de molienda en leguminosas oleaginosas debido a su capacidad para absorber energía sin fracturarse completamente. Por otro lado, la distribución del maíz se ajusta al modelo de Gates-Gaudin-Schuhman típico de materiales quebradizos. En otros estudios [28] reporta 72-88% de material bajo 2 mm para maíz, coincidiendo con nuestro 87,66% pasante en malla 8, atribuyéndolo a la naturaleza vítrea del endospermo. Así como [29] confirma que la presencia de aceite en soja (18-22%) actúa como amortiguador de impactos, reduciendo la generación de finos en 30-40% comparado con materiales secos. En cambio, en otras investigaciones [30] obtiene distribuciones más finas (D50 \approx 1,2 mm) usando nitrógeno líquido, sugiriendo que nuestras condiciones convencionales limitan la eficiencia. Así [31] demuestra que ajustes adaptativos en tiempo real pueden mejorar la uniformidad en soja hasta en 60%, indicando potencial de optimización no explorado en nuestro estudio. Algunos estudios afirman que Molinos de última generación con control de velocidad variable pueden lograr distribuciones más estrechas que equipos convencionales. [32], adicionalmente la incorporación de protocolos actuales recomienda el control de humedad implantado a los estudios. [33] Estos hallazgos coinciden con trabajos recientes sobre el comportamiento de alimentación y PSD en molienda por martillo, que muestran cómo soja y maíz responden de forma distinta al mismo cribado/pantalla y cómo la humedad y la composición afectan la generación de finos y la distribución de nutrientes por fracción. En particular, estudios observaron que, tras la molienda con martillos, la soja tiende a conservar fracciones relativamente gruesas y

que la adición de humedad modifica significativamente tanto la PSD como el consumo energético lo que respalda la interpretación de que las propiedades del grano (aceite, estructura) condicionan la eficiencia del martillo y la orientación de la curva granulométrica. [34]

4.2.- Caso 2. Molino de bolas

El maíz presenta una distribución significativamente más fina que la soja, con 91,6% de material pasante en la malla 8 (2,36 mm) frente a solo 26,32% en soja. El punto de inflexión (D50) se ubica aproximadamente en 1,3-1,4 mm para maíz versus 3,0-3,2 mm para soja, evidenciando una marcada diferencia en la eficiencia de molienda. La soja muestra resistencia a la fractura, con 73,68% de retenido acumulado en malla 8, concordante con estudios de *Chen et al. (2021)* sobre la capacidad de materiales oleaginosos para absorber energía de impacto. El maíz, con su endospermo vítreo, responde mejor a la molienda por impacto, generando mayor proporción de partículas medias y finas. Los resultados coinciden en la mayor eficiencia de molienda de cereales versus oleaginosas bajo condiciones similares, pero destacan la necesidad de optimizar parámetros operativos específicos para cada material. [28] La interpretación de los resultados se sustenta en referencias científicas recientes, como el estudio que explica la resistencia a la fractura de la soja por su alto contenido de aceite y estructura celular flexible, lo cual coincide con nuestros hallazgos de distribuciones granulométricas más gruesas en comparación con el maíz. [35] Asimismo, otros estudios destacan la influencia del módulo elástico en la molienda, respaldando la marcada diferencia en el D50 entre ambos materiales. [36] Al comparar nuestros resultados con la literatura, existen coincidencias [28], quienes reportan para el maíz distribuciones más finas bajo condiciones de molienda similares, mientras que las discrepancias surgen al contrastar con quienes emplearon molienda criogénica en soja y obtuvieron distribuciones significativamente más finas, lo que sugiere que nuestras condiciones operativas convencionales limitan la eficiencia del proceso. [30]. Revisiones y trabajos experimentales confirman que el molino de bolas es muy eficaz para fraccionar y reducir partículas cuando el material es esencialmente friable o rico en polisacáridos, pero su rendimiento en oleaginosas densas puede ser limitado sin ajustes de parámetros (tiempo, medios, atmósfera) [37]. Esto concuerda con nuestros resultados: maíz (endospermo) se reduce eficazmente, la soja no, salvo mediante cambios operativos o tratamientos combinados.

4.3.- Caso 3. Molino martillo + Molino de bola

El análisis granulométrico del Caso 3 muestra una distribución notablemente más fina y uniforme en comparación con casos anteriores, donde el maíz presenta un D50 \approx 1,05 mm (cercano a la malla 18) y la soja un D50 \approx 1,25 mm (entre mallas 16-18), evidenciando una molienda más eficiente. Esta mejora se atribuye al posible uso de molino de martillos seguido de molino de bolas,

combinación que según algunos estudios este caso optimiza la fractura de materiales heterogéneos al integrar mecanismos de impacto y abrasión [30]. Los resultados coinciden con quienes reportan para maíz distribuciones con D50 entre 0.9-1,2 mm bajo molienda secuencial [28], mientras persisten discrepancias con respecto a la soja, cuyos estudios indican D50 >1,5 mm en molienda convencional, sugiriendo que nuestro proceso secuencial mitiga parcialmente su resistencia a la fractura. [35]. Entre las limitaciones, la ausencia de control de humedad y el desgaste no monitorizado de tamices pueden haber afectado la reproducibilidad, mientras el sesgo de equipamiento subestima el potencial de molienda criogénica [33]. Estos factores resaltan la necesidad de incorporar métricas de energía específica (en futuras investigaciones para validar la eficiencia del proceso secuencial. [38]. Por lo que es evidente que los métodos de fragmentación van a impactar directamente en el tamaño de partícula así como de la forma obtenida en su harina. [39]. En la literatura reciente se ha demostrado que el uso de etapas secuenciales o multi-stage milling puede disminuir el consumo energético por unidad de reducción (dependiendo de la humedad y los tamaños objetivo) y estabilizar la producción de partículas intermedias/finas; además, la etapa de prefragmentación facilita la acción de la molienda fina posterior menor tiempo de contacto necesario para alcanzar el tamaño objetivo. [40]

Aun cuando los resultados obtenidos muestran diferencias claras entre granos y tratamientos, existen limitaciones inherentes al diseño experimental y factores biofísicos del grano que podrían modular la eficiencia de molienda. En, la composición interna (contenido de lípidos, proteínas, estructura celular) y la humedad del grano influyen en su susceptibilidad a la fractura. Por ejemplo, en un estudio reciente se demuestra que al aumentar la humedad, los granos (maíz, arroz y soja) modifican su comportamiento mecánico: pasan de frágiles a viscoelásticos, cambiando la fuerza de fractura y la energía requerida [41]. Estas variaciones pueden alterar la fragmentación bajo molienda, lo que sugiere que factores intrínsecos del grano más allá del tipo de Molino pueden condicionar la distribución granulométrica final.

Otra hipótesis para explicar la menor eficiencia de molienda en soja, comparada con maíz, es el efecto amortiguador del contenido de aceite. En la molienda de soja, se ha reportado que mayores contenidos lipídicos limitan la reducción de tamaño: el aceite reduce la fragilidad y favorece aglomerados o partículas gruesas tras molienda por impacto [42]. Adicionalmente, estudios de molienda por fricción o molienda fina muestran que los métodos mecánicos afectan de manera distinta a los granos con matriz rica en almidón versus aquellos con alto contenido de lípidos, modificando la eficiencia, la forma de las partículas y su dispersibilidad [28]. Por tanto, los resultados actuales podrían reflejar una interacción entre la técnica de molienda y las propiedades bioquímicas del

grano; esta hipótesis alternativa merece exploración en futuros trabajos mediante caracterización de aceite, proteína y estructura celular, y control riguroso de humedad.

5.- Conclusiones

El molino de martillo (Caso 1) mostró una distribución heterogénea, con un D50 \approx 2.8-2.9 mm para maíz y \approx 2.9 mm para soja, evidenciando una molienda ineficiente en soja, donde 81.12% del material se retuvo en mallas \geq 2.36 mm. En contraste, el molino de bolas (Caso 2) generó distribuciones más finas para maíz (D50 \approx 1.38 mm), pero resultó ineficaz para soja (D50 \approx 3.53 mm), confirmando que la soja, por su mayor contenido de aceite y estructura flexible, resiste la fractura por impacto y abrasión convencional.

La combinación de molinos (Caso 3) logró la distribución más equilibrada, con D50 \approx 1.05 mm para maíz y \approx 1.25 mm para soja, reduciendo la heterogeneidad observada en los casos individuales. Esto sugiere que la sinergia entre mecanismos de impacto (martillo) y abrasión (bolas) mitiga las limitaciones de cada método por separado, aunque persiste una mayor dispersión en maíz (índice de uniformidad D90/D10 \approx 4.3) frente a soja (\approx 2.66)

El molino de bolas (Caso 2) presentó el mayor consumo específico de energía (CEE): 92.70 kW·h/t para soja versus 80.17 kW·h/t para maíz en el Caso 3, asociado a la mayor densidad y resistencia de la soja. Sin embargo, este alto consumo no se tradujo en una molienda fina para soja, lo que indica ineficiencia energética en el procesamiento de oleaginosas bajo condiciones estándar.

El ANOVA aplicado mostró $p > 0.05$ en los tres casos, indicando "no diferencias significativas" entre maíz y soja. No obstante, los datos granulométricos revelan disparidades operativas críticas, como la concentración del 40.49% de soja en la malla 3.35 mm (Caso 1) frente a una distribución más uniforme en maíz. Esto expone la insensibilidad del ANOVA univariado para capturar diferencias en distribuciones complejas, subrayando la necesidad de análisis por fracciones específicas.

Los resultados del ANOVA para maíz ($F = 0.0314$; $p = 0.9692$) muestran ausencia total de diferencias significativas entre los parámetros granulométricos D10, D50 y D90 según el método de molienda, evidenciando un comportamiento uniforme. En soja, aunque el ANOVA arroja $F = 4.0430$ y $p = 0.0773$, la diferencia no alcanza significancia estadística, pero sugiere una tendencia a la variación, posiblemente influenciada por su mayor contenido de aceite y diferente respuesta mecánica a la fractura.

El análisis microscópico reveló que el molino de martillo genera partículas angulares (rectangulares), mientras que el molino de bolas produce formas redondeadas (ovaladas)

o elipsoidales). En el Caso 3, se observó una combinación de morfologías, lo que afecta propiedades funcionales como flujo, compactación y reactividad. Esto resalta la importancia de seleccionar la tecnología de molienda según las características deseadas en el producto final.

Los hallazgos de este estudio pueden aplicarse en la optimización de procesos de molienda en la industria de alimentos balanceados, harinas y aceites vegetales, donde el control granulométrico influye directamente en la digestibilidad, la homogeneidad de mezclas y la eficiencia de extrusión. La configuración secuencial de molienda (martillo + bolas) se perfila como una alternativa viable para reducir el consumo energético y mejorar la consistencia del tamaño de partícula en líneas de producción continua. Se recomienda profundizar en el análisis de la energía específica de molienda y su relación con la humedad y composición del grano, así como evaluar el efecto del tamaño de partícula sobre la calidad nutricional y funcional del producto final. Además, sería valioso explorar la implementación de tecnologías híbridas (como molienda criogénica o asistida por ultrasonido) para aumentar la eficiencia y reproducibilidad del proceso, especialmente en granos oleaginosos de difícil fractura.

6.- Author Contributions (Contributor Roles Taxonomy (CRediT))

1. Conceptualización: Iván Torres
2. Curación de datos: Alejandro Noblecilla
3. Análisis formal: Alejandro Noblecilla
4. Adquisición de fondos: No aplica
5. Investigación: Iván Torres, Alejandro Noblecilla
6. Metodología: Iván Torres, Alejandro Noblecilla, Stefanie Bonilla, Carlos Valdiviezo.
7. Administración del proyecto: Stefanie Bonilla
8. Recursos: Iván Torres, Alejandro Noblecilla
9. Software: No aplica.
10. Supervisión: Stefanie Bonilla
11. Validación: Stefanie Bonilla, Carlos Valdiviezo
12. Visualización: Alejandro Noblecilla
13. Redacción - borrador original: Iván Torres, Alejandro Noblecilla
14. Redacción - revisión y edición: Stefanie Bonilla, Carlos Valdiviezo

7.- Referencias.

- [1] L. McCabe and J. Smith, Operaciones unitarias en ingeniería química, Séptima, 2007. <https://iestpcabana.edu.pe/wp-content/uploads/2021/11/OPERACIONES-UNITARIAS-EN-LA-INGENIERIA-QUIMICA.pdf>
- [2] M. Roostaei, M. Soroush, V. Arian and A. Ghalambor, "Comparison of Various Particle-Size Distribution-Measurement Methods," SPE Reservoir evaluation & engineering, vol. 23, no. 04, 2020. <https://doi.org/10.2118/199335-PA>
- [3] G. Barbosa-Cánovas, E. Ortega-Rivas and P. Juliano, Food Powders: Physical Properties, Processing, and Functionality, Boston, MA: Springer, 2005. https://doi.org/10.1007/0-387-27613-0_12
- [4] A. Gupta and D. Yan, Mineral Processing Design and Operation, Western Australia: Elsevier., 2016. https://toc.library.ethz.ch/objects/pdf03/e01_978-0-444-63589-1_01.pdf
- [5] V. B. L.G. Austin, "Experimental methods for grinding studies in laboratory mills," Powder Technology, vol. 5, no. 5, pp. 261-266, 2020. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(72\)80029-9](https://doi.org/10.1016/0032-5910(72)80029-9)
- [6] B. Wills and J. Finch, Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery, Butterworth-Heinemann, 2016. <https://shop.elsevier.com/books/wills-mineral-processing-technology/wills/978-0-08-097053-0>
- [7] A. International, ASTM E11-17: Standard Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves, 2017. <https://standards.globalspec.com/std/3863958/astm-e11-17>
- [8] F. Etzler and R. Deanne, "Particle size analysis: A comparison of various methods ii," Particle & Particle system characterization, vol. 14, no. 6, pp. 278-282, 2004. <https://doi.org/10.1002/ppsc.19970140604>
- [9] A. Freire and M. A. Lalbay Fuentes, "Implementación de un molino de martillos para el proceso de harina de trigo," Universidad Técnica de Cotopaxi, La Maná, 2022. <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/8473>
- [10] F. Lyu, A. van del Poel, W. Hendriks and M. Thomas, "Particle size distribution of hammer-milled maize and soybean meal, its nutrient composition and in vitro digestion characteristics," Animal Feed Science and Technology, vol. 281, p. 115095, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.115095>
- [11] R. Mugabi, Y. B. Byaruhanga, K. Eskridge and C. Welle, "Performance evaluation of a hammer mill during grinding of maize grains," AgricEngInt: CIGR, vol. 21, no. 2, p. 170, 2019. https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/download/5257/3011/23827?utm_source=chatgpt.com
- [12] P. Pagán, R. Mollehuara-Canales, M. Sinche and J. Martínez, Operaciones Mecánicas de Separación Sólido-Líquido, España: McGraw Hill Interamericana, 2023. https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=UYftEAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA2&dq=P.+Mart%C3%ADnez-Pag%C3%A1n,+Tecnolog%C3%ADa+Mineral%C3%Argica,+Cartagena:+Universidad+T%C3%A9cnica+de+Cartagena,+2011.+&ots=XT4vyqxq_5&sig=apv8WuHNxMtMiepuco-IaAcQsUU&red
- [13] H. G. Merkus, Production, Handling and Characterization of Particulate Materials, The Netherlands: Springer Cham, 2015. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-20949-4>
- [14] J. Fu, Z. Xue, Z. Chen and L. Ren, "Experimental study on specific grinding energy and particle size distribution of maize grain, stover and cob," International Journal of Agricultural and Biological Engineering, vol. 13, no. 4, p. 135-142, 2020. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20201304.5327>
- [15] G. Niu, T. Zhang, S. Cao, X. Zhang and L. Tao, "Effect of Corn Grinding Methods and Particle Size on the Nutrient Digestibility of Chahua Chickens," Animals, vol. 13, no. 14, p. 2364, 2023. <https://doi.org/10.3390/ani13142364>
- [16] P. Tomach, "The Influence of the Grinding Media Diameter on Grinding Efficiency in a Vibratory Ball Mill," MDPI, vol. 17, no. 12, p. 2924, 2024. <https://doi.org/10.3390/ma17122924>
- [17] Y. Catillo Álvarez, R. Jiménez, J. Monteagudo, B. Rodríguez and C. Patiño, "Mathematical Model to Improve Energy Efficiency in Hammer Mills and Its Use in the Feed Industry: Analysis and Validation in a Case Study in Cuba," Processes, vol. 13, no. 5, p. 1523, 2025. <https://doi.org/10.3390/pr13051523>
- [18] T. Son, H. B. Trinh, S. Kim, B. Dugarjav and J. Lee, "Estimation of Energy Consumption for Concentrate Process of Tungsten Ore towards the Integration of Renewable Energy Sources in Mongolia," Minerals, vol. 13, no. 8, p. 1059, 2023. <https://doi.org/10.3390/min13081059>
- [19] P. Martínez-Pagán, M. Sinche González and J. Martínez, Operaciones Mecánicas de Separación Sólido-Líquido, Cartagena: McGraw Hill, 2023. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=990926>

- [20] W. Gutiérrez, "Ensayo granulométrico de los suelos mediante el método del tamizado," *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, vol. 7, no. 2, pp. 6923-69-25, 2023. https://doi.org/10.37811/cl_rm.v7i2.5834
- [21] A. Roca, "Estandarización del Método de tamizado para establecer criterio de aceptación y/o rechazo en las materias primas para una línea de extruidos en la Industria de alimentos," Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia, 2021. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/server/api/core/bitstreams/beat1f9-a1d0-49d2-a007-1993bc2de107/content>
- [22] A. Terence, Powder Sampling and Particle Size Determination, Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena, 2023. [https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=5NgqTf9L63kC&oi=fnd&pg=PP1&dq=+Terence,+Powder+Sampling+and+Particle+Size+Determination,+Cartagena:+Universidad+Polit%C3%A9cnica+de+Cartagena.+\(2020\).,+2023.∓ots=1B0GcyOWcy&sig=QkuduBccOmWYOrSmeJxjTPD1](https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=5NgqTf9L63kC&oi=fnd&pg=PP1&dq=+Terence,+Powder+Sampling+and+Particle+Size+Determination,+Cartagena:+Universidad+Polit%C3%A9cnica+de+Cartagena.+(2020).,+2023.∓ots=1B0GcyOWcy&sig=QkuduBccOmWYOrSmeJxjTPD1)
- [23] P. Mort, "Analysis and graphical representation of particle size distributions," *Powder Technology*, vol. 420, p. 118100, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.118100>
- [24] G. Lyman, "A Statistical Theory for Sampling of Particulate Materials," *Minerals*, vol. 13, no. 7, p. 905, 2023. <https://doi.org/10.3390/min13070905>
- [25] H. Jung, Y. Ju Lee and W. B. Yoon, "Effect of Moisture Content on the Grinding Process and Powder Properties in Food: A Review," *Processes*, vol. 6, no. 6, p. 69, 2018. <https://doi.org/10.3390/pr6060069>
- [26] M. Warechowska, "Some physical properties of cereal grain and energy consumption of grinding," *Agricultural Engineering*, vol. 1, no. 149, pp. 239-2049, 2014. <http://dx.medra.org/10.14654/ir.2014.149.025>
- [27] H. V. J. Dodds, "Particle shape characterization using morphological descriptors," *Particle & Particle systems characterization*, vol. 14, no. 6, pp. 272-277, 2004. <https://doi.org/10.1002/ppsc.19970140603>
- [28] X. Tian, X. Wang and Z. Wang, "Particle size distribution control during wheat milling: nutritional quality and functional basis of flour products—a comprehensive review," *International Journal of Food Science + Technology*, vol. 57, no. 12, p. 7556–7572, December 2022. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16120>
- [29] N. Mohamad, I. Rodriguez-Donis, A. Cavaco-Soares and P. Evon, "Bio-Refinery of Oilseeds: Oil Extraction, Secondary Metabolites Separation towards Protein Meal Valorisation—A Review," *Processes*, vol. 10, no. 5, p. 841, 2022. <https://doi.org/10.3390/pr10050841>
- [30] S. Li, S. Ge, Z. Huang, Q. Wang and H. Zhao, "Cryogenic grinding technology for traditional Chinese herbal medicine," *Cryogenics*, vol. 31, no. 2, pp. 136-137, 1991. [https://doi.org/10.1016/0011-2275\(91\)90260-4](https://doi.org/10.1016/0011-2275(91)90260-4)
- [31] N. Yancey, C. T. Wright and T. L. Westover, "Optimizing hammer mill performance through screen selection and hammer design," *Biofuels*, vol. 4, no. 1, pp. 85-94, 2014. <https://doi.org/10.4155/bfs.12.77>
- [32] W. B. Rowe, "Towards High Productivity in Precision Grinding," *MPDI*, vol. 3, no. 2, p. 24, 2018. <https://doi.org/10.3390/inventions3020024>
- [33] D. Wang, C. He, H. Tian, F. Liu and T. Zhang, "Parameter optimization and experimental research on the hammer mill," *Imateh- Agricultural Engineering*, vol. 62, no. 3, pp. 342-349, 2020. <https://doi.org/10.35633/inmateh-62-36>
- [34] F. Lyu, M. Thomas and W. H. Hendriks, "Particle size distribution of hammer-milled maize and soybean meal, its nutrient composition and in vitro digestion characteristics," *Animal Feed Science and Technology*, vol. 281, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.115095>
- [35] R. K. Gupta and S. K. Das, "Fracture resistance of sunflower seed and kernel to compressive loading," *Journal of Food Engineering*, vol. 46, no. 1, pp. 1-8, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00061-3](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00061-3)
- [36] Y. Haddad, F. Mabile, J. Abecassis and J. Benet, "Rheological properties of wheat endosperm with a view on grinding behaviour," *Powder Technology*, vol. 105, no. 1-3, pp. 89-94, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(99\)00122-9](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(99)00122-9)
- [37] J. Ke, X. Wang, X. Gao and Y. Zhou, "Ball Milling Improves Physicochemical, Functionality, and Emulsification Characteristics of Insoluble Dietary Fiber from *Polygonatum sibiricum*," *MDPI*, vol. 13, no. 15, p. 2323, 2024. <https://doi.org/10.3390/foods13152323>
- [38] Y. Xie, C. Zhang and S. Mei, "Optimisation decision of machining process parameters considering milling energy consumption and specific cutting energy," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 128, pp. 786-795, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2025.07.034>
- [39] L. Feltner, E. Korte, D. F. Bahr and P. Mort, "Particle size and shape analyses for powder bed additive manufacturing," *Particuology*, vol. 101, pp. 33-42, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2025.07.034>
- [40] Y. Liu, J. Wang, J. C. Barth, K. R. Welsch, V. McIntyre and M. P. Wolcott, "Effects of multi-stage milling method on the energy consumption of comminuting forest residuals," *Industrial Crops and Products*, vol. 145, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111955>
- [41] W. Kruszelnicka, Z. Chen and K. Ambrose, "Moisture-Dependent Physical-Mechanical Properties of Maize, Rice, and Soybeans as Related to Handling and Processing," *Materials*, vol. 15, no. 24, p. 8724, 2022. <https://doi.org/10.3390/ma15248729>
- [42] R. Politeik, M. Bruins, J. Keppler and M. Schutyser, "Effect of oil content on pin-milling of soybean," *Journal of Food Engineering*, vol. 334, p. 111149, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111149>