



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

TESIS

**“CONCENTRACIÓN POR CENTRIFUGACIÓN DE JALES Y MINERALES CON ALTO
CONTENIDO DE LIMOS”**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO**

PRESENTA

ENRIQUE RAMOS SÁNCHEZ

CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX

AÑO 2020





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: **Profesor: Huerta Cerdán Antonio**

VOCAL: **Profesor: Juárez Sánchez Faustino**

SECRETARIO: **Profesor: De La Rosa Canales Juan Manuel**

1er. SUPLENTE: **Profesor: Vela Avitua Andrés**

2º SUPLENTE: **Profesor: Hernández Mendoza Ilse Irene**

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

LABORATORIO 006 (BENEFICIO DE MINERALES), DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA METALÚRGICA, EDIFICIO D, FACULTAD DE QUÍMICA, CIUDAD UNIVERSITARIA, UNAM.

LABORATORIO DE RADIATIVIDAD NATURAL, INSTITUTO DE GEOFÍSICA, UNAM.

ASESOR DEL TEMA:

JUÁREZ SÁNCHEZ FAUSTINO

SUSTENTANTE:

ENRIQUE RAMOS SÁNCHEZ

Índice

Resumen	9
Introducción	10
Planteamiento del problema	11
Hipótesis	11
Objetivos	12
Capítulo 1. Marco teórico	13
1.1. Concentración de minerales	14
1.1.1. Concentración gravimétrica	14
1.1.2. Concentración centrífuga	15
1.2. Tipos de centrifugadoras	16
1.2.1. Centrífugas de lecho sedimentado	16
1.2.2. Concentradoras de lecho fluidizado	17
1.2.3. Centrifugadora de lecho fluidizado pulsante	18
1.3. Factores que influyen la concentración centrífuga	19
1.3.1. Criterio de Concentrabilidad de Taggart	20
1.3.2. Principio de concentración gravimétrica	21
1.4. Producción de los principales minerales en México	24
Capítulo 2. Desarrollo experimental	25
2.1. Etapa 1	27
2.1.1 Estudio mineralógico	27
2.1.2 Trituración primaria	28
2.1.3 Molienda	31
2.2. Etapa 2	33
2.2.1. Centrifugación manual de mineral (2000 rpm)	33
2.2.2. Centrifugación automática de mineral (2600 rpm)	34
2.2.3. Digestión de muestras de mineral centrifugadas.....	35

2.2.4. Lectura de contenidos metálicos en el mineral.....	36
2.3. Etapa 3	36
2.3.1. Centrifugación manual de jales (2000 rpm) a tiempos de 5 y 10 minutos.....	36
2.3.2. Centrifugación automática de jales (2600 rpm) a tiempos de 5 y 10 minutos.....	36
2.3.3. Digestión de muestras de mineral centrifugadas.....	37
2.3.4. Lectura de contenidos metálicos en el mineral.....	37
Capítulo 3. Resultados y análisis de resultados	39
3.1. Resultados de etapa 1.....	40
3.2. Resultados de etapa 2.....	52
3.3. Resultados de etapa 3	64
Conclusiones	97
Bibliografía	98

Índice de figuras

Figura 1. Diagrama de flujo del desarrollo experimental	26
Figura 2. Muestra de mineral donde se puede apreciar el contenido metálico	27
Figura 3. Variación de color y texturas en los minerales	28
Figura 4. Coneo realizado al mineral	29
Figura 5. Torre de cribas donde se llevó a cabo el análisis granulométrico	30
Figura 6. Producto de trituración primaria	31
Figura 7. Molienda observada a microscopio estereografico	32
Figura 8. Centrifugadora manual (2000 rpm)	33
Figura 9. Muestras procesadas en centrifugadora manual	34
Figura 10. Centrifugadora automática (2600 rpm)	34
Figura 11. Mineral procesado en centrifugadora automática	35
Figura 12. Muestras digeridas y aforadas a 100 mL	37
Figura 13. Espectrofotómetro de Absorción Atómica utilizado en la experimentación	38
Figura 14. Gráfica log % Ac(-) vs log tiempo. Muestra 1. Tiempo óptimo de molienda	47
Figura 15. Gráfica log % Ac(-) vs log tiempo. Muestra 2. Tiempo óptimo de molienda	48
Figura 16. Gráfica log % Ac(-) vs log tiempo. Muestra 3. Tiempo óptimo de molienda	49
Figura 17. Gráfica log % Ac(-) vs log tiempo. Muestra 4. Tiempo óptimo de molienda	50
Figura 18. Nomenclatura de la separación por capas de mineral centrifugado a 2000 rpm	53
Figura 19. Nomenclatura de la separación por capas de mineral centrifugado a 2600 rpm	56
Figura 20. Variación de % Cu en cada capa de la “muestra 1” a 2000 rpm y 2600 rpm	59
Figura 21. Variación de % Cu en cada capa de la “muestra 2” a 2000 rpm y 2600 rpm	59

Figura 22. Variación de % Cu en cada capa de la “muestra 3” a 2000 rpm y 2600 rpm	60
Figura 23. Variación de % Cu en cada capa de la “muestra 4” a 2000 rpm y 2600 rpm	60
Figura 24. Variación de % Fe en cada capa de la “muestra 1” a 2000 rpm y 2600 rpm	61
Figura 25. Variación de % Fe en cada capa de la “muestra 2” a 2000 rpm y 2600 rpm	61
Figura 26. Variación de % Fe en cada capa de la “muestra 3” a 2000 rpm y 2600 rpm	62
Figura 27. Variación de % Fe en cada capa de la “muestra 4” a 2000 rpm y 2600 rpm	62
Figura 28. Nomenclatura de la separación por capas de muestra de jale centrifugado	64
Figura 29. Variación de % Cu en cada capa de la “muestra 1” a 2000 rpm y 5 minutos	67
Figura 30. Variación de % Cu en cada capa de la “muestra 1” a 2000 rpm y 10 minutos	67
Figura 31. Variación de % Cu en cada capa de la “muestra 2” a 2000 rpm y 5 minutos	68
Figura 32. Variación de % Cu en cada capa de la “muestra 2” a 2000 rpm y 10 minutos	68
Figura 33. Variación de % Cu en cada capa de la “muestra 3” a 2000 rpm y 5 minutos	69
Figura 34. Variación de % Cu en cada capa de la “muestra 3” a 2000 rpm y 10 minutos	69
Figura 35. Variación de % Cu en cada capa de la “muestra 1” a 2600 rpm y 5 minutos	72
Figura 36. Variación de % Cu en cada capa de la “muestra 1” a 2600 rpm y 10 minutos	72
Figura 37. Variación de % Cu en cada capa de la “muestra 2” a 2600 rpm y 5 minutos	73
Figura 38. Variación de % Cu en cada capa de la “muestra 2” a 2600 rpm y 10 minutos	73
Figura 39. Variación de % Cu en cada capa de la “muestra 3” a 2600 rpm y 5 minutos	74

Figura 40. Variación de % Cu en cada capa de la “muestra 3” a 2600 rpm y 10 minutos	74
Figura 41. Variación de % Fe en cada capa de la “muestra 1” a 2000 rpm y 5 minutos	77
Figura 42. Variación de % Fe en cada capa de la “muestra 1” a 2000 rpm y 10 minutos	77
Figura 43. Variación de % Fe en cada capa de la “muestra 2” a 2000 rpm y 5 minutos	78
Figura 44. Variación de % Fe en cada capa de la “muestra 2” a 2000 rpm y 10 minutos	78
Figura 45. Variación de % Fe en cada capa de la “muestra 3” a 2000 rpm y 5 minutos	79
Figura 46. Variación de % Fe en cada capa de la “muestra 3” a 2000 rpm y 10 minutos	79
Figura 47. Variación de % Fe en cada capa de la “muestra 1” a 2600 rpm y 5 minutos	82
Figura 48. Variación de % Fe en cada capa de la “muestra 1” a 2600 rpm y 10 minutos	83
Figura 49. Variación de % Fe en cada capa de la “muestra 2” a 2600 rpm y 5 minutos	83
Figura 50. Variación de % Fe en cada capa de la “muestra 2” a 2600 rpm y 10 minutos	83
Figura 51. Variación de % Fe en cada capa de la “muestra 3” a 2600 rpm y 5 minutos	84
Figura 52. Variación de % Fe en cada capa de la “muestra 3” a 2600 rpm y 10 minutos	84
Figura 53. Variación de % Ag en cada capa de la “muestra 1” a 2000 rpm y 5 minutos	87
figura 54. Variación de % Ag en cada capa de la “muestra 1” a 2000 rpm y 10 minutos	87
Figura 55. Variación de % Ag en cada capa de la “muestra 2” a 2000 rpm y 5 minutos	88
Figura 56. Variación de % Ag en cada capa de la “muestra 2” a 2000 rpm y 10 minutos	88
Figura 57. Variación de % Ag en cada capa de la “muestra 3” a 2000 rpm y 5 minutos	89

Figura 58. Variación de % Ag en cada capa de la “muestra 3” a 2000 rpm y 10 minutos	89
Figura 59. Variación de % Ag en cada capa de la “muestra 1” a 2600 rpm y 5 minutos	92
Figura 60. Variación de % Ag en cada capa de la “muestra 1” a 2600 rpm y 10 minutos	92
Figura 61. Variación de % Ag en cada capa de la “muestra 2” a 2600 rpm y 5 minutos	95
Figura 62. Variación de % Ag en cada capa de la “muestra 2” a 2600 rpm y 10 minutos	95
Figura 63. Variación de % Ag en cada capa de la “muestra 3” a 2600 rpm y 5 minutos	94
Figura 64. Variación de % Ag en cada capa de la “muestra 3” a 2600 rpm y 10 minutos	94
Figura 65. Aumento de % Cu respecto al tiempo de centrifugado en la muestra 3 a 2000 rpm	96

Índice de tablas

Tabla 1. Pesos de las muestras a trabajar en el proceso de trituración primaria	40
Tabla 2. Valores de F_{80} y P_{80} para cada muestra en el proceso de trituración primaria	41
Tabla 3. Datos obtenidos de lectura de I_v , I_c y tiempo de estancia en la trituradora de quijada	42
Tabla 4. Resultados de W_i para cada mineral alimentado a la trituradora de quijada	44
Tabla 5. Densidades obtenidas por la técnica de la probeta con un volumen inicial de 150 mL	45
Tabla 6. Valores obtenidos en la muestra 1. % Ac(-) en función de tamaño de liberación de partícula para cada tiempo de molienda	47
Tabla 7. Valores obtenidos en la muestra 2. % Ac(-) en función de tamaño de liberación de partícula para cada tiempo de molienda	48
Tabla 8. Valores obtenidos en la muestra 3. % Ac(-) en función de tamaño de liberación de partícula para cada tiempo de molienda	49
Tabla 9. Valores obtenidos en la muestra 4. % Ac(-) en función de tamaño de liberación de partícula para cada tiempo de molienda	50
Tabla 10. Tiempo óptimo de molienda obtenido en cada muestra de mineral experimentado.....	51
Tabla 11. Densidades de cada mineral procesado	52
Tabla 12. Contenido de cobre en cada capa de mineral obtenida a 2000 rpm	54
Tabla 13. Contenido de hierro en cada capa de mineral obtenida a 2000 rpm	55
Tabla 14. Contenido de cobre en cada capa de mineral obtenida a 2600 rpm	57
Tabla 15. Contenido de hierro en cada capa de mineral obtenida a 2600 rpm	58
Tabla 16. Contenido de cobre en cada capa de jale obtenida a 2000 rpm y 5 minutos	65

Tabla 17. Contenido de cobre en cada capa de jale obtenida a 2000 rpm y 10 minutos	66
Tabla 18. Contenido de cobre en cada capa de jale obtenida a 2600 rpm y 5 minutos	70
Tabla 19. Contenido de cobre en cada capa de jale obtenida a 2600 rpm y 10 minutos	71
Tabla 20. Contenido de hierro en cada capa de jale obtenida a 2000 rpm y 5 minutos	75
Tabla 21. Contenido de hierro en cada capa de jale obtenida a 2000 rpm y 10 minutos	76
Tabla 22. Contenido de hierro en cada capa de jale obtenida a 2600 rpm y 5 minutos	80
Tabla 23. Contenido de hierro en cada capa de jale obtenida a 2600 rpm y 10 minutos	81
Tabla 24. Contenido de plata en cada capa de jale obtenida a 2000 rpm y 5 minutos	85
Tabla 25. Contenido de plata en cada capa de jale obtenida a 2000 rpm y 10 minutos	86
Tabla 26. Contenido de plata en cada capa de jale obtenida a 2600 rpm y 5 minutos	90
Tabla 27. Contenido de plata en cada capa de jale obtenida a 2600 rpm y 10 minutos	91

Resumen

En este trabajo se presenta la separación por medio de fuerza centrífuga aplicado en jales de minerales procesados, lo cual fue un reto experimental dado que la mayoría de los componentes del jale tienen densidades semejantes. Al emplear el proceso de centrifugación, la separación de estos componentes se vio favorecida, obteniéndose un resultado con productos estratificados con la posibilidad de su separación mecánica como se muestra en los resultados obtenidos.

En esta tesis se realizó la centrifugación de mineral procesado en laboratorio y de jales de mina. El mineral se trabajó en dos diferentes centrifugas que emplean diferentes velocidades de centrifugación (2000 y 2600 rpm), los jales de mina se trabajaron a las velocidades antes mencionadas y variando el tiempo de centrifugación (5 y 10 minutos).

Los datos obtenidos denotan un aumento en la concentración de las especies estudiadas a pesar tener densidades semejantes lo cual nos indica que el proceso es viable.

Este trabajo escrito propone la concentración centrífuga como una alternativa para el procesamiento de jales, ya que al ocupar como único insumo el agua y al aumentar el contenido metálico de las especies ocasiona que el proceso pueda ser rentable para la industria minera.

Introducción

Los procesos de concentración gravimétricos son utilizados para separar a partículas minerales que presentan una marcada diferencia en su peso específico, en dichos procesos las partículas son sometidas a diferentes fuerzas en su movimiento como respuesta a las acciones que ejercen sobre ellas simultáneamente la gravedad y/u otras fuerzas como la hidráulica y de fricción. Cabe señalar que dicho proceso es el más sencillo y económico de todos los métodos de concentración.

La separación centrífuga está comprendida dentro de los métodos de concentración gravimétrica, los cuales se agrupan en tres categorías:

- 1) Separación por medio pesado, en la cual las partículas se introducen en un fluido de densidad intermedia, de tal manera que partículas de bajo peso específico flotan y las de alto peso específico se hunden.
- 2) Separación por corriente verticales, en la que se aprovechan las diferencias en velocidades de sedimentación, como en el caso de los Jigs.
- 3) Separación en corrientes superficiales, como en el caso de las mesas concentradoras y los espirales. A partir de la primera categoría, son empleados los procesos de forzar la separación de los minerales con mayor densidad mediante centrifugación.

Resulta interesante aplicar este tipo de tecnología en los minerales mexicanos, en específico a los jales de mina, lo cual podría ser benéfico por los bajos costos y tiempos cortos de operación.

Planteamiento del problema

La cabeza de los minerales se compone de diferentes especies mineralógicas, por lo que los procesos de separación y concentración de minerales suelen ser costosos, con diferentes etapas y al procesarse se producen jales, los cuales contienen inertes (ganga) y partes mínimas del mineral de interés ya que los procesos de separación no son 100% eficientes.

En esta ganga por lo regular no se trabaja y se mantiene en las presas de jales. En este punto se presenta la oportunidad para separar estos valores en una forma económicamente factible para que la minera invierta en algún proceso que permita la separación.

Hipótesis

Es posible realizar la separación y concentración de valores minerales con altos contenidos en arcillas y limos o en jales que contienen leyes susceptibles de ser recuperados, si se aplica un proceso de centrifugado a una velocidad determinada según sea el tamaño de las partículas y la naturaleza del mineral a tratar. Entonces, es posible tener horizontes de sedimentación definidos.

Objetivos

Objetivo General: Recuperar metales de minerales, limos y/o jales de tamaño de partícula menor a 500 μm , a partir de la concentración centrífuga.

Objetivo particular: Evaluar el efecto que tiene la velocidad centrífuga en la separación de minerales con densidades cercanas a partir de la técnica de concentración centrífuga.

Capítulo 1

Marco teórico

Concentración de minerales

México continúa siendo uno de los países más importantes a escala mundial en cuanto a riqueza minera se refiere, esto es debido a la abundancia de sus minerales, así como a la diversidad de sus depósitos a lo largo de su territorio, muchos de estos minerales son procesados en una primera etapa de separación y concentración en plantas de beneficio de minerales.

La concentración de minerales es la operación en la cual se eleva la ley de una mena o mineral determinado, mediante el conocimiento de las propiedades del mineral, así como el uso de equipos de separación produciendo la segregación de estériles para obtener un concentrado de un mineral de interés.

De forma general, las operaciones más relevantes con las cuales se cuenta en una planta de beneficio de minerales son: trituración, molienda, clasificación por ciclones, concentración por flotación, gravimétrica y magnética, espesamiento y filtración. ^[1]

Por la relevancia en esta tesis de los del proceso de concentración gravimétricos solo se hablará de ellos en este marco teórico.

Concentración gravimétrica

Es un método para separar partículas de minerales de diferente peso específico debido a sus diferencias de movimiento en respuesta a las acciones que ejercen sobre ellas, simultáneamente, la gravedad u otras fuerzas.

Se acepta generalmente que la concentración por gravedad es el más sencillo y económico de los métodos de concentración. El uso de este tipo de separación está recomendado siempre que sea practicable porque permite la recuperación de mineral útil en un orden de tamaños tan gruesos como sea posible, reduciendo los costos inherentes a la reducción de tamaño y disminuyendo las pérdidas asociadas a estas operaciones. [3]

El proceso de concentración gravimétrico que da pie al presente trabajo es la concentración centrífuga, la cual se explicará a continuación:

Concentración centrífuga

La concentración gravimétrica es buena cuando se tienen granulometrías de medianos a grandes intervalos de tamaño, es por esto por lo que con el tiempo se investigó un método para separar las partículas más finas, este se trata de la concentración centrífuga. En algunos casos se presentan demasiadas partículas finas lo que implica mayor tiempo de separación, afectando la eficiencia de la concentración gravitacional, bajo estas circunstancias se lleva a cabo la utilización de la fuerza centrífuga (en la separación) debido a que ésta es de mayor magnitud que la fuerza gravitacional.

El principio básico de los equipos de separación centrífuga consiste en un recipiente que contiene un fluido (generalmente agua) en su interior el cual gira a una velocidad determinada, así las partículas con mayor peso específico son separadas de otras. [7]

A continuación, se muestra información teórica de los dispositivos utilizados en la concentración de minerales en la industria.

Tipos de concentradoras centrífugas

En la concentración centrífuga, los equipos están diseñados para aumentar la fuerza gravitacional considerablemente, lo cual hace que estos equipos sean más eficientes que los convencionales, por lo tanto, hacen más fácil la separación de partículas con mayor peso específico. Los equipos de concentración centrífuga se dividen en tres grupos según el tratamiento del lecho de mineral, estos son: Centrífugas de lecho sedimentado, centrífugas de lecho fluidizado, centrífugas de lecho fluidizado pulsante [2]

Centrífugas de lecho sedimentado

Este método trata de que el material de interés es introducido a las centrífugas en forma de pulpa. Con respecto a la separación en sí, la velocidad a la cual giran los equipos se relaciona directamente con la posibilidad de separación de partículas en función de su tamaño, por lo cual, mientras mayor sea dicha velocidad también aumentará la recuperación de las partículas mucho más pequeñas.

Para el lecho sedimentado se ocupan los siguientes equipos:

- **Concentrador chino:** es un cilindro que gira en torno a un eje horizontal, funciona con dos toberas; una para la alimentación de la pulpa y otra para el agua de lavado. Ambas entran y permanecen dentro del razón de retención, luego el equipo gira y las partículas más pesadas se van hacia la pared.

- Concentrador Gekko: cilindro rotatorio, el cual posee anillos circulantes en toda la superficie interna, los cuales tienen como función retener las partículas de mayor peso específico. Cuando esto sucede, las partículas de mayor peso son retenidas en las hendiduras de los anillos y así las otras más livianas son arrastradas por el líquido hacia la parte superior siendo separadas del mineral valioso. [6]

Concentradoras de lecho fluidizado

Se da el nombre de fluidizado al proceso de contacto que ocurre entre un sólido y un fluido (gas o líquido) en el cual el lecho formado por partículas sólidas finamente divididas se levanta y se agita por medio de una corriente ascendente de fluido. En el funcionamiento de las centrifugadoras es necesario determinar las condiciones del régimen de operación bajo las cuales el trabajo del separador sea más eficiente.

Para el lecho fluidizado se ocupan los siguientes equipos:

- Centrifugadora Knelson: En su operación, en principio se inyecta agua en el tazón giratorio de concentración a través de una serie de orificios de fluidización. Luego se introduce la pulpa por medio de un tubo central vertical estacionario de alimentación. Una vez que la pulpa llega a la base del tazón, ésta debido a la fuerza centrífuga es forzada a desplazarse por la parte exterior, subiendo por la propia pared del tazón, donde las partículas pesadas, una vez que se ha alcanzado la fluidización óptima son atrapadas entre los rifles.

- Centrifugadora Falcón: Constituida principalmente por un cilindro rotante, donde la geometría del rotor, interiormente en la parte inferior, adquiere una forma cónica y en la parte superior una geometría cilíndrica en forma de anillos. En esta operación las partículas pesadas se fijan en la pared interna del cono y son descargadas por la parte inferior a través de un cilindro que envuelve al cono. [5]

Centrifugadora de lecho fluidizado pulsante

Los equipos de este grupo además de utilizar movimiento de rotación y agua de fluidización utilizan un movimiento de pulsación similar al que se observa en los jigs y mesas vibradoras convencionales.

El lecho fluidizado pulsante tiene los siguientes equipos:

- Centrifugadora Kelsey: el diseño de este concentrador cuenta con una criba convencional que la hace girar para producir
- Una fuerza centrífuga. Esto hace aumentar la eficiencia de separación de partículas finas de mineral. Dentro del rotor se encuentra la criba que es alineada internamente con la cama que se esparce suavemente con la generación de la fuerza centrípeta. La alimentación es inyectada por una tobera central en forma de pulpa, la cual llega a la base de la criba para que al ser sometida al movimiento giratorio esta sea impulsada a la zona de concentración.
- Separador multigravimétrico: es semejante a una mesa vibratoria potente y compacta, la que se encuentra comúnmente envuelta por una superficie

cilíndrica cónica, que al rotar con rapidez desarrolla un campo gravitacional (fuerza centrípeta) que genera una gran eficiencia de recuperación de las partículas fina y ultrafinas. [8]

A nivel laboratorio se emplean otros equipos los cuales hacen más accesible su manejo, estas centrífugas son instrumentos que permiten someter a las muestras a intensas fuerzas que producen la sedimentación en poco tiempo de las partículas que tienen una densidad mayor que la del medio que las rodea.

Factores que influyen la concentración centrífuga

En una centrífuga de laboratorio el elemento determinante es el rotor, dispositivo que gira y en el que se colocan los tubos. Existen dos tipos:

Rotor basculante: Los tubos se colocan en un dispositivo (cestilla) que, al girar el rotor, se coloca en disposición perpendicular al eje de giro. Así pues, los tubos siempre giran situados perpendicularmente al eje de giro.

Rotor de ángulo fijo: Los tubos se insertan en orificios en el interior de rotores macizos. El caso extremo es el de los rotores verticales en los que el tubo se sitúa paralelo al eje de giro. Este tipo de rotores es típico de ultracentrífugas. [7]

Estos tipos a su vez pueden clasificarse según su velocidad:

Centrifugación a baja velocidad – menos de 10 000 rpm

Centrifugación a alta velocidad – entre 10 000 y 20 000 rpm

Ultracentrifugación – más de 20 000 rpm

Todos estos equipos trabajan con los mismos principios físicos ya que se basan en la diferencia de densidades entre partículas minerales y los estériles por lo que la factibilidad de utilizar estos equipos depende de un criterio de concentrabilidad y un principio de concentración gravimétrica.

Criterio de Concentrabilidad de Taggart

El criterio de concentración nos da a conocer la posibilidad de la separación por medio de la gravedad y depende del rango de densidad de los minerales involucrados y del fluido con que se trabaje.

Definido por la ecuación:

$$Q = \frac{Dp - Dm}{Dl - Dm} \quad (1)$$

Donde:

Dp = Densidad de partículas pesadas $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

Dl = Densidad de las partículas livianas $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

Dm = Densidad del medio fluido de separación $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

Cuando el criterio de Taggart es mayor a 2.5 el proceso de concentración gravimétrica es adecuado para la separación. A medida que disminuye este valor, la eficiencia del proceso decrece y para valores de CC inferiores a 1.25 el proceso no es factible desde el punto de vista comercial.

El movimiento de una partícula dentro de un fluido también depende del tamaño de las partículas, ya que si estas son grandes se verán más afectadas en comparación con las pequeñas. La eficiencia de los procesos gravimétricos aumenta con el tamaño de partícula, a menor tamaño responden relativamente mal a los métodos de concentración gravimétrica. [2]

Principio de concentración gravimétrica.

Partiendo de la ecuación de Stokes, bajo un campo de gravedad la velocidad de sedimentación está relacionada directamente con el cuadrado del tamaño de la partícula, según la siguiente ecuación:

$$V_S = \frac{d^2(\rho_p - \rho_l)}{18\mu} g \quad (2)$$

Donde:

Vs: velocidad de sedimentación $[\frac{m}{s}]$

d: diámetro de la partícula. $[m]$

ρ_p : densidad de la partícula $[\frac{kg}{m^3}]$

ρ_l : densidad del líquido $[\frac{kg}{m^3}]$

μ : viscosidad del líquido $[\frac{N \cdot s}{m^2}]$

g: aceleración de la gravedad. $[\frac{N}{kg}]$

De acuerdo con esta ecuación cuando el tamaño de la partícula es pequeño la velocidad de sedimentación es también pequeña. Por lo tanto, en estos casos es necesario hacer uso de una fuerza de separación mayor como es la fuerza centrífuga. De acuerdo con esto en la ecuación de Stokes la aceleración de la gravedad es reemplazada por la aceleración centrífuga.

$$g = ac \quad (3)$$

pero

$$ac = 4\pi^2 RF^2 \quad (4)$$

Donde:

ac: Aceleración centrífuga. [$\frac{m}{s^2}$]

R: Radio de rotación. [m]

F: Frecuencia. [s^{-1}]

Entonces, la velocidad de sedimentación en un campo centrífugo (VSC), queda expresada de la siguiente manera:

$$V_{SC} = \frac{d^2(\rho p - \rho l)}{18\mu} * 4\pi^2 RF^2 \quad (4)$$

Dividiendo y multiplicando por “g” a la ecuación anterior

$$V_{SC} = \frac{d^2(\rho p - \rho l)}{18\mu} * g * \frac{4\pi^2 RF^2}{g} \quad (5)$$

$$V_{SC} = V_S * \frac{4\pi^2 RF^2}{g} \quad (6)$$

Donde “ $(4\pi^2 R f^2)/g$ ” es conocido como el valor de G.

$$V_{sc} = G(V_s) \quad (7)$$

Relación entre la fuerza centrífuga y las gravedades “G”.

Se sabe que:

$$F_c = 4 \pi^2 R f^2 V \rho \quad (8)$$

Donde:

FC: Fuerza centrífuga [N]

f: Frecuencia [s^{-1}]

V: Volumen ocupado por la masa “m” [m^3]

ρ : Densidad [$\frac{kg}{m^3}$]

además, se sabe que:

$$G = \frac{4 \pi^2 R f^2}{g} \quad (9)$$

Por lo tanto, de ambas funciones se obtienen que:

$$F_c = G(gV\rho) \quad (10)$$

De aquí se deduce que la velocidad de sedimentación en el campo centrífugo es mucho mayor que en el gravitacional. En esto se basa el funcionamiento de los concentradores centrífugos. [2]

Producción de los principales minerales en México

México, según datos del INEGI, obtuvo 751 mil 5 toneladas de cobre, el estado de mayor producción de cobre en México es Sonora con 81.3% de la producción total. Esta producción se conforma primordialmente por las aportaciones de las minas “Buenavista del Cobre” y “La Caridad” (principales productoras del metal en el país). Aunado a estas también participan en la producción la mina “Milpillas”, “Piedras Verdes” y “María”.

En cuanto a producción de plata por entidad federativa, Zacatecas obtiene la primera posición, con una productividad de 37%; en esta localidad se encuentran las minas de plata más grandes del país: “Peñasquito”, “Fresnillo” y “Saucito”, esta última fue la mayor productora minera de plata desplazando a “Peñasquito”. La mina “Fresnillo” es la más importante en la obtención de plata minera en México y en el mundo, participando con una tercera parte de la producción nacional y el 7% de la mundial.

A nivel nacional, el INEGI reportó una producción de 12.2 millones de toneladas de extracción de hierro. Siendo Coahuila el mayor productor con 4 millones de toneladas seguido por Colima con 3.1 millones de toneladas y Michoacán con 2.4 millones de toneladas. ^[9]

CAPÍTULO 2

DESARROLLO

EXPERIMENTAL

Capítulo 2. Desarrollo experimental

El desarrollo experimental del presente trabajo está dividido en 3 etapas como podemos ver en la **Figura 1**, las cuales son: a) preparación del mineral a estudiar, b) centrifugación del mineral y c) centrifugación de jales.



Figura 1. Diagrama de flujo del desarrollo experimental.

2.1. Etapa 1.

La materia prima empleada en la etapa 1 de esta tesis fueron 5 muestras de mineral proveniente de Pachuca, cabe mencionar que la mina donde provienen estas muestras se dedica a la extracción de hierro y cobre, dicho mineral fue caracterizado y procesado de acuerdo con los siguientes puntos.

2.1.1. Estudio mineralógico

En primer lugar, se realizó un análisis cualitativo de las muestras en el cual se analizó las propiedades físicas del mineral como textura, color y brillo, esto con el fin de determinar los componentes de lo cinco diferentes minerales utilizados en el proceso de centrifugación, en la **Figura 2** se puede observar una muestra de mineral a través de un microscopio estereográfico.



Figura 2. Muestra de mineral observada a través de un microscopio estereográfico a 50X.

Por otro lado, se procedió a una inspección, la cual consistió en determinar olor, color y tipo de fractura presentes en las muestras de los minerales, en la **Figura 3** se observa una muestra de mineral.



Figura 3. Variación de color y texturas en los minerales.

2.1.2. Trituración primaria.

Para iniciar el proceso de trituración se realizó un muestreo del mineral por lo cual el material se extendió en una superficie de concreto y para su fácil limpieza se colocó un plástico, se apiló en forma cónica y se repitió la operación 3 veces con el propósito de dar a las partículas una distribución homogénea; posteriormente el material se distribuyó por medio de un cucharón para formar primero un cono truncado y después un pastel circular plano; el pastel circular se dividió en 4 partes a lo largo de dos diagonales perpendiculares entre sí; finalmente dos cuartos opuestos se separaron para la caracterización del mineral y fueron divididos nuevamente utilizando los pasos antes descritos hasta obtener una muestra de aproximadamente 500 gramos, esto se logró después de dos etapas de preparación.

Los 500 gramos de material fueron divididos, utilizando un cuarteador, tomando nuevamente dos cuartos opuestos, desechando los restantes; y repitiendo los pasos anteriores hasta obtener aproximadamente 100 gramos de material, esto se logró después de cinco etapas de preparación, en la **Figura 4** se observa el proceso de muestreo del mineral.

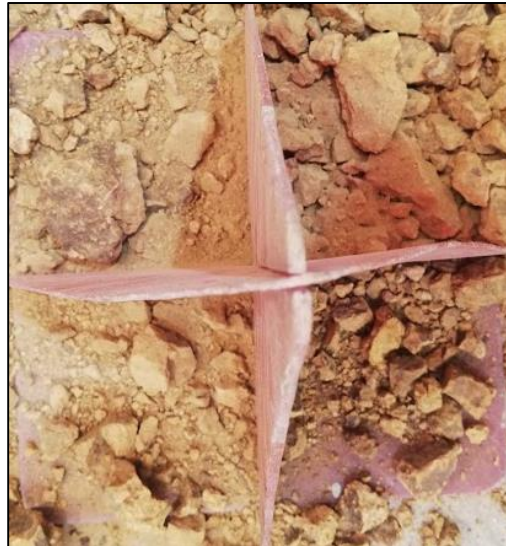


Figura 4. Coneo realizado al mineral

Se obtuvieron los análisis granulométricos de la muestra de 100 gramos de cada mineral previo a la alimentación a la trituradora de quijadas de laboratorio, esto con el fin de tener información de nuestro mineral previo a la disminución de tamaño de las muestras. La torre de cribas utilizada en el análisis granulométrico se observa en la **Figura 5**.



Figura 5. Torre de cribas donde se llevó a cabo el análisis granulométrico.

Posteriormente se llevó la lectura del voltaje de línea y el amperaje en vacío de la trituradora de quijadas, luego se alimentó 500 g de mineral a la trituradora de quijadas, registrando al mismo tiempo, amperaje desarrollado por la trituradora y el tiempo de operación.

Para obtener una muestra representativa de la descarga se implementó el partidor Jones, a partir de esta muestra se obtuvieron los análisis granulométricos del producto de trituración. El producto de trituración se muestra en la **Figura 6**.



Figura 6. Producto de trituración primaria.

2.1.2. Molienda.

Para llevar a cabo la molienda se determinó la densidad del medio molurante y la carga de bolas a partir de las dimensiones del molino. Posteriormente se alimentó el mineral fue reducido de tamaño en un molino de bolas de laboratorio con dimensiones de 20.7 cm de diámetro x 15.7 cm de longitud, utilizando como medio molurante 8.64 kg de bolas de molino y realizando la molienda por un espacio de cinco minutos. Una vez transcurrido el tiempo se recuperó el material molido para obtener una muestra representativa a partir del partidador Jones. A partir de esta muestra se realizó el análisis granulométrico del producto de molienda. Se observó y evaluó en el microscopio estereográfico el % de liberación de dicha muestra, así como determinar el tamaño de partícula al 100% de liberación. Figura 7

Se alimentó nuevamente el mineral al molino de bolas incrementado el tiempo de residencia en 5 minutos. De igual manera se obtuvieron las tablas de análisis

granulométricos correspondientes a los diferentes tiempos de molienda, así como sus gráficas % Ac(-) vs μm .

El producto de molienda se separó en dos partes, esto para posteriores pruebas de centrifugado a 2000 y 2600 rpm respectivamente, el producto de molienda se observa en la **Figura 7**.



Figura 7. Molienda observada a microscopio.

2.2. Etapa 2

2.2.1 Centrifugación manual de mineral (2000 rpm)

Del producto de molienda se pesó 1 gramo de muestra, este fue colocado en un tubo de ensaye de capacidad de 20 mL, y se agregó 10 mL de agua. El tubo de ensaye fue colocado en cada uno de los compartimientos de la centrifugadora para realizar pruebas durante 5 minutos, las condiciones de la centrifuga fueron 2000 rpm. El proceso de centrifugación a 2000 rpm se observa en la **Figura 8**.

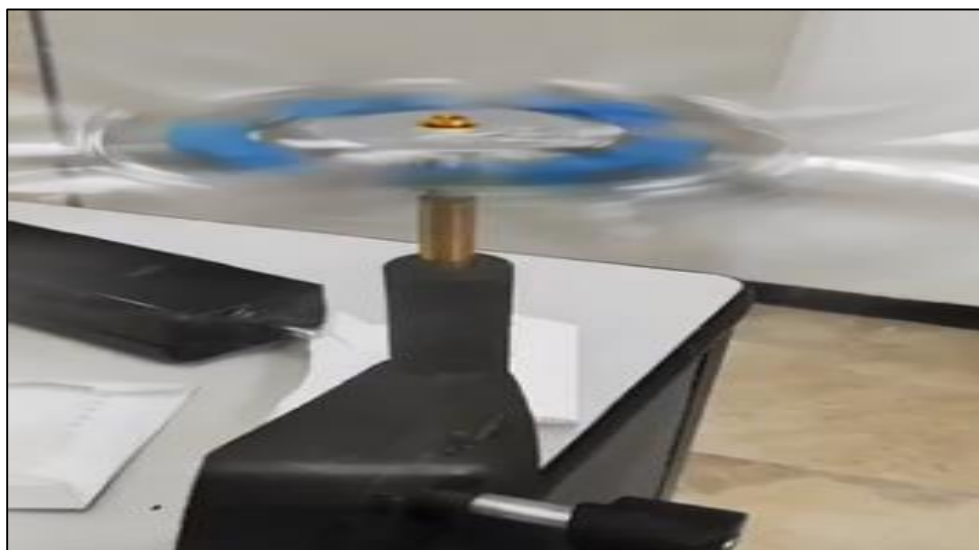


Figura 8. Centrifugadora manual (2000 RPM).

Se recuperaron las muestras de cada tubo, separándose los sólidos por cada capa que este formaba, se secaron los sólidos y se obtuvieron los pesos de cada capa y posteriormente se tomó una muestra para su posterior análisis por la técnica de absorción atómica, de aproximadamente 0.5 gramos, el producto de dicha centrifugación se puede observar en la **Figura 9**.



Figura 9. Muestras procesadas en centrifugadora manual.

2.2.2. Centrifugación automática (2600 rpm)

Del producto 2 de molienda, se pesaron 5 gramos para ser colocados en un tubo de ensaye de capacidad de 25 mL, con 100 mL de agua, el número de muestras colocadas en la centrífuga fueron de 4 y las condiciones de esta son: 2600 rpm y 5 minutos de centrifugación. En la **Figura 10** se muestra la centrifugadora utilizada en el proceso de centrifugación automática.



Figura 10. Centrifugadora automática (2600RPM).

Se tomaron las muestras de cada tubo y se separaron por capa de mineral recuperado, obteniendo los pesos de cada capa y posteriormente se llevó a un secado para su posterior análisis. El resultado de la centrifugación automática se observa en la **Figura 11**.

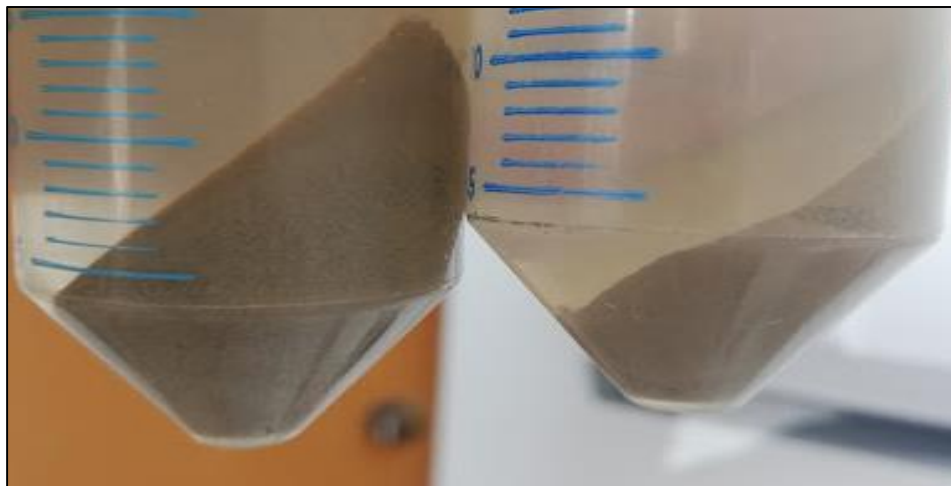


Figura 11. Mineral procesado en centrifugadora automática.

2.2.3. Digestión de muestras de mineral centrifugadas.

A partir de cada capa seleccionada de muestra centrifugada se tomó una porción entre 0.5 - 0.1 gramos para llevar a cabo los siguientes pasos: se agregó HF, se calentó a sequedad, posteriormente se adicionó HNO_3 y HCL y se calentó hasta lograr disolver para poder aforar a 100mL

2.2.4. Lectura de contenidos metálicos en el mineral.

Para determinar la concentración en ppm de cada muestra se empleó un equipo de “Espectrofotómetro de Absorción Atómica “, realizando lecturas de Cu y Fe.

2.3. Etapa 3

2.3.1. Centrifugación manual (2000 rpm)

De las muestras de jales que se encontraban en el laboratorio se pesó 1 gramo de muestra. En un tubo de ensaye se agregó 10 mL de agua y la muestra de jale previamente pesado.

Se colocó un tubo de ensaye en cada uno de los compartimientos de la centrifugadora y se realizaron pruebas por 5 y 10 minutos.

Se tomaron las muestras de cada tubo y se separaron por capa de mineral recuperado, obteniendo los pesos de cada capa y posteriormente se llevó a un secado para su posterior análisis.

2.3.2. Centrifugación automática (2600 rpm)

De las muestras de jales que se encontraban en el laboratorio se pesó 1 gramo de muestra. En un tubo de ensaye se agregó 30 mL de agua y la muestra de jale previamente pesado.

Se colocó un tubo de ensaye en cada uno de los compartimientos de la centrifugadora y se realizaron las pruebas por 5 y 10 minutos.

Se tomaron las muestras de cada tubo y se separaron por capa de mineral recuperado, obteniendo los pesos de cada capa y posteriormente se llevó a un secado para su posterior análisis químico.

2.3.3. Digestión de muestras centrifugadas.

A partir de cada capa seleccionada de muestra centrifugada se tomó una porción entre 0.5 - 0.1 gramos para llevar a cabo los siguientes pasos: se agregó HF, se calentó a sequedad, posteriormente se adicionó HNO_3 y HCL y se calentó hasta lograr disolver para poder aforar a 100mL

En la **Figura 11** se aprecia las muestras en el proceso de “digestión”.

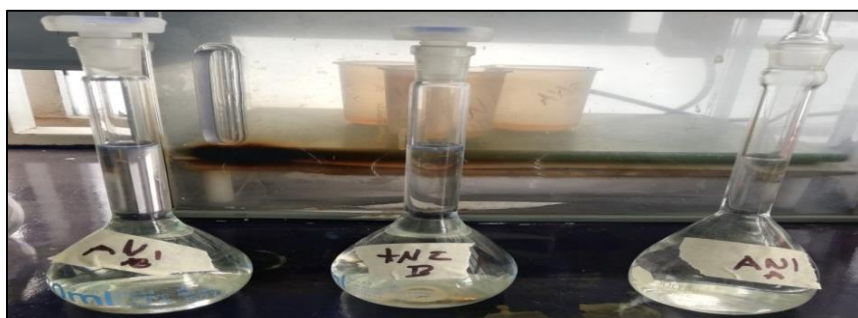


Figura 12. Muestras digeridas y aforadas a 100 mL.

2.3.4. Lectura de contenidos metálicos.

El análisis de la muestra por Espectroscopia de Absorción Atómica se llevó a cabo usando el equipo modelo spectrAA 50 B, utilizado para la determinación de la concentración de los metales en solución, las lecturas que se llevaron a cabo fueron

para Cu, Ag y Fe. La **Figura 13** muestra el Espectrofotómetro utilizado en la experimentación.



Figura 13. Espectrofotómetro de Absorción Atómica utilizado en la experimentación.

Capítulo 3

Resultados y análisis de resultados

Capítulo 3. Resultados y análisis de resultados

3.1. Resultados de etapa 1.

A continuación, se muestran los pesos de los especímenes (**Tabla 1**) después de aplicar un coneo para tomar una muestra representativa.

Tabla 1. Pesos de las muestras a trabajar en el proceso de trituration primaria.

Mineral	Peso (g)
Muestra 1.1.	613.3
Muestra 1.2.	680.7
Muestra 2.1.	840.4
Muestra 2.2.	946.5
Muestra 3.1.	799.8
Muestra 3.2.	1094.2
Muestra 4.1.	974.9
Muestra 4.2	560.0

Una vez obtenidos los pesos de las diferentes muestras se realizó una trituration primaria seguida de un análisis granulométrico, así como sus gráficas % Ac (-) vs μm (**Anexo 1**), de esta información se determinaron los datos de F_{80} y P_{80} que se utilizaron para obtener W_i , los resultados se muestran en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Valores de F_{80} y P_{80} para cada muestra en el proceso de trituración primaria.

Mineral	F_{80} (μm)	P_{80} (μm)
Muestra 1.1.	31750	16375.73
Muestra 1.2.	31750	16871.81
Muestra 2.1.	22225	12966.16
Muestra 2.2.	22225	13087.88
Muestra 3.1.	22225	13889.51
Muestra 3.2.	22225	14889.61
Muestra 4.1.	101600	23206.74
Muestra 4.2	101600	20494.61

Aprovechando el proceso de trituración primaria se tomó lectura del amperaje en vacío (I_v), amperaje desarrollado con carga (I_c) y tiempo de trituración, cabe señalar que el motor de la trituradora trabaja con 220 V, los resultados se muestran en la **Tabla 3.**

Tabla 3. Resultados obtenidos de lectura de I_v , I_c y tiempo de estancia en la trituradora de quijada.

Mineral	I_v (amp)	I_c (amp)	Tiempo (s)
Muestra 1.1.	1.7	1.9	3.25
Muestra 1.2.	1.7	1.9	3.23
Muestra 2.1.	1.7	1.8	3.24
Muestra 2.2.	1.7	1.8	3.15
Muestra 3.1.	1.6	1.8	3.54
Muestra 3.2.	1.6	1.8	4.15
Muestra 4.1.	1.7	2.3	4.69
Muestra 4.2	1.7	2.4	3.66

A partir de los resultados obtenidos en la trituración primaria se calculó el W_i de cada muestra por medio del método directo el cual se muestra un ejemplo de cálculo a continuación: Ejemplo utilizando valores de mineral 1.1.

$$kw = \frac{(I_c - I_v)V\sqrt{NF}}{1000} = \frac{(1.9A - 1.7A)(220V)(\sqrt{3})}{1000} = 0.0762 \text{ kw}$$

$$(613.3g) \left(\frac{1 \text{ ton}}{1 \times 10^6 g} \right) \left(\frac{1.1023 \text{ ston}}{1 \text{ ton}} \right) = 6.760 \times 10^{-4} \text{ ston}$$

$$(3.25 \text{ seg}) \left(\frac{1h}{3600s} \right) = 9.027 \times 10^{-4} h$$

$$cap = \frac{ston}{h} = \frac{6.760 \times 10^{-4} ston}{9.027 \times 10^{-3} h} = 0.748 \text{ ston/h}$$

$$W = \frac{kw}{\frac{ston}{h}} = \frac{0.0762 kw}{0.748 \text{ stone/h}} = 0.1018 \frac{kw - h}{ston}$$

$$W = \frac{10Wi}{\sqrt{P80}} - \frac{10Wi}{\sqrt{F80}}$$

$$W = Wi \left[\frac{10}{\sqrt{P80}} - \frac{10}{\sqrt{F80}} \right]$$

$$Wi = \frac{W}{\frac{10}{\sqrt{P80}} - \frac{10}{\sqrt{F80}}} = \frac{0.1018 \frac{kw}{stone/h}}{\frac{10}{\sqrt{16375.736}} - \frac{10}{\sqrt{31750}}} = 4.626 \frac{kw - h}{ston}$$

Este cálculo se realizó para cada una de las muestras procesadas en la trituradora de quijada, los resultados obtenidos se muestran en la **Tabla 4**.

Tabla 4. Resultados de W_i para cada mineral alimentado a la trituradora de quijada.

Mineral	Kw	ston	Tiempo (h)	Cap	W	Wi
Muestra 1.1.	0.0762	0.000676	0.00093	0.7265	0.1049	4.7
Muestra 1.2.	0.0762	0.000750	0.00090	0.8363	0.0911	4.3
Muestra 2.1.	0.0381	0.000926	0.00090	1.0293	0.0370	1.7
Muestra 2.2.	0.0381	0.001043	0.00088	1.1924	0.0320	1.5
Muestra 3.1.	0.0762	0.000882	0.00098	0.8966	0.0850	4.7
Muestra 3.2.	0.0762	0.001206	0.00115	1.0463	0.0728	4.8
Muestra 4.1.	0.2286	0.001097	0.00130	0.8418	0.2716	7.9
Muestra 4.2	0.2667	0.000838	0.00102	0.8240	0.3237	8.4

Al analizar los resultados obtenidos de dureza se puede determinar que los minerales analizados tienen diferentes composiciones, los de menor dureza cuentan con mayor material inerte (tierra, arcillas, entre otros), las especies no metálicas son más blandas por lo que confiere menor dureza al mineral.

El análisis de dureza se realizó por duplicado ya que un cambio de amperaje podría alterar los datos obtenidos.

Al término de la trituración primaria se prosiguió a realizar las pruebas de molienda en el molino de bolas por lo cual se determinó la densidad del medio molurante y la carga de bolas a partir de las dimensiones del molino como se describe a continuación.

Se determinó el peso y volumen de la bola para determinar su densidad a partir de la técnica de la probeta, los resultados se muestran en la **Tabla 5**.

Tabla 5. Densidades obtenidas por la técnica de la probeta con un volumen inicial de 150 mL.

Bola	Peso (g)	Volumen (mL)	Densidad (g/mL)
1	128.8	165	8.58
2	132	165	8.8
3	154.5	170	7.27

Se tomó una densidad promedio de $8.21 \frac{g}{mL}$, así como las dimensiones del molino que a continuación se presentan.

Molino:

Diámetro: 20.5 cm

Altura: 15.6 cm

Volumen: $5.1489 \times 10^{-3} m^3$

Para determinar la carga de bolas al molino se realizó el cálculo siguiente.

$$Cb = 0.2044 * V (m^3) * \delta medm (ton / m^3)$$

Donde:

Cb = carga de bolas (ton)

V = volumen del molino (m³)

dmedm = densidad del medio molidor. (ton/m³)

A partir de esta fórmula se determinó la carga de bolas:

$$Cb = (0.2044) * (5.1489 \times 10^{-3} \text{ m}^3) * \left(8.21 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3}\right)$$

$$Cb = 8.64 \times 10^{-3} \text{ ton}$$

$$Cb = 8.64 \text{ Kg}$$

Al tener el cálculo de carga de bolas se continuó con la alimentación de medio molidor y mineral al molino. Una vez realizadas las pruebas de molienda cada 5 minutos hasta llegar a 20 minutos, se obtuvieron los análisis granulométricos, así como sus gráficas % Ac(-) vs μm (**Anexo 2**), de esta información se extrajeron los resultados de % Ac(-) al tamaño de liberación de la partícula para realizar los cálculos de tiempo óptimo de molienda.

A continuación, se muestran los valores de % Ac(-) en función del tamaño de liberación de la partícula para cada tiempo de molienda.

Tabla 6. Resultados obtenidos en la muestra 1. % Ac(-) en función del tamaño de liberación de la partícula para cada tiempo de molienda.

Tamaño de liberación 73.660 μm			
Tiempo	%Ac(-)	log tiempo	log %Ac(-)
5.000	38.088	0.699	1.581
10.000	53.582	1.000	1.729
15.000	61.570	1.176	1.789
20.000	65.982	1.301	1.819

A continuación, se muestra en la **Figura 14**, los resultados obtenidos en el proceso de molienda en la muestra 1.

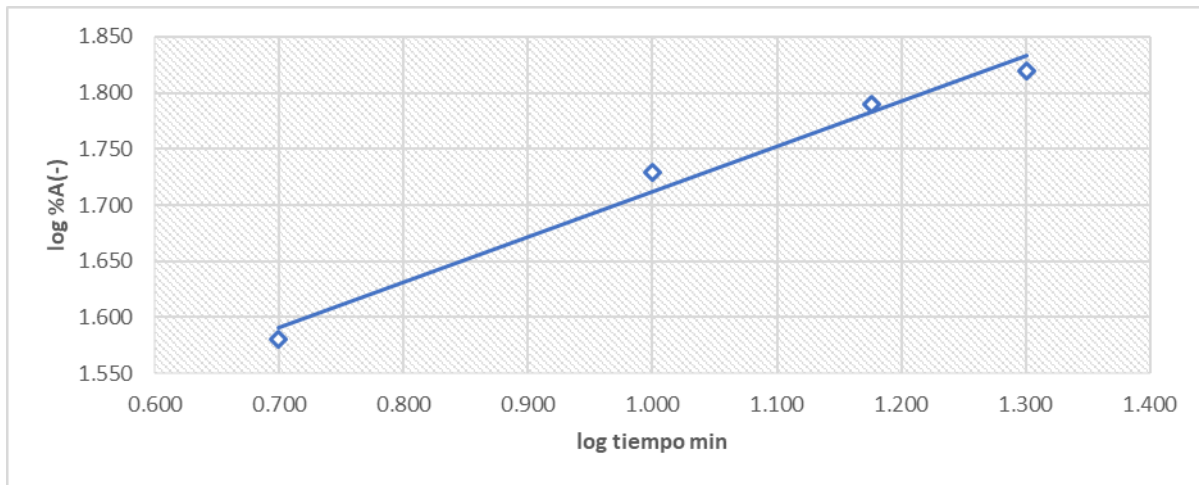


Figura 14. Gráfica log % Ac(-) vs log tiempo. Muestra 1. Tiempo óptimo de molienda.

Tabla 7. Resultados obtenidos en la muestra 2. % Ac(-) en función de tamaño de liberación de partícula para cada tiempo de molienda.

Tamaño de liberación 104.140 μm			
Tiempo	%Ac(-)	log tiempo	log %(-)
5.000	68.027	0.699	1.833
10.000	73.314	1.000	1.865
15.000	76.161	1.176	1.882
20.000	75.676	1.301	1.879

A continuación, se muestra en la **Figura 15**, los resultados obtenidos en el proceso de molienda en la muestra 2.

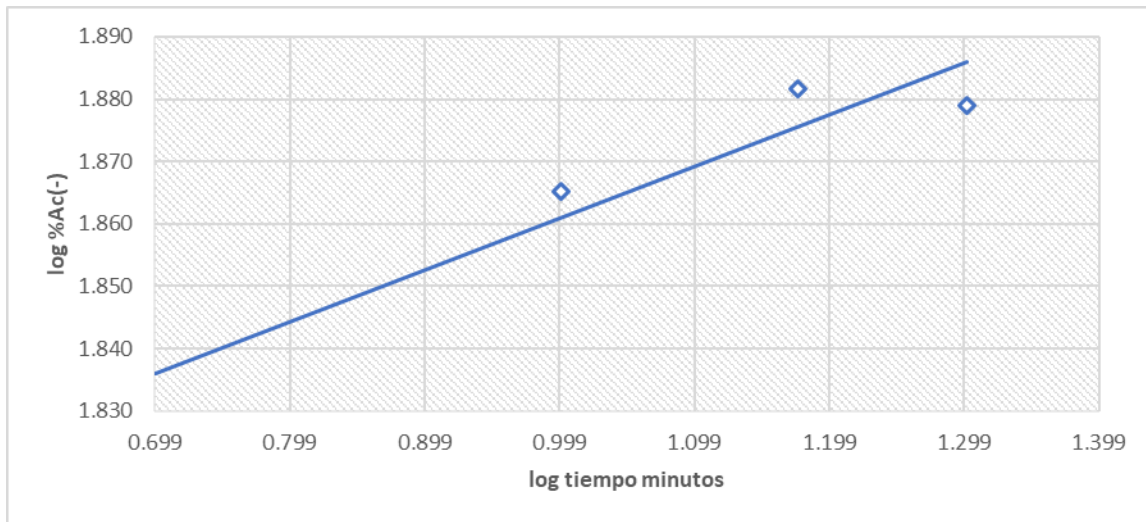


Figura 15. Gráfica log % Ac(-) vs log tiempo. Muestra 2 . Tiempo óptimo de molienda.

Tabla 8. Resultados obtenidos en la muestra 3. % Ac(-) en función de tamaño de liberación de partícula para cada tiempo de molienda.

Tamaño de liberación 149.860µm			
Tiempo	% Ac(-)	log tiempo	log % Ac(-)
5.000	43.168	0.699	1.635
10.000	63.675	1.000	1.804
15.000	74.154	1.176	1.870
20.000	80.201	1.301	1.904

A continuación, se muestra en la **Figura 16**, los resultados obtenidos en el proceso de molienda en la muestra 3.

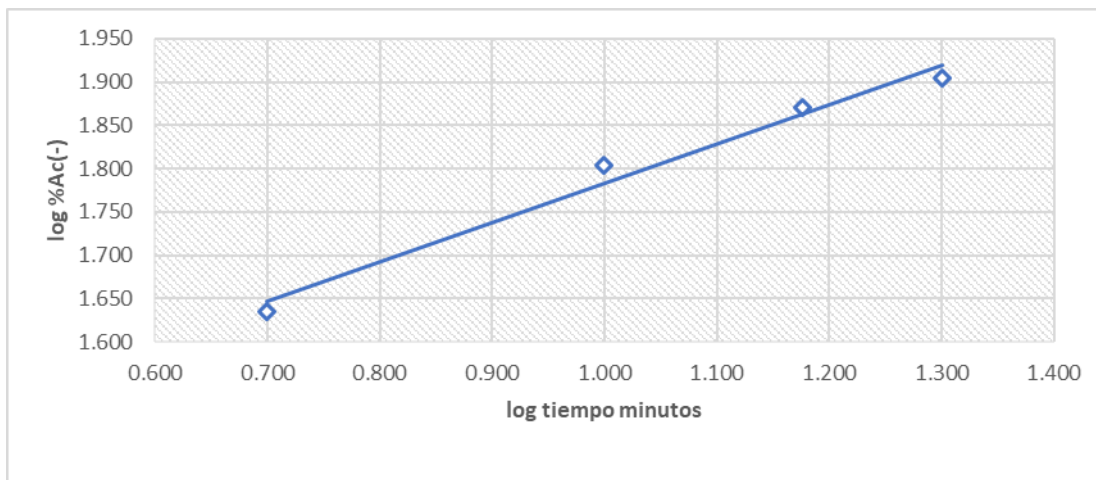


Figura 16. Gráfica log % Ac(-) vs log tiempo. Muestra 3. Tiempo óptimo de molienda.

Tabla 9. Resultados obtenidos en la muestra 4. % Ac(-) en función de tamaño de liberación de partícula para cada tiempo de molienda.

Tamaño de liberación 104.140 μm			
Tiempo	% Ac(-)	log tiempo	log %Ac(-)
5.000	35.552	0.699	1.551
10.000	50.143	1.000	1.700
15.000	51.064	1.176	1.708
20.000	60.534	1.301	1.782

A continuación, se muestra en la **Figura 17**, los resultados obtenidos en el proceso de molienda en la muestra 4.

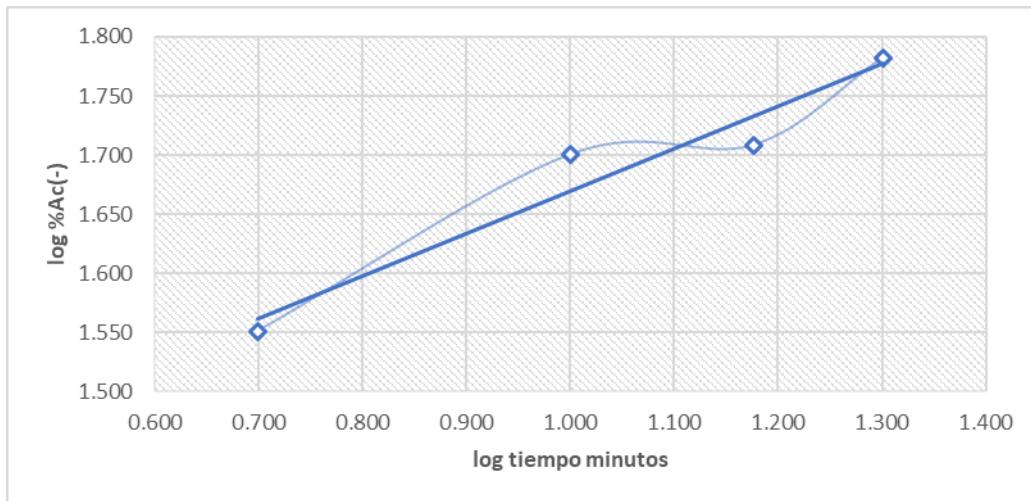


Figura 17. Gráfica log % Ac(-) vs log tiempo. Muestra 4 . Tiempo óptimo de molienda.

Una vez obtenidas las gráficas de % Ac (-) vs el tamaño en micrómetros se determinó el tiempo óptimo de molienda a partir del 80% Ac(-), para cada una de las muestras.

A continuación, se muestra los tiempos óptimos de molienda obtenidos para cada mineral, **Tabla 10**.

Tabla 10. Tiempo óptimo de molienda obtenido en cada muestra de mineral experimentado

Mineral	Tiempo óptimo (min)
Muestra 1	29.00
Muestra 2	32.00
Muestra 3	29.00
Muestra 4	44.00

Al obtener los resultados de tiempo óptimo de molienda se puede ver una comparación con la dureza de cada material ya que estos van ligados; a menor dureza se tendrá un menor tiempo óptimo de molienda del mineral. En los minerales que se procesaron a un tiempo óptimo de 29.00 minutos de proceso se tiene un intervalo de dureza de 4.3 – 4.8, el mineral con mayor dureza (8.1) tiene el mayor tiempo en el proceso de molienda (44.00 minutos) lo que nos confirma que, a mayor dureza, mayor tiempo de molienda.

En el caso la muestra 2 se observa una anomalía ya que los valores de dureza obtenidos son de 1.5-1.6 y su tiempo de molienda es de 32 minutos lo cual no se

espera analizando los datos obtenidos en las anteriores muestras, esto se debe a que el tamaño de partícula de alimentación al molino no era el mismo que las otras muestras, por lo cual tiene un mayor tiempo óptimo de molienda.

Se realizó un análisis granulométrico a cada mineral una vez molido, así como sus gráficas de % Ac (-) vs log tamaño μm (**Anexo 3**), de este análisis se separaron las partículas cuyo tamaño fuera más grande que el óptimo de liberación esto con el fin de ser utilizado en las pruebas de centrifugación.

3.2. Resultados etapa 2.

Para proceder a las pruebas de centrifugación previamente se llevó a cabo la determinación de la densidad de cada mineral procesado, los valores obtenidos de la densidad fueron determinados por el método de la probeta teniendo un volumen inicial de 10 cm^3 de agua, en la **Tabla 11** se muestran los resultados de las densidades obtenidas.

Tabla 11. Densidades de cada mineral procesado.

Muestra	Masa (g)	Volumen Final (cm^3)	Δ Volumen (cm^3)	Densidad (g/cm^3)
1	2.24	11.10	1.10	2.03
2	2.04	11.00	1.00	2.04
3	2.32	11.20	1.20	1.93
4	2.04	10.90	0.90	2.27

Para las pruebas de centrifugación manual se emplearon 2000 RPM, utilizando tubos a los cuales se les adicionó 10 mL de agua y 1 g de mineral previamente caracterizado. Se centrifugó por 5 minutos y al terminar se realizó una separación en tres capas de mineral, tomando peso de cada capa, como se muestra en la **Figura 18**.

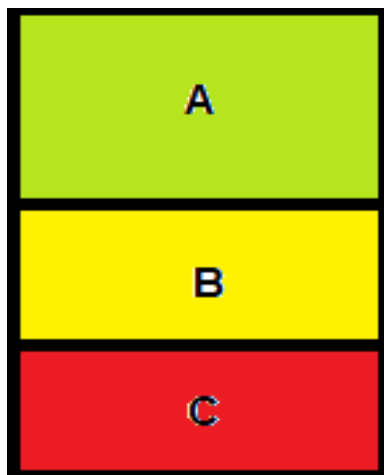


Figura 18. Nomenclatura de la separación por capas de mineral centrifugado a 2000 rpm.

Las capas de cada muestra fueron sometidas a un proceso de digestión para poder llevar a cabo la lectura de contenido metálico en un “Espectrómetro de Absorción Atómica”, obteniéndose lecturas de Cu y Fe, los resultados obtenidos se muestran en la **Tabla 12** para Cu y **Tabla 13** para Fe.

Tabla 12. Contenido de cobre en cada capa de mineral obtenida a 2000 rpm.

Muestra 1	Peso (g)	ppm Cu	% Cu
Inicial	0.3764	2.34	0.0622
A	0.1878	1.32	0.0703
B	0.2362	1.15	0.0487
C	0.1989	0.95	0.0478
Muestra 2	Peso (g)	ppm Cu	% Cu
Inicial	0.3524	0.38	0.0108
A	0.2258	0.33	0.0146
B	0.2224	0.25	0.0112
C	0.1609	0.14	0.0087
Muestra 3	Peso (g)	ppm Cu	% Cu
Inicial	0.3354	0.29	0.0086
A	0.1292	0.12	0.0093
B	0.2559	0.2	0.0078
C	0.3152	0.25	0.0079
Muestra 4	Peso (g)	ppm Cu	% Cu
Inicial	0.3501	0.21	0.0060
A	0.2237	0.19	0.0085
B	0.1414	0.05	0.0035
C	0.2388	0.09	0.0038

Tabla 13. Contenido de hierro en cada capa de mineral obtenida a 2000 rpm.

Muestra 1	Peso (g)	ppm Fe	% Fe
Inicial	0.3764	206.1638	5.4773
A	0.1878	110.4741	5.8825
B	0.2362	140.6466	5.9546
C	0.1989	144.9569	7.2879
Muestra 2	Peso (g)	ppm Fe	% Fe
Inicial	0.3524	158.3190	4.4926
A	101.2672	0.0101	4.4848
B	114.6293	0.0115	5.1542
C	84.6121	0.0085	5.2587
Muestra 3	Peso (g)	ppm Fe	% Fe
Inicial	0.3354	152.2845	4.5404
A	0.1011	52.2845	5.1716
B	0.2317	107.0259	4.6192
C	0.3152	165.2155	5.2416
Muestra 4	Peso (g)	ppm Fe	% Fe
Inicial	0.3501	250.1293	7.1445
A	118.23	0.0118	5.2853
B	77.28	0.0077	5.4657
C	247.54	0.0248	10.3661

En las pruebas de centrifugación automática se emplearon 2600 rpm, utilizando tubos a los cuales se les adicionó 30 mL y 5 g de mineral previamente caracterizado. Se centrifugó por 5 minutos y al terminar se realizó una separación en tres capas de mineral separado, tomando peso de cada capa, la nomenclatura se muestra en la **Figura 19**.

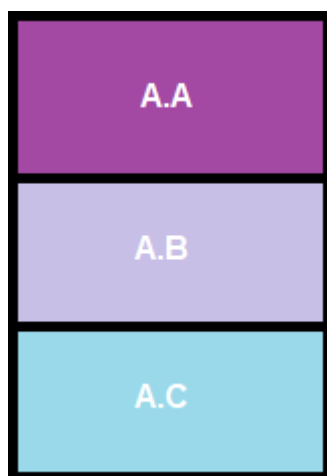


Figura 19. Nomenclatura de la separación por capas de mineral centrifugado a 2600 rpm.

Las capas de cada muestra fueron sometidas a un proceso de digestión para poder llevar a cabo la lectura de contenido metálico en un “Espectrómetro de Absorción Atómica”, obteniendo lecturas de Cu y Fe. En las tablas **14 y 15** se muestran los resultados obtenidos de Cu y Fe en las pruebas realizadas a las muestras previamente digeridas.

Tabla 14. Contenido de cobre en cada capa de mineral obtenida a 2600 rpm.

Muestra 1	Peso (g)	ppm Cu	% Cu
A. Inicial	0.3764	2.34	0.0622
A.A	0.412	2.49	0.0604
A.B	0.3786	2.07	0.0547
A.C	0.3502	1.85	0.0528
Muestra 2	peso (g)	ppm Cu	% Cu
Inicial	0.3524	0.38	0.0108
A.A	0.3521	0.41	0.0116
A.B	0.3709	0.37	0.0100
A.C	0.3089	0.3	0.0097
Muestra 3	Peso (g)	ppm Cu	% Cu
A. inicial	0.3354	0.29	0.0086
A.A	0.3566	0.26	0.0073
A.B	0.3502	0.11	0.0031
A.C	0.3417	0.07	0.0020
Muestra 4	Peso (g)	ppm Cu	% Cu
A. inicial	0.3501	0.21	0.0060
A.A	0.3262	0.25	0.0077
A.B	0.3248	0.20	0.0062
A.C	0.3057	0.19	0.0062

Tabla 15. Contenido de hierro en cada capa de mineral obtenida a 2600 rpm.

Muestra 1	Peso (g)	ppm Fe	% Fe
M. inicial	0.3764	206.1638	5.4773
A.A	0.412	0.1293	0.0031
A.B	0.3786	145.8190	3.8515
A.C	0.3502	152.2845	4.3485
Muestra 2	Peso (g)	ppm Fe	% Fe
A. inicial	0.3524	158.3190	4.4926
A.A	0.3521	149.1459	4.2359
A.B	0.3709	157.4249	4.2444
A.C	0.3089	140.9871	4.5642
Muestra 3	Peso (g)	ppm Fe	% Fe
A. inicial	0.3354	152.2845	0.4540
A.A	0.3566	202.2845	5.6726
A.B	0.3502	198.4052	5.6655
A.C	0.3417	191.5086	5.6046
Muestra 4	Peso (g)	ppm Fe	% Fe
A. inicial	0.3501	250.1293	7.1445
A.A	0.3262	209.2275	6.4141
B.A	0.3248	234.1202	7.2081
A.C	0.3057	236.6953	7.7427

Realizadas las lecturas de los contenidos metálicos se realizó una comparación de cada muestra respecto a los porcentajes de cada especie separada contra las diferentes velocidades de centrifugación.

Las **Figuras 20, 21, 22 y 23** muestran la variación de Cu obtenida en cada muestra después del proceso de centrifugación.

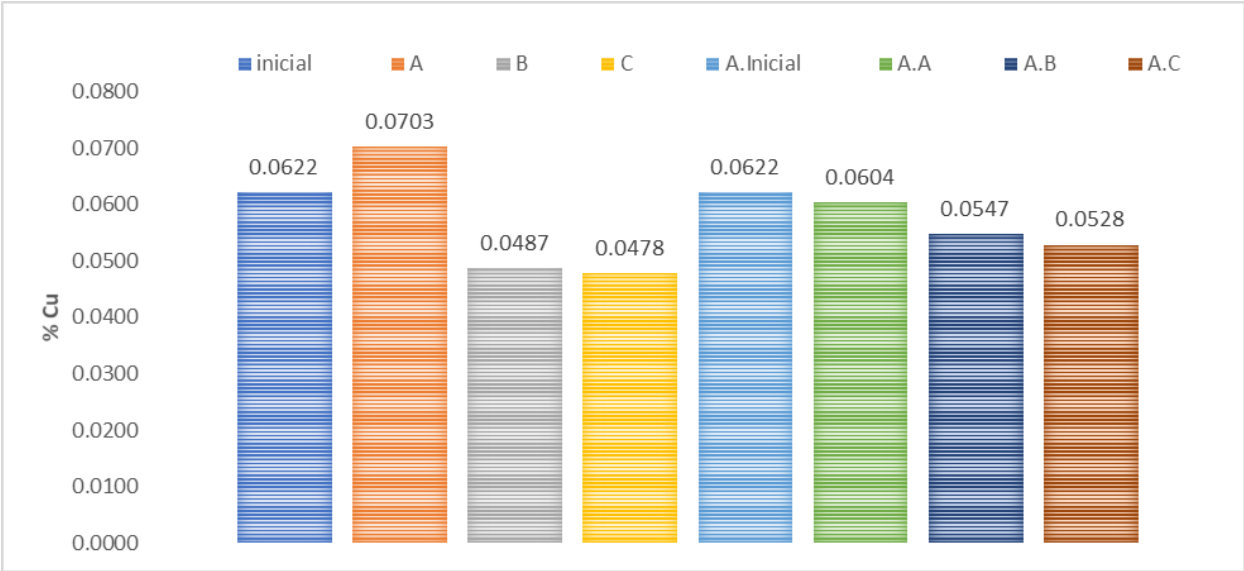


Figura 20. Variación de % Cu en cada capa de la "muestra 1" a 2000 rpm y 2600 rpm.

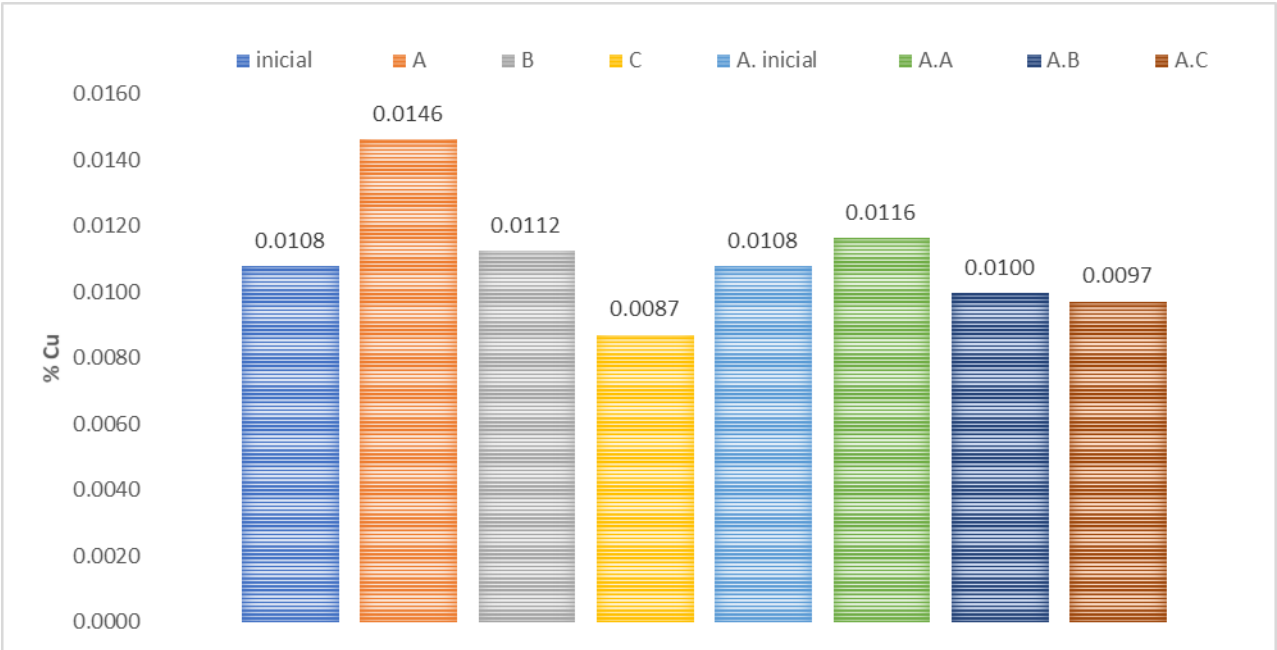


Figura 21. Variación de % Cu en cada capa de la "muestra 2" a 2000 rpm y 2600 rpm.



Figura 22. Variación de % Cu en cada capa de la "muestra 3" a 2000 rpm y 2600 rpm.

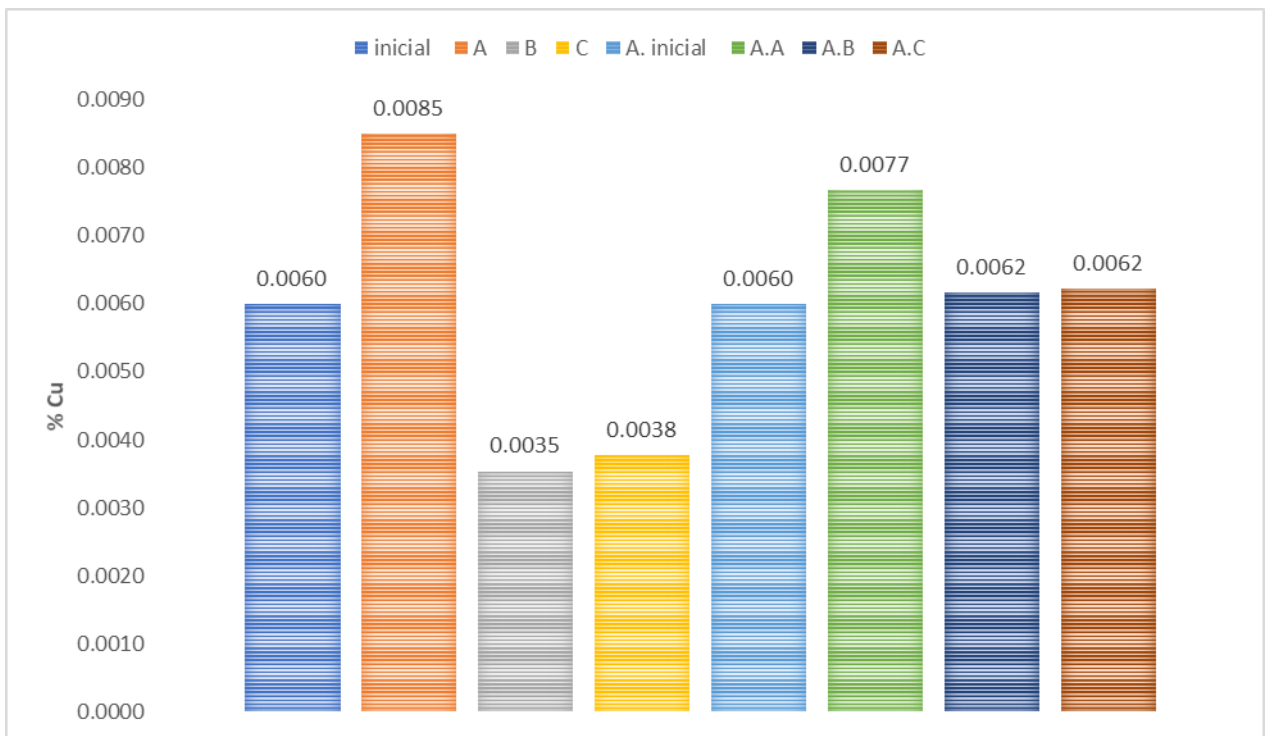


Figura 23. Variación de % Cu en cada capa de la "muestra 4" a 2000 rpm y 2600 rpm.

Las **Figuras 24, 25, 26 y 27** muestran la variación de Fe obtenida en cada muestra después del proceso de centrifugación.

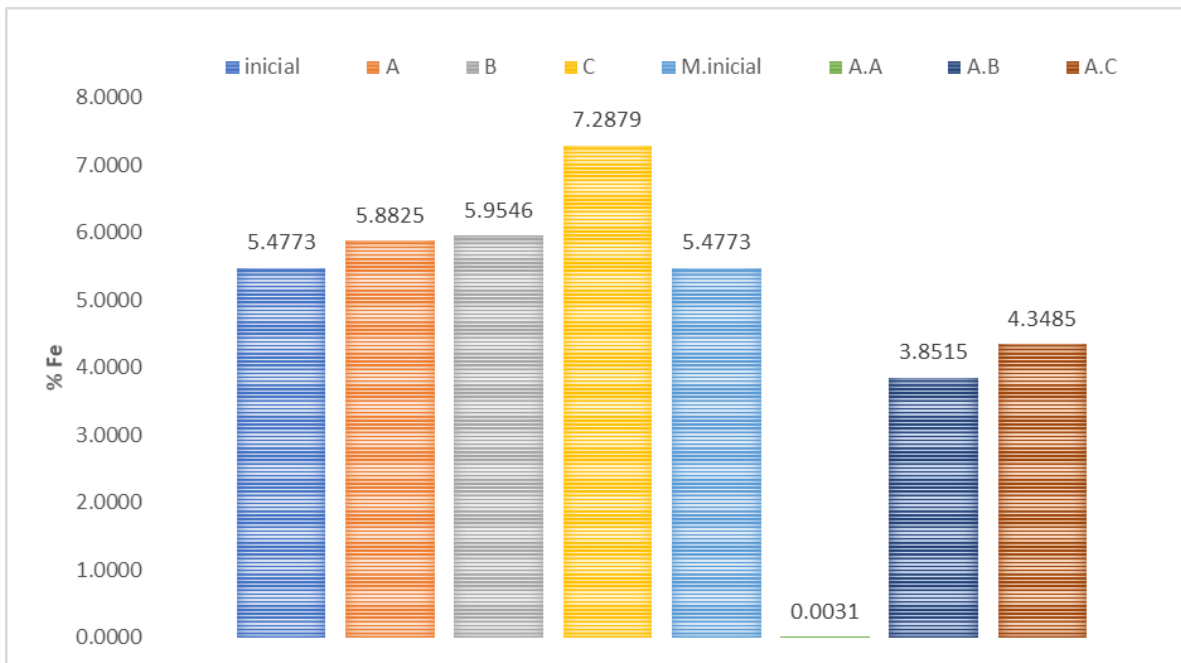


Figura 24. Variación de % Fe en cada capa de la "muestra 1" a 2000 rpm y 2600 rpm.

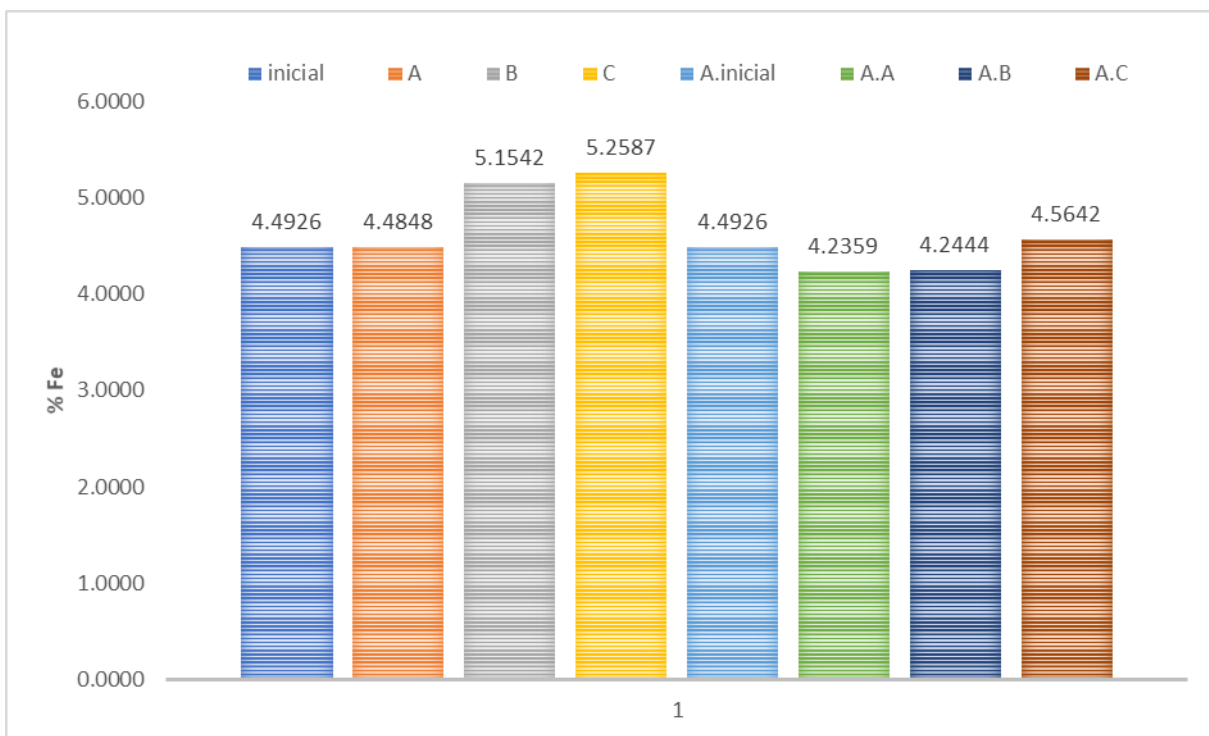


Figura 25. Variación de % Fe en cada capa de la "muestra 2" a 2000 rpm y 2600 rpm.

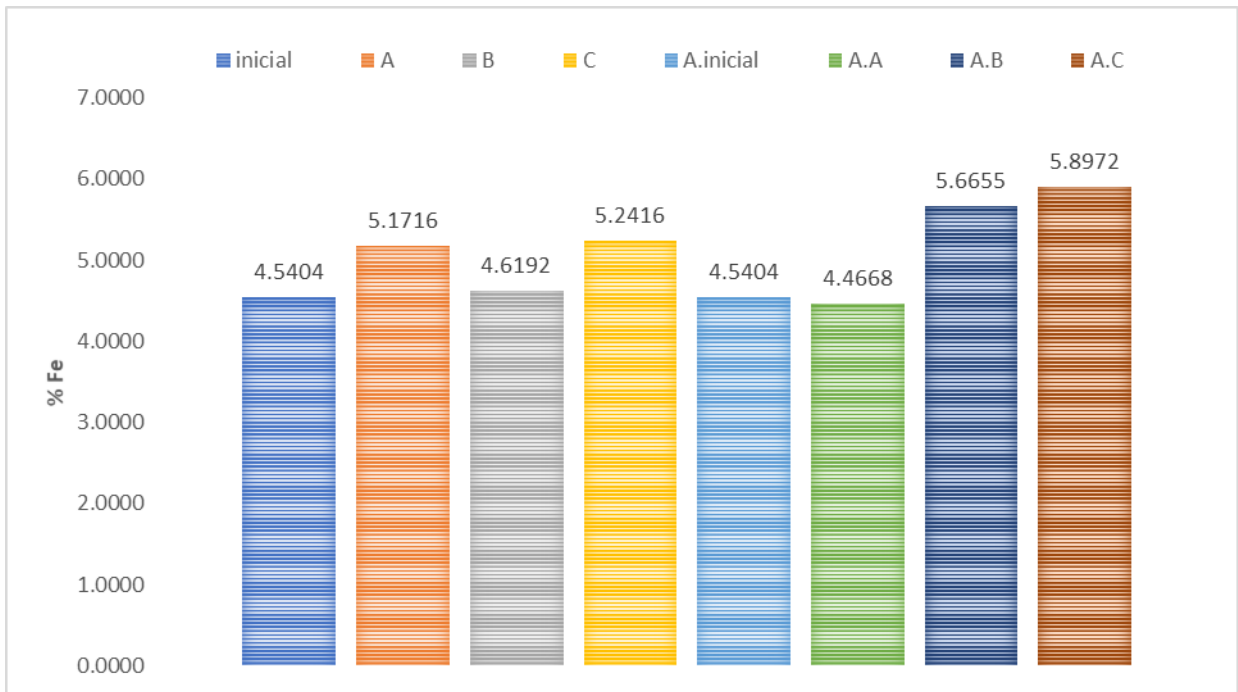


Figura 26. Variación de % Fe en cada capa de la "muestra 3" a 2000 rpm y 2600 rpm.

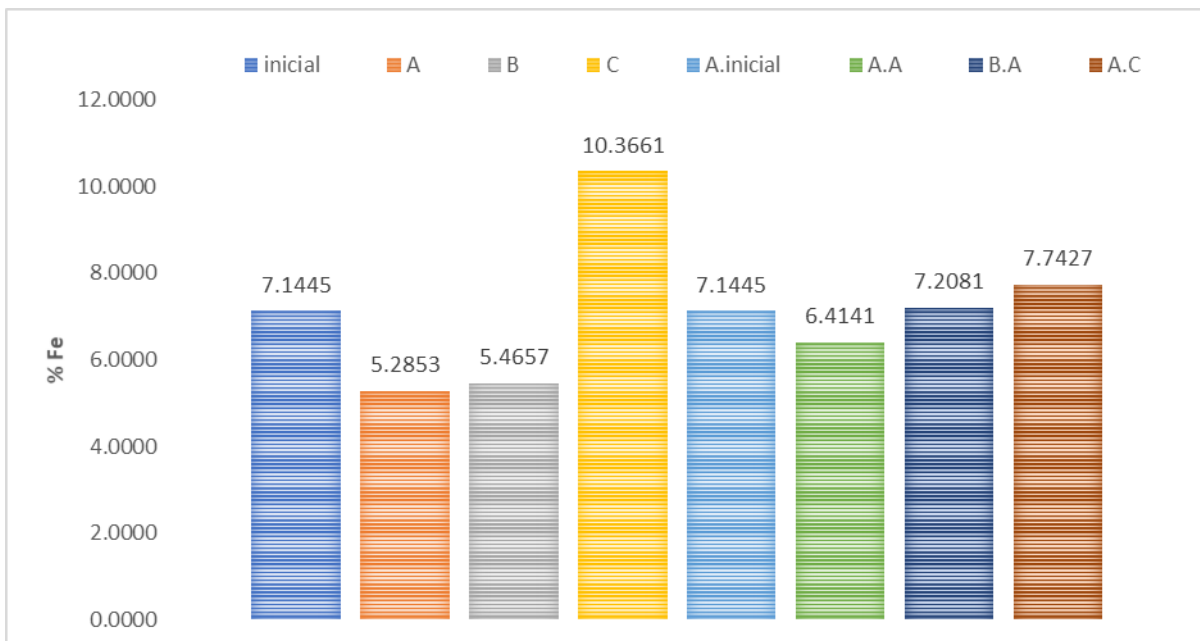


Figura 27. Variación de % Fe en cada capa de la "muestra 4" a 2000 rpm y 2600 rpm.

Siguiendo el criterio de concentrabilidad de Taggart y tomando en cuenta la densidad de minerales de Cu como calcopirita y calcosita, así como minerales de Fe como hematita y magnetita en nuestras muestras podemos determinar un valor de criterio de concentración próximo a 1.45, lo que nos indica que nuestro proceso de concentración es factible.

Si partimos de la ecuación de Stokes de velocidad centrifuga que nos indica que la velocidad es proporcional a la densidad de la partícula podemos determinar una mayor velocidad de sedimentación en los minerales de Fe ya que estos cuentan con una mayor densidad que los de Cu, lo cual significa que la parte inferior de nuestro producto contará con mayores concentraciones de Fe y la parte superior de Cu. De igual manera al aumentar las revoluciones por minuto del proceso se esperaría un mayor grado de concentración de productos en cada muestra.

En las figuras 20, 21, 22 y 23 se muestra la variación de % de cobre contenido en las capas de cada muestra centrifugada a 2000 y 2600 rpm. En todas las muestras se observa un aumento en la concentración de cobre en la parte superior del producto de centrifugación.

Comparando los productos de cobre a 2000 y 2600 rpm se observa una mayor eficiencia en las pruebas realizadas a menores revoluciones esto debido a las condiciones de trabajo ya que la centrifugadora manual (2000 rpm) trabaja con un rotor basculante el cual hace que los tubos contenedores de muestra giren perpendicularmente al eje de giro, mientras que la centrifugadora automática (2600 rpm) trabaja con un rotor de ángulo fijo haciendo que los tubos se sitúen paralelo al eje de giro, al hacer que los tubos giren perpendicularmente al eje de giro se beneficia que las partículas con menor densidad se depositen en la parte superior del producto. Las figuras 24, 25, 26 y 27 presentan la variación de % de hierro denotando una tendencia a aumentar la concentración de hierro en la parte inferior del producto de centrifugación, en este caso se observa una mayor eficiencia en las pruebas realizadas en la centrifugadora automática, ya que al hacer que los tubos se sitúen en paralelo al eje de giro ayuda a que las partículas de mayor densidad se sitúen en la parte inferior del producto.

3.3. Resultados etapa 3.

Para las pruebas de centrifugación manual en jales se emplearon 2000 y 2600 rpm. Se centrifugó por 5 y 10 minutos y al terminar se realizó una separación en cuatro capas de muestra de jale, tomando peso de cada capa, en la **Figura 28** de muestra la nomenclatura utilizada para cada capa.

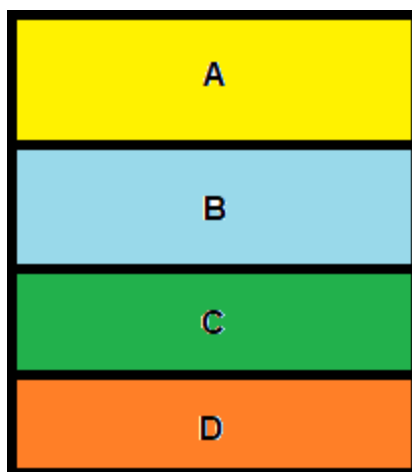


Figura 28. Nomenclatura de la separación por capas de muestra de jale centrifugado.

Las capas de cada muestra de fueron sometidas a un proceso de digestión para poder llevar acabo la lectura de contenido metálico en un “Espectrómetro de Absorción Atómica”, obtenido lecturas de Cu, Fe y Ag.

En las tablas **16 y 17** se muestran los resultados obtenidos de contenido de Cu en cada capa de las pruebas realizadas a 2000 rpm, a un tiempo de 5 y 10 minutos respectivamente.

Tabla 16. Contenido de cobre en cada capa de jale obtenida a 2000 rpm y 5 minutos.

Muestra 1	Peso (g)	ppm Cu	% Cu
Inicial	0.4855	5.44	0.1120
A	0.2820	2.67	0.0947
B	0.3861	3.16	0.0818
C	0.3723	4.27	0.1147
D	0.4800	8.43	0.1756
Muestra 2	Peso (g)	ppm Cu	% Cu
Inicial	0.4855	5.44	0.1120
A	0.2930	1.63	0.0556
B	0.4375	3.47	0.0793
C	0.2953	3.4	0.1151
D	0.4403	6.33	0.1438
Muestra 3	Peso (g)	ppm Cu	% Cu
Inicial	0.4855	5.44	0.1120
A	0.3047	2.24	0.0735
B	0.4021	4.45	0.1107
C	0.3972	5.28	0.1329
D	0.4133	6.09	0.1474

Tabla 17. Contenido de cobre en cada capa de jale obtenida a 2000 rpm y 10 minutos.

Muestra 1	Peso (g)	ppm Cu	% Cu
Inicial	0.4855	5.44	0.1120
A	0.2960	2.33	0.0787
B	0.3853	4.28	0.1111
C	0.4321	6.06	0.1402
D	0.3692	7.21	0.1953
Muestra 2	Peso (g)	ppm Cu	% Cu
Inicial	0.4855	5.44	0.1120
A	0.2512	1.63	0.0649
B	0.3475	3.38	0.0973
C	0.3975	6.07	0.1527
D	0.4295	8.05	0.1874
Muestra 3	Peso (g)	ppm Cu	% Cu
Inicial	0.4855	5.44	0.1120
A	0.2251	2.42	0.1075
B	0.3336	2.5	0.0749
C	0.3455	4.45	0.1288
D	0.4083	6.14	0.1504

Las **Figuras 29, 30, 31, 32, 33, 34** muestran la variación de contenido de Cu de las muestras después del proceso de centrifugación a 2000 rpm, a 5 y 10 minutos respectivamente.

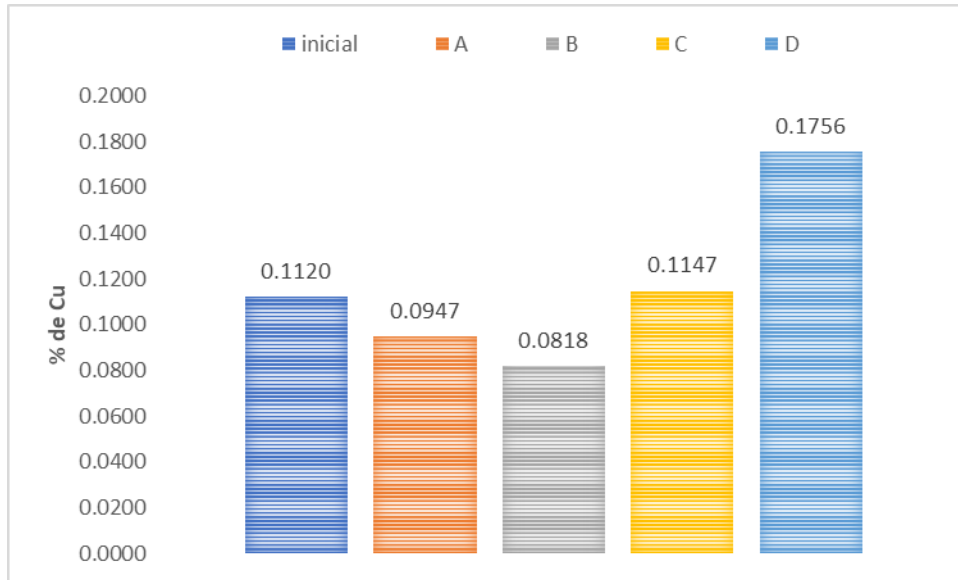


Figura 29. Variación de % Cu en cada capa de la "muestra 1" a 2000 rpm y 5 minutos.

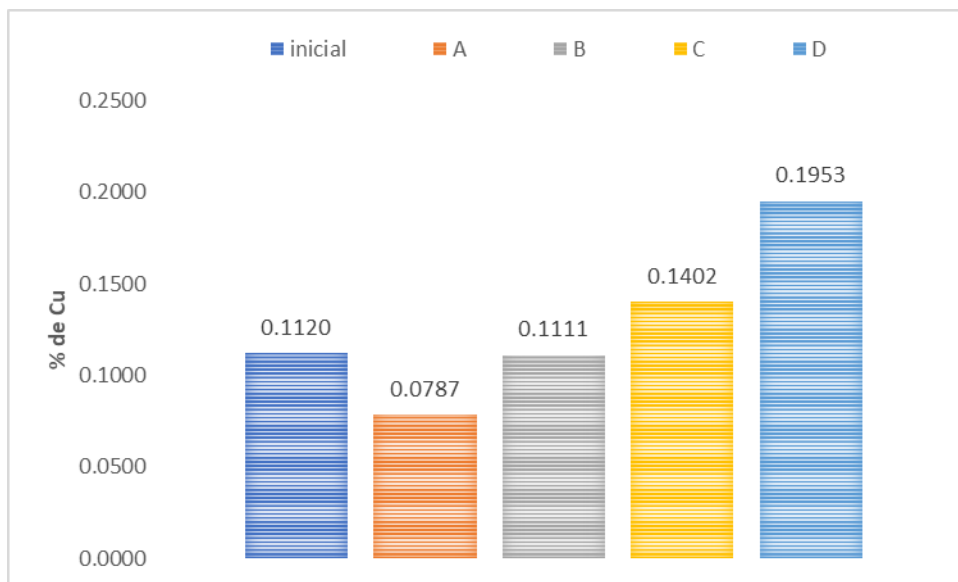


Figura 30. Variación de % Cu en cada capa de la "muestra 1" a 2000 rpm y 10 minutos.

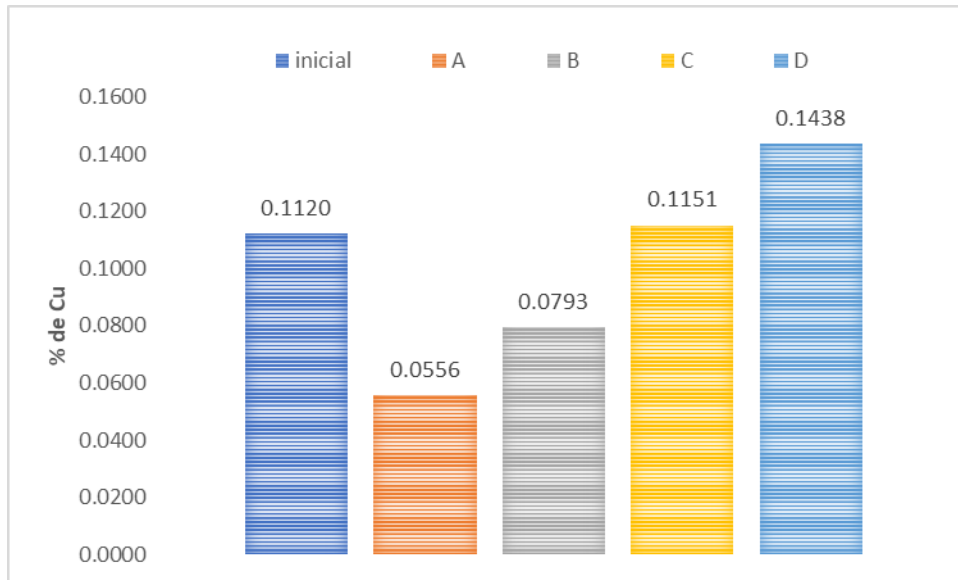


Figura 31. Variación de % Cu en cada capa de la "muestra 2" a 2000 rpm y 5 minutos.

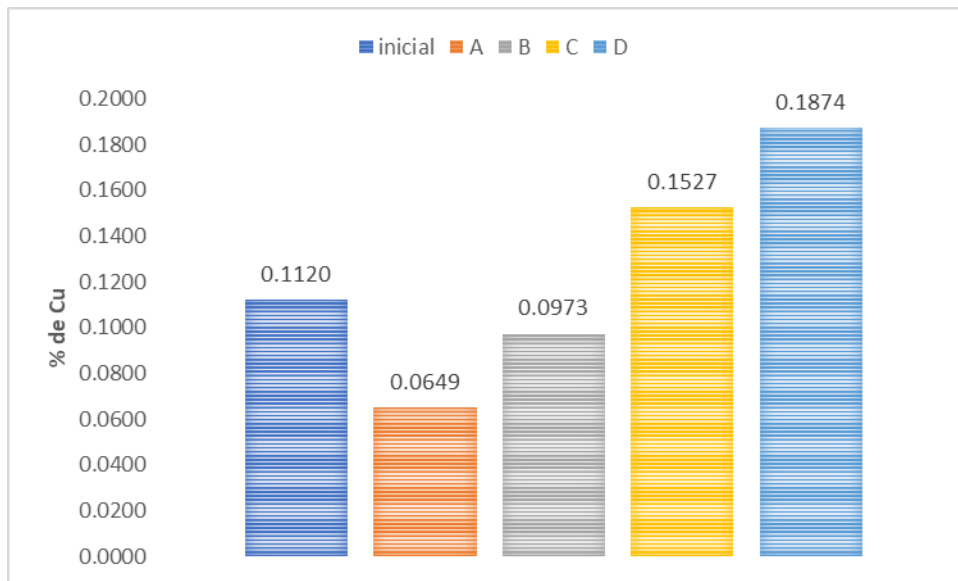


Figura 32. Variación de % Cu en cada capa de la "muestra 2" a 2000 rpm y 10 minutos.

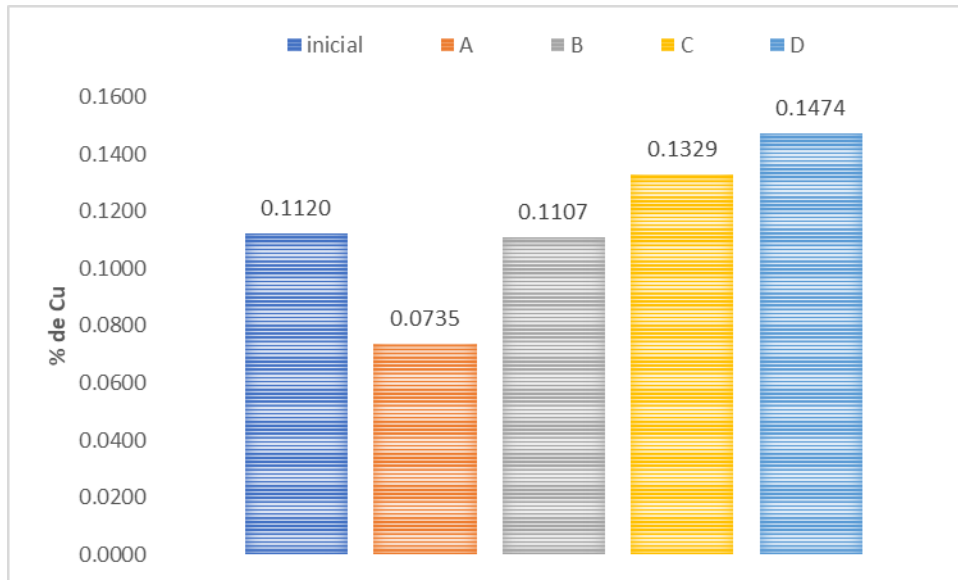


Figura 33. Variación de % Cu en cada capa de la "muestra 3" a 2000 rpm y 5 minutos.

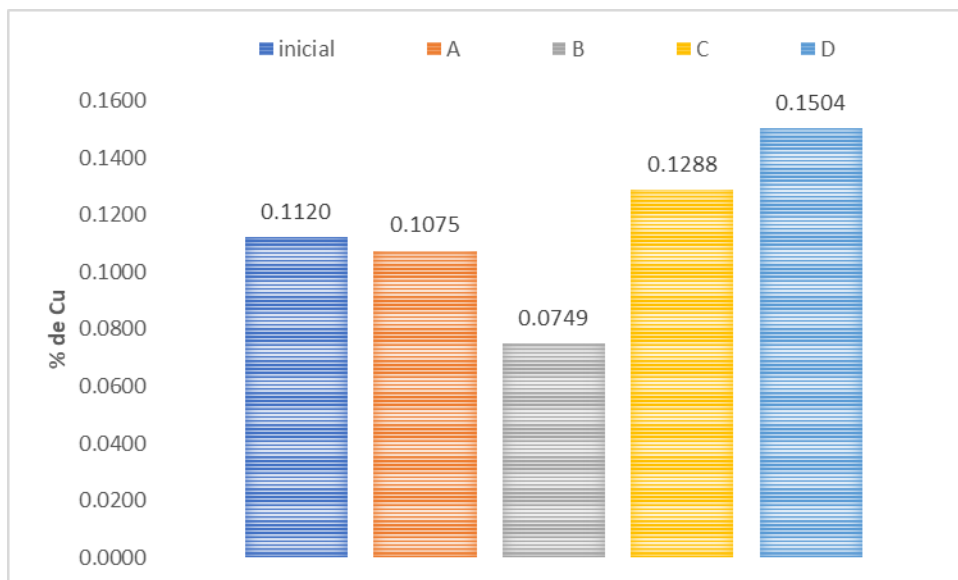


Figura 34. Variación de % Cu en cada capa de la "muestra 3" a 2000 rpm y 10 minutos.

En las tablas **18 y 19** se muestran los resultados obtenidos de contenido de Cu en cada capa de las pruebas realizadas a 2600 rpm, a 5 y 10 minutos respectivamente.

Tabla 18. Contenido de cobre en cada capa de jale obtenida a 2600 rpm y 5 minutos.

Muestra 1	Peso (g)	ppm Cu	% Cu
Inicial	0.4855	5.44	0.1120
A	0.4610	4.06	0.0881
B	0.4534	5.42	0.1195
C	0.3853	4.87	0.1264
D	0.4698	6.9	0.1469
Muestra 2	Peso (g)	ppm Cu	% Cu
Inicial	0.4855	5.44	0.1120
A	0.3898	4.03	0.1034
B	0.4874	6.18	0.1268
C	0.4385	6.33	0.1444
D	0.4440	6.25	0.1408
Muestra 3	Peso (g)	ppm Cu	% Cu
Inicial	0.4855	5.44	0.1120
A	0.3170	2.51	0.0792
B	0.3537	3.35	0.0947
C	0.3242	3.99	0.1231
D	0.3476	3.95	0.1136

Tabla 19. Contenido de cobre en cada capa de jale obtenida a 2600 rpm y 10 minutos.

Muestra 1	Peso (g)	ppm Cu	% Cu
Inicial	0.4855	5.44	0.1120
A	0.3605	2.5	0.0693
B	0.4641	6.13	0.1321
C	0.4822	7.1	0.1472
D	0.4947	7.2	0.1455
Muestra 2	Peso (g)	ppm Cu	% Cu
Inicial	0.4855	5.44	0.1120
A	0.3238	2.57	0.0794
B	0.4873	6.58	0.1350
C	0.4803	8.23	0.1714
D	0.4526	6.34	0.1401
Muestra 3	Peso (g)	ppm Cu	% Cu
Inicial	0.4855	5.44	0.1120
A	0.3801	2.85	0.0750
B	0.4250	5.24	0.1233
C	0.4273	5.91	0.1383
D	0.4945	7.06	0.1428

Las **Figuras 35, 36, 37, 38, 39, 40** muestran la variación de contenido de Cu de las muestras después del proceso de centrifugación a 2600 rpm, a 5 y 10 minutos respectivamente.

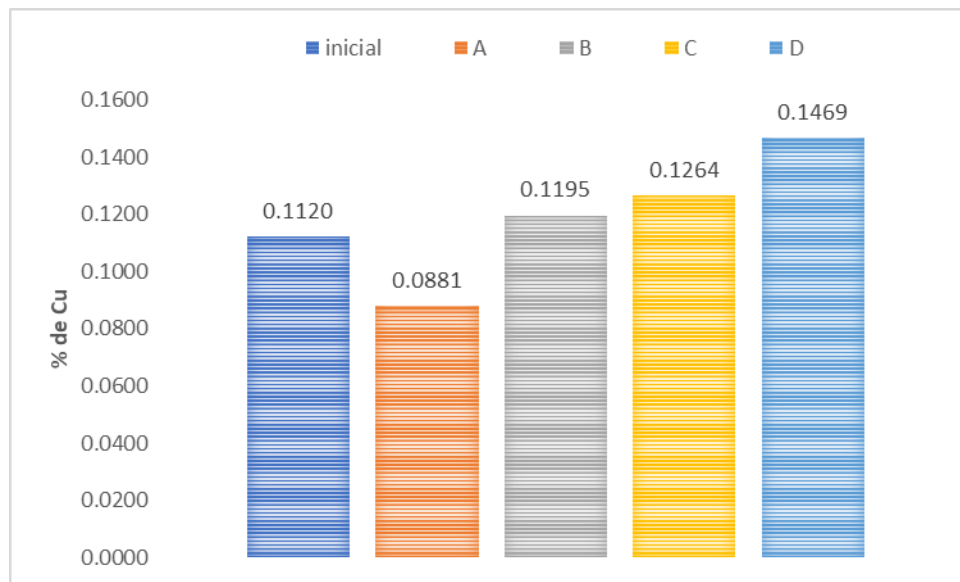


Figura 35. Variación de % Cu en cada capa de la "muestra 1" a 2600 rpm y 5 minutos.

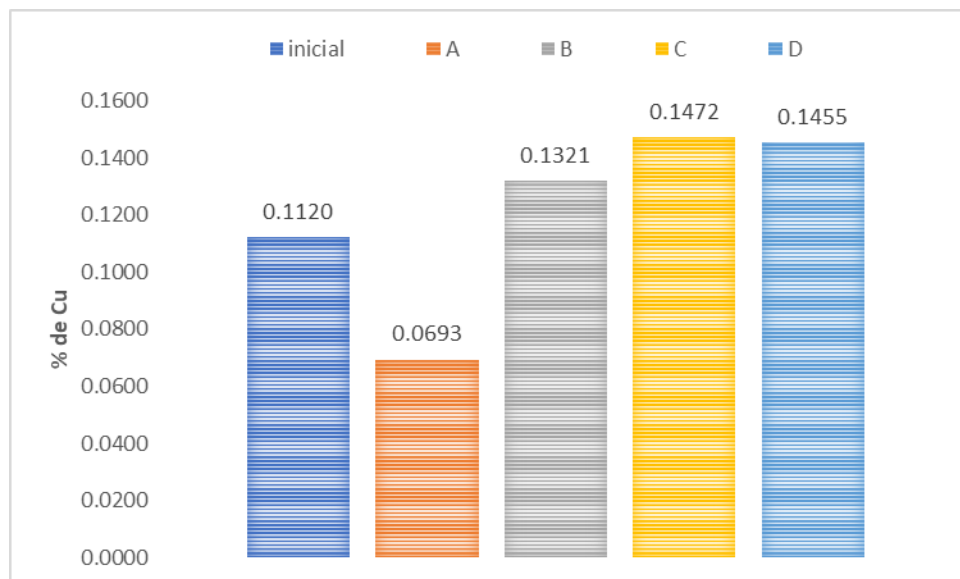


Figura 36. Variación de % Cu en cada capa de la "muestra 1" a 2600 rpm y 10 minutos.

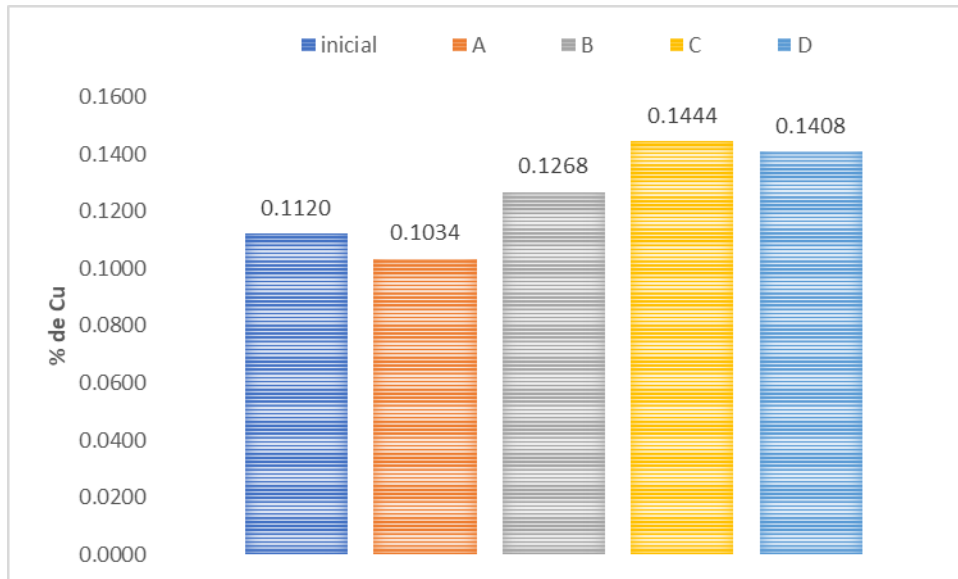


Figura 37. Variación de % Cu en cada capa de la "muestra 2" a 2600 rpm y 5 minutos.

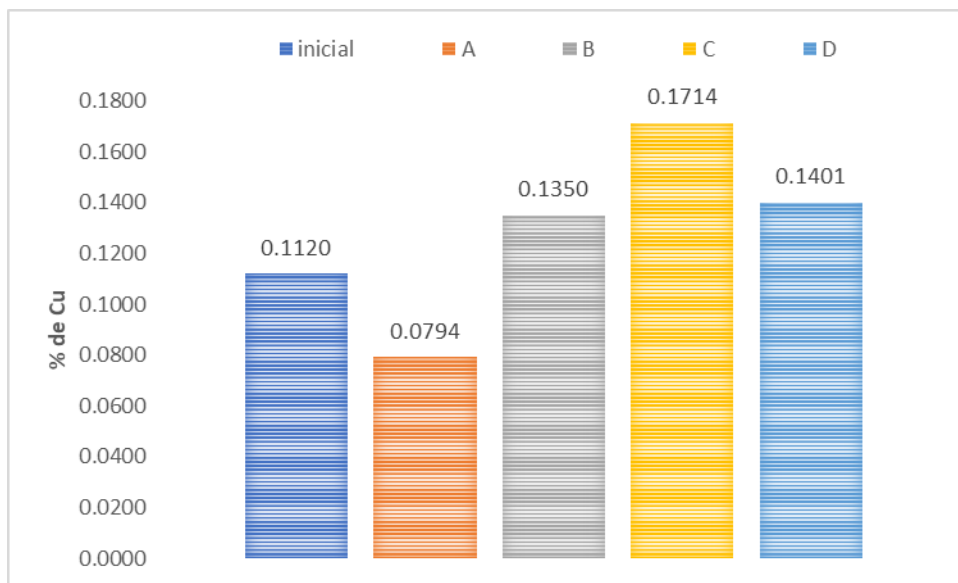


Figura 38. Variación de % Cu en cada capa de la "muestra 2" a 2600 rpm y 10 minutos.

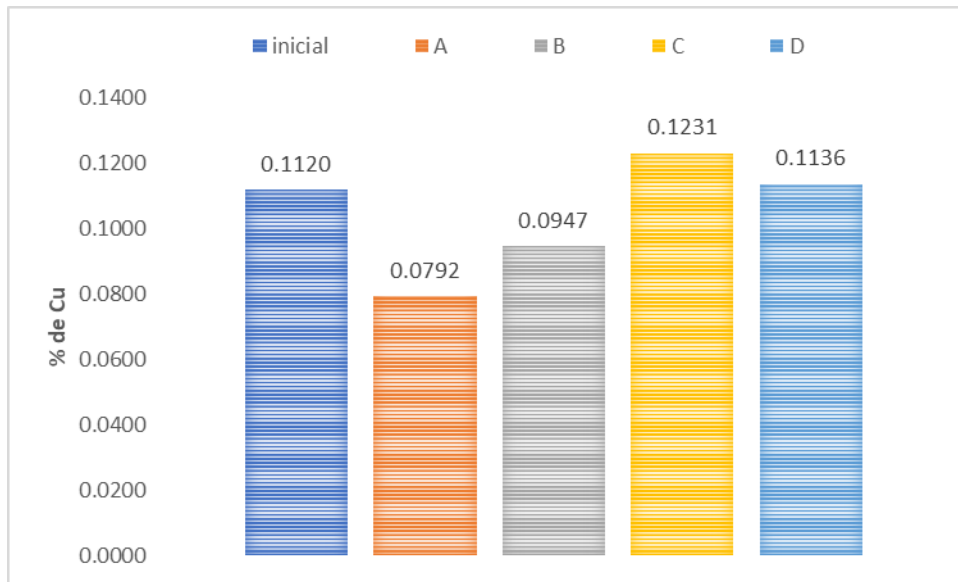


Figura 39. Variación de % Cu en cada capa de la "muestra 3" a 2600 rpm y 5 minutos.

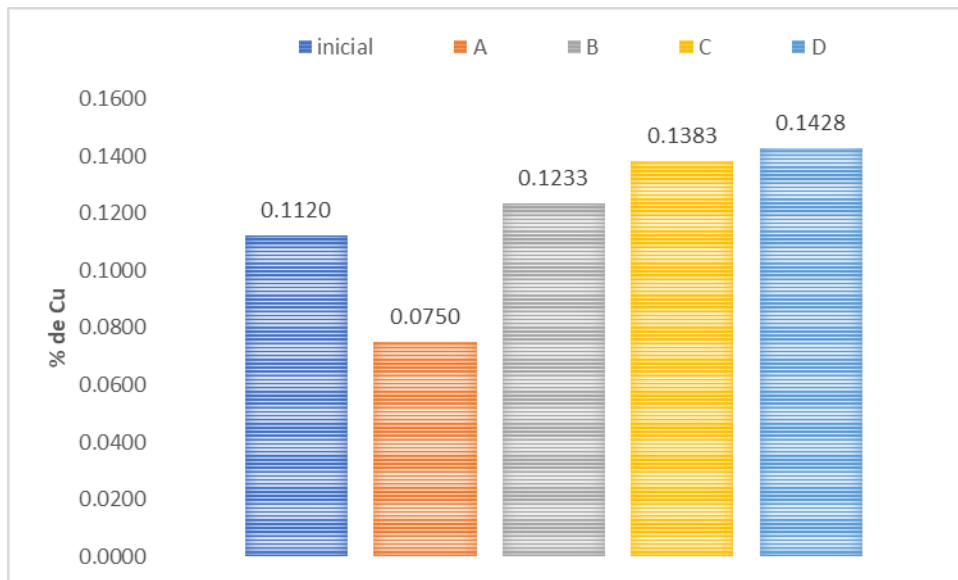


Figura 40. Variación de % Cu en cada capa de la "muestra 3" a 2600 rpm y 10 minutos.

En las tablas **20 y 21** se muestran los resultados obtenidos de contenido de Fe en cada capa de las pruebas realizadas a 2000 rpm, a 5 y 10 minutos respectivamente.

Tabla 20. Contenido de hierro en cada capa de jale obtenida a 2000 rpm y 5 minutos.

Muestra 1	Peso (g)	ppm Fe	% Fe
Inicial	0.4855	314	0.6468
A	0.2820	204	0.7234
B	0.3861	290	0.7511
C	0.3723	217	0.5829
D	0.4800	281	0.5854
Muestra 2	Peso (g)	ppm Fe	% Fe
Inicial	0.4855	314	0.6468
A	0.2930	245	0.8362
B	0.4375	360	0.8229
C	0.2953	173	0.5858
D	0.4403	232	0.5269
Muestra 3	Peso (g)	ppm Fe	% Fe
Inicial	0.4855	314	0.6468
A	0.3047	270	0.8861
B	0.4021	314	0.7809
C	0.3972	218	0.5488
D	0.4133	220	0.5323

Tabla 21. Contenido de hierro en cada capa de jale obtenida a 2000 rpm y 10 minutos.

Muestra 1	Peso (g)	ppm Fe	% Fe
Inicial	0.4855	314	0.6468
A	0.2960	295	0.9966
B	0.3853	268	0.6956
C	0.4321	277	0.6411
D	0.3692	193	0.5228
Muestra 2	Peso (g)	ppm Fe	% Fe
Inicial	0.4855	314	0.6468
A	0.2512	223	0.8877
B	0.3475	225	0.6475
C	0.3975	235	0.5912
D	0.4295	218	0.5076
Muestra 3	Peso (g)	ppm Fe	% Fe
Inicial	0.4855	314	0.6468
A	0.2251	186	0.8263
B	0.3336	246	0.7374
C	0.3455	266	0.7699
D	0.4083	221	0.5413

Las Figuras 41, 42, 43, 44, 45, 46 muestran la variación de contenido de Fe de las muestras después del proceso de centrifugación a 2000 rpm, a 5 y 10 minutos respectivamente.

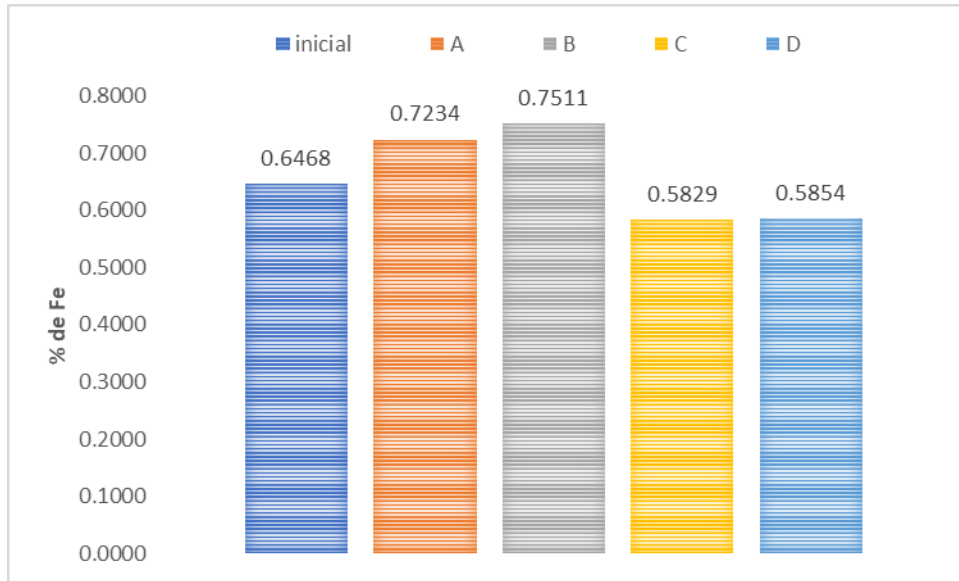


Figura 41. Variación de % Fe en cada capa de la "muestra 1" a 2000 rpm y 5 minutos.

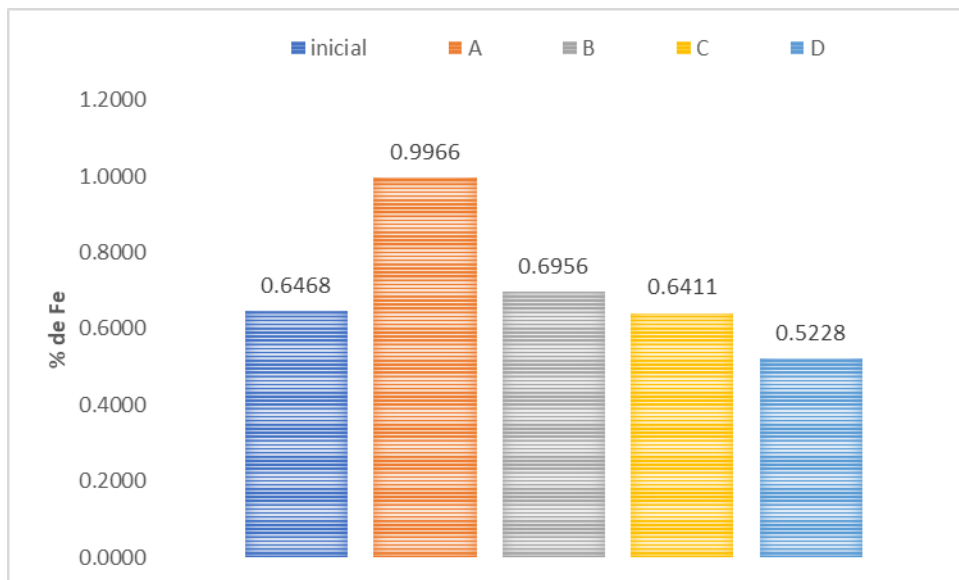


Figura 42. Variación de % Fe en cada capa de la "muestra 1" a 2000 rpm y 10 minutos.

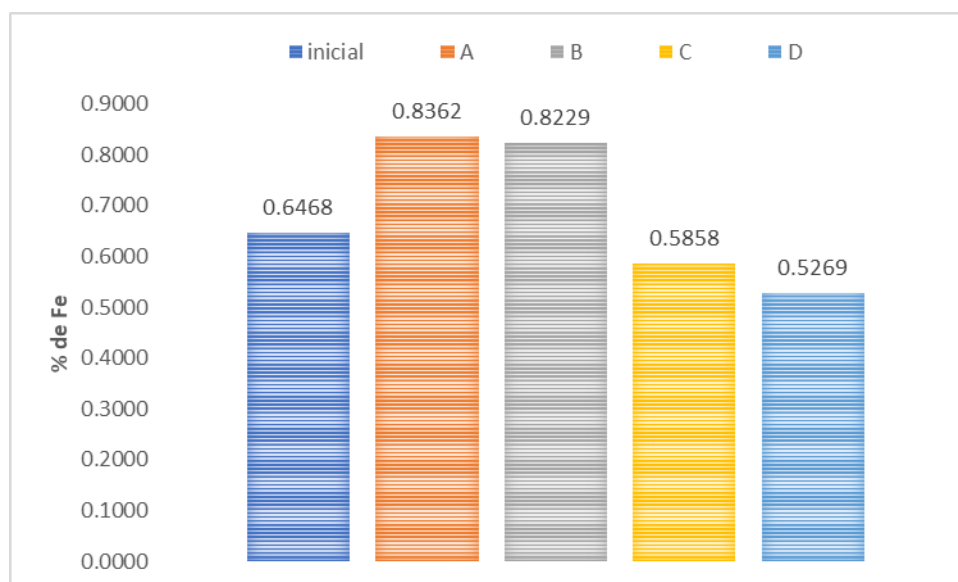


Figura 43. Variación de % Fe en cada capa de la "muestra 2" a 2000 rpm y 5 minutos.

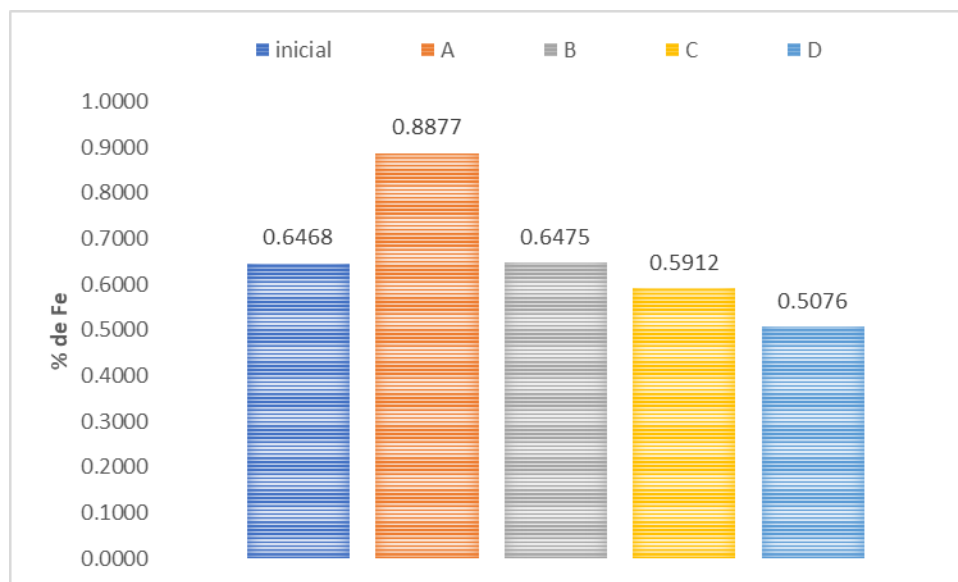


Figura 44. Variación de % Fe en cada capa de la "muestra 2" a 2000 rpm y 10 minutos

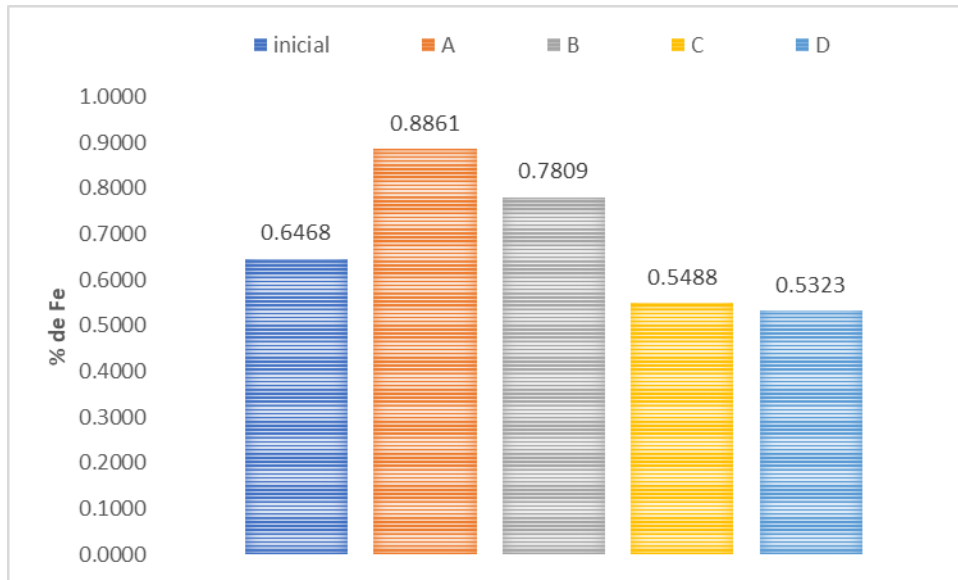


Figura 45. Variación de % Fe en cada capa de la "muestra 3" a 2000 rpm y 5 minutos.

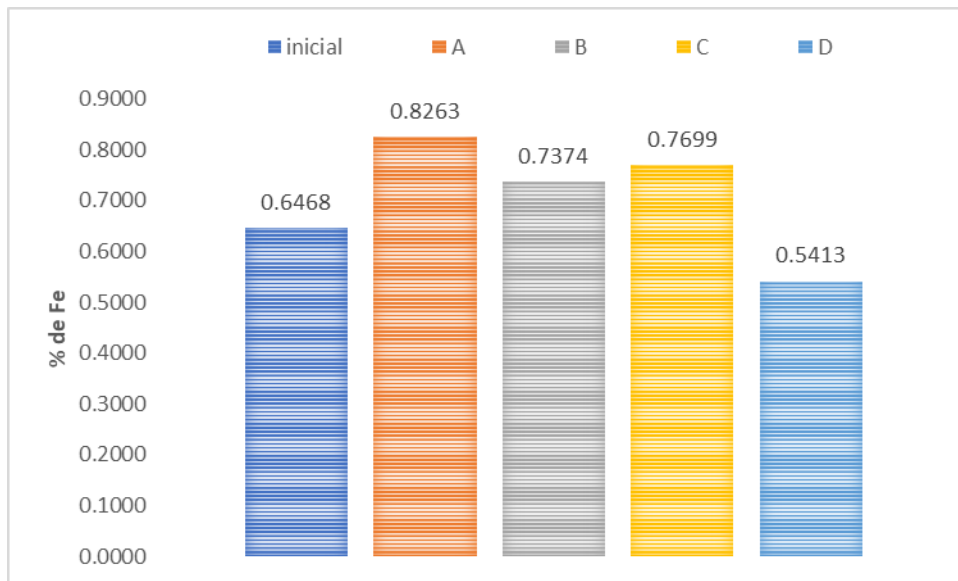


Figura 46. Variación de % Fe en cada capa de la "muestra 3" a 2000 rpm y 10 minutos

En las tablas **22 y 23** se muestran los resultados obtenidos de contenido de Fe en cada capa de las pruebas realizadas a 2600 rpm, a 5 y 10 minutos respectivamente.

Tabla 22. Contenido de hierro en cada capa de jale obtenida a 2600 rpm y 5 minutos.

Muestra 1	Peso (g)	ppm Fe	% Fe
Inicial	0.4855	314	0.6468
A	0.4610	324	0.7028
B	0.4534	316	0.6970
C	0.3853	259	0.6722
D	0.4699	302	0.6427
Muestra 2	Peso (g)	ppm Fe	% Fe
Inicial	0.4855	314	0.6468
A	0.3898	298	0.7645
B	0.4874	363	0.7448
C	0.4385	243	0.5542
D	0.4440	238	0.5360
Muestra 3	Peso (g)	ppm Fe	% Fe
Inicial	0.4855	314	0.6468
A	0.3170	254	0.8013
B	0.3537	262	0.7407
C	0.3242	214	0.6601
D	0.3476	176	0.5063

Tabla 23. Contenido de hierro en cada capa de jale obtenida a 2600 rpm y 10 minutos.

Muestra 1	Peso (g)	ppm Fe	% Fe
Inicial	0.4855	314	0.6468
A	0.3605	297	0.8239
B	0.4641	324	0.6981
C	0.4822	286	0.5931
D	0.4947	198	0.4002
Muestra 2	Peso (g)	ppm Fe	% Fe
Inicial	0.4855	314	0.6468
A	0.3238	274	0.8462
B	0.4873	329	0.6751
C	0.4803	298	0.6204
D	0.4526	229	0.5060
Muestra 3	Peso (g)	ppm Fe	% Fe
Inicial	0.4855	314	0.6468
A	0.3801	324	0.8524
B	0.4250	227	0.5341
C	0.4273	232	0.5429
D	0.4945	248	0.5015

Las **Figuras 47, 48, 49, 50, 51, 52** muestran la variación de contenido de Fe de las muestras después del proceso de centrifugación a 2600 rpm, a 5 y 10 minutos respectivamente.

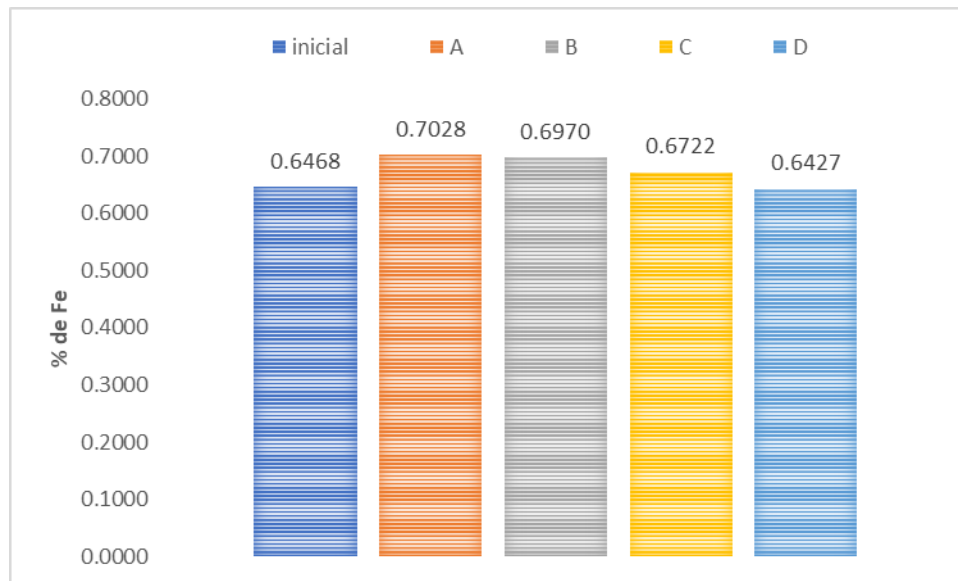


Figura 47. Variación de % Fe en cada capa de la "muestra 1" a 2600 rpm y 5 minutos.

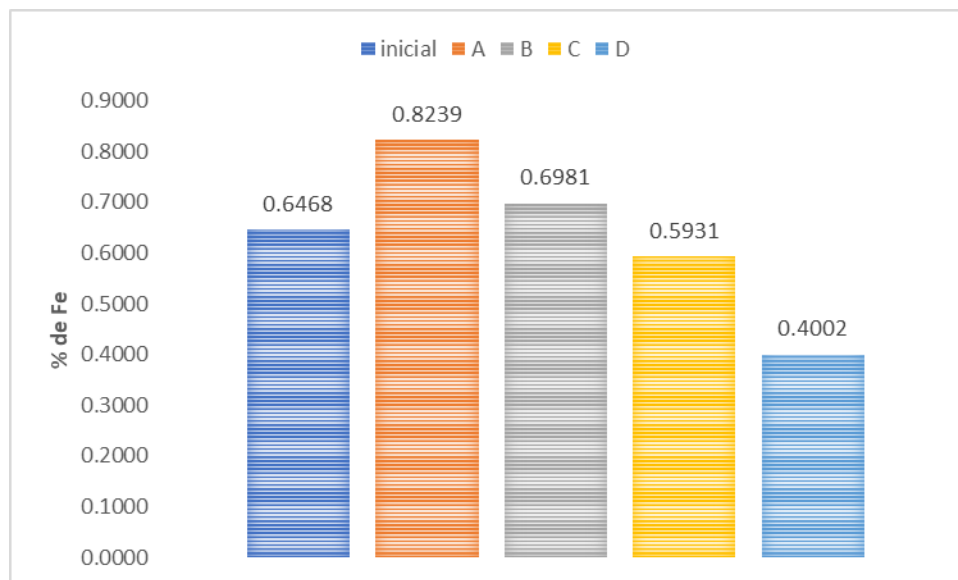


Figura 48. Variación de % Fe en cada capa de la "muestra 1" a 2600 rpm y 10 minutos.

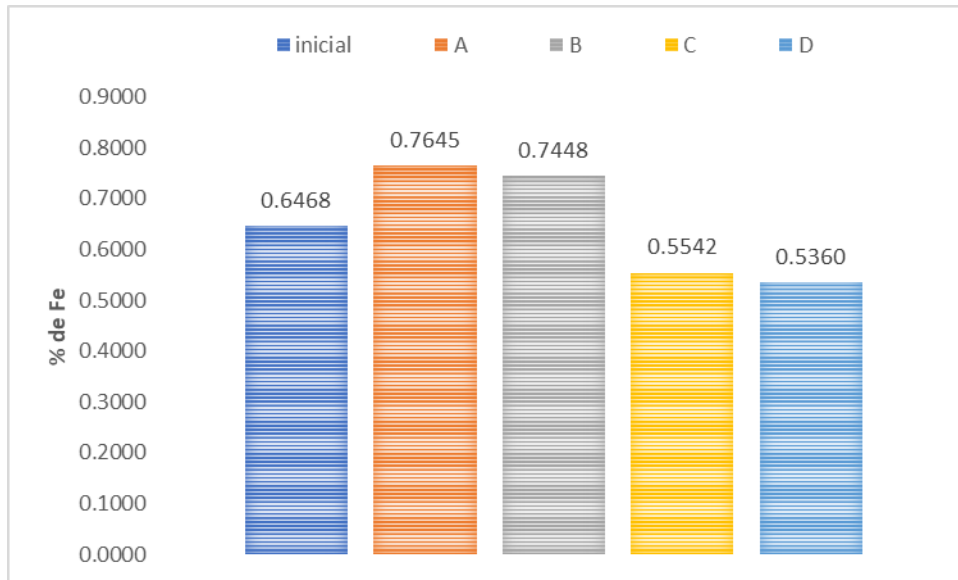


Figura 49. Variación de % Fe en cada capa de la "muestra 2" a 2600 rpm y 5 minutos.

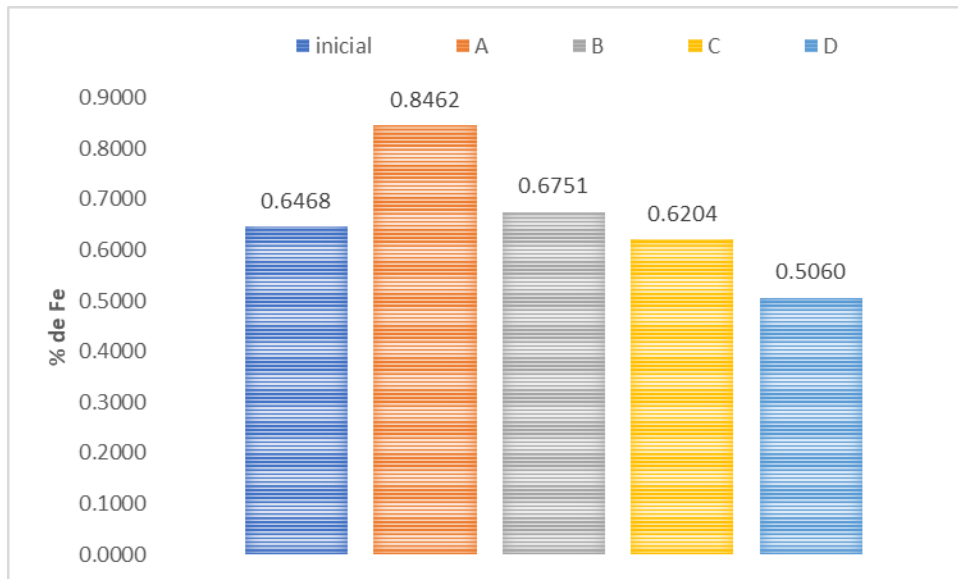


Figura 50. Variación de % Fe en cada capa de la "muestra 2" a 2600 rpm y 10 minutos.

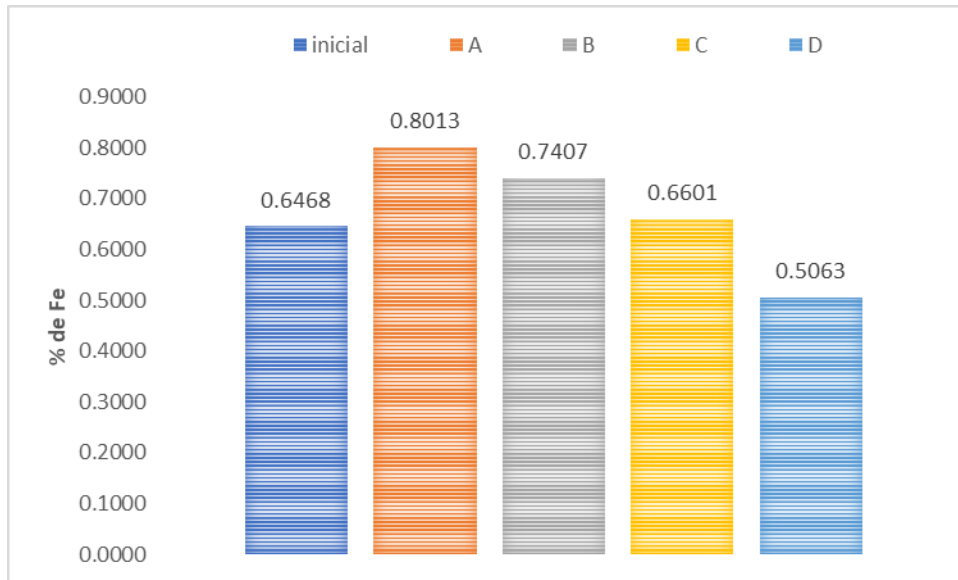


Figura 51. Variación de % Fe en cada capa de la "muestra 3" a 2600 rpm y 5 minutos.

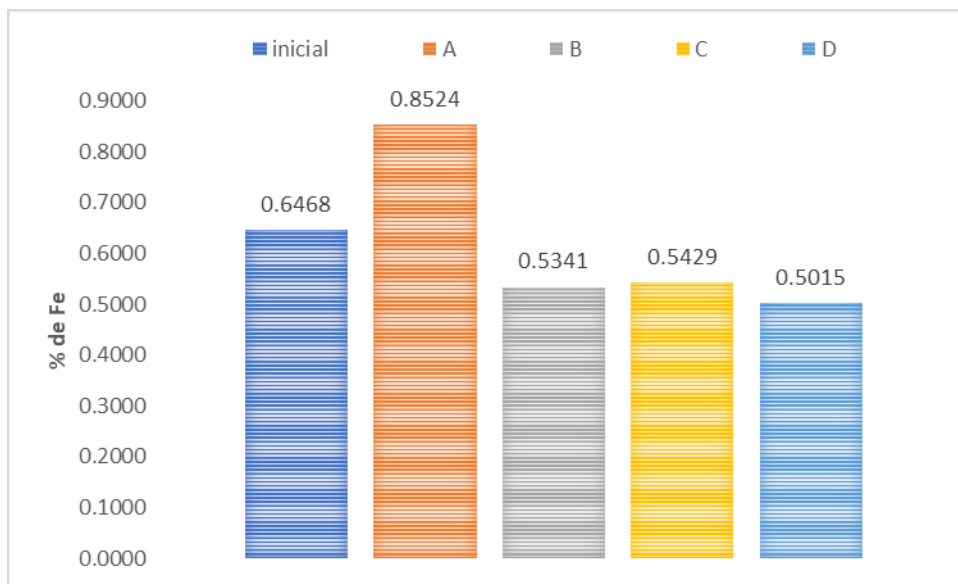


Figura 52. Variación de % Fe en cada capa de la "muestra 3" a 2600 rpm y 10 minutos.

En las tablas **24** y **25** se muestran los resultados obtenidos de contenido de Ag en cada capa de las pruebas realizadas a 2000 rpm, a 5 y 10 minutos respectivamente.

Tabla 24. Contenido de plata en cada capa de jale obtenida a 2000 rpm y 5 minutos.

Muestra 1	Peso (g)	ppm Ag	% Ag
Inicial	0.4855	0.05	1.03E-04
A	0.2820	0.07	2.48E-04
B	0.3861	0.05	1.30E-04
C	0.3723	0.04	1.07E-04
D	0.4800	0.07	1.46E-04
Muestra 2	Peso (g)	ppm Ag	% Ag
Inicial	0.4855	0.05	1.03E-04
A	0.2930	0.04	1.37E-04
B	0.4375	0.03	6.86E-05
C	0.2953	0.02	6.77E-05
D	0.4403	0.03	6.81E-05
Muestra 3	Peso (g)	ppm Ag	% Ag
Inicial	0.4855	0.05	1.03E-04
A	0.3047	0.04	1.31E-04
B	0.4021	0.03	7.46E-05
C	0.3972	0.03	7.55E-05
D	0.4133	0.03	7.26E-05

Tabla 25. Contenido de plata en cada capa de jale obtenida a 2000 rpm y 10 minutos.

Muestra 1	Peso (g)	ppm Ag	% Ag
inicial	0.4855	0.05	1.03E-04
A	0.2960	0.04	1.35E-04
B	0.3853	0.04	1.04E-04
C	0.4321	0.04	9.26E-05
D	0.3692	0.03	8.13E-05
Muestra 2	Peso (g)	ppm Ag	% Ag
inicial	0.4855	0.05	1.03E-04
A	0.2512	0.03	1.19E-04
B	0.3475	0.03	8.63E-05
C	0.3975	0.03	7.55E-05
D	0.4295	0.03	6.98E-05
Muestra 3	Peso (g)	ppm Ag	% Ag
inicial	0.4855	0.05	1.03E-04
A	0.2251	0.03	1.33E-04
B	0.3336	0.03	8.99E-05
C	0.3955	0.04	1.01E-04
D	0.4083	0.03	7.35E-05

Las **Figuras 53, 54, 55, 56, 57 y 58** muestran la variación de contenido de Ag de las muestras después del proceso de centrifugación a 2000 rpm, a 5 y 10 minutos respectivamente.

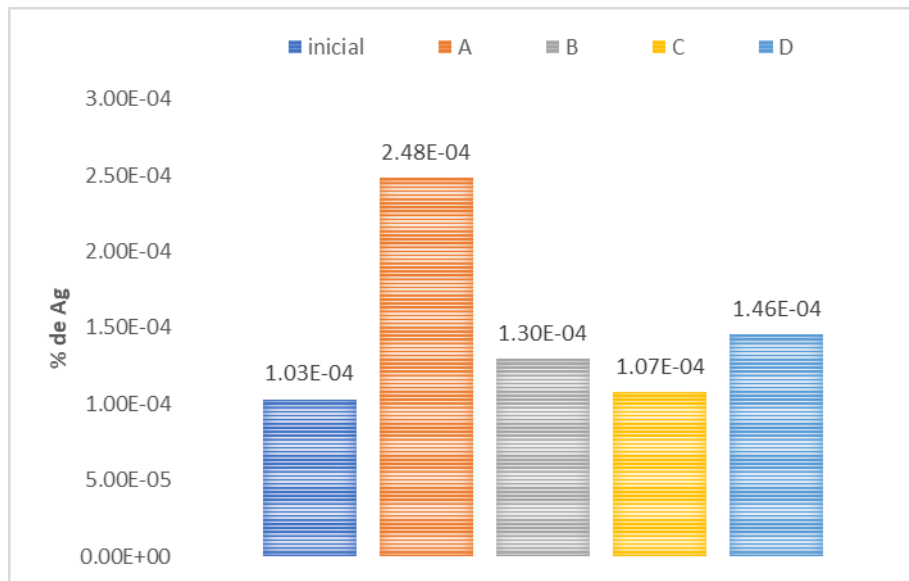


Figura 53. Variación de % Ag en cada capa de la "muestra 1" a 2000 rpm y 5 minutos.

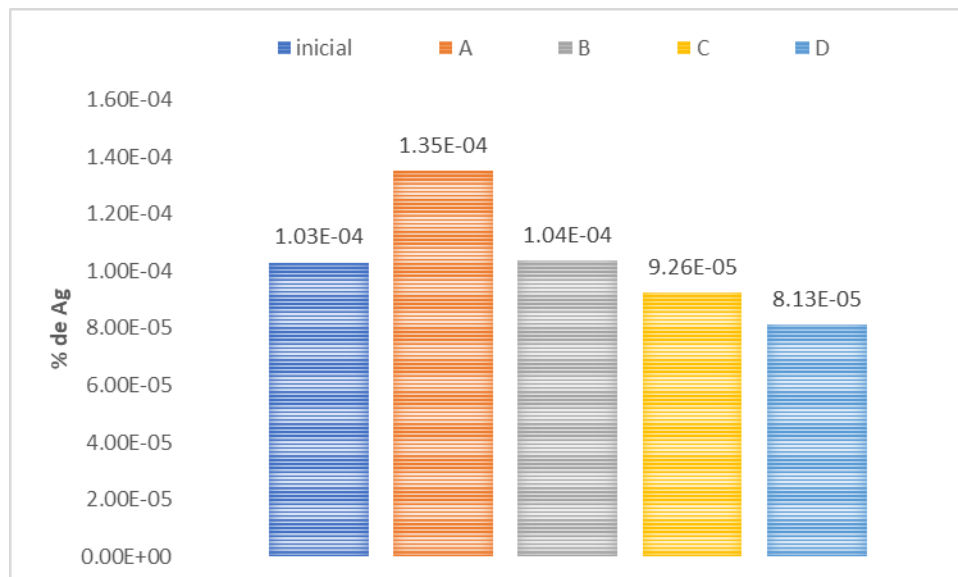


Figura 54. Variación de % Ag en cada capa de la "muestra 1" a 2000 rpm y 10 minutos.

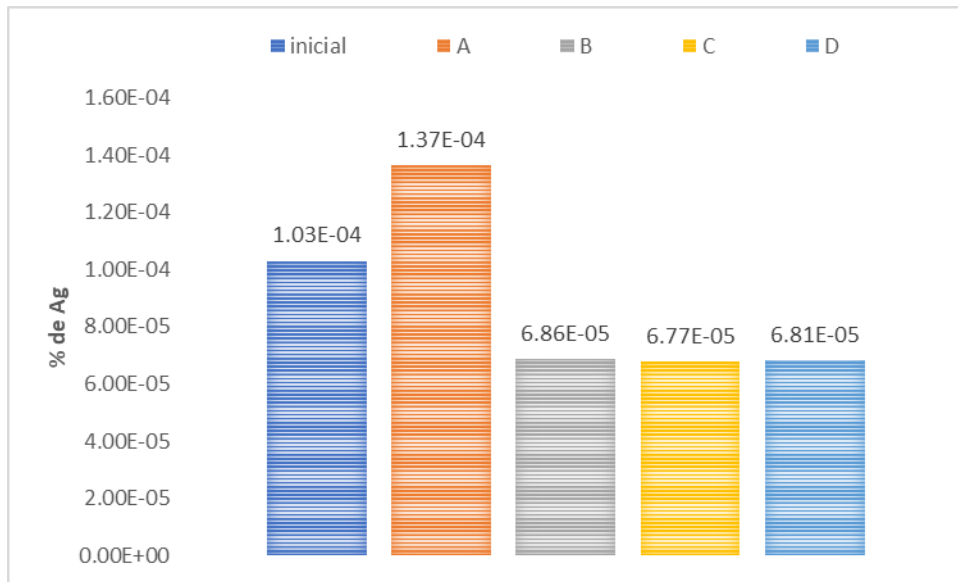


Figura 55. Variación de % Ag en cada capa de la "muestra 2" a 2000 rpm y 5 minutos.

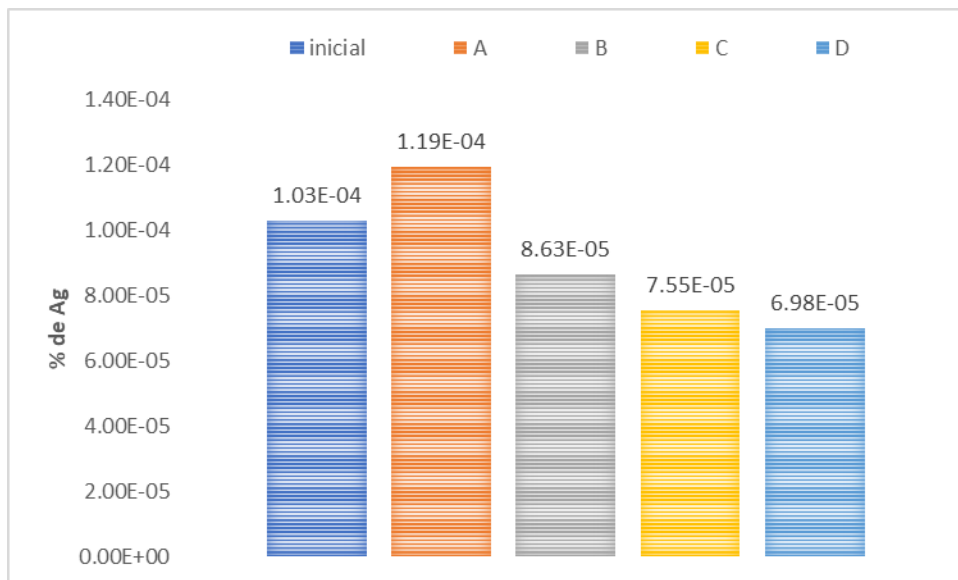


Figura 56. Variación de % Ag en cada capa de la "muestra 2" a 2000 rpm y 10 minutos.

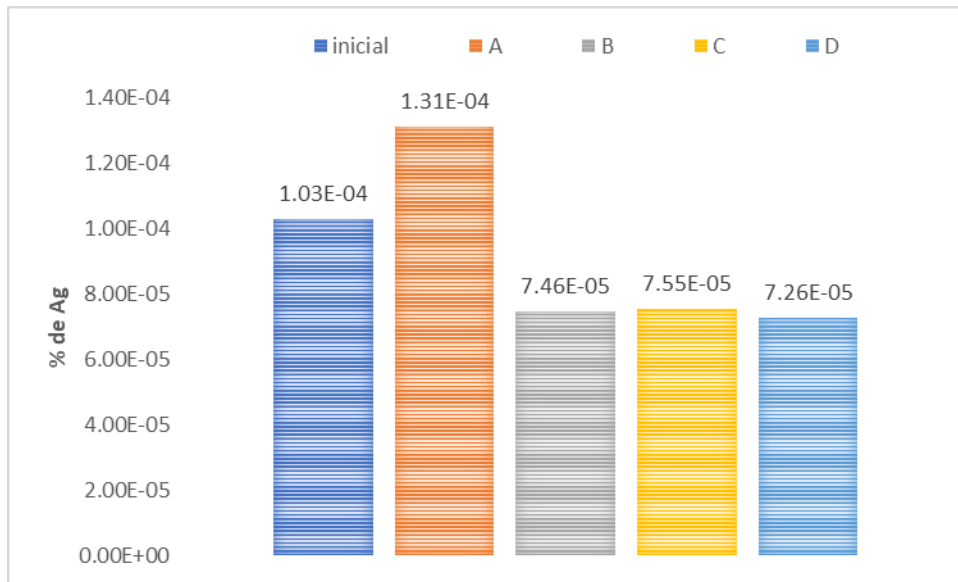


Figura 57. Variación de % Ag en cada capa de la "muestra 3" a 2000 rpm y 5 minutos.

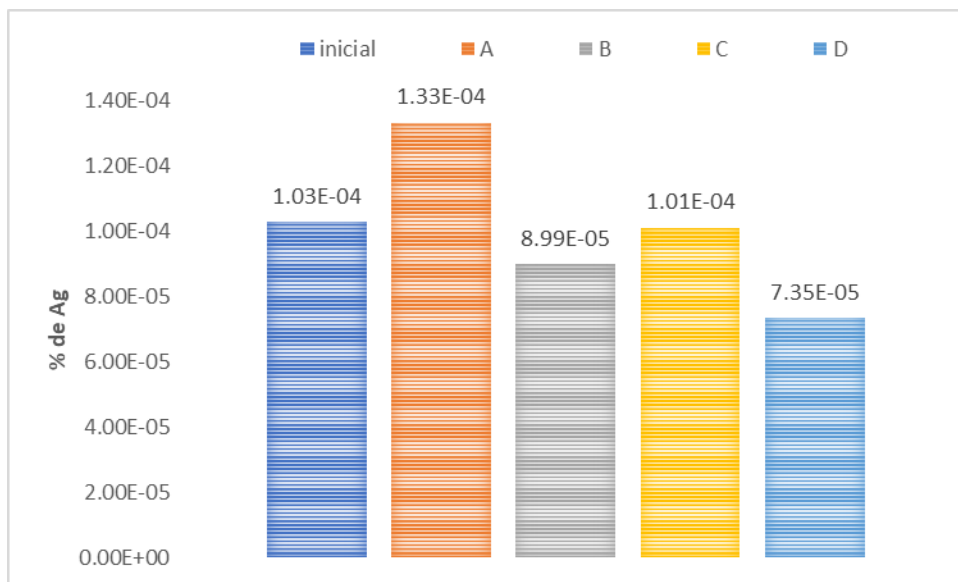


Figura 58. Variación de % Ag en cada capa de la "muestra 3" a 2000 rpm y 10 minutos.

En las tablas **26 y 27** se muestran los resultados obtenidos de contenido de Ag en cada capa de las pruebas realizadas a 2600 rpm, a 5 y 10 minutos respectivamente.

Tabla 26. Contenido de plata en cada capa de jale obtenida a 2600 rpm y 5 minutos.

Muestra 1	Peso (g)	ppm Ag	% Ag
Inicial	0.4855	0.05	1.03E-04
A	0.4310	0.05	1.16E-04
B	0.4534	0.04	8.82E-05
C	0.3853	0.03	7.79E-05
D	0.4698	0.04	8.51E-05
Muestra 2	Peso (g)	ppm Ag	% Ag
Inicial	0.4855	0.05	1.03E-04
A	0.3898	0.05	1.28E-04
B	0.4874	0.04	8.21E-05
C	0.4385	0.04	9.12E-05
D	0.4440	0.04	9.01E-05
Muestra 3	Peso (g)	ppm Ag	% Ag
Inicial	0.4855	0.05	1.03E-04
A	0.3170	0.04	1.26E-04
B	0.3537	0.03	8.48E-05
C	0.3242	0.03	9.25E-05
D	0.3476	0.03	8.63E-05

Tabla 27. Contenido de plata en cada capa de jale obtenida a 2600 rpm y 10 minutos.

Muestra 1	Peso (g)	ppm Ag	% Ag
Inicial	0.4855	0.05	1.03E-04
A	0.3605	0.05	1.39E-04
B	0.4641	0.04	8.62E-05
C	0.4822	0.04	8.30E-05
D	0.4947	0.03	6.06E-05
Muestra 2	Peso (g)	ppm Ag	% Ag
Inicial	0.4855	0.05	1.03E-04
A	0.3238	0.05	1.54E-04
B	0.4873	0.05	1.03E-04
C	0.4803	0.05	1.04E-04
D	0.4526	0.02	4.42E-05
Muestra 3	Peso (g)	ppm Ag	% Ag
Inicial	0.4855	0.05	1.03E-04
A	0.3801	0.05	1.32E-04
B	0.4250	0.04	9.41E-05
C	0.4273	0.03	7.02E-05
D	0.4945	0.02	4.04E-05

Las **Figuras 59, 60, 61, 62, 63, 64** muestran la variación de contenido de Ag de las muestras después del proceso de centrifugación a 2600 rpm, a 5 y 10 minutos respectivamente.

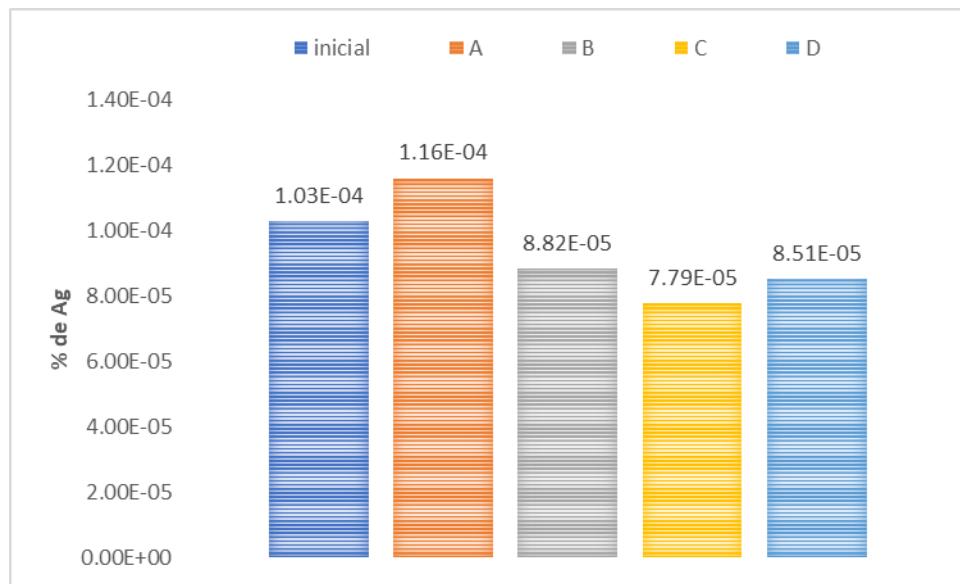


Figura 59. Variación de % Ag en cada capa de la "muestra 1" a 2600 rpm y 5 minutos.

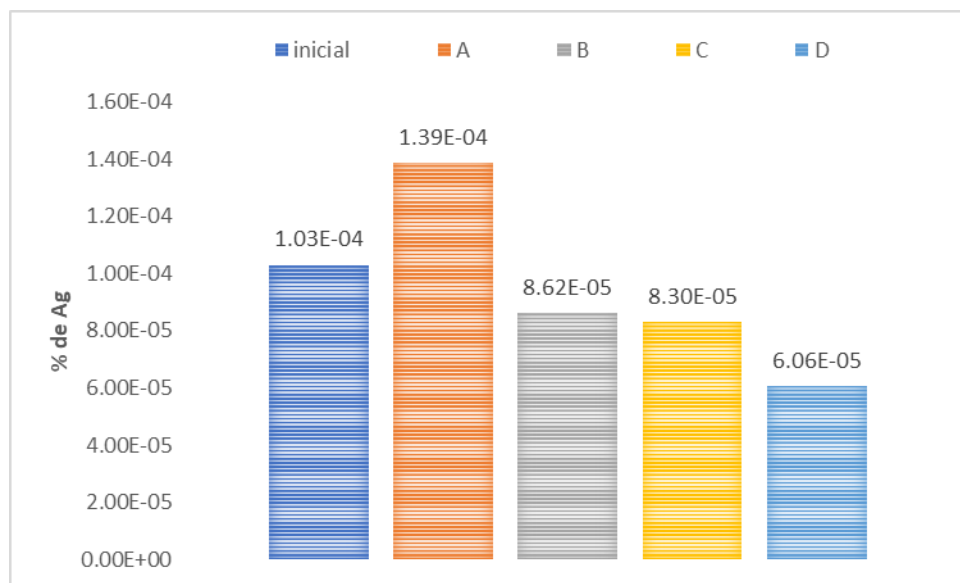


Figura 60. Variación de % Ag en cada capa de la "muestra 1" a 2600 rpm y 10 minutos.

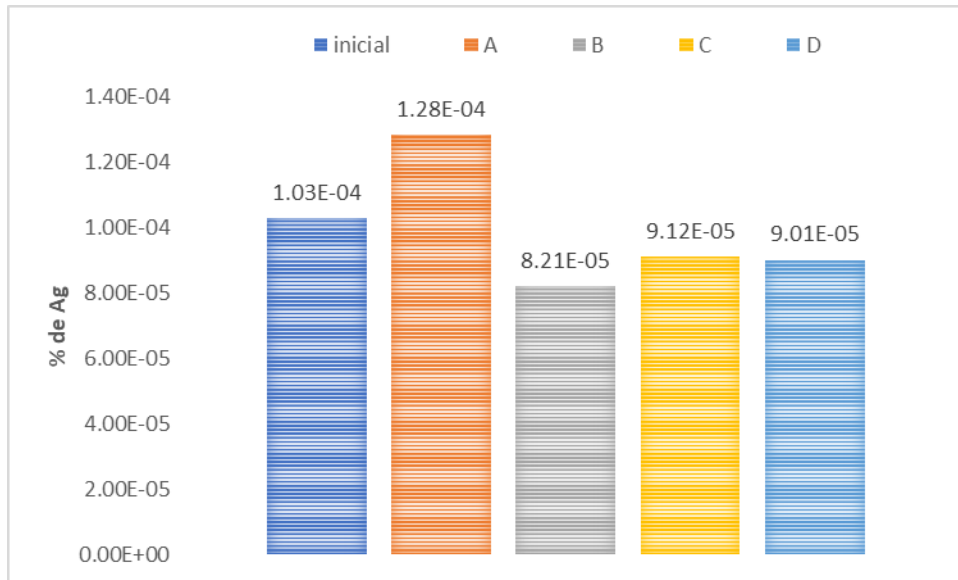


Figura 61. Variación de % Ag en cada capa de la "muestra 2" a 2600 rpm y 5 minutos.

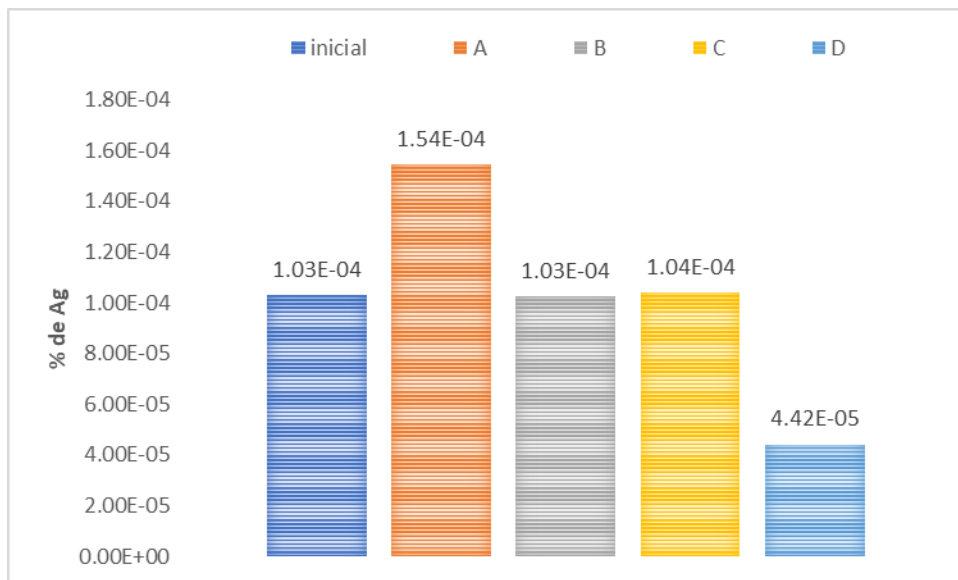


Figura 62. Variación de % Ag en cada capa de la "muestra 2" a 2600 rpm y 10 minutos.

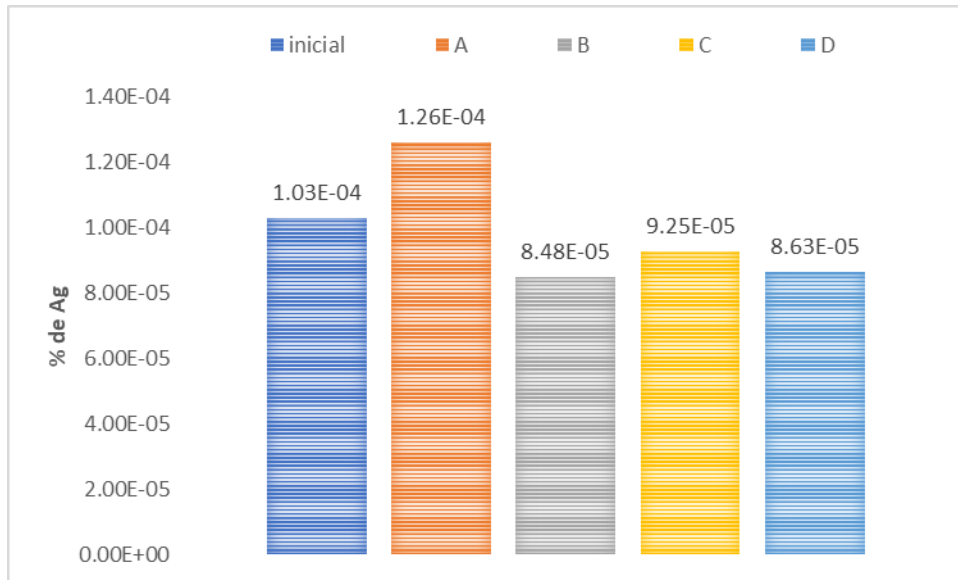


Figura 63. Variación de % Ag en cada capa de la "muestra 3" a 2600 rpm y 5 minutos.

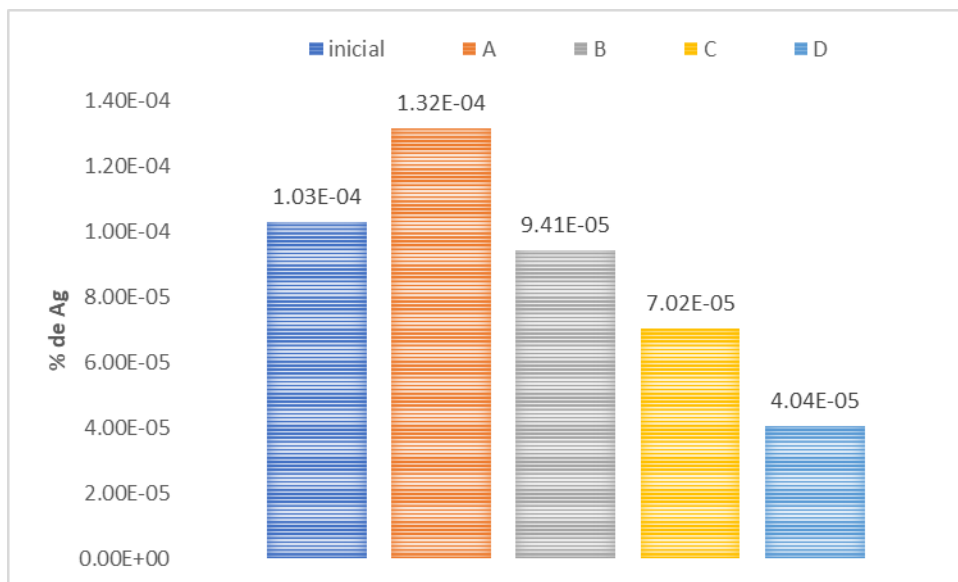


Figura 64. Variación de % Ag en cada capa de la "muestra 3" a 2600 rpm y 10 minutos.

Al realizar el ensayo esta vez con jales el comportamiento de los productos de separación no fue el mismo al observado en la centrifugación de mineral esto debido a que los componentes de nuestra pulpa cambian. En la centrifugación mineral

trabajamos con productos conformados principalmente de sulfuros mientras que los jales los tratamos con óxido.

Tomando en cuenta las densidades de óxidos de hierro (5.74 g/cm^3), plata (7.14 g/cm^3), y cobre (6.31 g/cm^3) y aplicando criterio de concentrabilidad de Taggart ponemos obtener tres resultados para la concentración de productos: Cu-Fe =1.12, Cu-Ag=1.15, Fe-Ag=1.24. Estos resultados están por debajo del parámetro de 1.25 el cual nos indica que nuestra concentración no se llevará acabo de la mejor forma.

Por otro lado, los perfiles de sedimentación dependen únicamente de la densidad de la partícula debido a que se trabaja con el mismo tamaño de partícula, por lo que teóricamente el perfil de sedimentación seria Fe-Cu-Ag, en la experimentación se obtuvo un perfil de sedimentación Fe-Ag-Cu, este cambio en los perfiles de concentración se deben principalmente a dos cosas:

- A) Criterio de concentrabilidad de Targgart
- B) Poca concentración de Ag

El tener valores por debajo de 1.25 del criterio de concentrabilidad de Targgart nos refiere a que las concentraciones de los productos a separar son similares, por lo cual al momento de efectuar la centrifugación estos tendrán comportamiento similar al instante de precipitar, debido a este problema nos podemos enfocar en la concentración de cada especie, al hacer un análisis densidad-concentración teniendo en cuenta densidades cercana se puede observar que el producto que precipitará primero será aquel que cuente con una mayor concentración.

En las figuras 29, 31 y 33 se muestra la variación de % de cobre contenido en las capas de cada muestra centrifugada a 2000 rpm y 5 minutos. En todas las muestras se observa un aumento en la concentración de cobre en la parte inferior del producto de centrifugación. Esta concentración incrementa en cada capa cuando se amplía el tiempo de centrifugación de 5 a 10 minutos.

Este fenómeno de aumento de concentración al ampliar el tiempo de centrifugado se observa en las tres especies concentradas, ya sea a 2000 rpm o 2600 rpm; esto

nos da una pauta para ver la relación tiempo de centrifugado-concentración de mineral la cual no es lineal, por lo cual podríamos tratar este fenómeno como “cinética de centrifugación”, es decir, la variación de contenido metálico de interés obtenido en función del tiempo.

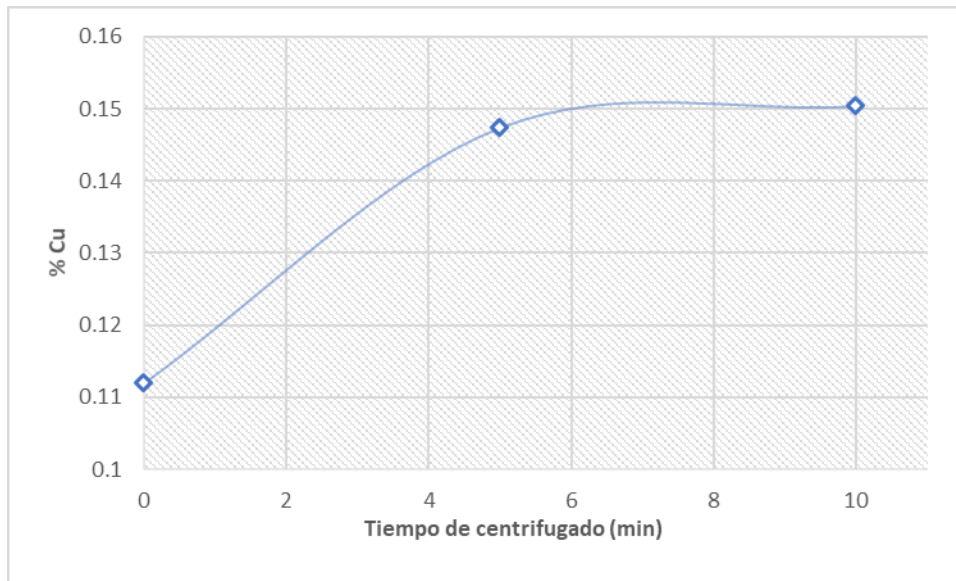


Figura 65. Aumento de % Cu respecto al tiempo de centrifugado en la muestra 3 a 2000 rpm.

En la figura 65 podemos observar que existe un tiempo adecuado para realizar una centrifugación en la cual obtengamos una buena recuperación de la especie de interés ahorrando tiempo e insumos.

Este fenómeno ocurre en cada especie estudiada (Cu, Fe, Ag), de la misma manera se observa el mismo comportamiento a 2000 rpm y 2600 rpm, por lo cual a una velocidad y tiempo de centrifugado óptimo se esperan los mejores resultados tanto en la separación como en la concentración de especies.

Conclusiones

- La diferencia de densidades entre los productos de concentración centrífuga es determinante para la separación de éstos.
- El ángulo de eje de giro se considera un factor que puede beneficiar a las partículas ligeras o pesada dependiendo como se trabaje.
- Conocer el perfil de velocidades de centrifugación nos da un panorama del comportamiento del proceso.
- Un estudio para determinar un tiempo de operación de la centrífuga es beneficioso para el proceso.
- La concentración centrífuga es un tratamiento de concentración de minerales que se puede emplear minerales ricos en jales previos a su estudio.
- El proceso de concentración de minerales por centrifugación es viable ya que la separación de los productos aumenta de manera considerable, esta técnica se puede aplicar para la recuperación de especies valiosas en los jales de mina para su posterior aprovechamiento.

Bibliografía

- 1. Ballesteres, A. (2000). Metalurgia extractiva. Madrid: Síntesis S.A.**
- 2. Urday M. (2015). Influencia de la fuerza de rotación gravimétrica del mineral con alta concentración de alabandita de la U.P. Uchuzchacua. Facultad de Ingeniería de Procesos, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.**
- 3. Cliffoord D. (1999). Concentración Gravimétrica. España: Mining Journal.**
- 4. Errol G. (1990). Introducción al procesamiento de minerales. México, Limusa.**
- 5. Juan V. (2018). Factores de concentración gravimétrica centrífuga en la recuperación de oro de un mineral carbonáceo aurífero. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Trujillo.**
- 6. Camilo H. (2017). Concentración gravitacional: concentración centrífuga. Departamento de Ingeniería en Metalurgia, Universidad de Santiago de Chile.**
- 7. Freifelder, D. (1991). Técnicas de bioquímica y biología molecular. Madrid.**
- 8. Little, S.E., (1989). Plasmid DNA Separations in High Performance Vertical Tube Rotors. Effect of Speed on Run Times. Beckman Instruments.**
- 9. Rogelio, M. (2014). Mi México es minero. Tercera edición. Ciudad de México.**

Anexo 1

Trituración primaria

A continuación, se muestran los análisis granulométricos, así como sus gráficas log % Ac (-) vs log tamaño μm de cada muestra.

Tabla 1. Análisis granulométrico mineral 1.1. trituración primaria.

Tamaño (inch)	Tamaño (μm)	Peso (g)	% Retenido	% Ac(-)	% Ac(+)	Log Tamaño	Log % Ac(-)
0.625	15875	55.6	9.0	90.92	9.07	4.20	1.95
0.5	12700	78.6	12.8	78.09	21.90	4.10	1.89
0.3124	7934.96	183.2	29.9	48.19	51.80	3.90	1.68
0.223	5664.2	78.9	12.8	35.31	64.68	3.75	1.54
0.157	3987.8	47	7.6	27.64	72.35	3.60	1.44
0.111	2819.4	31.9	5.2	22.44	77.55	3.45	1.35
0.093	2362.2	13.7	2.2	20.20	79.79	3.37	1.30
0.0661	1678.94	22.1	3.6	16.59	83.40	3.22	1.22
0.0555	1409.7	8.8	1.4	15.16	84.83	3.14	1.18
0.048	1219.2	10.1	1.6	13.51	86.48	3.08	1.13
0.0331	840.74	17.1	2.7	10.72	89.27	2.92	1.03
0.0232	589.28	14.2	2.3	8.40	91.59	2.77	0.92
0.0117	297.18	11.2	1.8	6.57	93.42	2.47	0.81

En la **Figura 1** se muestra los resultados del análisis granulométrico del mineral 1.1. después del proceso de trituración primaria.

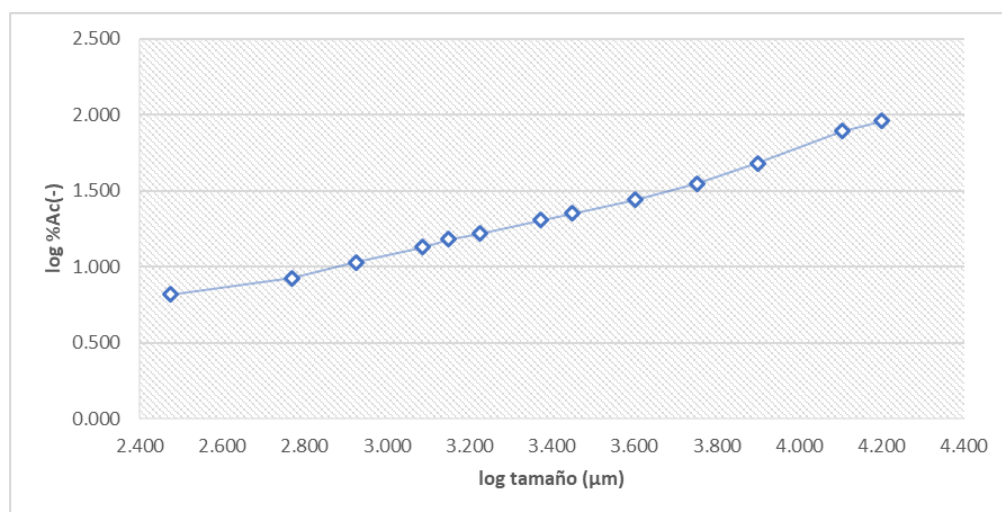


Figura 1. Gráfica log % Ac(-) vs log tamaño μm . muestra 1.1. Trituración primaria.

Tabla 2. Análisis granulométrico mineral 1.2. Trituración primaria.

Tamaño (inch)	Tamaño (μm)	Peso (g)	% Retenido	% Ac(-)	% Ac(+)	Log Tamaño	Log % Ac(-)
0.625	15875	27.2	3.9	96.00	3.99	4.20	1.98
0.5	12700	96.8	14.2	81.78	18.21	4.10	1.91
0.3124	7934.96	249.9	36.7	45.06	54.93	3.90	1.65
0.223	5664.2	80.6	11.8	33.22	66.77	3.75	1.52
0.157	3987.8	57.1	8.3	24.83	75.16	3.60	1.39
0.111	2819.4	33.1	4.8	19.96	80.03	3.45	1.30
0.093	2362.2	12.7	1.8	18.10	81.89	3.37	1.25
0.0661	1678.94	21.8	3.2	14.89	85.10	3.22	1.17
0.0555	1409.7	8.3	1.2	13.67	86.32	3.14	1.13
0.048	1219.2	9.6	1.4	12.26	87.73	3.08	1.08
0.0331	840.74	16.7	2.4	9.81	90.18	2.92	0.99
0.0232	589.28	13.4	1.9	7.84	92.15	2.77	0.89
0.0117	297.18	10.3	1.5	6.33	93.66	2.47	0.80

En la **Figura 2** se muestra los resultados del análisis granulométrico del mineral 1.2. después del proceso de trituración primaria.

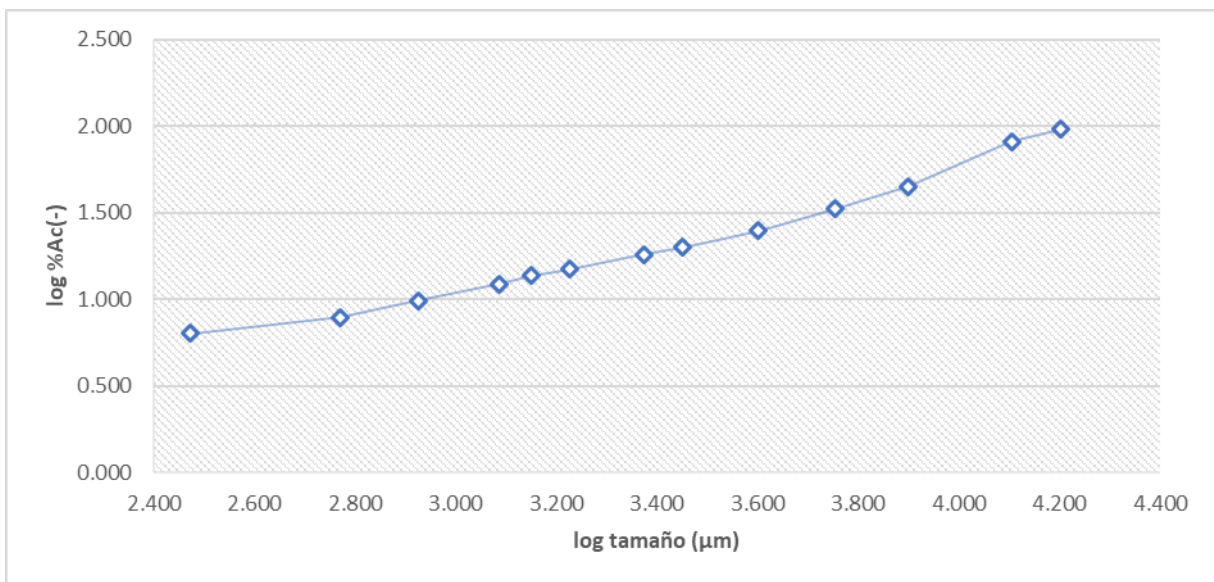


Figura 2. Gráfica log % Ac(-) vs log tamaño μm . muestra 1.2. Trituración primaria.

Tabla 3. Análisis granulométrico mineral 2.1. Trituración primaria.

Tamaño (inch)	Tamaño (µm)	Peso (g)	% Retenido	% Ac(-)	% Ac(+)	Log Tamaño	Log % Ac(-)
0.625	15875	13.4	1.5	98.40	1.59	4.20	1.99
0.5	12700	53.9	6.4	91.98	8.01	4.10	1.96
0.3124	7934.96	211.7	25.2	66.78	33.21	3.90	1.82
0.223	5664.2	170.2	20.2	46.52	53.47	3.75	1.66
0.157	3987.8	93.5	11.1	35.39	64.60	3.60	1.54
0.111	2819.4	52.7	6.2	29.11	70.88	3.45	1.46
0.093	2362.2	20.4	2.4	26.69	73.31	3.37	1.42
0.0661	1678.94	34.6	4.1	22.57	77.42	3.22	1.35
0.0555	1409.7	11.7	1.3	21.17	78.82	3.14	1.32
0.048	1219.2	15.3	1.8	19.35	80.64	3.08	1.28
0.0331	840.74	27	3.2	16.14	83.85	2.92	1.20
0.0232	589.28	22.9	2.7	13.41	86.58	2.77	1.12
0.0117	297.18	18.5	2.2	11.21	88.78	2.47	1.05

En la **Figura 3** se muestra los resultados del análisis granulométrico del mineral 2.1. después del proceso de trituración primaria.

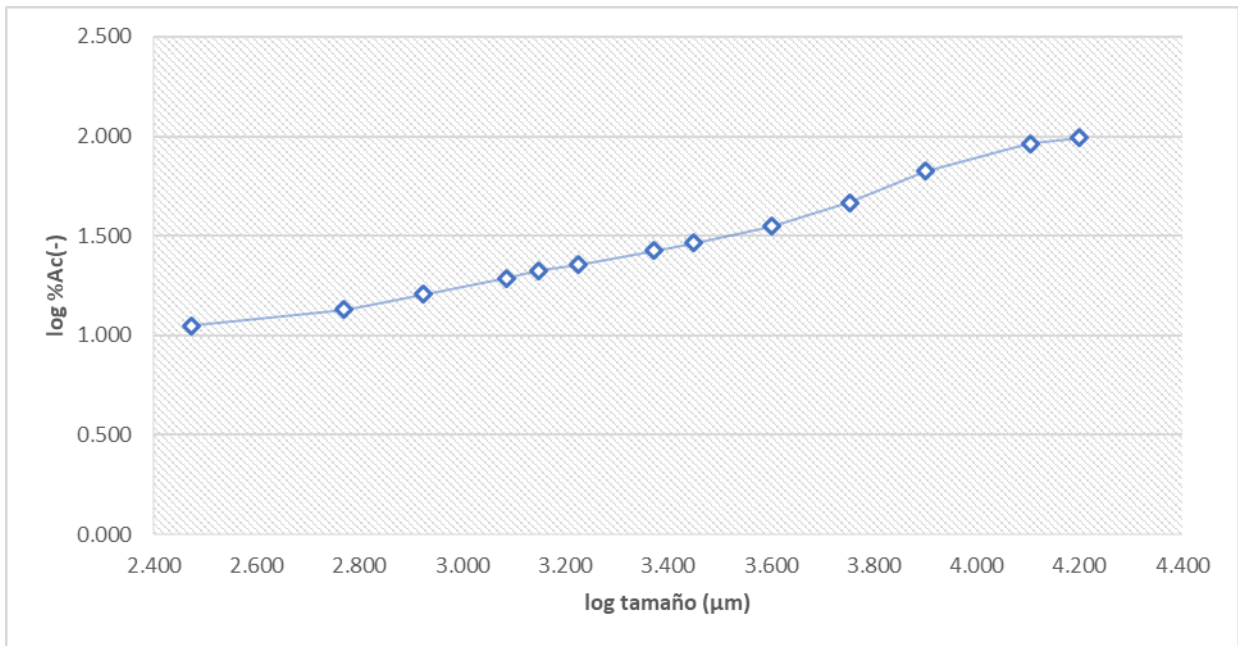


Figura 3. Gráfica log % Ac(-) vs log tamaño µm. muestra 2.1. Trituración primaria.

Tabla 4. Análisis granulométrico mineral 2.2. trituración primaria.

Tamaño (inch)	Tamaño (µm)	Peso (g)	% Retenido	% Ac(-)	% Ac(+)	Log Tamaño	Log % Ac(-)
0.5	12700	40.7	4.3	95.70	4.30	4.10	1.98
0.3124	7934.96	285	30.1	65.58	34.41	3.90	1.81
0.223	5664.2	171	18.0	47.52	52.47	3.75	1.67
0.157	3987.8	102.1	10.7	36.73	63.26	3.60	1.56
0.111	2819.4	63.4	6.6	30.03	69.96	3.45	1.47
0.093	2362.2	26.2	2.7	27.26	72.73	3.37	1.43
0.0661	1678.94	40.7	4.3	22.96	77.03	3.22	1.36
0.0555	1409.7	15	1.5	21.38	78.61	3.14	1.33
0.048	1219.2	18.2	1.9	19.46	80.53	3.08	1.28
0.0331	840.74	30.8	3.2	16.20	83.79	2.92	1.21
0.0232	589.28	26.2	2.7	13.43	86.56	2.77	1.12
0.0117	297.18	21.4	2.2	11.17	88.82	2.47	1.04

En la **Figura 4** se muestra los resultados del análisis granulométrico del mineral 2.2. después del proceso de trituración primaria.

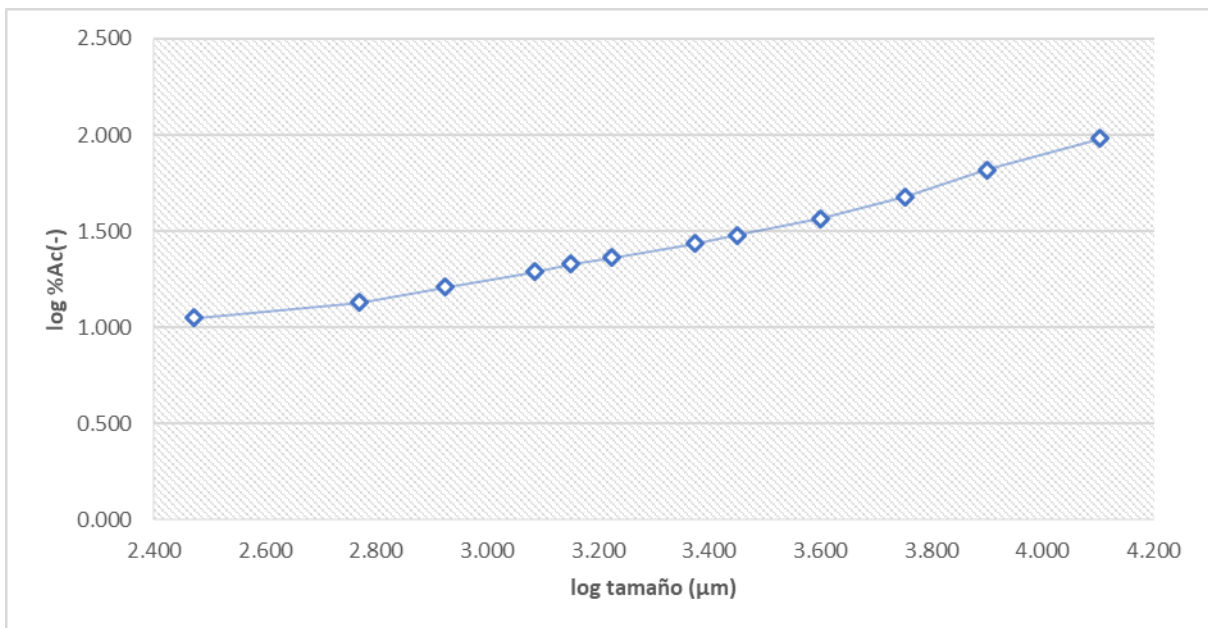


Figura 4. Gráfica log % Ac(-) vs log tamaño µm. muestra 2.2. Trituración primaria.

Tabla 5. Análisis granulométrico mineral 3.1. Trituración primaria.

Tamaño (inch)	Tamaño (μm)	Peso (g)	% Retenido	% Ac(-)	% Ac(+)	Log Tamaño	Log % Ac(-)
0.5	12700	62.7	7.8	92.15	7.84	4.10	1.96
0.3124	7934.96	250.2	31.2	60.86	39.13	3.90	1.78
0.223	5664.2	179.4	22.4	38.43	61.56	3.75	1.58
0.157	3987.8	111.1	13.8	24.53	75.46	3.60	1.38
0.111	2819.4	52.5	6.5	17.97	82.02	3.45	1.25
0.093	2362.2	19.9	2.4	15.48	84.51	3.37	1.18
0.0661	1678.94	29	3.6	11.85	88.14	3.22	1.07
0.0555	1409.7	9.2	1.1	10.70	89.29	3.14	1.02
0.048	1219.2	9.9	1.2	9.46	90.53	3.08	0.97
0.0331	840.74	17	2.1	7.34	92.65	2.92	0.86
0.0232	589.28	13.2	1.6	5.69	94.31	2.77	0.75
0.0117	297.18	10.2	1.2	4.41	95.58	2.47	0.64

En la **Figura 5** se muestra los resultados del análisis granulométrico del mineral 3.1. después del proceso de trituración primaria.

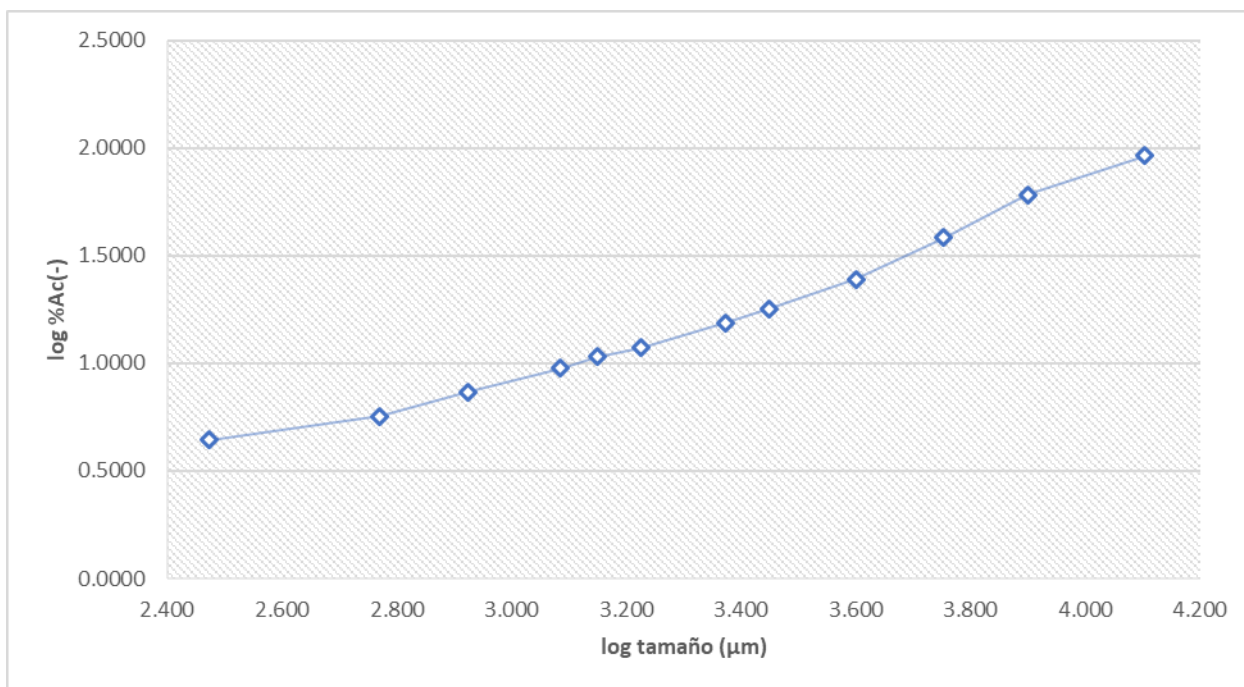


Figura 5. Gráfica log % Ac(-) vs log tamaño μm . muestra 3.1. Trituración primaria.

Tabla 6. Análisis granulométrico mineral 3.2. Trituración primaria.

Tamaño (inch)	Tamaño (μm)	Peso (g)	% Retenido	% Ac(-)	% Ac(+)	Log Tamaño	Log % Ac(-)
0.625	15875	57.3	5.2	94.76	5.23	4.20	1.97
0.5	12700	111.1	10.1	84.60	15.39	4.10	1.92
0.3124	7934.96	332.7	30.4	54.20	45.80	3.90	1.73
0.223	5664.2	205.5	18.7	35.41	64.58	3.75	1.54
0.157	3987.8	133.7	12.2	23.19	76.80	3.60	1.36
0.111	2819.4	62.4	5.7	17.49	82.50	3.45	1.24
0.093	2362.2	23.8	2.1	15.31	84.68	3.37	1.18
0.0661	1678.94	34.7	3.1	12.14	87.85	3.22	1.08
0.0555	1409.7	12.1	1.1	11.04	88.95	3.14	1.04
0.048	1219.2	14.5	1.3	9.71	90.28	3.08	0.98
0.0331	840.74	23.1	2.1	7.60	92.39	2.92	0.88
0.0232	589.28	19.9	1.8	5.78	94.21	2.77	0.76
0.0117	297.18	13.7	1.2	4.53	95.46	2.47	0.65

En la **Figura 6** se muestra los resultados del análisis granulométrico del mineral 3.2. después del proceso de trituración primaria.

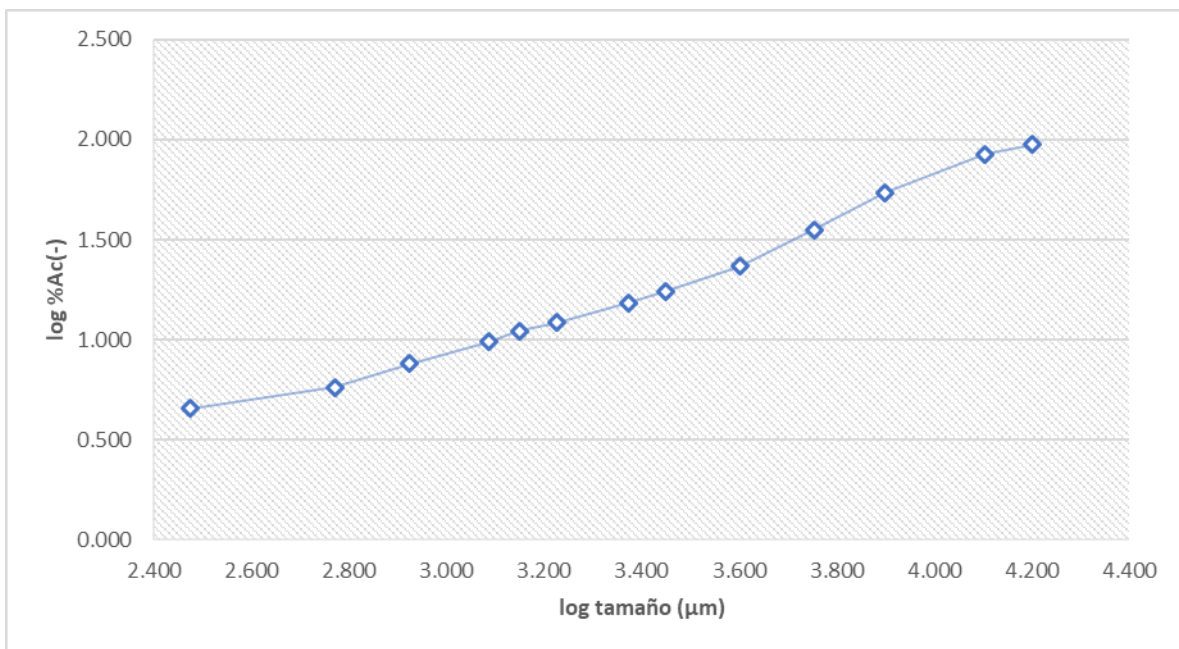


Figura 6. Gráfica log % Ac(-) vs log tamaño μm . muestra 3.2. Trituración primaria.

Tabla 7. Análisis granulométrico mineral 4.1. Trituración primaria.

Tamaño (inch)	Tamaño (μm)	Peso (g)	% Retenido	% Ac(-)	% Ac(+)	Log Tamaño	Log % Ac(-)
0.625	15875	93.2	9.5	90.43	9.56	4.20	1.95
0.5	12700	273.4	28.0	62.38	37.61	4.10	1.75
0.3124	7934.96	269.8	27.6	34.70	65.29	3.90	1.54
0.223	5664.2	76.7	7.8	26.83	73.16	3.75	1.42
0.157	3987.8	55.3	5.6	21.16	78.83	3.60	1.32
0.111	2819.4	36.9	3.7	17.38	82.62	3.45	1.24
0.093	2362.2	17.5	1.7	15.58	84.41	3.37	1.19
0.0661	1678.94	24.8	2.5	13.04	86.96	3.22	1.11
0.0555	1409.7	9	0.9	12.11	87.88	3.14	1.08
0.048	1219.2	10.9	1.1	10.99	89.00	3.08	1.04
0.0331	840.74	19.9	2.0	8.95	91.04	2.92	0.95
0.0232	589.28	16.4	1.6	7.27	92.72	2.77	0.86
0.0117	297.18	13.3	1.3	5.91	94.09	2.47	0.77

En la **Figura 7** se muestra los resultados del análisis granulométrico del mineral 4.1. después del proceso de trituración primaria.

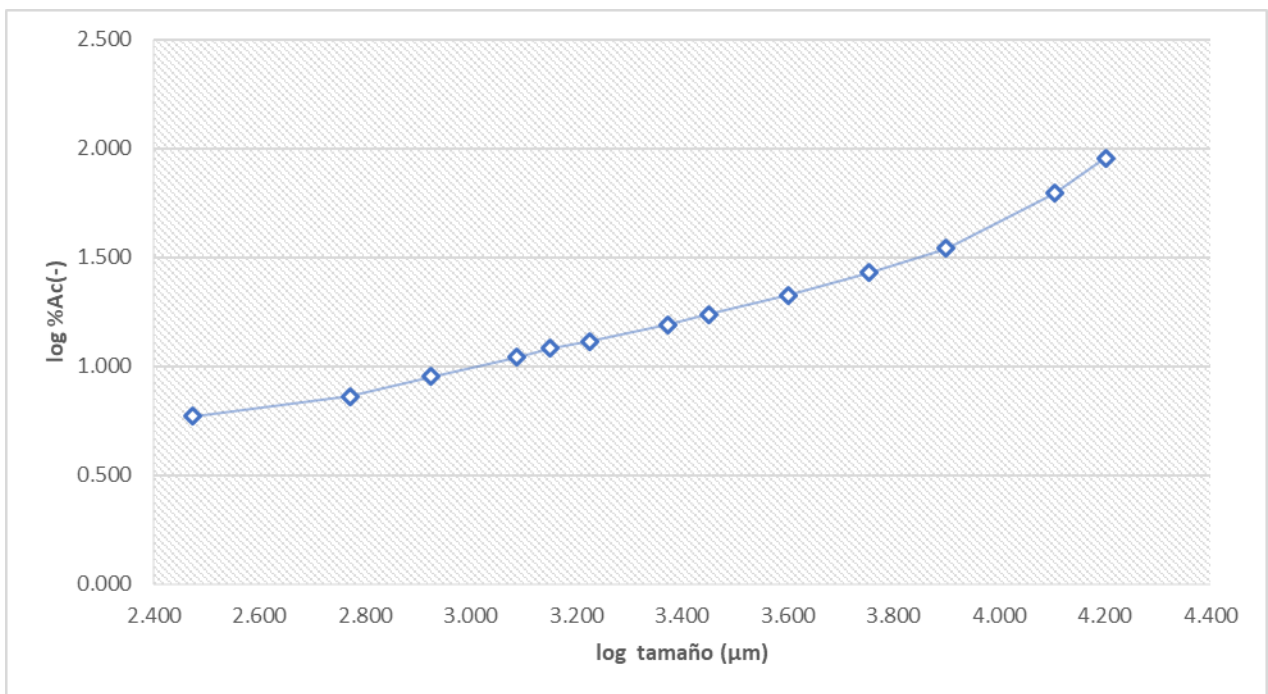


Figura 7. Gráfica log % Ac(-) vs log tamaño μm. muestra 4.1. Trituración primaria.

Tabla 8. Análisis granulométrico mineral 4.2. trituración primaria.

Tamaño (inch)	Tamaño (μm)	Peso (g)	% Retenido	% Ac(-)	% Ac(+)	Log Tamaño	Log % Ac(-)
0.625	15875	60.4	10.7	89.21	10.78	4.20	1.95
0.5	12700	87.3	15.5	73.62	26.38	4.10	1.86
0.3124	7934.96	192.6	34.3	39.22	60.77	3.90	1.59
0.223	5664.2	57.8	10.3	28.89	71.10	3.75	1.46
0.157	3987.8	36.6	6.5	22.36	77.63	3.60	1.34
0.111	2819.4	21.7	3.8	18.48	81.51	3.45	1.26
0.093	2362.2	9.9	1.7	16.71	83.28	3.37	1.22
0.0661	1678.94	16	2.8	13.86	86.14	3.22	1.14
0.0555	1409.7	6	1.0	12.78	87.21	3.14	1.10
0.048	1219.2	7.2	1.2	11.50	88.49	3.08	1.06
0.0331	840.74	11	1.9	9.53	90.46	2.92	0.97
0.0232	589.28	9.7	1.7	7.80	92.19	2.77	0.89
0.0117	297.18	8.5	1.5	6.28	93.71	2.47	0.79

En la **Figura 8** se muestra los resultados del análisis granulométrico del mineral 4.2. después del proceso de trituración primaria.

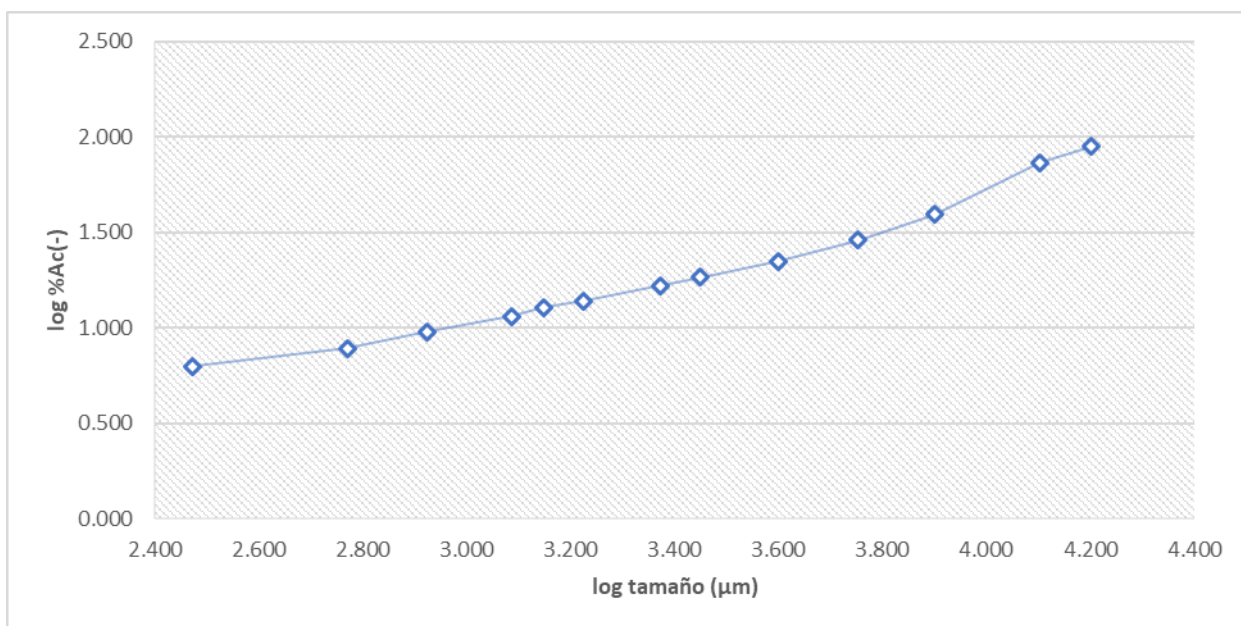


Figura 8. Gráfica log % Ac(-) vs log tamaño μm . muestra 4.2. Trituración primaria.

Anexo 2

Obtención de tiempo óptimo de molienda

A continuación, se muestran los análisis granulométricos a diferentes tiempos, así como sus gráficas % Ac(-) vs log tamaño μm de cada muestra.

Tabla 1. Análisis granulométrico mineral 1. Molienda a tiempos de 5, 10, 15 y 20 minutos.

Molienda 5 minutos						
Tamaño (inch)	Tamaño (μm)	Peso (g)	% Retenido	% Ac(-)	% Ac(+)	Log Tamaño
0.012	297.180	17.500	25.735	74.265	25.735	2.473
0.008	210.820	7.900	11.618	62.647	37.353	2.324
0.006	149.860	6.900	10.147	52.500	47.500	2.176
0.004	104.140	5.300	7.794	44.706	55.294	2.018
0.003	73.660	4.500	6.618	38.088	61.912	1.867
0.002	43.180	3.900	5.735	32.353	67.647	1.635
Molienda 10 minutos						
Tamaño (inch)	Tamaño (μm)	Peso (g)	% Retenido	% Ac(-)	% Ac(+)	Log Tamaño
0.012	297.180	5.300	7.910	92.090	7.910	2.473
0.008	210.820	6.200	9.254	82.836	17.164	2.324
0.006	149.860	7.200	10.746	72.090	27.910	2.176
0.004	104.140	6.700	10.000	62.090	37.910	2.018
0.003	73.660	5.700	8.507	53.582	46.418	1.867
0.002	43.180	4.600	6.866	46.716	53.284	1.635
Molienda 15 minutos						
Tamaño (inch)	Tamaño (μm)	Peso (g)	% Retenido	% Ac(-)	% Ac(+)	Log Tamaño
0.012	297.180	2.600	3.581	96.419	3.581	2.473
0.008	210.820	4.100	5.647	90.771	9.229	2.324
0.006	149.860	6.900	9.504	81.267	18.733	2.176
0.004	104.140	7.100	9.780	71.488	28.512	2.018
0.003	73.660	7.200	9.917	61.570	38.430	1.867
0.002	43.180	5.200	7.163	54.408	45.592	1.635
molienda 20 minutos						
Tamaño (inch)	Tamaño (μm)	Peso (g)	% Retenido	% Ac(-)	% Ac(+)	Log Tamaño
0.012	297.180	2.300	3.372	96.628	3.372	2.473
0.008	210.820	2.500	3.666	92.962	7.038	2.324
0.006	149.860	5.200	7.625	85.337	14.663	2.176
0.004	104.140	6.000	8.798	76.540	23.460	2.018
0.003	73.660	7.200	10.557	65.982	34.018	1.867
0.002	43.180	4.800	7.038	58.944	41.056	1.635

En la **Figura 1** se muestra los resultados de los análisis granulométricos del mineral 1 a 5,10, 15 y 20 minutos de proceso de molienda.

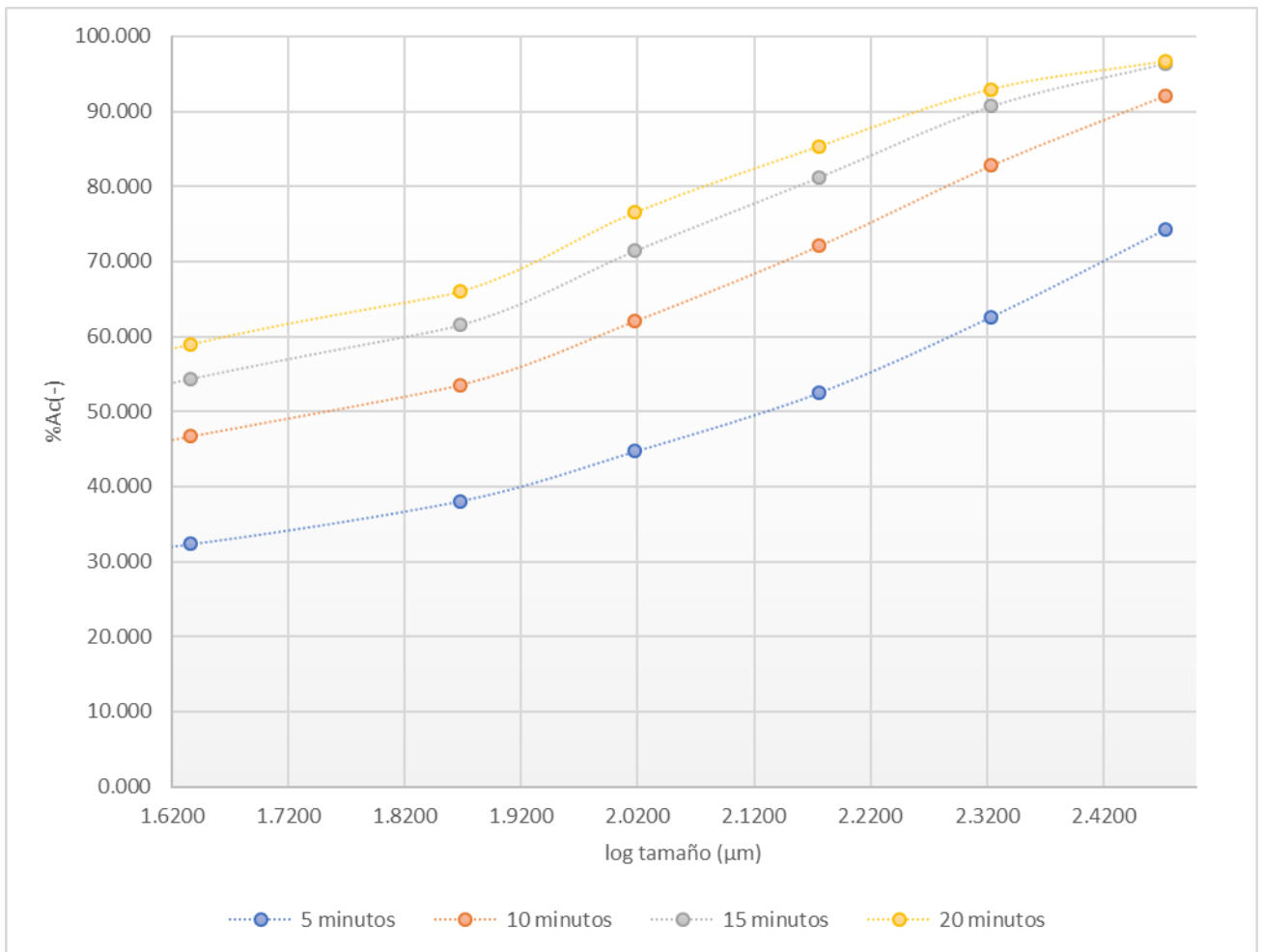


Figura 1. Gráfica % Ac(-) vs log tamaño µm. Muestra 1. Molienda.

Tabla 2. Análisis granulométrico mineral 2. Molienda a tiempos de 5, 10, 15 y 20 minutos.

Molienda 5 minutos						
Tamaño (inch)	Tamaño (µm)	Peso (g)	% Retenido	% Ac(-)	% Ac(+)	Log Tamaño
0.012	297.180	2.000	6.803	93.197	6.803	2.473
0.008	210.820	2.600	8.844	84.354	15.646	2.324
0.006	149.860	2.400	8.163	76.190	23.810	2.176
0.004	104.140	2.400	8.163	68.027	31.973	2.018
0.003	73.660	3.100	10.544	57.483	42.517	1.867
0.002	43.180	2.400	8.163	49.320	50.680	1.635
Molienda 10 minutos						
Tamaño (inch)	Tamaño (µm)	Peso (g)	% Retenido	% Ac(-)	% Ac(+)	Log Tamaño
0.012	297.180	1.600	4.692	95.308	4.692	2.473
0.008	210.820	1.800	5.279	90.029	9.971	2.324
0.006	149.860	2.600	7.625	82.405	17.595	2.176
0.004	104.140	3.100	9.091	73.314	26.686	2.018
0.003	73.660	3.000	8.798	64.516	35.484	1.867
0.002	43.180	2.800	8.211	56.305	43.695	1.635
Molienda 15 minutos						
Tamaño (inch)	Tamaño (µm)	Peso (g)	% Retenido	% Ac(-)	% Ac(+)	Log Tamaño
0.012	297.180	1.500	4.644	95.356	4.644	2.473
0.008	210.820	1.300	4.025	91.331	8.669	2.324
0.006	149.860	2.100	6.502	84.830	15.170	2.176
0.004	104.140	2.800	8.669	76.161	23.839	2.018
0.003	73.660	3.000	9.288	66.873	33.127	1.867
0.002	43.180	2.500	7.740	59.133	40.867	1.635
Molienda 20 minutos						
Tamaño (inch)	Tamaño (µm)	Peso (g)	% Retenido	% Ac(-)	% Ac(+)	Log Tamaño
0.012	297.180	1.900	5.706	94.294	5.706	2.473
0.008	210.820	1.400	4.204	90.090	9.910	2.324
0.006	149.860	2.200	6.607	83.483	16.517	2.176
0.004	104.140	2.600	7.808	75.676	24.324	2.018
0.003	73.660	4.500	13.514	62.162	37.838	1.867
0.002	43.180	3.200	9.610	52.553	47.447	1.635

En la **Figura 2** se muestra los resultados de los análisis granulométricos del mineral 2 a 5,10, 15 y 20 minutos de proceso de molienda.

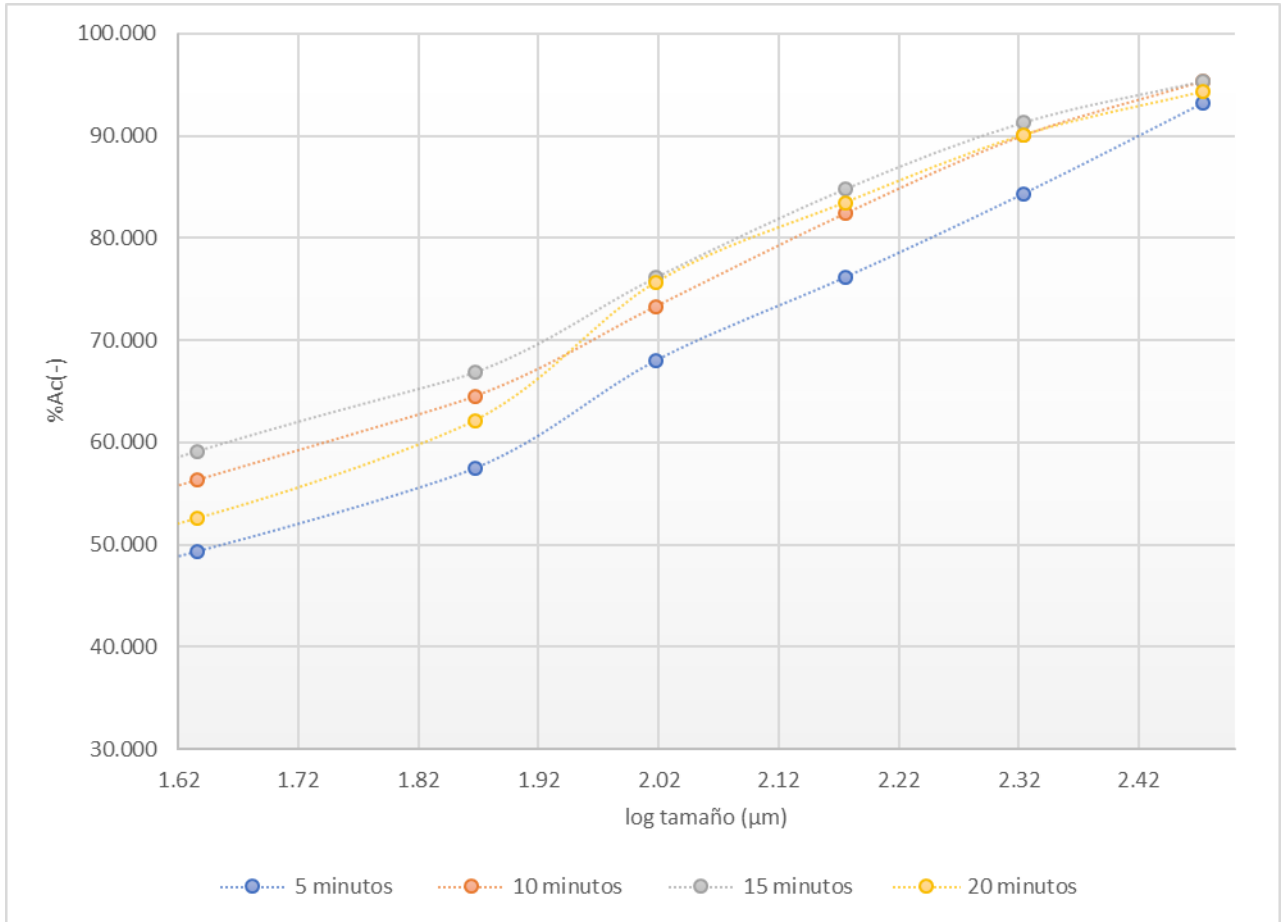


Figura 2. Gráfica % Ac(-) vs log tamaño µm. Muestra 2. Molienda.

Tabla 3. Análisis granulométrico mineral 3. Molienda a tiempos de 5, 10, 15 y 20 minutos.

Molienda 5 minutos						
Tamaño (inch)	Tamaño (µm)	Peso (g)	% Retenido	% Ac(-)	% Ac(+)	Log Tamaño
0.012	297.180	30.900	37.364	62.636	37.364	2.473
0.008	210.820	9.200	11.125	51.511	48.489	2.324
0.006	149.860	6.900	8.343	43.168	56.832	2.176
0.004	104.140	5.300	6.409	36.759	63.241	2.018
0.003	73.660	4.400	5.320	31.439	68.561	1.867
0.002	43.180	4.100	4.958	26.481	73.519	1.635
Molienda 10 minutos						
Tamaño (inch)	Tamaño (µm)	Peso (g)	% Retenido	% Ac(-)	% Ac(+)	Log Tamaño
0.012	297.180	14.800	15.812	84.188	15.812	2.473
0.008	210.820	10.300	11.004	73.184	26.816	2.324
0.006	149.860	8.900	9.509	63.675	36.325	2.176
0.004	104.140	7.700	8.226	55.449	44.551	2.018
0.003	73.660	6.800	7.265	48.184	51.816	1.867
0.002	43.180	5.600	5.983	42.201	57.799	1.635
Molienda 15 minutos						
Tamaño (inch)	Tamaño (µm)	Peso (g)	% Retenido	% Ac(-)	% Ac(+)	Log Tamaño
0.012	297.180	5.600	7.578	92.422	7.578	2.473
0.008	210.820	6.600	8.931	83.491	16.509	2.324
0.006	149.860	6.900	9.337	74.154	25.846	2.176
0.004	104.140	5.700	7.713	66.441	33.559	2.018
0.003	73.660	5.400	7.307	59.134	40.866	1.867
0.002	43.180	5.800	7.848	51.286	48.714	1.635
Molienda 20 minutos						
Tamaño (inch)	Tamaño (µm)	peso (g)	% Retenido	% Ac(-)	% Ac(+)	Log Tamaño
0.012	297.180	4.100	5.882	94.118	5.882	2.473
0.008	210.820	3.300	4.735	89.383	10.617	2.324
0.006	149.860	6.400	9.182	80.201	19.799	2.176
0.004	104.140	5.600	8.034	72.166	27.834	2.018
0.003	73.660	5.300	7.604	64.562	35.438	1.867
0.002	43.180	4.800	6.887	57.676	42.324	1.635

En la **Figura 3** se muestra los resultados de los análisis granulométricos del mineral 3 a 5,10, 15 y 20 minutos de proceso de molienda.

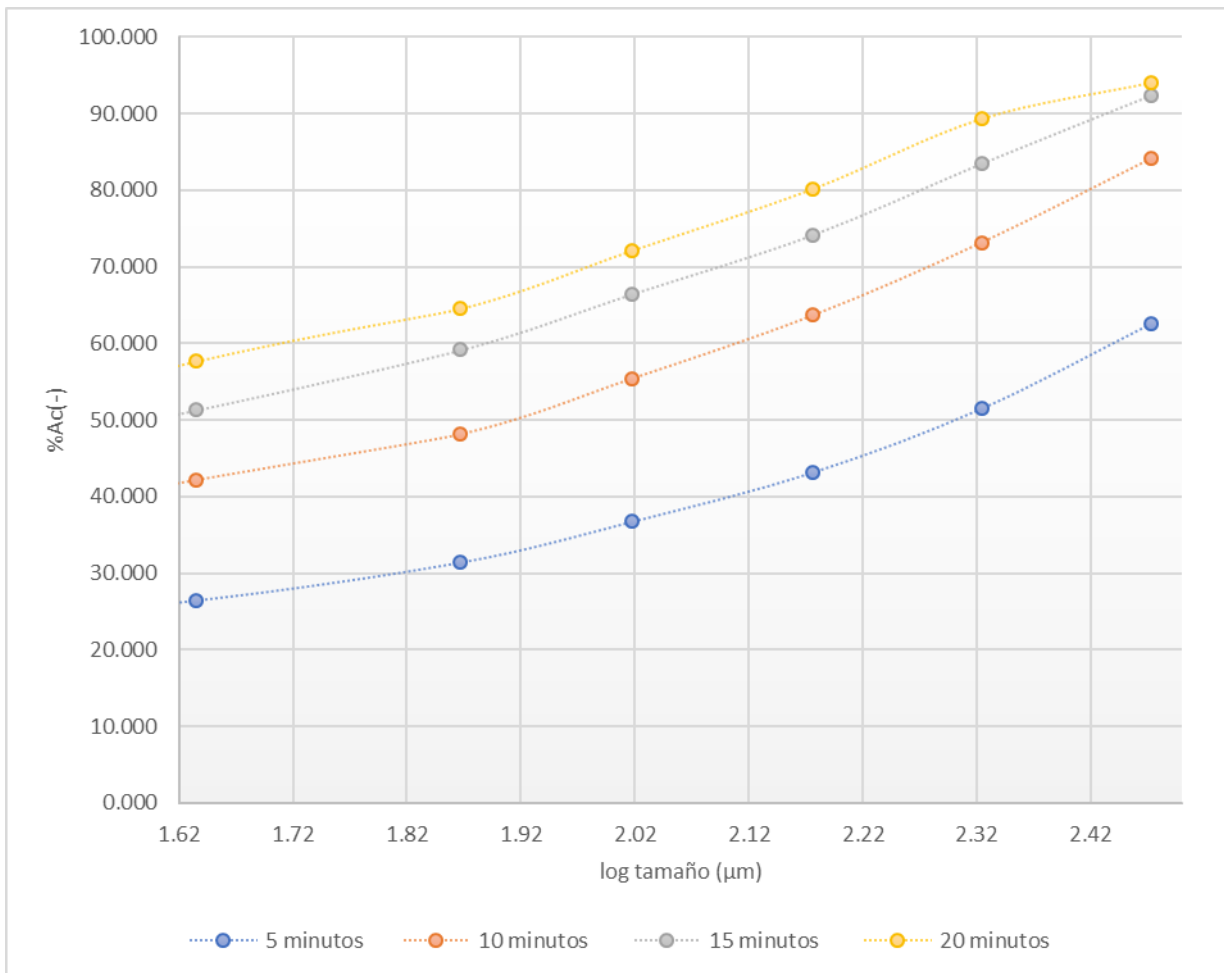


Figura 3. Gráfica % Ac(-) vs log tamaño µm. Muestra 3. Molienda.

Tabla 4. Análisis granulométrico mineral 4. Molienda a tiempos de 5, 10, 15 y 20 minutos.

Molienda 5 minutos						
Tamaño (inch)	Tamaño (µm)	Peso (g)	% Retenido	% Ac(-)	% Ac(+)	Log Tamaño
0.012	297.180	26.500	43.019	56.981	43.019	2.473
0.008	210.820	4.500	7.305	49.675	50.325	2.324
0.006	149.860	4.800	7.792	41.883	58.117	2.176
0.004	104.140	3.900	6.331	35.552	64.448	2.018
0.003	73.660	2.400	3.896	31.656	68.344	1.867
0.002	43.180	3.100	5.032	26.623	73.377	1.635
Molienda 10 minutos						
Tamaño (inch)	Tamaño (µm)	Peso (g)	% Retenido	% Ac(-)	% Ac(+)	Log Tamaño
0.012	297.180	21.800	31.232	68.768	31.232	2.473
0.008	210.820	2.800	4.011	64.756	35.244	2.324
0.006	149.860	4.800	6.877	57.880	42.120	2.176
0.004	104.140	5.400	7.736	50.143	49.857	2.018
0.003	73.660	4.200	6.017	44.126	55.874	1.867
0.002	43.180	4.300	6.160	37.966	62.034	1.635
Molienda 15 minutos						
Tamaño (inch)	Tamaño (µm)	Peso (g)	% Retenido	% Ac(-)	% Ac(+)	Log Tamaño
0.012	297.180	27.500	39.007	60.993	39.007	2.473
0.008	210.820	1.000	1.418	59.574	40.426	2.324
0.006	149.860	2.400	3.404	56.170	43.830	2.176
0.004	104.140	3.600	5.106	51.064	48.936	2.018
0.003	73.660	4.400	6.241	44.823	55.177	1.867
0.002	43.180	4.000	5.674	39.149	60.851	1.635
Molienda 20 minutos						
Tamaño (inch)	Tamaño (µm)	peso (g)	% Retenido	% Ac(-)	% Ac(+)	Log Tamaño
0.012	297.180	31.500	32.374	67.626	32.374	2.473
0.008	210.820	0.400	0.411	67.215	32.785	2.324
0.006	149.860	1.400	1.439	65.776	34.224	2.176
0.004	104.140	5.100	5.242	60.534	39.466	2.018
0.003	73.660	7.600	7.811	52.724	47.276	1.867
0.002	43.180	5.200	5.344	47.379	52.621	1.635

En la **Figura 4** se muestra los resultados de los análisis granulométricos del mineral 4 a 5,10, 15 y 20 minutos de proceso de molienda.

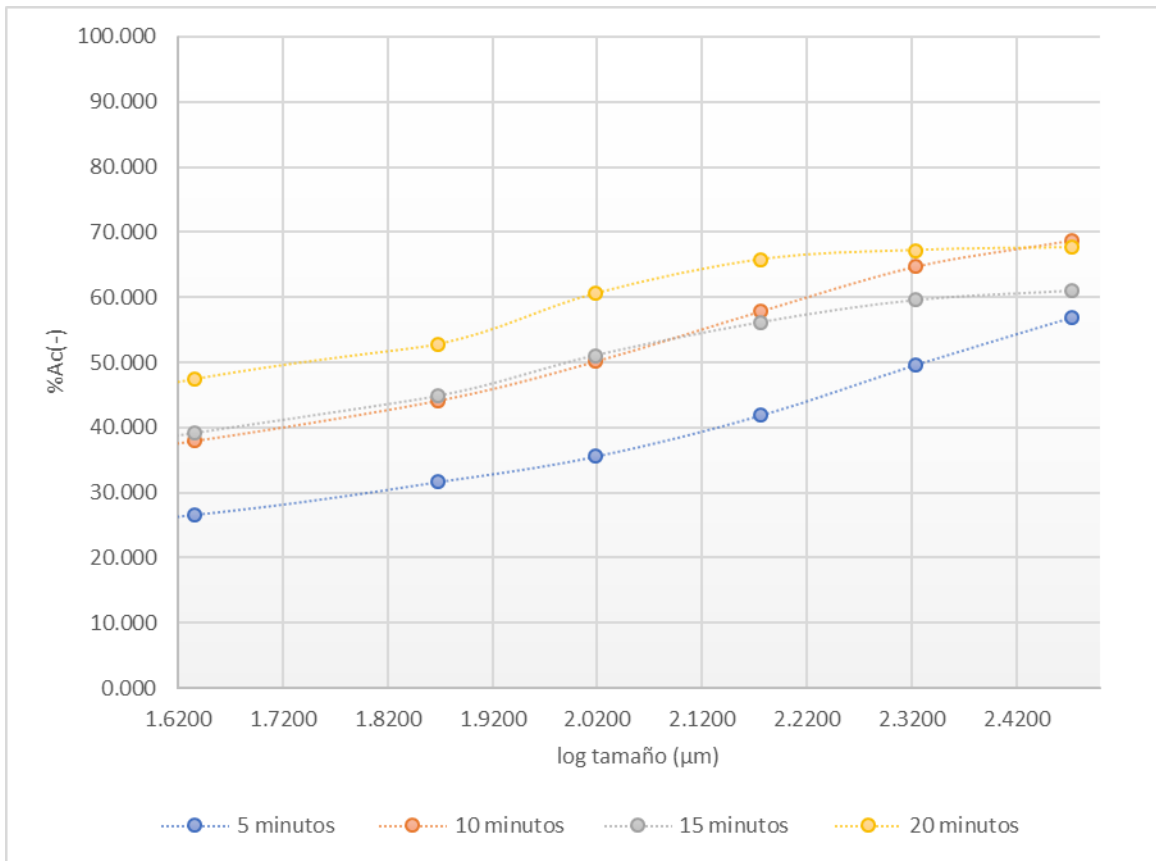


Figura 4. Gráfica % Ac(-) vs log tamaño μm . Muestra 4. Molienda.

Anexo 3

Análisis granulométrico a tiempo óptimo de molienda

A continuación, se muestran los análisis granulométricos a tiempo óptimo de molienda, así como sus gráficas log % Ac(-) vs log tamaño μm de cada muestra.

Tabla 1. Análisis granulométrico mineral 1. Tiempo óptimo de molienda

Tiempo óptimo de molienda 29 minutos							
Tamaño (inch)	Tamaño (μm)	Peso (g)	% Retenido	% Ac(-)	% Ac(+)	Log Tamaño	Log % Ac(-)
0.012	297.18	1.8	2.87	97.12	2.87	2.47	1.98
0.008	210.82	0.6	0.95	96.17	3.82	2.32	1.98
0.006	149.86	2.5	3.98	92.18	7.81	2.17	1.96
0.004	104.14	7.6	12.12	80.06	19.93	2.01	1.90
0.003	73.66	15.1	24.08	55.98	44.01	1.86	1.74
0.002	43.18	24.1	38.43	17.54	82.45	1.63	1.24

A continuación, en la **Figura 1** se muestra los resultados del análisis granulométrico a tiempo óptimo de molienda del mineral 1.

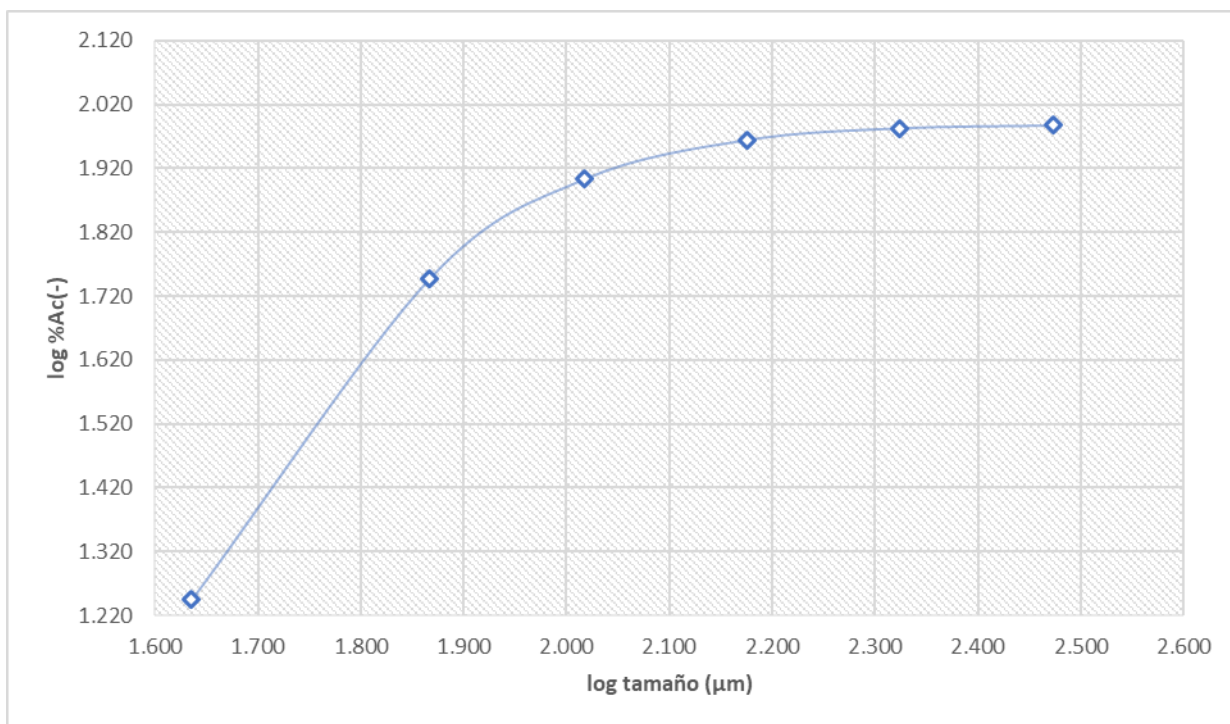


Figura 1. Gráfica log % Ac(-) vs log tamaño μm . Muestra 1. Tiempo óptimo de molienda.

Tabla 2. Análisis granulométrico mineral 2. Tiempo óptimo de molienda

Tiempo óptimo de molienda 32 minutos							
Tamaño (inch)	Tamaño (µm)	Peso (g)	% Retenido	% Ac(-)	% Ac(+)	Log Tamaño	Log % Ac(-)
0.012	297.18	3.60	7.72	92.27	7.72	2.47	1.96
0.008	210.82	0.30	0.64	91.63	8.36	2.32	1.96
0.006	149.86	1.60	3.43	88.19	11.80	2.17	1.94
0.004	104.14	4.00	8.58	79.61	20.38	2.01	1.90
0.003	73.66	3.90	8.36	71.24	28.75	1.86	1.85
0.002	43.18	6.10	13.09	58.15	41.84	1.63	1.76

A continuación, en la **Figura 2** se muestra los resultados del análisis granulométrico a tiempo óptimo de molienda del mineral 2.

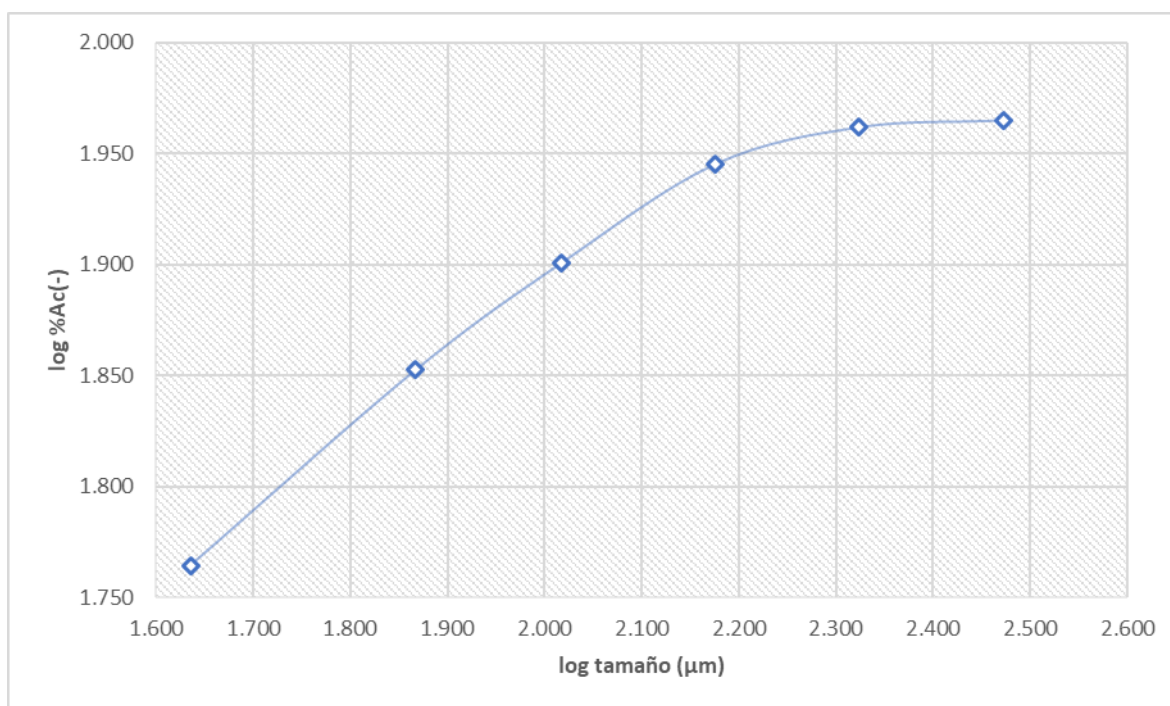


Figura 2. Gráfica log % Ac(-) vs log tamaño µm. Muestra 2. Tiempo óptimo de molienda.

Tabla 3. Análisis granulométrico mineral 3. Tiempo óptimo de molienda

Tiempo óptimo de molienda 29 minutos							
Tamaño (inch)	Tamaño (μm)	peso (g)	% Retenido	% Ac(-)	% Ac(+)	Log Tamaño	Log % Ac(-)
0.012	297.18	4.1	5.70	94.29	5.70	2.47	1.97
0.008	210.82	5.5	7.65	86.64	13.35	2.32	1.93
0.006	149.86	6.4	8.90	77.74	22.25	2.17	1.89
0.004	104.14	5.6	7.78	69.95	30.04	2.01	1.84
0.003	73.66	5.3	7.37	62.58	37.41	1.86	1.79
0.002	43.18	4.8	6.67	55.91	44.08	1.63	1.74

A continuación, en la **Figura 3** se muestra los resultados del análisis granulométrico a tiempo óptimo de molienda del mineral 3.

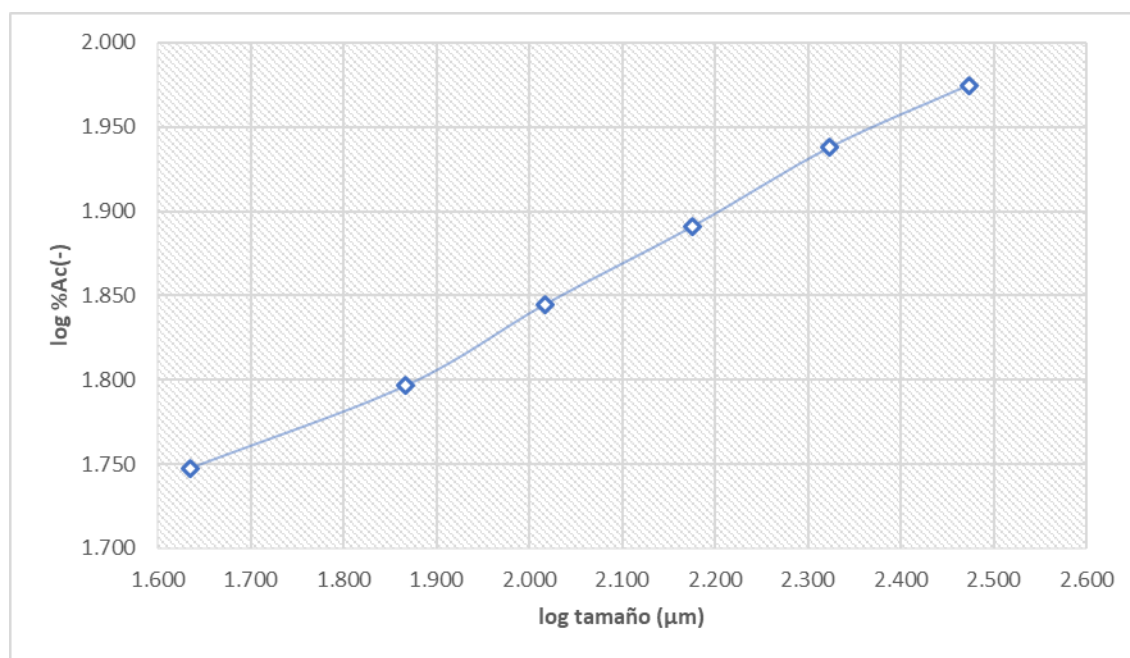


Figura 3. Gráfica log % Ac(-) vs log tamaño μm. Muestra 3. Tiempo óptimo de molienda.

Tabla 4. Análisis granulométrico mineral 4. Tiempo óptimo de molienda

Tiempo óptimo de molienda 44 minutos							
Tamaño (inch)	Tamaño (μm)	Peso (g)	% Retenido	% Ac(-)	% Ac(+)	Log Tamaño	Log % Ac(-)
0.012	297.18	19.9	26.42	73.57	26.42	2.47	1.86
0.008	210.82	0.9	1.19	72.37	27.62	2.32	1.86
0.006	149.86	0.1	0.13	72.24	27.75	2.17	1.85
0.004	104.14	6.4	8.49	63.74	36.25	2.01	1.80
0.003	73.66	17.1	22.70	41.03	58.96	1.86	1.61
0.002	43.18	2.4	3.18	37.84	62.15	1.63	1.57

A continuación, en la **Figura 4** se muestra los resultados del análisis granulométrico a tiempo óptimo de molienda del mineral 4.

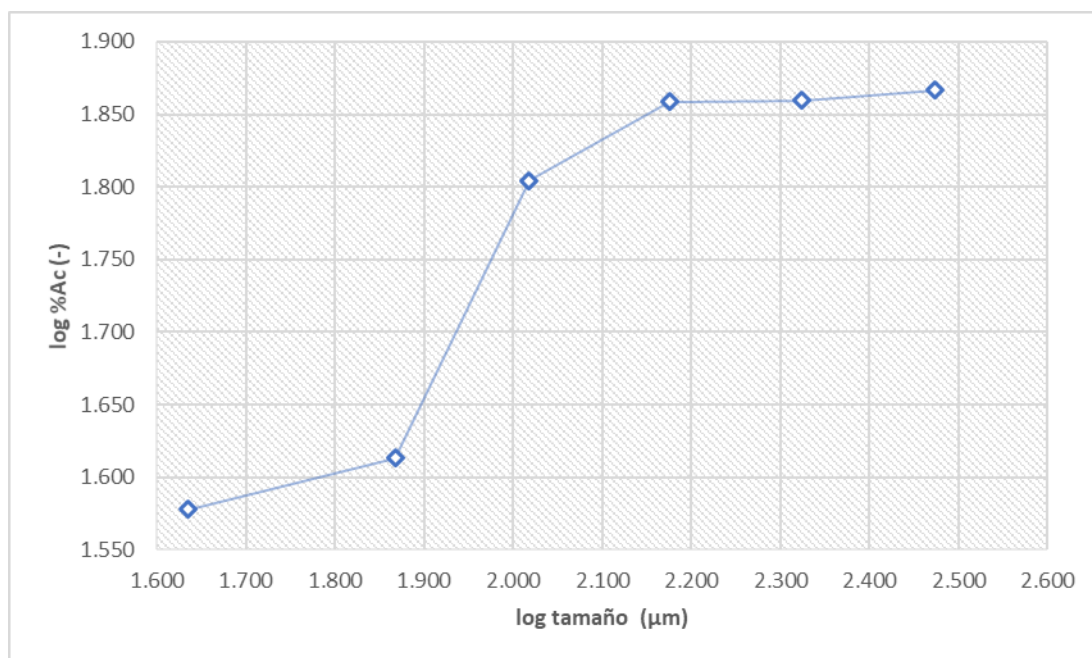


Figura 4. Gráfica log % Ac(-) vs log tamaño μm. Muestra 4 . Tiempo óptimo de molienda

Anexo 4

Propiedades físicas y químicas de los minerales

Tabla 1. Propiedades físicas y químicas de los minerales.

Nombre	Color	Brillo	Dureza (Mohs)	Textura	Ruptura	Densidad (g/cm³)
Plata	Plateado	Metálico	2.7	Lisa	Cristalina	2.5 – 3
Pirita	Amarillo latón	Metálico	6 – 6.5	Gránulos	Cristalina	4.9 – 5.2
Hematita	Rojo pardo	Mate	6 – 5	Lisa	Cristalina	5.27
Magnetita	Negro opaco	Metálico	5.5 – 6.5	Irregular	Cristalina	5.17
Calcopirita	Amarillo rojizo	Metálico	3.4 – 4	Lisa	Cristalina	4.19
Calcosina	Gris oscuro	Metálico	2.5 - 3	Irregular	Cristalina	5.35