

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA

OBTENCIÓN DE FERRITAS A PARTIR DE DESECHOS SÓLIDOS PROVENIENTES DE LOS PROCESOS DE EXTRACCIÓN DE ORO

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA QUÍMICA

MARÍA JOSÉ BAUTISTA MOYA
(jose.bautista.moya@gmail.com)

DIRECTOR: LUIS RODRIGO LASCANO LASCANO PhD.
(luis.lascano@epn.edu.ec)

CO-DIRECTORA: ING. LUCÍA ELIANA MANANGÓN PERUGACHI MSc.
(lucia.manangon@epn.edu.ec)

Quito, abril del 2015

© Escuela Politécnica Nacional (2015)
Reservados todos los derechos de reproducción

DECLARACIÓN

Yo, María José Bautista Moya, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

María José Bautista Moya

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por María José Bautista Moya, bajo mi supervisión.

Luis Lascano Lascano PhD.
DIRECTOR DE PROYECTO

Ing. Eliana Manangón MSc.
CODIRECTORA DE PROYECTO

AGRADECIMIENTO

A Dios porque sin él no creo que habría podido entrar a la Poli, ni haber pasado Control o haber aguantado los “malos ratos”.

A mi mamá, abuelita Reneé y a la Colombi, quienes directa e indirectamente me criaron y educaron con su ejemplo para que no dependa de un hombre.

A mi hermana Valeria, a quien le debo un agradecimiento especial.

A mi Niquito hermoso que me ha visto graduarme de la escuela, el colegio y ahora la universidad, y espero que siga conmigo hasta graduarme de la maestría y el doctorado 😊.

Al Dr. Luis Lascano quien fue un excelente director de tesis, al Ing. Patricio Flor, Dr. Oswaldo Aldás, Dr. César Costa, Dr. Rafael Uribe, Ing. Eliana Manangón, a la Sra. Ruth y al Ing. Martín Portilla porque sin conocerme me ayudaron facilitándome conocimientos y equipos, convirtiéndose en poco tiempo en mis amigos.

Al Ing. Carlos Chia, gerente de producción de SODIREC, por permitirme hacer una vista técnica por la planta y facilitarme el material necesario para esta investigación.

Finalmente, a mis amigas Flor Oña, Majo Vallejo, Erika Urbano y Ana Montoya, a mis amigos Danilo Guanoluisa y Jorge Luis Masache porque en ellos encontré apoyo, alegría y con quien desahogarme en diferentes circunstancias propias de la poli y de la vida.

DEDICATORIA

A mi mamá Liliana, hermana Valeria, hermano Nico, a mi otra mamá Colombi y a mis sobrinitos Gustavo y Adrián.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

| | PÁGINA |
|---|-----------|
| RESUMEN | xiv |
| INTRODUCCIÓN | xvi |
| | |
| 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA | 1 |
| 1.1 Proceso productivo de la planta SODIREC | 1 |
| 1.1.1 Marco geológico y mineralógico en Portovelo | 1 |
| 1.1.2 Proceso metalúrgico en la planta SODIREC | 2 |
| 1.1.2.1 Proceso de cementación Merrill Crowe | 4 |
| 1.1.2.2 Proceso de carbón en pulpa | 5 |
| 1.2 Minerales de hierro y transformaciones térmicas | 8 |
| 1.2.1 Características, propiedades y aplicaciones de minerales presentes en los suelos | 9 |
| 1.2.1.1 Elementos químicos y minerales en suelos y rocas | 9 |
| Arcilla | 11 |
| 1.2.1.2 Hidróxidos, oxihidróxidos, y óxidos de hierro y aluminio | 11 |
| 1.2.1.3 Tipos de materiales según sus propiedades magnéticas | 18 |
| 1.2.1.4 Ferritas | 19 |
| 1.2.2 Transformaciones térmicas en arcillas | 20 |
| 1.2.2.1 Ceramización y encapsulación | 21 |
| 1.2.2.2 Cambios estructurales de los minerales de arcilla en función de la temperatura | 25 |
| | |
| 2. PARTE EXPERIMENTAL | 31 |
| 2.1 Caracterización de las muestras de desechos sólidos provenientes de los procesos de extracción de oro | 32 |
| 2.1.1 Caracterización física de los relaves | 33 |
| 2.1.1.1 Determinación de la densidad real y de la densidad aparente de los relaves | 33 |
| 2.1.1.2 Análisis granulométrico de los relaves | 33 |
| 2.1.1.3 Separación magnética de los relaves | 33 |
| 2.1.2 Caracterización química de los relaves | 34 |
| 2.1.2.1 Determinación de la composición química por espectroscopía de dispersión de rayos X característicos (EDS) | 35 |
| 2.1.2.2 Determinación de la composición química por espectroscopía de plasma inducido por láser (LIBS) | 35 |
| 2.1.3 Caracterización mineralógica de los relaves | 36 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 2.2 | Estudio de la influencia del tamaño de partícula de la muestra y de la temperatura de calcinación en la formación y separación de ferritas | 37 |
| 2.2.1 | Clasificación granulométrica | 38 |
| 2.2.2 | Calcinación | 39 |
| 2.2.3 | Ciclos de separación magnética | 40 |
| 2.2.4 | Caracterización durante todo el proceso | 42 |
| 2.2.4.1 | Apreciación visual de la concentración de minerales por microscopía petrográfica | 42 |
| 2.2.4.2 | Apreciación visual de la concentración de minerales por microscopía óptica | 43 |
| 2.2.4.3 | Caracterización mineralógica por DRX | 44 |
| 2.2.4.4 | Determinación de la composición química por espectroscopía de dispersión de rayos X característicos (EDS) | 44 |
| 2.2.4.5 | Determinación de la composición química por espectroscopía de plasma inducido por láser (LIBS) | 45 |
| 2.3 | Diseño de un proceso para la obtención de ferritas | 45 |
| 2.3.1 | Elaboración del diagrama de flujo del proceso para la obtención de ferritas | 45 |
| 2.3.2 | Dimensionamiento de equipos | 45 |
| 2.3.3 | Estimación económica preliminar del costo para la obtención de ferritas a partir de desechos sólidos provenientes de los procesos de extracción de oro | 46 |
| 3. | RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 47 |
| 3.1 | Resultados de la caracterización de las muestras de desechos sólidos provenientes de los procesos de extracción de oro | 47 |
| 3.1.1 | Resultados de la caracterización física de los relaves | 47 |
| 3.1.1.1 | Resultados de la determinación de la densidad real y de la densidad aparente de los relaves | 47 |
| 3.1.1.2 | Resultados del análisis granulométrico de los relaves | 48 |
| 3.1.1.3 | Resultados de la separación magnética de los relaves | 51 |
| 3.1.2 | Resultados de la caracterización química de los relaves | 53 |
| 3.1.2.1 | Resultados de la determinación de la composición química por espectroscopía de dispersión de rayos X característicos (EDS) | 53 |
| 3.1.2.2 | Resultados de la determinación de la composición química por espectroscopía de plasma inducido por láser (LIBS) | 56 |
| 3.1.3 | Resultados de la caracterización mineralógica de los relaves | 60 |
| 3.2 | Resultados del estudio de la influencia del tamaño de partícula de la muestra y de la temperatura de calcinación en la formación y separación de ferritas | 62 |
| 3.2.1 | Resultados de la clasificación granulométrica | 62 |
| 3.2.2 | Resultados de los ensayos de calcinación realizados para la obtención de las ferritas | 63 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 3.2.3 | Resultados de los ciclos de separación magnética realizados para la separación de las ferritas | 67 |
| 3.2.4 | Resultados de la caracterización de muestras durante todo el proceso | 69 |
| 3.2.4.1 | Resultados de la apreciación visual de la concentración de minerales por microscopía petrográfica | 70 |
| 3.2.4.2 | Resultados de la apreciación visual de la concentración de minerales por microscopía óptica | 71 |
| 3.2.4.3 | Resultados de la caracterización mineralógica por DRX | 75 |
| 3.2.4.4 | Resultados de la determinación de la composición química por espectrometría de dispersión de rayos X característicos (EDS) | 77 |
| 3.2.4.5 | Resultados de la determinación de la composición química por espectroscopía de plasma inducido por láser (LIBS) | 82 |
| 3.3 | Resultados del diseño del proceso para la obtención de ferritas | 83 |
| 3.3.1 | Definición del diagrama de bloques (BFD) y del diagrama de flujo (PFD) del proceso para la obtención de ferritas | 83 |
| 3.3.1.1 | Balance de masa para la producción de una tonelada mensual de ferritas | 85 |
| 3.3.1.2 | Dimensionamiento de equipos | 87 |
| 3.3.1.3 | Plano de simbología y abreviaturas usadas en los equipos y líneas de corriente | 92 |
| 3.3.1.4 | Descripción detallada del proceso | 93 |
| 3.3.2 | Resultados de la estimación económica preliminar del costo para la obtención de ferritas a partir de desechos sólidos provenientes de los procesos de extracción de oro | 94 |
| 4. | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 102 |
| 4.1 | Conclusiones | 102 |
| 4.2 | Recomendaciones | 105 |
| | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 107 |
| | ANEXOS | 112 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | | PÁGINA |
|--------------------|--|---------------|
| Tabla 1.1. | Abundancia de elementos químicos en rocas y suelos | 9 |
| Tabla 1.2. | Minerales más comunes en suelos | 10 |
| Tabla 1.3. | Resumen de los efectos de la temperatura en óxidos e hidróxidos de hierro | 28 |
| Tabla 2.1. | Resumen de las condiciones de operación usadas en el separador magnético | 34 |
| Tabla 2.2. | VARIABLES consideradas en el proceso de obtención de ferritas | 37 |
| Tabla 2.3. | Combinación de variables para la realización de ensayos | 39 |
| Tabla 2.4. | Condiciones de operación del separador magnético para los tres procesos de separación magnética | 40 |
| Tabla 3.1. | Resultados de la densidad real y de la densidad aparente de los relaves | 48 |
| Tabla 3.2. | Resultados del análisis granulométrico de los relaves | 48 |
| Tabla 3.3. | Rangos de tamaño de partícula considerados para el estudio de la obtención y separación de ferritas | 50 |
| Tabla 3.4. | Resultados de la separación magnética aplicada a los relaves | 51 |
| Tabla 3.5. | Resultados del análisis químico elemental semi-cuantitativo por EDS de los relaves en toda la muestra | 54 |
| Tabla 3.6. | Resultados del análisis químico elemental semi-cuantitativo por EDS para cuatro granos específicos en la muestra de relaves | 55 |
| Tabla 3.7. | Resultados cualitativos y cuantitativos obtenidos mediante el análisis de DRX para la muestra de relaves sin tratamiento térmico | 61 |
| Tabla 3.8. | Rangos de tamaño de partícula usados para el estudio de la obtención y separación de ferritas | 62 |
| Tabla 3.9. | Resumen de los porcentajes de granos de ganga contados en las muestras de ferritas acumuladas de los ensayos del 1 al 12 | 73 |
| Tabla 3.10. | Resumen de los porcentajes de granos mixtos contados en las muestras de ferritas acumuladas de los ensayos del 1 al 12 | 74 |

| | | |
|--------------------|---|----|
| Tabla 3.11. | Resumen de los porcentajes de granos de ferritas libres contados en las muestras denominadas como ferritas acumuladas de los ensayos del 1 al 12 | 74 |
| Tabla 3.12. | Resultados cualitativos y cuantitativos obtenidos mediante el análisis de DRX | 76 |
| Tabla 3.13. | Resultados del análisis químico elemental semi-cuantitativo por EDS de las ferritas obtenidas del ciclo de separación magnética del ensayo N° 10. Análisis realizado en toda la muestra | 78 |
| Tabla 3.14. | Resultados del análisis químico elemental semi-cuantitativo por EDS para cuatro granos específicos en la muestra de ferritas obtenidas del ciclo de separación magnética del ensayo N° 10 | 79 |
| Tabla 3.15. | Condiciones de operación del tamizado | 84 |
| Tabla 3.16. | Condiciones de operación para el secado | 84 |
| Tabla 3.17. | Condiciones de operación para la calcinación | 84 |
| Tabla 3.18. | Condiciones de operación para la separación magnética | 85 |
| Tabla 3.19. | Corrientes obtenidas con el balance de masa para la producción de una tonelada mensual de ferritas | 87 |
| Tabla 3.20. | Balance de energía por día para los equipos eléctricos en el proceso de obtención de ferritas | 92 |
| Tabla 3.21. | Simbología y abreviaturas usadas en los equipos y líneas de corriente | 92 |
| Tabla 3.22. | Parámetros del proyecto de inversión para el proceso de obtención de ferritas | 94 |
| Tabla 3.23. | Costos fijos anuales para la implementación del proceso de obtención de ferritas | 95 |
| Tabla 3.24. | Costos de servicios industriales | 96 |
| Tabla 3.25. | Costo de operación para el proceso de obtención de ferritas | 96 |
| Tabla 3.26. | Resumen de costos del proceso de obtención de ferritas | 96 |
| Tabla 3.27. | Resultados del costo de kilogramo de relaves procesados y kilogramo de ferritas obtenidas | 97 |
| Tabla 3.28. | Costo de equipos principales para el proceso de obtención de ferritas | 97 |

| | | |
|-----------------------|---|-----|
| Tabla 3.29. | Monto total de inversión para el proceso de obtención de ferritas a partir del tratamiento de desechos sólidos provenientes de los procesos de extracción de oro | 97 |
| Tabla 3.30. | Resumen de ventas de ferritas | 98 |
| Tabla 3.31. | Flujo de caja considerando un costo de ferritas comercializadas a 0,01 UDS/g | 99 |
| Tabla 3.32. | Valores de TIR, VAN y período de recuperación para un flujo de caja considerando un costo de ferritas comercializadas a 0,01 USD/g | 100 |
| Tabla AI.1. | Dimensiones del cilindro usado para la determinación de la densidad aparente de los relaves | 116 |
| Tabla AIII.1. | Resumen de las muestras seleccionadas para caracterización en todo el proceso | 120 |
| Tabla AVI.1. | Resultados del balance de masa de los ensayos del 1 al 16 (corrientes de la A a la m2) | 124 |
| Tabla AVI.2. | Resultados del balance de masa de los ensayos del 1 al 16 (corrientes de la E a la P3) | 125 |
| Tabla AV.1. | Resultados del análisis LIBS para el contenido de hierro en las muestras de relaves retenidos sobre las diferentes mallas empleadas en el análisis granulométrico | 128 |
| Tabla AVIII.1. | Resultados de las pérdidas por calcinación de las muestras de relaves sometidas a distintas temperaturas de calcinación | 130 |
| Tabla AVIII.2. | Resumen de resultados de las pérdidas por calcinación de las muestras de relaves sometidas a distintas temperaturas de calcinación | 131 |
| Tabla AVIII.3. | Resultados de las cantidades de material clasificado después de la 1ra y 2da separación magnética conjuntas | 131 |
| Tabla AVIII.4. | Porcentajes de las cantidades de material clasificado después de 1ra y 2da separación magnética conjuntas | 132 |
| Tabla AVIII.5. | Resumen del porcentaje de ferritas separadas en la 1ra y 2da separación magnética conjunta en los ensayos del 1 al 16 | 132 |
| Tabla AVIII.6. | Registros del material magnético sometido al proceso de pulverización | 133 |
| Tabla AVIII.7. | Resultados de las cantidades de material clasificado después de la 3ra separación magnética | 133 |

| | | |
|-----------------------|---|-----|
| Tabla AVIII.8. | Porcentajes de las cantidades de material clasificado después de la 3ra separación magnética | 134 |
| Tabla AVIII.9. | Resumen del porcentaje de ferritas separadas en la 3ra separación magnética en los ensayos del 1 al 12 | 134 |
| Tabla AIX.1. | Resultados del conteo de granos de las ferritas acumuladas en los ensayos del 1 al 12 | 140 |
| Tabla AIX.2. | Resultados de los porcentajes del conteo de granos de las ferritas acumuladas en los ensayos del 1 al 12 | 141 |
| Tabla AIX.3. | Resumen de los resultados de los porcentajes del conteo de granos de las ferritas acumuladas en los ensayos del 1 al 12 | 142 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | PÁGINA |
|---|--------|
| Figura 1.1. Diagrama de bloques del proceso productivo de la Planta SODIREC S.A | 3 |
| Figura 1.2. Diagrama de procesos de la Planta SODIREC S.A. | 1 |
| Figura 1.3. Distribución de minerales de arcillas rojas de interés cerámico | 11 |
| Figura 1.4. Estructuras del grupo de la hematita | 14 |
| Figura 1.5. Cristales de hematita | 15 |
| Figura 1.6. Composición natural de los óxidos minerales en el sistema | 16 |
| Figura 1.7. Series de soluciones sólidas con los óxidos involucrados en el sistema $TiO_2 - FeO - Fe_2O_3$ | 17 |
| Figura 1.8. Cristales de magnetita | 17 |
| Figura 1.9. Procesos de ceramización y encapsulación | 22 |
| Figura 1.10. Principio de la ceramización | 24 |
| Figura 1.11. Diagrama de fases hierro-oxígeno | 29 |
| Figura 2.1. Esquema general de la metodología seguida para determinar el proceso y condiciones de operación para obtener ferritas a partir de desechos sólidos provenientes de los procesos de extracción de oro | 31 |
| Figura 2.2. Piscina de lixiviación N° 5 de la empresa SODIREC S.A. | 32 |
| Figura 2.3. Muestras de relaves retenidos en los diferentes tamices y blanco (cinta doble faz) para el análisis con LIBS | 36 |
| Figura 2.4. Esquema de la metodología seguida para analizar la influencia del tamaño de partícula y de la temperatura de calcinación para el proceso de obtención y separación de ferritas | 38 |
| Figura 2.5. Perfil del tratamiento térmico realizado | 40 |
| Figura 3.1. Análisis granulométrico de los relaves y determinación del d_{80} | 50 |
| Figura 3.2. a) Fracciones magnética y no magnética de la muestra A. b) Fracciones magnética y no magnética de la muestra B | 52 |

| | | |
|---------------------|--|----|
| Figura 3.3. | Fotografía de la muestra de relaves capturada con la video cámara interna del equipo de microscopía electrónica de barrido ASPEX, en la cual se realizó el análisis químico elemental semi-cuantitativo, tanto de la muestra general como de cuatro granos específicos | 53 |
| Figura 3.4. | Fotografías de las muestras de relaves retenidos sobre las distintas mallas obtenidas con la video cámara del equipo LIBS | 57 |
| Figura 3.5. | Espectro LIBS (405 – 440 nm) de los relaves retenidos sobre las diferentes mallas. Se muestra el acercamiento a un pico de longitud de onda comprendida entre 437,8 y 438,8 nm. Este espectro muestra las cuentas frente a longitud de onda únicamente para el elemento hierro | 58 |
| Figura 3.6. | Espectro LIBS (con el eje de longitud de onda completo) realizado a la muestra de relaves secos retenidos sobre la malla N° 140. Se presentan acercamientos a los segmentos del espectro en donde se pueden identificar los picos característicos del hierro | 59 |
| Figura 3.7. | Difractograma de los relaves obtenido con el difractómetro D8 Advance, Bruker | 60 |
| Figura 3.8. | Fotografías que evidencian el cambio de coloración de las muestras de relaves después de haber sido calcinadas | 63 |
| Figura 3.9. | Fotografías de los relaves calcinados en los ensayos del 1 al 16 | 64 |
| Figura 3.10. | Fotografía de la muestra de relaves correspondiente al ensayo N° 16 (granos < 45 μm, 1 000 °C), después de haber sido calcinada | 65 |
| Figura 3.11. | Resultados de las pérdidas de calcinación de las muestras de relaves sometidas a distintas temperaturas de calcinación | 66 |
| Figura 3.12. | Porcentajes de ferritas separadas en función de la temperatura, en la 1ra y 2da separación magnética conjuntas, para los ensayos del 1 al 16 | 67 |
| Figura 3.13. | Resultados de los porcentajes de ferritas separadas en la 3ra separación magnética para los ensayos del 1 al 12 | 68 |
| Figura 3.14. | Fotografía de un grano de ferritas correspondiente al ensayo N° 1, observado con el microscopio petrográfico ZEISS, con analizador | 71 |
| Figura 3.15. | Fotografías de muestras obtenidas a lo largo del proceso para la obtención de ferritas | 72 |
| Figura 3.16. | Fotografías de granos de la muestra de ferritas del ensayo N° 10, tomadas con la cámara del estereomicroscopio Motic, con la lente de aumento 10 X | 73 |

| | | |
|-----------------------|--|-----|
| Figura 3.17. | Difractograma de las ferritas separadas (correspondientes al ensayo N° 10) | 75 |
| Figura 3.18. | Fotografía de la muestra de ferritas obtenidas en el ensayo N° 10 capturada con la video cámara interna del equipo de microscopía electrónica de barrido ASPEX, en la cual se realizó el análisis químico elemental semi-cuantitativo, tanto de la muestra general como de cuatro granos específicos | 78 |
| Figura 3.19. | Fotografía de granos procedentes de la muestra del ensayo N° 10 | 81 |
| Figura 3.20. | Espectro LIBS (con el eje de longitud de onda completo) realizado a la muestra de ferritas correspondientes al ensayo N° 10. Se presentan acercamientos a los segmentos del espectro en donde se pueden identificar los picos característicos del hierro | 82 |
| Figura 3.21. | Diagrama de bloques para realizar el balance de masa para la obtención de una tonelada mensual de ferritas | 85 |
| Figura 3.22. | Diagrama de bloques del proceso para la obtención de ferritas a partir del tratamiento de desechos sólidos provenientes de los procesos de extracción de oro | 90 |
| Figura 3.23. | PFD del proceso para la obtención de una tonelada de ferritas mensual | 91 |
| Figura 3.24. | Gráfica de TIR en función del costo por kilogramo de relaves procesados | 100 |
| Figura AIV.1. | Esquema del separador magnético CARPCO en el que se representan las fracciones clasificadas luego de separar magnéticamente una muestra | 121 |
| Figura AV.1. | Resumen gráfico del procedimiento de separación magnética seguido para separar las ferritas obtenidas luego de la calcinación de los relaves | 122 |
| Figura AVI.1. | Diagrama de bloques para determinar el mejor tamaño de partícula y la mejor temperatura de calcinación para el proceso de obtención y separación de ferritas | 123 |
| Figura AVII.1. | Espectro LIBS (con el eje de longitud de onda completo) para el elemento hierro, obtenido para las muestras de relaves retenidos sobre las diferentes mallas usadas en el análisis granulométrico | 127 |
| Figura AVII.2. | Espectro LIBS 2D (373,0 – 377,0 nm) para el elemento hierro, obtenido para las muestras de relaves retenidos sobre las diferentes mallas usadas en el análisis granulométrico | 127 |

| | | |
|-----------------------|---|-----|
| Figura AVII.3. | Espectro LIBS 3D (373,0 – 377,0 nm) para el elemento hierro, obtenido para las muestras de relaves retenidos sobre las diferentes mallas usadas en el análisis granulométrico | 128 |
| Figura AVII.4. | Resultados del análisis LIBS (344,061 nm) para el contenido de hierro en las muestras de relaves retenidos sobre las diferentes mallas empleadas en el análisis granulométrico | 129 |
| Figura AIX.1. | Fotografías de las muestras de relaves después de haber sido calcinadas, obtenidas con la cámara acoplada al estereomicroscopio Motic BA4310 | 135 |
| Figura AIX.2. | Fotografías del material no magnético libre conseguido después de la 1ra separación magnética, obtenidas con la cámara acoplada al estereomicroscopio Motic BA4310 | 136 |
| Figura AIX.3. | Fotografías del material no magnético mixto conseguido después de la 2da separación magnética, obtenidas con la cámara acoplada al estereomicroscopio Motic BA4310 | 136 |
| Figura AIX.4. | Fotografías del material ceramizado conseguido después de la 2da separación magnética, obtenidas con la cámara acoplada al estereomicroscopio Motic BA4310 | 137 |
| Figura AIX.5. | Fotografías de las ferritas acumuladas después de la 1ra, 2da y 3ra separación magnética, obtenidas con la cámara acoplada al estereomicroscopio Motic BA4310 | 137 |
| Figura AIX.6. | Fotografías de las ferritas acumuladas después de la 1ra, 2da y 3ra separación magnética, obtenidas con la cámara acoplada al estereomicroscopio Motic BA4310 | 138 |
| Figura AIX.7. | Fotografías de los granos de ferritas acumuladas después de la 1ra, 2da y 3ra separación magnética, obtenidas con la cámara SONY de 8 MP acoplada al estereomicroscopio OLYMPUS SD 30 | 139 |
| Figura AX.1. | Difractograma de la muestra de relaves con tamaño de partícula entre 105 y 149 μm luego de haber sido calcinados a 800 °C (ensayo N° 10) | 143 |
| Figura AX.2. | Difractograma del material no magnético libre (correspondiente al ensayo N° 10), obtenido luego de la 1ra separación magnética | 143 |
| Figura AX.3. | Difractograma del material no magnético mixto (correspondiente al ensayo N° 10), obtenido luego de la 2da separación magnética | 144 |
| Figura AX.4. | Difractograma del material ceramizado (correspondiente al ensayo N° 10), obtenido luego de la 3ra separación magnética | 144 |

Figura AXII.1. Esquema del tanque de acondicionamiento

147

ÍNDICE DE ANEXOS

| | PÁGINA |
|---|---------------|
| ANEXO I | |
| Procedimiento para la determinación de la densidad real y la densidad aparente de los relaves con base en la metodología propuesta por Juvenal Luis Hernández en su manual de laboratorio “Métodos para el Análisis Físico de los Suelos” | 113 |
| ANEXO II | |
| Determinación de la distribución granulométrica de los relaves con base en la norma ASTM C325-07 | 117 |
| ANEXO III | |
| Resumen de las muestras seleccionadas para caracterización en todo el proceso | 120 |
| ANEXO IV | |
| Fracciones que se pueden obtener con el separador magnético | 121 |
| ANEXO V | |
| Ciclos de separación magnética | 122 |
| ANEXO VI | |
| Resultados del balance de masa para los ensayos del 1 al 16 | 123 |
| ANEXO VII | |
| Determinación de la composición química elemental de los relaves mediante espectroscopía de plasma inducido por láser (LIBS) | 127 |
| ANEXO VIII | |
| Resultados de los ensayos de calcinación, separación magnética y pulverización de las muestras de relaves | 130 |
| ANEXO IX | |
| Resultados del análisis de microscopía óptica realizada con los estereomicroscopios Motic BA4310 y OLYMPUS SD 30 | 135 |
| ANEXO X | |
| Difractogramas obtenidos de las muestras de material calcinado, no magnético libre, no magnético mixto, ceramizado y ferritas | 143 |
| ANEXO XI | |
| Balance de masa para la obtención de una tonelada mensual de ferritas | 145 |
| ANEXO XII | |
| Diseño del tanque de acondicionamiento TA-101 | 147 |
| ANEXO XIII | |
| Hojas de especificaciones de equipos seleccionados para el proceso de obtención de ferritas de capacidad una tonelada mensual | 148 |

RESUMEN

Los relaves o desechos sólidos provenientes de los procesos de extracción de oro y plata de las industrias mineras pueden ser valorizados debido a su contenido de metales como el cinc y el hierro. La necesidad de conseguir una aplicación a estos desechos es imperativa ya que se están convirtiendo en una fuente de contaminación ambiental, por tal motivo se planteó obtener ferritas a partir del tratamiento de desechos sólidos provenientes de esta industria y así proponer una alternativa de tratamiento para conseguir productos con aplicaciones industriales.

Para el presente trabajo, la muestra recolectada corresponde a los relaves gruesos que son depositados en la periferia de la piscina de lixiviación N° 5 de la empresa SODIREC S.A., después de haber sido separados del relave general proveniente del proceso de carbón en pulpa para la extracción oro. A estos relaves se los caracterizó física, química y mineralógicamente, determinándose que provienen de un suelo esquelético, por su alto contenido de sulfuros y cuarzo y, por su bajo contenido de materia orgánica. Además, se determinó que los sulfuros presentes se encuentran ocluidos en la matriz de cuarzo y que su presencia es cercana al 8 %p/p del total del material.

El resto de muestra, que no se empleó para la caracterización, fue clasificada granulométricamente dentro de 4 rangos de tamaño de partícula, los cuales fueron calcinados a temperaturas de 600, 800, 900 y 1 000 °C. Se realizaron 16 ensayos para determinar la influencia del tamaño de partícula y la temperatura de calcinación en la ceramización o retención de un metal pesado (o sus respectivos óxidos) en la matriz cerámica del material calcinado. Luego se realizó un ciclo de separación magnética para separar las ferritas formadas en la calcinación. Los resultados obtenidos de los 16 ensayos determinaron que el ensayo N° 10 (tamaño de partícula entre 105 y 149 μm y temperatura de calcinación de 800 °C) presentó mejores resultados, con un porcentaje de separación de ferritas de 3,87 %. A partir de este ensayo se determinaron las condiciones de operación para definir el diagrama de flujo (PFD).

Adicionalmente, la caracterización de las ferritas separadas mediante análisis físicos, químicos y mineralógicos, evidenciaron la formación de hematita y magnetita, a partir de la pirita presente en los relaves. Sin embargo, aún después de los ciclos de separación magnética su concentración sigue siendo baja (4 %p/p de magnetita y 15 % de hematita), razón por la cual se considera que las ferritas separadas son de baja pureza.

Finalmente, se realizó el diagrama de bloques, el diagrama de flujo, se dimensionaron y seleccionaron los equipos y se determinó la factibilidad técnico-económica de la implementación del proceso para la obtención de una tonelada mensual de ferritas.

INTRODUCCIÓN

Nuestro país dispone de materiales metálicos que podrían ser materia prima para la obtención de óxidos puros diversos. Como parte del proceso de extracción de oro y plata en las plantas metalúrgicas ubicadas al sur del país, se desechan diariamente cantidades apreciables de material sólido que contiene importantes metales. Estos desechos están convirtiéndose incluso en una fuente de contaminación ambiental.

Estudios anteriores reportan la presencia de poli sulfuros metálicos en los relaves de la explotación de minerales al sur del país que contienen metales de transición tales como el hierro y el cinc (Aguaiza, 2014, p.157), que podrían ser materia prima para la obtención de óxidos puros de dichos elementos.

Entre las empresas de extracción de oro de dicha región austral, la planta industrial SODIREC ubicada en el campamento Birapamba, utiliza tecnología relativamente actualizada y está comprometida con la preservación de un entorno ambiental apropiado. Por tal motivo, se busca proponer una alternativa de tratamiento para sus desechos para conseguir productos con nuevas aplicaciones industriales. Se pretende procesar los relaves gruesos, cuyo flujo másico es de 0,56 t/h, que en la actualidad únicamente son tratados con sustancias oxidantes, antes de ser colocados en piscinas de oxidación abiertas, con la finalidad de que el proceso de oxidación ambiental mitigue los riesgos contaminantes a lo largo del tiempo, normalmente años, antes de ser enterrados permanentemente (Chia, 2014, comunicación personal).

En concordancia con lo expuesto, el problema científico - tecnológico dentro del que se enmarca el presente proyecto es el tratamiento de relaves procedentes del proceso de carbón en pulpa para la extracción de oro de la empresa SODIREC S.A., para la obtención de óxidos de hierro en forma de ferritas, para así aprovechar los recursos naturales de tipo mineral que ofrece Ecuador.

Los principales óxidos anhídridos naturales de hierro son la hematita ($\alpha - \text{Fe}_2\text{O}_3$) y los minerales de la serie maghemita-magnetita ($\gamma - \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_3\text{O}_4$). La hematita es el producto final de la calcinación de otros óxidos, oxihidróxidos e hidróxidos a temperaturas mayores que 600 °C. Los minerales naturales existen en composiciones intermedias entre Fe_2O_3 y Fe_3O_4 . Las ferritas son materiales cerámicos ferrimagnéticos que se preparan combinando óxido de hierro (Fe_2O_3) con otros óxidos y carbonatos, en forma de polvo. El prototipo de estos materiales lo constituye la magnetita o piedra imán Fe_3O_4 ($\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) (Brindley y Brown, 1980, p. 370; Mesa, 2009, p. 11).

El polvo de ferritas es usado en la fabricación de cintas para grabación; en este caso, el material es óxido férrico. También el polvo es utilizado como componente del tóner magnético en impresoras láser, pigmento de algunos tipos de pintura, y en procesos de soldadura, tinta magnética para imprimir cheques y códigos de barras. Además, con dicho polvo, la adición de un fluido portador y un surfactante o tensoactivo, es posible fabricar ferrofluido casero (Universidad de Vigo, 2011).

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En este capítulo se presenta la información realizada sobre el proceso que sigue la empresa SODIREC para extraer oro de las minas de Portovelo, al sur del Ecuador, así como las características de los posibles minerales presentes en los relaves provenientes de las técnicas usadas para la extracción de oro. Además, se resumen las posibles transformaciones térmicas que pueden experimentar los minerales presentes en los relaves.

1.1 PROCESO PRODUCTIVO DE LA PLANTA SODIREC

1.1.1 MARCO GEOLÓGICO Y MINERALÓGICO EN PORTOVELO

Los yacimientos de oro en Portovelo se encuentran próximos a la ciudad de Zaruma, ubicada en la provincia de El Oro, al sur del Ecuador. Son yacimientos con formaciones en vetas de origen hidrotermal, más magnánimos de la cordillera Andina. Sus minas se encuentran a 900 m debajo de la superficie y a 200 m sobre el nivel del mar. El campamento Birapamba (Portovelo – Zaruma) engloba un sistema grande de vetas de oro-polimetálicas dentro de un área de más de 48 km² (Vikentyev, 2005, pp. 148-154).

La estructura mineralógica del yacimiento de Portovelo es la siguiente: sus minerales tienen una estructura de cuarzo (SiO_2) con incrustaciones de sulfuros. También hay oro nativo, de modo que en la estructura del cuarzo se encuentran los diferentes sulfuros y partículas de oro. Entre los sulfuros predominan la pirita (FeS_2), la esfalerita (ZnS), la calcopirita ($CuFeS_2$) y la galena (PbS). También hay arsenopirita ($FeAsS$) y sulfuros de plata como la argentita (Ag_2S) (Chia, 2014, comunicación personal).

La explotación y aprovechamiento de los recursos minerales han estado supeditados únicamente a la recuperación de oro y plata, olvidándose de otros

metales como el cobre y el hierro, tanto por parte de las empresas privadas como por parte de la población que trabaja artesanalmente. Las formas de procesamiento de los minerales auríferos causan problemas asociados de contaminación ambiental con mercurio, cianuro, y metales pesados (De la Torre, 1997, p. 28).

En la actualidad, por motivos socioeconómicos y/o técnicos, la explotación de minerales metálicos se ha ido incrementando, tanto en minas de producción artesanal como en minería a mayor escala, como es el caso de la Planta SODIREC, la cual recupera oro y plata. El procesamiento de minerales auríferos ha generado botaderos y depósitos de relaves sólidos, que mayoritariamente se apilan al aire libre. Esta disposición, al ser totalmente caótica, provoca serios impactos ambientales por alteración de los suelos, por el incremento de los sólidos en suspensión en los ríos, destruyendo sus ecosistemas, sin olvidar la alteración paisajística (De la Torre, 1997, p. 38).

1.1.2 PROCESO METALÚRGICO EN LA PLANTA SODIREC

El proceso para la extracción de oro y plata se inicia cuando el mineral extraído de la mina es transportado en volquetas con capacidad de 12 t a la planta ubicada en el campamento Birapamba (a 12 km de la ciudad de Piñas), cerca del Río Calera, para disponer de la gran cantidad de agua que se requiere para el procesamiento.

El proceso metalúrgico bajo el cual la Planta SODIREC extrae oro y plata se indica en la Figura 1.1.

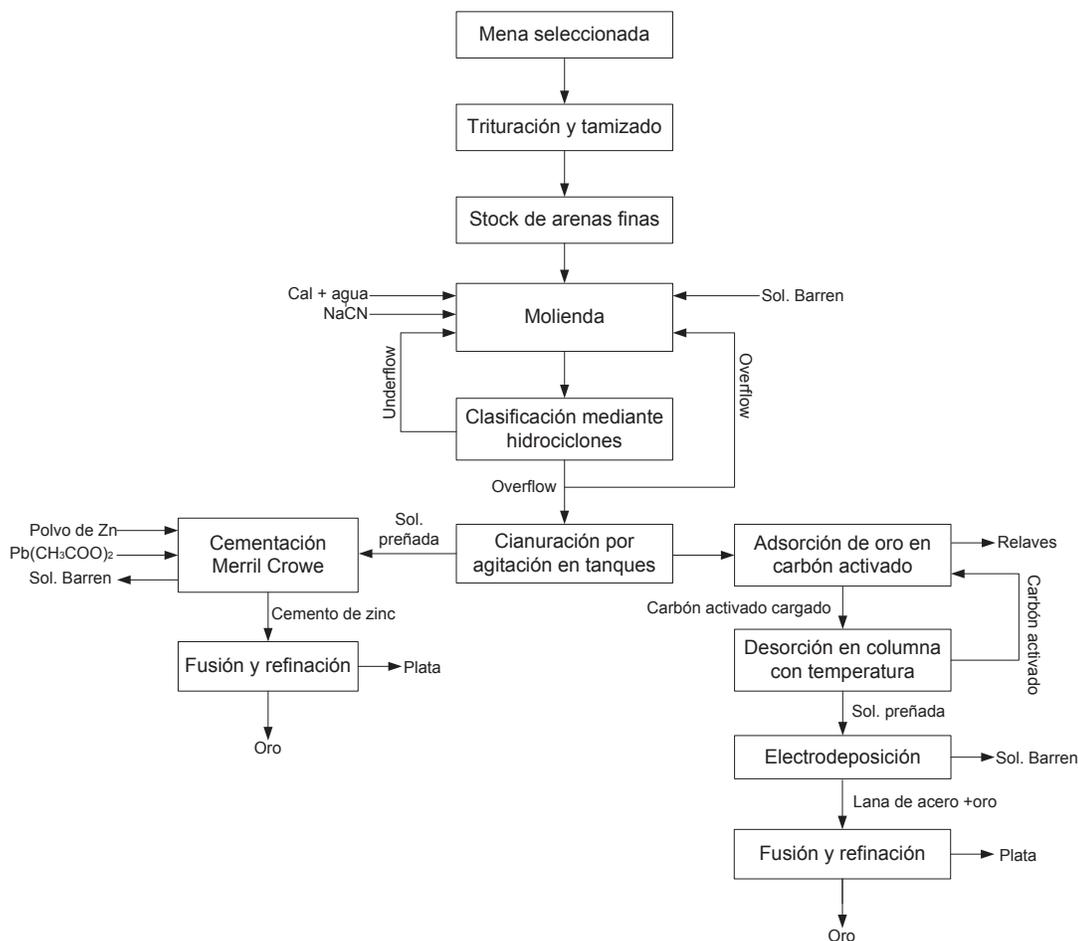


Figura 1.1. Diagrama de bloques del proceso productivo de la Planta SODIREC S.A

Inicialmente las volquetas descargan el mineral en tres tolvas, dos de 120 t y una de 90 t de capacidad, destinadas para el material denominado como grueso. Luego este material es llevado por bandas transportadoras hacia el circuito de trituración, el mismo que inicia con un electromagneto estacionario que separa los minerales magnéticos gruesos. El resto del material pasa por una zaranda vibratoria que lo clasifica, el material grueso es triturado por una trituradora primaria y el fino se junta directamente con el material triturado para ser transportados hacia la zaranda vibratoria ubicada antes de la trituradora cónica. El material grueso es triturado y nuevamente pasa por la zaranda, el material fino con un flujo másico de 120 t/h se almacena en la tolva de finos de 200 t de capacidad. A continuación, el material almacenado se conduce por bandas transportadoras hacia dos molinos de bolas en donde se adicionan agua, cal y solución de cianuro de sodio (*NaCN*); entonces, el material que sale de cada uno

de los molinos se clasifica por su respectivo hidrociclón, del cual el “underflow” se realimenta al molino como carga circulante y el “overflow” pasa al circuito de cianuración.

En el “overflow” hay complejos cianurados de oro disuelto, por lo que lo primero que se hace con esta fracción es someterla a una separación sólido – líquido en una serie de espesadores. La corriente de líquido que se obtiene es transparente y contiene oro cianurado, por tal motivo, esta solución pasa a la cementación en polvo de zinc que normalmente se desarrolla en el equipo conocido como Merrill Crowe. Para los sólidos o pulpa de cianuración que está conformada por el concentrado, el oro y la plata disueltos como complejos cianurados, se considera el proceso de carbón en pulpa. Cabe mencionar que para el desarrollo de la presente investigación, se consideraron únicamente los relaves provenientes del proceso de carbón en pulpa.

1.1.2.1 Proceso de cementación Merrill Crowe

La corriente de líquido proveniente de la separación sólido – líquido se impulsa con una bomba hasta la primera etapa de filtrado en donde el líquido es obligado a ingresar al filtro de tubos, y luego el filtrado se almacena en un tanque de 23 m³ de capacidad. Luego pasa a la segunda etapa de filtrado, aquí los filtros tienen una capa filtrante de diatomita, de modo que cuando la solución entra a presión, pasa a través de dicha capa produciéndose una solución transparente que todavía tiene oxígeno. Por tal motivo a esta solución se la lleva a una columna de vacío o de desoxigenación, conformada por un relleno de tipo “rasching”, sobre el cual se forma una capa delgada de líquido que hace que salga el aire disuelto y con él, el oxígeno. Es así que en el fondo se va acumulando una solución transparente sin oxígeno, lista para la cementación.

El polvo de zinc (Zn^0) y una solución de acetato de plomo ($Pb(CH_3COO)_2$) se dosifican por un embudo en contacto con la tubería por la que viaja la solución sin oxígeno. En el punto de contacto de estas sustancias se cementa instantáneamente el oro y la plata de la solución, que no se vuelven a disolver

debido a la ausencia de oxígeno, y recorren el resto de la tubería hasta que al final se obtiene un cemento de oro y plata. Este cemento ingresa a otro par de filtros de tubos, de modo que nuevamente en cada tubo hay una capa de diatomita en la que se acumula el cemento de oro y plata. Mientras tanto por el tubo va saliendo una solución pobre ($18 \text{ m}^3/\text{h}$), conocida como solución “barren”, que contiene cianuro de sodio, la misma que es enviada hacia el molino de bolas en donde se la recicla para disolver el oro y la plata remanentes.

El cemento de oro y plata se procesa posteriormente empezando con un secado a $110 \text{ }^\circ\text{C}$ y una calcinación a $850 \text{ }^\circ\text{C}$, para eliminar los minerales volátiles (zinc, arsénico, bismuto y antimonio).

1.1.2.2 Proceso de carbón en pulpa

Para la alternativa del proceso de carbón en pulpa, a la pulpa de cianuración que está conformada por el concentrado, el oro y la plata disueltos como complejos cianurados, se la lleva a una etapa de adsorción con carbón en pulpa.

A la pulpa se la lleva a reactores neumáticos verticales, conocidos como reactores Pachuca, que operan en cascada pero en contracorriente con el carbón, lo que implica que la pulpa circula en un sentido y el carbón en otro. Lo primero que se debe tener en este sistema es una línea de aire, que proviene de un compresor. De este modo, una tubería se conecta al primer reactor (pachuca #1), en el cual se desarrolla una agitación lenta para que no haya pérdidas de atrición por la fricción del mineral con el carbón. Cada etapa de agitación dura 5 horas, luego de las cuales la pulpa pasa por gravedad al siguiente tanque (pachuca #2), donde nuevamente el aire agita a la pulpa. Una vez que se ha llegado al tanque final (pachuca #6), y superadas las 5 horas de agitación, se tiene la salida del relave, el mismo que se dirige a un hidrociclón que clasifica al relave general en arenas gruesas y finas. Con la intención de resguardar la obra civil las arenas gruesas son depositadas en el contorno de la piscina de lixiviación N° 5 y las arenas finas

se depositan en el centro de la piscina. Los lixiviados de los subdrenajes de esta piscina pasan a la planta de detoxificación de $NaCN$.

En el último tanque (pachuca #6) se tiene la solución de oro y plata menos concentrada. Entonces, el carbón que ingresa al último tanque y que proviene de la regeneración de carbón, es decir que es un carbón regenerado, entra en contacto y se genera una buena atracción. Este carbón cargado con oro y plata pasa al penúltimo tanque (pachuca #5) para continuar con el proceso que, como se había mencionado, se da en contracorriente.

Cuando se llega al primer tanque (pachuca #1), en el que se tiene la solución más concentrada de oro y plata, el carbón se carga aún más. En todos los tanques, incluso en el primero, se tiene una inyección de corriente gaseosa, para una separación líquido-gas "Air Lifth". Con el "Air Lifth" del primer tanque se obtiene al carbón en el que se han adsorbido el oro y la plata, y al que se lo lava con agua a presión. Así, al último se obtiene un carbón cargado que se lleva a la desorción y luego a una electro-recuperación.

Conforme a lo expuesto, la Figura 1.2 muestra un diagrama de procesos aproximado al que sigue la Planta SODIREC.

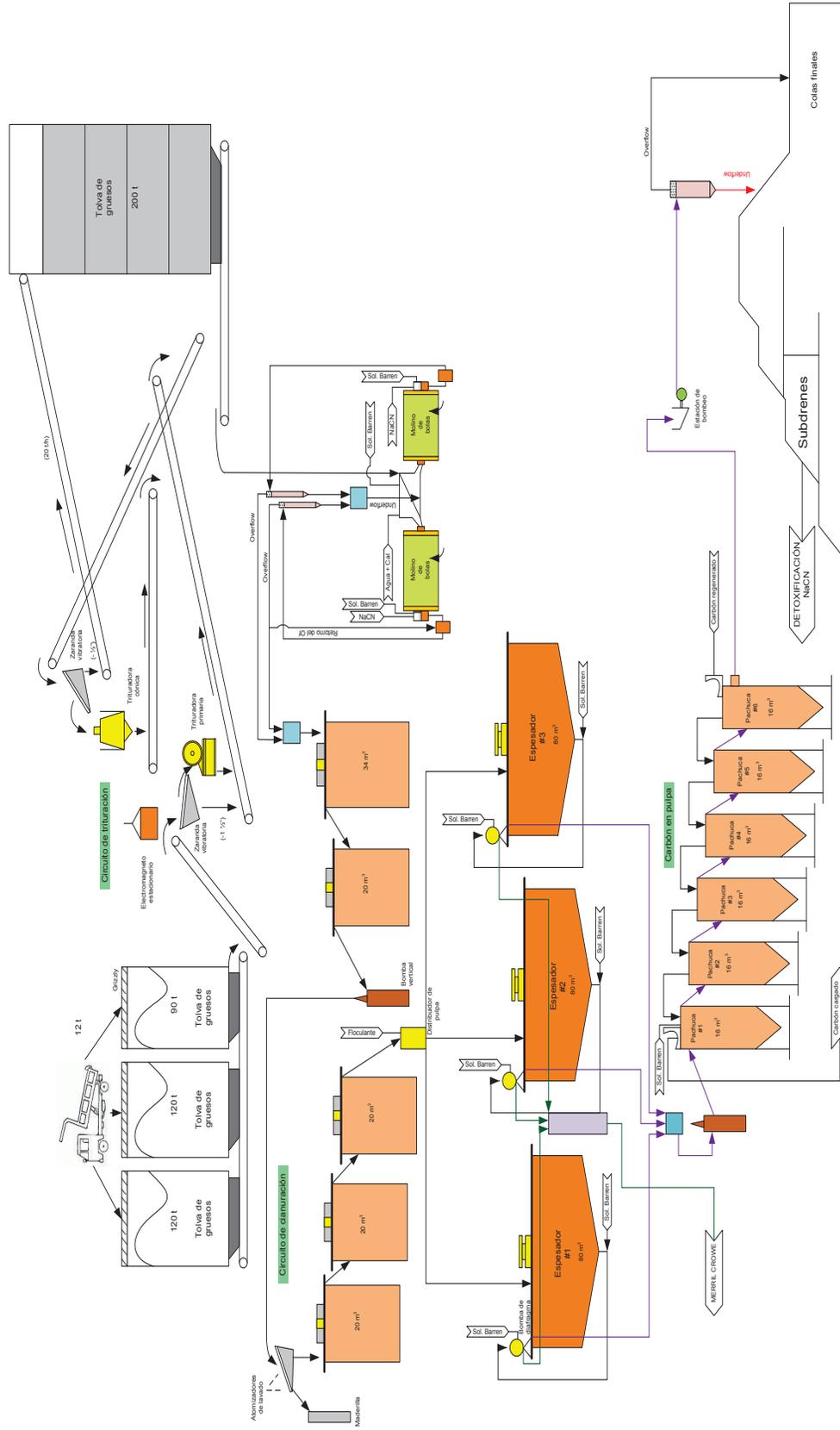


Figura 1.2. Diagrama de procesos de la Planta SODIREC S.A.

1.2 MINERALES DE HIERRO Y TRANSFORMACIONES TÉRMICAS

Es común escuchar hablar de contaminación y hacer referencia a los medios más livianos como la atmósfera y el medio acuoso, sin embargo, el suelo es el mayor receptor de la contaminación. Se define como suelo contaminado a aquel que ha cambiado en sus características físicas, químicas o biológicas que, por su naturaleza, grado de afección o permanencia en el tiempo, resulte incongruente con sus propiedades funcionales de uso o represente una amenaza grave para la salud pública o medio ambiente (Elias, 2009, p.249).

Muchas actividades industriales, especialmente la industria minera, emiten cantidades importantes de residuos que contribuyen a la degradación de la calidad del suelo, lo que hace que la valorización del suelo se convierta en una problemática importante. Debido a las actividades de extracción de oro y plata, hoy en día se tienen serios problemas de contaminación por cianuros, metales pesados y relaves sólidos. Los relaves de la industria minera son considerados como ganga, que es el material sin valor, fundamentalmente formado por cuarzo y cantidades mínimas de oro ocluido en los sulfuros, principalmente en la pirita y calcopirita. (De la Torre, 1995, pp. 5-13).

A partir de los sulfuros de hierro presentes en los relaves se pueden formar materiales magnéticos como la hematita (Fe_2O_3) y magnetita (Fe_3O_4), sometiendo a los sulfuros a calcinación en aire a temperaturas superiores a 600 °C (Aguaisa, 2013, pp. 77-78).

La hematita al mezclarse con otros óxidos y carbonatos en forma de polvo da lugar a la formación de materiales cerámicos magnéticos denominados ferritas cuyo prototipo lo constituye la magnetita (Mesa, 2009, p. 11).

Uno de los inconvenientes que se presenta al formar ferritas en atmósfera oxidante es la granulometría de la materia prima, ya que se conoce que a mayor superficie de contacto más reactivo se vuelve el material, formándose mayor fase

líquida que atrapa a los metales pesados, lo que provoca que las ferritas formadas pasan a integrar parte de la matriz cerámica dificultando su separación. A este fenómeno por el cual los metales pesados quedan retenidos en la matriz cerámica se lo conoce como ceramización (Elias, 2009, p. 118).

1.2.1 CARACTERÍSTICAS, PROPIEDADES Y APLICACIONES DE MINERALES PRESENTES EN LOS SUELOS

1.2.1.1 Elementos químicos y minerales en suelos y rocas

Los minerales encontrados de forma bruta en la naturaleza son consecuencia de la gran cantidad de elementos químicos presentes en la corteza terrestre. La Tabla 1.1 muestra la abundancia de algunos elementos químicos que conforman la corteza terrestre. Aquí, la composición de suelos sigue a la de las rocas en general, salvo en el caso del carbono y el nitrógeno, que casi no aparecen en rocas pero sí en cantidad relativa en suelos.

Tabla 1.1. Abundancia de elementos químicos en rocas y suelos

| Elemento (símbolo) | Peso (%) en rocas | Peso (%) en suelos |
|--------------------|-------------------|--------------------|
| Aluminio (Al) | 8,23 | 7,2 |
| Calcio (Ca) | 4,14 | 2,4 |
| Hierro (Fe) | 5,63 | 2,6 |
| Magnesio (Mg) | 2,33 | 0,9 |
| Oxígeno (O) | 4,40 | 49,0 |
| Potasio (K) | 2,09 | 1,5 |
| Silicio (Si) | 28,25 | 31,0 |
| Sodio (Na) | 2,36 | 1,2 |
| TOTAL | 99,33 | 95,8 |

(Elias, 2009, p. 346)

La Tabla 1.2 muestra los minerales más comunes que se encuentran en suelos.

Tabla 1.2. Minerales más comunes en suelos

| Mineral | Fórmula química | Características |
|--------------|--|---|
| Cuarzo | SiO_2 | Abundancia en suelos arenosos y sedimentarios. |
| Feldespato | $(Na, K)[SiO_3Al_2O_8]$; o también $CaAl_2O_4[SiO_2]_2$ | Abundancia en suelos no lixiviados extensivamente. |
| Mica | $K_2Al_2[AlSi_3O_{10}](OH)_2$ Moscovita; o también $KMg_3Al_2[AlSi_3O_{10}](OH)_2$ Flogopita | Fuente de K en muchos suelos de zona templada. |
| Anfiboles | $(Ca, Na, K)_{2,3}(Mg, Fe, Al)_5(OH)_2(Si, Al)_4O_{11}$ | Se convierte fácilmente a minerales de arcilla y óxidos. |
| Piroxenos | $(Ca, Mg, Fe, Ti, Al)[(Si, Al)O_3]$ | Erosiona fácilmente. |
| Olivino | $(Mg, Fe)_2SiO_4$ | Erosiona fácilmente. |
| Epidota | $Ca_2(Al, Fe)_3(OH)Si_3O_{12}$ | Altamente resistentes a la erosión química. |
| Turmalina | $NaMg_3Al_6B_3Si_6O_{27}(OH, F)_4$ | |
| Circón | $ZrSiO_4$ | |
| Rutilo | TiO_2 | |
| Caolinita | $Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$ | Abundan en suelos arcillosos como resultado de la erosión. |
| Esmectita | $M_{0-6}(Al, Fe, Mg)_{4-6}(Si, Al)_8O_{20}(OH)_4$ | |
| Vermiculita | $(Mg, Fe, Al)_3(Al, Si)_4O_{10}(OH)_2 \cdot 4H_2O$ | |
| Clorita | $(Al, Fe, Mg)_{4-6}(Al, Si, Fe)_4O_{10}(OH, O)_8$ | |
| Alofana | $Si_3Al_4O_{12} \cdot nH_2O$ | Abundan en suelos derivados de depósitos de cenizas volcánicas. |
| Imogolita | $Al_2SiO_3(OH)_4$ | |
| Gibbsita | $Al(OH)_3$ | Abunda en suelos lixiviados. |
| Geotita | $FeO(OH)$ | Óxido de Fe más abundante. |
| Hematita | Fe_2O_3 | Abunda en regiones cálidas. |
| Ferrihidrita | $Fe_4(OH)_{12}$ a $Fe_5O_3(OH)_9$ | Abunda en suelos orgánicos. |
| Birnesita | $Na_4Mn_{14}O_{27} \cdot 9H_2O$ | Óxido de Mn más abundante. |
| Calcita | $CaCO_3$ | Carbonato más abundante. |
| Yeso | $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ | Abunda en regiones áridas. |

(Elias, 2009, p. 346)

Arcilla

La arcilla es un término petrográfico y, como la mayoría de las rocas, está compuesta por minerales en proporciones variables. La palabra arcilla se emplea con referencia a un material de grano fino (de tamaño inferior a 2 mm), terroso, que se torna plástico al ser mezclado con el agua (Elias, 2009, p. 345).

Se denomina arcilla a un conjunto heterogéneo de minerales de arcilla propiamente dichos y un variopinto grupo de otros minerales, entre los que destaca el cuarzo (Elias, 2009, p. 347).

Probablemente ningún material extraído de la corteza terrestre tiene tantas aplicaciones como la arcilla.

La Figura 1.3 representa una media de la distribución de diferentes minerales que se presentan en arcillas de interés cerámico.

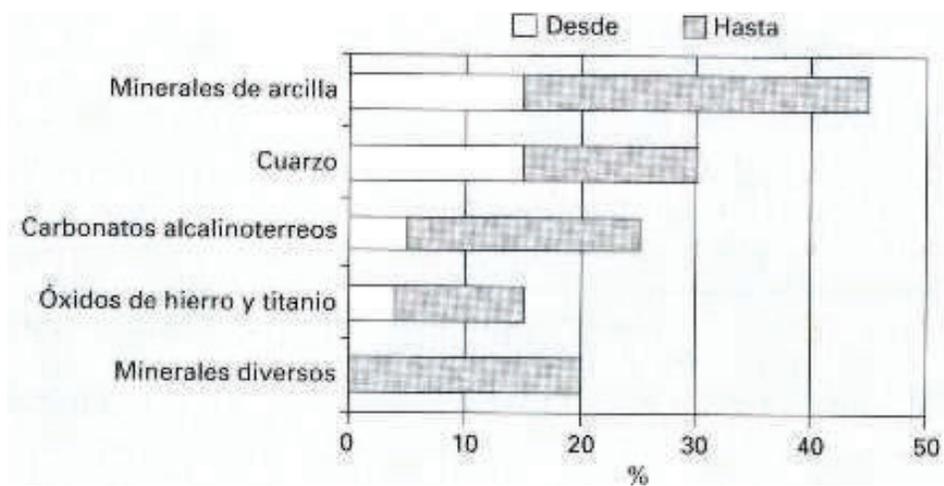


Figura 1.3. Distribución de minerales de arcillas rojas de interés cerámico (Elias, 2009, p. 347)

1.2.1.2 Hidróxidos, oxihidróxidos, y óxidos de hierro y aluminio

Probablemente los minerales más comunes en las arcillas son los hidróxidos, oxihidróxidos y óxidos de hierro y aluminio (Brindley y Brown, 1980, p.362).

1.2.1.2.1 Hidróxidos

Existen tres hidróxidos de aluminio polimórficos cristalinos que ocurren naturalmente, la más común es la gibbsita $Al(OH)_3$. Las otras dos formas, bayerita y nordstrandita fueron obtenidas sintéticamente. El nombre bayerita deriva del proceso Bayer para comercializar la preparación de hidróxido de aluminio. La nordstrandita fue sintetizada por primera vez por van Noerdstrand, Hettinger and Keith en 1956. El hierro no forma un hidróxido cristalino $Fe(OH)_3$. (Brindley y Brown, 1980, p.362).

1.2.1.2.2 Oxihidróxidos

El aluminio forma dos oxihidróxidos, la diaspora ($\alpha - AlOOH$), y la boehmita ($\gamma - AlOOH$), ambas se encuentran naturalmente. Los oxihidróxidos de hierro son la goetita ($\alpha - FeOOH$), y la lepidocrocita ($\gamma - FeOOH$), que son isomorfas con la diaspora y la boehmita respectivamente. Éstos son minerales naturales relativamente frecuentes.

La akaganéita ($\beta - FeOOH$), la forma $-\beta$ de la $FeOOH$, también se la puede encontrar ocasionalmente como mineral. Una cuarta forma ($\delta - FeOOH$), fue reproducida sintéticamente por Francombe y Rooksby en 1959 y recientemente se encontró que la ($\delta' - FeOOH$), puede ocurrir naturalmente, y se la denomina ferroxihita. En adición a estos oxihidróxidos, la escasa cristalización natural del óxido de hierro hidratado es análoga al llamado "hidróxido férrico coloidal" que toma el nombre ferrihidrita (Brindley y Brown, 1980, p.362).

La diáspora está constituida por Al_2O_3 85 % p/p y H_2O 15 % p/p. Tiene alta dureza y buen clivaje, es decir, que presenta capas finas apiladas paralelamente. Es comúnmente asociada con el corindón en rocas esmeril, en dolomita y la esquistos clorita. Se utiliza como un material refractario (Klein y Dutrow, 2007, p. 391).

La goethita está compuesta por Fe 62,9 %, O 27,0 %, H_2O 10,1 % p/p. El Mn en ocasiones está presente en cantidades mayores que el 5 %. Una especie similar

es la limonita ($FeO.OH.nH_2O$) que se utiliza como mena de hierro. Ésta se distingue de la hematita por su raya, propiedad que permite diferenciar materiales por el color que dejan después de usados como una tiza de pizarra sobre una superficie cerámica, ya que dicha marca está compuesta por el polvo del mineral utilizado, y en muchas ocasiones el color de la raya difiere del color del mineral (Klein y Dutrow, 2007, p. 392).

1.2.1.2.3 Óxidos de hierro y aluminio anhidros

El único óxido de aluminio anhidro que se puede encontrar naturalmente es el corindón ($\alpha - Al_2O_3$), que resulta como el último producto del calentamiento de todos los hidróxidos, oxihidróxidos y óxidos de aluminio (Brindley y Brown, 1980, p.369).

Los óxidos anhidros naturales de hierro son la hematita ($\alpha - Fe_2O_3$), y los minerales de la serie maghemita-magnetita ($\gamma - Fe_2O_3 - Fe_3O_4$). La wustita (FeO) existe en el coque natural, pero es imposible que se pueda encontrar de forma natural en asociación con arcillas. La $\beta - Fe_2O_3$ no se encuentra como mineral. Los minerales de hierro de origen natural se presentan en composiciones entre Fe_2O_3 y Fe_3O_4 , su composición puede ser expresada como:

$$Fe_{2+n}O_{3+n} \text{ es decir } Fe_2^{3+}Fe_n^{2+}O_{3+n} \quad [1.1]$$

donde $n = \frac{2p}{1-p}$ y p es la razón entre el hierro ferroso (Fe^{2+}) y el total de hierro (Brindley y Brown, 1980, p.370).

1.2.1.2.3.1 Corindón

El corindón está compuesto por Al 52,9 %, O 47,1 %. Se caracteriza por una gran dureza, alto lustre, gran gravedad específica, resistencia a la ruptura y por no ser

fundible. Se usa como gema y como abrasivo (Klein y Dutrow, 2007, pp. 376-377).

1.2.1.2.3.2 Hematita

La hematita ($\alpha - Fe_2O_3$) es isoestructural con el corindón como se puede observar en la Figura 1.4 y es igualmente el último producto de calentamiento en aire a temperaturas sobre los 600 °C de los hidróxidos, oxihidróxidos y óxidos de hierro (Brindley y Brown, 1980, p.370).

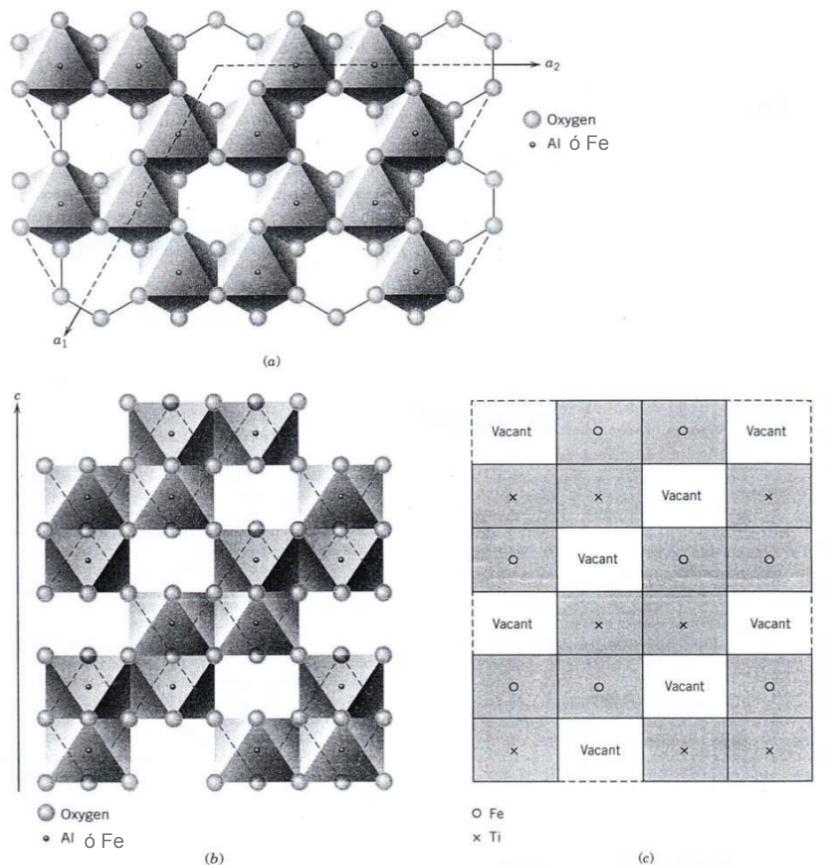


Figura 1.4. Estructuras del grupo de la hematita. (a) Lámina basal de un octaedro de corindón, Al_2O_3 , o hematita, Fe_2O_3 , con una vacante para cualquier par de octaedros con Al^{3+} o Fe^{3+} en el centro. (b) Sección vertical de la estructura del corindón que muestra los lugares llenos y vacíos del octaedro. (c) Sección de un corte vertical de la estructura de la ilmenita. Esta representación es la misma que la de la Figura 1.4 b con las posiciones del oxígeno y las líneas del octaedro eliminadas. Solo se muestran las locaciones de los cationes

(Klein y Dutrow, 2007, p. 370)

En la Figura 1.5 se pueden apreciar las diferentes formas de cristalización de la hematita.

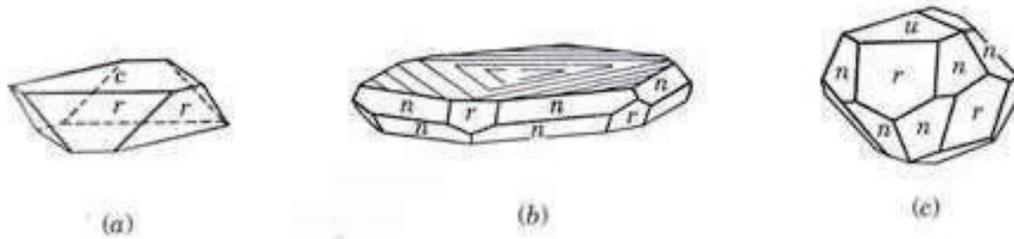


Figura 1.5. Cristales de hematita
(Klein y Dutrow, 2007, p. 377)

La hematita tiene lustre metálico en cristales y es mate en variedades terrosas. Su color puede estar entre el rojo, rojo pardo o negro. La variedad roja es conocida como roja ocre y la variedad negra como especularita. La variedad roja (amorfa) se vuelve negra (cristalina) con el calentamiento. Se encuentra compuesta, por lo general, por 70 % de Fe y 30 % p/p de O. Es una sustancia pura a temperaturas ordinarias, sin embargo presenta pequeñas cantidades de Mn y Ti. Forma una serie de soluciones sólidas con la ilmenita a temperaturas superiores a 950 °C como se puede apreciar en la Figura 1.6, donde las líneas continuas indican la coexistencia geológica común a temperaturas relativamente bajas. Las líneas cortadas indican una solución sólida completa entre sus miembros finales. Hematita-ilmenita es una serie completa sobre los 950 °C (Brindley y Brown, 1980, pp.377-378).

Y de acuerdo con la Figura 1.7, en la serie Ilmenita-hematita y pseudobroquita a temperaturas superiores a 600 °C, la extensión de las soluciones sólidas aumenta considerablemente (Klein y Dutrow, 2007, p. 386).

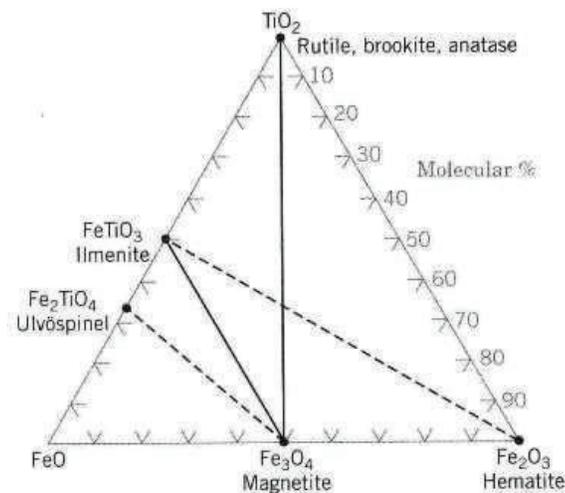


Figura 1.6. Composición natural de los óxidos minerales en el sistema
FeO – Fe₂O₃ – TiO₂
(Klein y Dutrow, 2007, p. 378)

1.2.1.2.3.3 Magnetita

La magnetita (Fe_3O_4) tiene una estructura de espinel inversa, es decir, su composición química se encuentra en la relación de un ión Fe^{+2} , dos iones Fe^{+3} y cuatro átomos de oxígeno. La celda unitaria que es cúbica contiene $Fe_{16}^{3+}Fe_8^{2+}O_{32}$. Los ocho sitios tetraédricos disponibles son ocupados por $8Fe^{3+}$, y los dieciséis octaédricos por $8Fe^{3+}$ y $8Fe^{2+}$ (Brindley y Brown, 1980, p.370).

De acuerdo con la Figura 1.6, la Magnetita-Ulvöspiel es una serie completa sobre los 600 °C. La magnetita comúnmente contiene laminillas de ilmenita. Esto es posible como resultado de la oxidación de los miembros de la serie magnetita-ulvöspiel (Brindley y Brown, 1980, pp.377-378).

La magnetita es de color negro de hierro al igual que su raya, es opaca y fuertemente magnética, tanto que puede actuar como un imán natural, conocido como calamita. Está compuesta por Fe 72,4 %, O 27,6 % p/p. La composición de la magnetita es muy cercana a Fe_3O_4 . Sin embargo, ciertos análisis muestran que existen porcentajes de Mg y Mn^{2+} que substituyen al Fe^{2+} y $(Al, Cr, Mn)^{3+}$ y Ti^{4+} que substituyen al Fe^{3+} , como se puede apreciar en la Figura 1.7. Allí, la extensión y composición de las soluciones sólidas entre los miembros de los extremos se

muestra en líneas sólidas para minerales sintetizados en laboratorio a temperaturas de alrededor de 600 °C. A temperaturas superiores, la extensión de las soluciones sólidas aumenta considerablemente. La ausencia de soluciones sólidas a temperaturas de alrededor de 600 °C es mostrada en líneas entrecortadas (Klein y Dutrow, 2007, pp. 385-386).

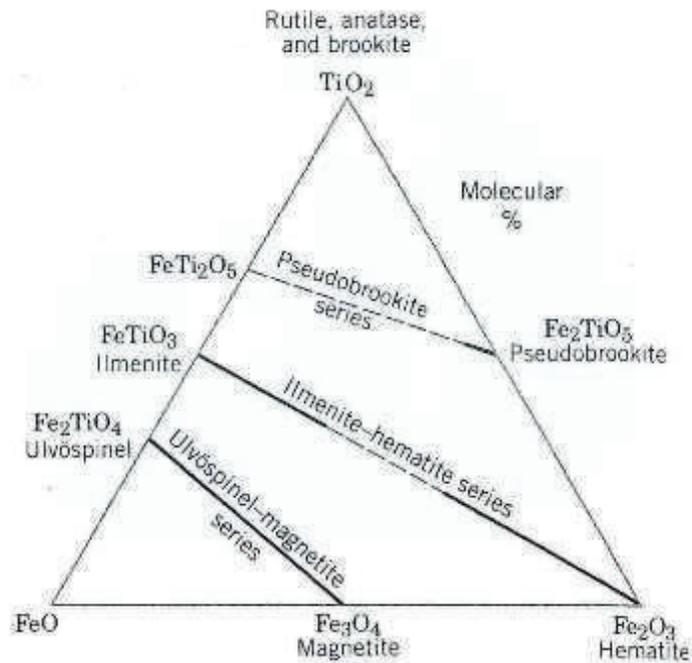


Figura 1.7. Series de soluciones sólidas con los óxidos involucrados en el sistema TiO_2 - FeO - Fe_2O_3 (Klein y Dutrow, 2007, p. 386)

En la Figura 1.8 se puede apreciar las diferentes formas de cristalización de la magnetita.

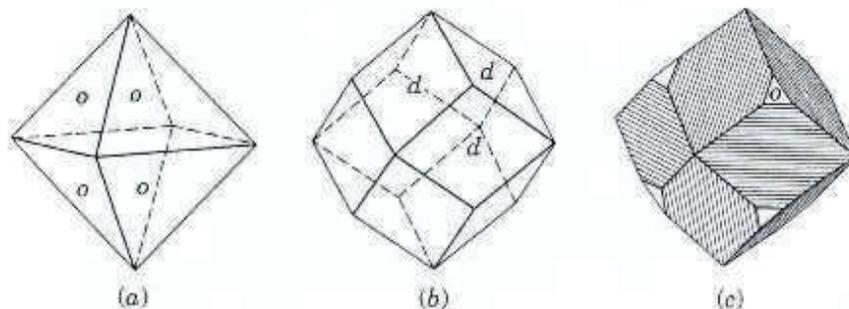


Figura 1.8. Cristales de magnetita (Klein y Dutrow, 2007, p. 385)

1.2.1.2.3.4 Maghemita e ilmenita

La maghemita ($\gamma - Fe_2O_3$) tiene una estructura similar a la espinel formada por 32 oxígenos, con $21 \frac{1}{3} Fe^{3+}$ iones distribuidos aleatoriamente en los ocho sitios tetraédricos y dieciséis sitios octaédricos (Brindley y Brown, 1980, p.370).

Los minerales de la serie maghemita-magnetita se convierten en hematita con el calentamiento. La temperatura de conversión en la que esto ocurre está alrededor de los 400 °C para maghemita de cristales pequeños y, entre 600 – 800 °C para magnetita bien cristalizada. Para minerales del mismo tamaño de cristal, la temperatura de descomposición depende del contenido de Fe^{2+} , siendo mayor cuanto mayor es el contenido de este ion (Brindley y Brown, 1980, p.374).

La ilmenita ($FeTiO_3$) tiene una estructura similar a la de la hematita.

1.2.1.3 Tipos de materiales según sus propiedades magnéticas

Existen los materiales diamagnéticos, paramagnéticos, ferromagnéticos, ferrimagnéticos y antiferromagnéticos.

Los materiales denominados diamagnéticos se caracterizan por ser repelidos por los imanes, cualquiera que fuese el polo al que se acerquen (opuestos a los ferromagnéticos). Los materiales paramagnéticos son aquellos que presentan un comportamiento magnético muy débil como el aluminio, cobre y otros metales de transición, y se diferencian de los ferromagnéticos en que al retirar el campo externo aplicado el efecto del paramagnetismo desaparece. Los materiales ferromagnéticos contienen elementos metálicos de transición (Fe , Co , Ni) y sus aleaciones. Éstos pueden imantarse mejor que los demás materiales, conservan la imantación cuando se suprime el campo, por lo que sus propiedades son muy usadas en el campo de la electrotecnia, en la grabación de información, etc. (Universidad de Vigo, 2011).

Las características macroscópicas de los materiales ferromagnéticos y ferrimagnéticos son similares. La diferencia entre ellos reside en que el ferrimagnetismo es un fenómeno físico presente en algunos materiales cerámicos, que poseen dos redes de átomos o iones con momentos magnéticos diferentes y, cuando esos momentos magnéticos se alinean de forma antiparalela, se produce un momento magnético neto en una dirección. Este tipo de materiales se llaman ferritas, que tienen baja conductividad, y son útiles para muchas aplicaciones eléctricas y magnéticas tales como en transformadores de alta frecuencia. La magnetita es un material ferrimagnético, pertenece a las llamadas “ferritas” u “óxidos ferrimagnéticos”.

Los materiales antiferromagnéticos poseen dos redes de átomos o iones con momentos magnéticos iguales y, cuando esos momentos magnéticos se alinean de forma antiparalela, se produce un momento magnético nulo. Se usan en numerosas aplicaciones, desde motores eléctricos hasta en el almacenamiento de información en discos duros (Universidad de Vigo, 2011).

1.2.1.4 Ferritas

Las ferritas son materiales cerámicos ferrimagnéticos que se preparan combinando óxido de hierro (Fe_2O_3) con otros óxidos y carbonatos, en forma de polvo. El prototipo de estos materiales lo constituye la magnetita o piedra imán Fe_3O_4 ($FeO \cdot Fe_2O_3$). Se trata de un material ferrimagnético que tiene un momento magnético neto en ausencia de campo externo. Evidentemente sus imanaciones de saturación no son tan grandes como la de los materiales ferromagnéticos metálicos, pero sí lo suficientes para ser utilizadas a escala industrial, ya que almacenan campos magnéticos con más fuerza que el hierro (Mesa, 2009, p. 11).

Las ferritas se producen con frecuencia en forma de polvo, con el cual se pueden fabricar objetos de gran resistencia y dureza, moldeadas por presión y luego calentadas, sin alcanzar la temperatura de fusión, como parte de un proceso conocido como sinterización. A través de este proceso se producen núcleos para transformadores, bobinas y otros elementos eléctricos o electrónicos. El polvo de

ferrita se usa también en la producción de cintas de grabación; en este caso, el material es óxido férrico. También es empleado como tóner magnético de impresoras láser, como pigmento en algunos tipos de pintura, polvo usado en soldadura, tinta magnética para imprimir cheques y códigos de barras. Además, con dicho polvo, la adición de un fluido portador y un surfactante o tensoactivo, es posible fabricar ferrofluido casero (Universidad de Vigo, 2011).

Las ferritas pueden clasificarse entre duras y blandas de acuerdo con las características de sus ciclos de histéresis magnéticos. La mayoría de las ferritas blandas son similares a la magnetita y su fórmula general puede describirse como $MO.Fe_2O_3$ ($M = Fe^{2+}, Mn^{2+}, Ni^{2+}, Zn^{2+}$), con estructura espinela inversa con simetría cúbica, excepto la de Zn que es una espinela normal. Esto los convierte en materiales ideales para evitar pérdidas de energía por corrientes parásitas en los núcleos de los transformadores de alta frecuencia. Se utilizan en algunos tipos de ordenadores como medio de almacenamiento (núcleos magnéticos que aunque pierdan energía no pierden la información), cuando se necesita una especial resistencia a las sacudidas (usos militares) (Mesa, 2009, pp. 11-12).

Las ferritas duras se utilizan como imanes permanentes, y las más importantes son las de fórmula general $MO.6Fe_2O_3$ ($M = Ba, Sr$). Estas ferritas se preparan prensándolas en húmedo bajo la acción de un campo magnético para provocar el alineamiento de los momentos magnéticos. Presentan estructuras espinela inversa pero con simetría hexagonal en lugar de cúbica, sus campos coercitivos son muy elevados. Su precio es barato, por lo que se usan en muchos juguetes, pestillos de puertas, precintos y también en auriculares y timbres de teléfono, así como en muchos generadores y motores (Mesa, 2009, p.12).

1.2.2 TRANSFORMACIONES TÉRMICAS EN ARCILLAS

Todas las interacciones en estado sólido de las arcillas, como en las cerámicas, presentan una cinética de reacción extremadamente lenta. La variable capaz de acelerar el proceso es el tamaño de partícula: cuanto más fino sea el grano mayor

será su superficie específica y mayor su velocidad de reacción; por el contrario, cuando el grano tiene un tamaño suficientemente grande queda sin reaccionar.

Dentro del conjunto de tecnologías existentes para conseguir la inertización y neutralización de compuestos peligrosos (metales pesados) presentes en residuos, la ceramización y la encapsulación representan dos opciones estratégicas, dado que establecen una relación entre los metales pesados confinados en un medio receptor y su comportamiento futuro. Si el metal pesado se ceramiza, es decir, entra a formar parte químicamente del nuevo compuesto su comportamiento futuro será siempre el mismo, pero si éste es retenido físicamente y no reacciona, quedará encapsulado y su futuro comportamiento dependerá del medio en el que se encuentre (Elias, 2009, p. 118).

1.2.2.1 Ceramización y encapsulación

Encontrar la frontera donde el metal pesado se agrega a la matriz cerámica o queda encapsulado depende de factores como la granulometría del material, la facilidad de reacción de la arcilla y del propio residuo. Tal y como se muestra en la Figura 1.9, un límite prudente sería un tamaño de grano de 500 μm ya que, para valores superiores, el metal pesado queda sin reaccionar y a valores inferiores se integrará a la matriz cerámica. Conviene aclarar que en la Figura 1.9 la palabra “residuo” hace referencia a un compuesto peligroso que contamina la arcilla, o a un metal pesado que se incorporó a la arcilla en un proceso previo.

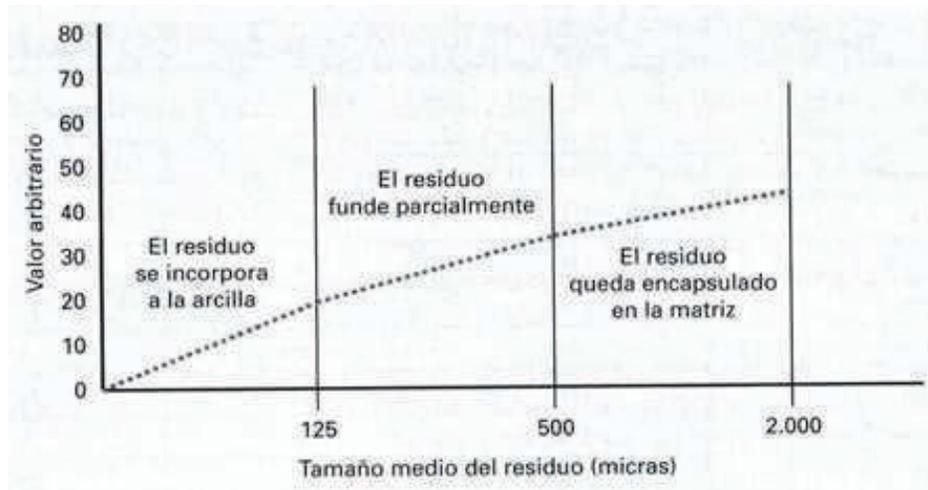


Figura 1.9. Procesos de ceramización y encapsulación
(Elias, 2009, p.119)

Mecanismo de la ceramización

En el campo del reciclaje de residuos, una de las técnicas más novedosas que se ha abierto es la de la ceramización, ya que si el residuo contiene metales pesados u otros compuestos de naturaleza inorgánica, éstos quedarán insertos en una fase vítrea de la matriz cerámica a la que se le puede dar otra gama de aplicaciones (Elias, 2009, p.168).

La capacidad de retención de los metales pesados, por incorporación a la matriz cerámica, es una función de la naturaleza de la fase vítrea formada en la cocción cerámica, de la temperatura de volatilización de los metales y sus óxidos, y del tamaño de grano del mineral de arcilla. En circunstancias normales y debido a la gran presencia de aire que existe en los hornos cerámicos, la mayoría de los metales pesados aportados por los residuos se encuentran en formas de óxidos, lo que ayuda a su incorporación en la matriz cerámica (Elias, 2009, p. 284).

El ejemplo más representativo de este mecanismo de ceramización es el de la hematita (Fe_2O_3), presente en la mayoría de arcillas. Una vez cocida la hematita entra a formar parte de la fase amorfa de la arcilla y tiñe la cerámica de color rojo característico de los materiales estructurales. Cuanto mayor sea la superficie específica de la arcilla tanto mayor será la formación de la fase líquida y más

fácilmente se atraparán los metales. Es por ello que un ceramista sabe que, al trabajar con la misma arcilla, ésta será más roja una vez cocida, si tritura más la materia prima (Elias, 2009, p. 284).

En la ceramización, el factor desencadenante por excelencia es la temperatura ya que al someter a la arcilla a una temperatura creciente, la viscosidad de la fase líquida cohesiona y rigidiza completamente el conjunto (Elias, 2009, p. 121, 344).

Como ya se había mencionado, la arcilla es un material complejo formado por diversos minerales que, al ser sometidos al calor, sufren una creciente transformación en sus estructuras cristalinas (Elias, 2009, p. 119).

A medida que aumenta la temperatura se inicia la etapa más crítica, la etapa de calcinación, donde el retículo cristalino del mineral de arcilla se descompone volviéndose muy reactivo, lo que provoca inestabilidad en el conjunto, debido a que los enlaces de las macromoléculas se rompen y los metales u óxidos pueden ser insertados fácilmente en la matriz cerámica. Esto da lugar a la formación de una fase amorfa líquida, que continúa en este estado hasta el final de la cocción. La fase líquida se va introduciendo en los intersticios de las micelas de arcilla donde eventualmente puede haber cuerpos extraños y/o metales pesados, y debido a la gran viscosidad los va atrapando y englobando, tal como se muestra en la Figura 1.10 (Elias, 2009, p. 133).

Durante el proceso de calcinación, el aire o gases procedentes de la conversión energética de la fracción orgánica de la arcilla quedan ocluidos dando lugar a poros, que le confieren propiedades de aislamiento térmico o acústico. Con frecuencia, una parte de la fase fundida recristaliza y origina fases cristalinas muy estables, y en ciertas ocasiones la incorporación de óxidos metálicos, como parte de la fase líquida, involucra a compuestos inorgánicos que catalizan las reacciones y ellos mismos ayudan a esta recristalización (Elias, 2009, pp. 122, 133, 168, 284, 289).

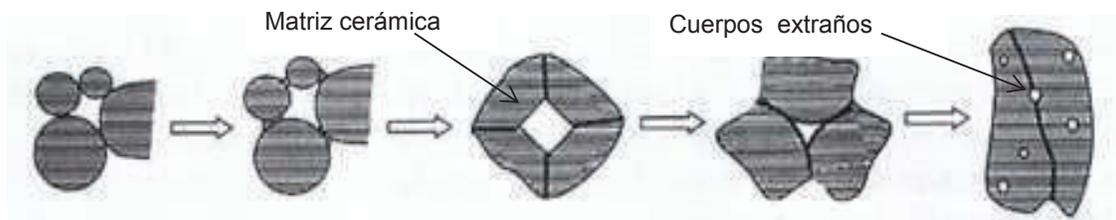


Figura 1.10. Principio de la ceramización
(Elias, 2009, p.133)

Las reacciones fisicoquímicas más destacadas que tienen lugar durante la cocción de arcillas de interés cerámico, en relación con el tratamiento de metales pesados y/o cuerpos extraños, son las siguientes (Elias, 2009, pp. 119-121):

- **Reacciones de vitrificación**
Se forma abundante fase líquida que al enfriarse será una fase amorfa que habrá integrado a los cuerpos extraños presentes, o los habrá encapsulado, dependiendo de la granulometría del material.
- **Destilación de materiales orgánicos**
En esta etapa se generan poros a partir de la fracción orgánica de la arcilla. Hasta 400 - 500 °C se pirolizan los compuestos orgánicos. Los compuestos volátiles son emitidos al interior del horno.
- **Descomposición de los minerales arcillosos**
Todos los minerales de arcilla al llegar a cierta temperatura, rompen los enlaces del agua de constitución y se convierten en sustancias amorfas, que más adelante formarán la fase líquida. Hasta 400 - 500 °C se elimina el agua de constitución y humedad adsorbida. A partir de 600 - 800 °C se descompone el retículo cristalino de los minerales de arcilla, comenzando por la montmorillonita $\frac{1}{2}(Ca, Na)_{0-7}(Al, Mg, Fe)_4[(Si, Al)_8O_{20}](OH)_4.nH_2O$. En esta etapa es cuando se atrapan la mayor parte de los metales pesados presentes, no solo los incorporados a la arcilla en procesos previos, sino también los que se encuentran de forma natural en las propias arcillas. Por regla general, a partir de 800 °C y en función del tipo de mineral de arcilla, las fases amorfas son parcialmente líquidas aunque de una altísima viscosidad lo que permite

mantener la geometría del cuerpo cerámico. También a estas temperaturas se destruyen los carbonatos. Tanto el óxido de calcio (CaO) como el de magnesio (MgO) procedentes de las decarbonataciones son poco reactivos y su contribución a la ceramización es mínima.

A temperaturas próximas a 1000 °C la sílice (SiO_2) procedente de la descomposición de los minerales de arcilla ataca a los óxidos alcalinotérreos presentes, y forma nuevas fases minerales. Si la cocción prosigue, a mayores temperaturas funden los feldespatos presentes y la fase líquida puede atacar y fundir a los minerales producto de las posibles recristalizaciones.

1.2.2.2 Cambios estructurales de los minerales de arcilla en función de la temperatura

Cuando se realiza un proceso de ceramización es preciso conocer la evolución de los minerales de arcilla en función de la temperatura, puesto que éstos son los protagonistas de las reacciones cerámicas.

Las temperaturas en las que se dan las transformaciones térmicas para los distintos minerales, dependen básicamente del nivel de perfección de los cristales, de la naturaleza propia del mineral, de los minerales que acompañan al mineral en estudio, de la atmósfera del horno, de la velocidad de calentamiento y enfriamiento, de la naturaleza de los residuos incorporados. Por esta razón, resulta conveniente centrarse en las temperaturas teóricas de transformación térmica para cada mineral (Elias, 2009, pp. 348-349).

- Caolinitas ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$)
Tienen una elevada temperatura de fusión. A temperaturas superiores a 1200 °C, si hay iones de hierro presentes, éstos se fijan en el retículo cristalino y el típico color blanco de la arcilla caolinítica se torna ligeramente amarillo.

- Ilinitas $((K, H_3O)(Al, Mg, Fe)_2(Si, Al)_4O_{10}[(OH)_2, (H_2O)])$
Como la mayoría de ilinitas contienen hierro, a partir de los 900 °C se percibe un típico color rojo, siempre que no exista cal.
- Montmorillonitas $((Na, Ca)_{0,3}(Al, Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O^1)$
Con frecuencia contienen hierro en el retículo y, éste es liberado a partir de los 800 °C presentando el típico color rojo.
- Cloritas $((Mg, Fe)_3(Si, Al)_4O_{10}(OH)_2 \cdot (Mg, Fe)_3(OH)_6)$
Todas contienen hierro en el retículo, el mismo que es liberado en forma de hematitas sobre los 550 °C.
- Micas, $(XY_{2-3}Z_4O_{10}(OH, F)_2$ ó $XY_3Si_4O_{12}$ donde: $X = Ba, Ca, Cs, K, Na, NH_4, H_3O$, $Y = Al, Li, Mg, Zn, Cr^{+3}, Fe^{+2}, Fe^{+3}, Mn^{+2}, Mn^{+3}, V^{+3}$ y $Z = Al, Be, Si, Fe^{+3}$)
Forman abundante fase líquida alrededor de los 950 °C.
- Sulfuros
La pirita (FeS_2) es la más común y abundante dentro de los sulfuros, luego le sigue la calcopirita ($CuFeS_2$). La bornita (Cu_5FeS_4) está normalmente asociada a las dos anteriores. Otros sulfuros son la marcasita o pirita blanca (FeS_2), la pirrotita ($Fe_{0,8-1}S$) o pirita magnética (pirrotina), la arsenopirita ($FeAsS$), la molibdenita (MoS_2), la galena (PbS) y la esfalerita (Zn, Fe)S (Klein y Dutrow, 2007, p. 355).

Los sulfuros de hierro no se emplean en siderurgia, debido a que es muy difícil eliminar la cantidad de azufre que contienen (2 % p/p), que para los aceros es muy pernicioso. También suelen contener en ocasiones arsénico, que es también muy perjudicial (López, 2012, p. 2).

Los sulfuros de hierro son una posible fuente de imanación. Dentro de los sulfuros de hierro, la pirita (FeS_2) es probablemente la más común, aunque magnéticamente es paramagnética. En segundo lugar, la pirrotina que cristaliza en dos formas, es un posible portador de imanación. La estructura cristalográfica

más común de la Fe_7S_8 , es monoclinica y es ferrimagnética, mientras que la Fe_9S_{10} es hexagonal y antiferromagnética (García, 2013, p. 9).

En la calcinación de los relaves se pueden distinguir dos etapas, una reductora y otra oxidante. En la primera, la arsenopirita bajo condiciones reductoras y baja temperatura (450 – 500 °C) se transforma en pirrotina porosa (FeS), eliminando arsénico gaseoso. La pirita, a su vez elimina azufre elemental volátil, formando también pirrotina porosa. De esta forma, en la corriente gaseosa se propicia la formación de compuestos volátiles tales como As_2S_3 , As_2S_5 y As_4S_4 . En esta etapa se espera tener una calcina con un contenido inferior a 0,1 % p/p de arsénico. En la segunda etapa se trabaja en condiciones oxidantes a 600 °C, transformando la pirrotina en hematita, con mayor porosidad, e inevitablemente una pequeña cantidad de magnetita (Fe_3O_4). El arsénico residual formará As_2O_3 , mientras que el azufre pasa a SO_2 (Díaz, 1997, p. 95).

Las Ecuaciones de la 1.2, a la 1.7 muestran las reacciones más importantes que ocurren durante la de calcinación (Lunar, 1977, p.85; Rodríguez, 2005, pp.18-21).



- Óxidos e hidróxidos de hierro

Los óxidos e hidróxidos de hierro forman nuevas estructuras cristalinas como consecuencia del calentamiento, lo cual se puede observar en la Tabla 1.3.

Tabla 1.3. Resumen de los efectos de la temperatura en óxidos e hidróxidos de hierro

| Compuesto | Temperatura de descomposición (1h en aire) | Productos observados mediante DRX, luego del calentamiento |
|--|--|--|
| Goethita ($\alpha - FeOOH$) | 230-280 °C | El producto intermedio a 280 °C es la hematita ($\alpha - Fe_2O_3$) desordenada: la hematita bien cristalizada se forma progresivamente con la calcinación a mayores temperaturas. |
| Lepidocrocita ($\gamma - FeOOH$) | 230-280 °C | Maghemita, la cuales se transforma en hematita a 400-500 °C. Si se forma hematita, ésta no permanece. |
| Maghemita ($\gamma - Fe_2O_3$) | 350-450 °C | Hematita ($\alpha - Fe_2O_3$). |
| Magnetita (Fe_3O_4) | 600-800 °C | Hematita. |
| Ferrihidrita sin silicio ($(Fe^{3+})_2O_3(H_2O)_{0.5}$) | 350-400 °C | Hematita. |
| Ferrihidrita con silicio ($(Fe^{3+})_2O_3(H_2O)_{0.5}$) | 550-600 °C | Hematita. |

(Brindley y Brown, 1980, p.372)

Las temperaturas indicadas no siempre son exactas ya que la composición, el tamaño de cristal, el tamaño de grano y el tiempo de calentamiento influyen en las reacciones, las mismas que implican deshidratación e incremento en el tamaño de los cristales de las fases recién formadas (Brindley y Brown, 1980, p.372).

También hay que considerar que a temperatura de 900 °C se observa la formación de hematita bien cristalizada (Aguaiza, 2014, p.158).

El diagrama de fases hierro-oxígeno se puede observar en la Figura 1.11, e ilustra los diferentes compuestos que pueden aparecer en función de la concentración de oxígeno y de la temperatura.

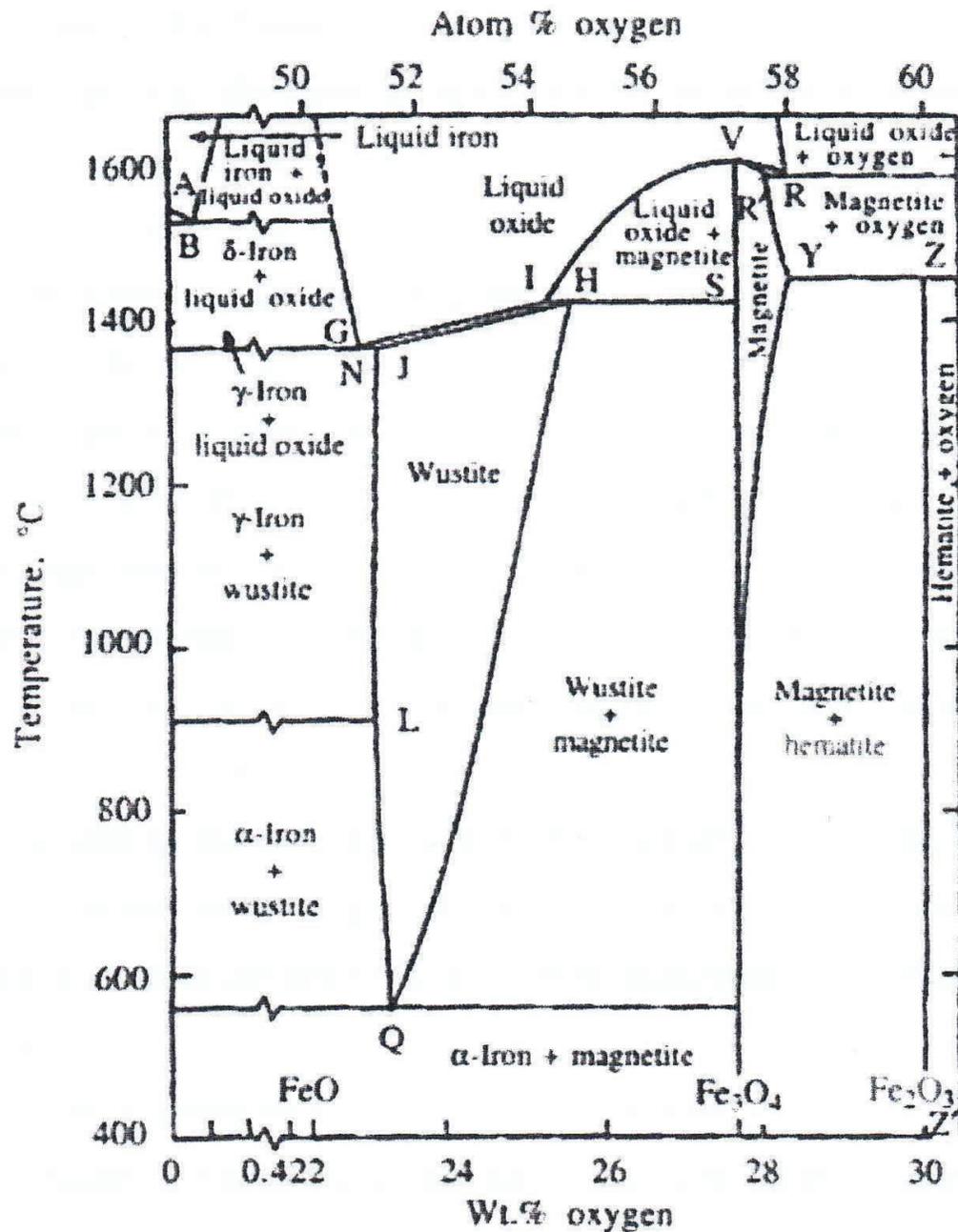


Figura 1.11. Diagrama de fases hierro-oxígeno
(Ghosh, 2004, p.190)

- Silicatos (SiO_2)

El clásico diagrama de fases para los minerales silícicos se basa en el trabajo de Fenner (1913), que muestra tres formas de sílica: cuarzo, tridimita y cristobalita, estables en rangos de temperatura menores que 570 °C (bajo

cuarzo), 570 – 870 °C (alto cuarzo), 870 – 1470 °C (alta tridimita); y a temperaturas mayores a 1470 °C (alta cristobalita). La conversión del cuarzo tiene lugar a altas temperaturas, éste se convierte en β – *cuarzo* alrededor de los 573 °C (Brindley y Brown, 1980, p.380).

2. PARTE EXPERIMENTAL

El presente trabajo de investigación tiene por objeto la obtención de ferritas a partir de desechos sólidos provenientes de los procesos de extracción de oro, para lo cual se siguió la metodología indicada en la Figura 2.1.

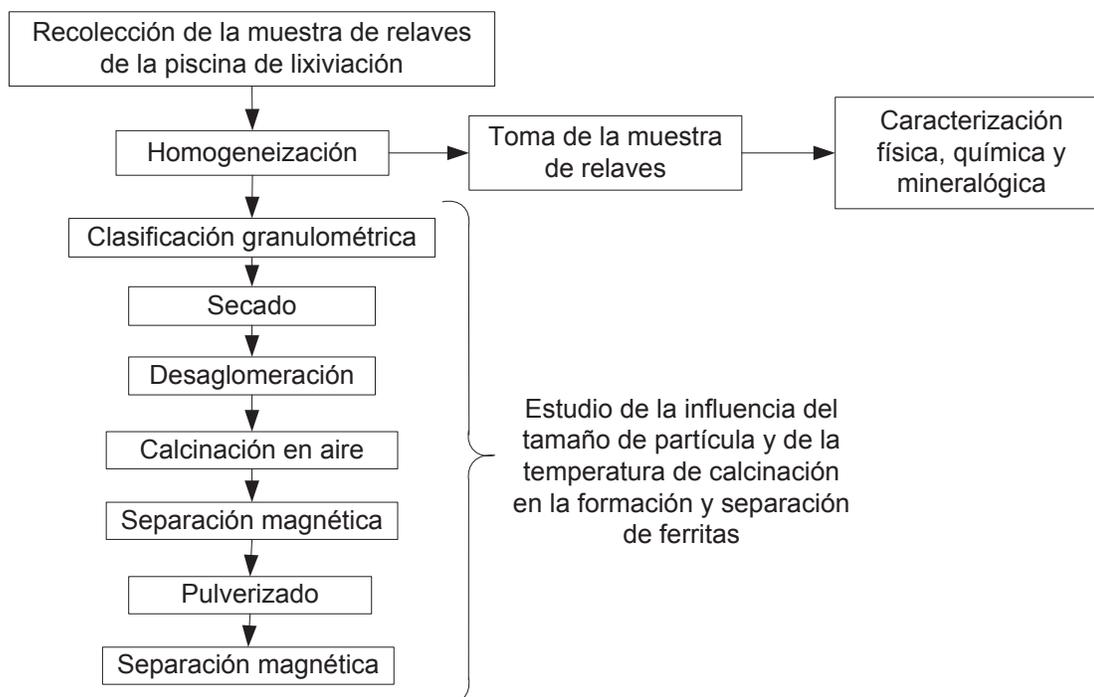


Figura 2.1. Esquema general de la metodología seguida para determinar el proceso y condiciones de operación para la obtención de ferritas a partir de desechos sólidos provenientes de los procesos de extracción de oro

La muestra tomada corresponde a los relaves gruesos que son depositados en la periferia de la piscina de lixiviación N° 5 de la empresa SODIREC S.A., y después de haber sido separados del relave general proveniente del proceso de carbón en pulpa para la extracción oro. Se aplicó el método de muestreo por recogida para tomar una masa de 17 kg, debido a que se trata de arenas con un tamaño de grano menor que 0,25 mm. La Figura 2.2 muestra el lugar de donde se tomó la muestra para desarrollar el presente trabajo de investigación.



Figura 2.2. Piscina de lixiviación N° 5 de la empresa SODIREC S.A. En la imagen se puede observar el flujo de arenas gruesas (underflow) provenientes de la clasificación del relave general procedentes del hidrociclón

Se definieron además el diagrama de flujo, y las condiciones de operación, para el diseño del proceso de obtención de ferritas a partir de desechos sólidos provenientes de los procesos de extracción de oro.

Por último se efectuó un análisis económico tomando en cuenta la inversión total en equipos principales y en el consumo de energía, para determinar la factibilidad de la implementación del proceso de obtención de ferritas, y se analizaron los indicadores económicos como la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Valor Actual Neto (VAN).

2.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS DE DESECHOS SÓLIDOS PROVENIENTES DE LOS PROCESOS DE EXTRACCIÓN DE ORO

Se tomaron 2 kg de material homogeneizado y cuarteado para los análisis de caracterización física, química y mineralógica.

2.1.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LOS RELAVES

Dentro de las características físicas de los relaves se determinaron la densidad real y la densidad aparente. Además, se realizó un análisis granulométrico y un análisis de separación magnética.

2.1.1.1 Determinación de la densidad real y de la densidad aparente de los relaves

La determinación de la densidad real y de la densidad aparente se hizo con base en la metodología propuesta por Juvenal Luis Hernández (2007) en su manual de laboratorio “Métodos para el análisis físico de los suelos”, cuyo procedimiento se detalla en el Anexo I.

2.1.1.2 Análisis granulométrico de los relaves

El análisis granulométrico fue realizado con base en la norma ASTM C325-07, cuyo procedimiento se detalla en el Anexo II.

2.1.1.3 Separación magnética de los relaves

Para determinar si los relaves gruesos tienen minerales magnéticos en su composición se tomó una masa de relaves y se secó a 110 °C por 24 h. Se tomaron dos porciones de 150 g de relaves secos cada una y éstas fueron colocadas en el separador magnético en las condiciones que se presentan en la Tabla 2.1. El equipo de separación magnética usado fue un separador de cilindro de alta intensidad MIH(13) 111-5 marca CARPCO, de capacidad 200 lb/h, cuyo tamaño de alimentación va desde la malla N° 3 (6 730 μm) hasta la malla N° 200 (74 μm). Y cuyo nivel de vibración de la tolva de alimentación está graduado de 1 a 100 unidades/t.

Tabla 2.1. Resumen de las condiciones de operación usadas en el separador magnético

| Condiciones de operación | Muestra | | | |
|---------------------------------|---------|-----|----|---|
| | A | B | | |
| Velocidad del cilindro (rpm) | 20 | 20 | | |
| Nivel de vibración (unidades) | 60 | 60 | | |
| Corriente (A) | 2,5 | 2,5 | | |
| Velocidad de alimentación (g/s) | 0,6 | 0,6 | | |
| Número de pasadas | 1 | 1 | 10 | 5 |

La muestra A fue pasada una sola vez por el equipo y se obtuvieron dos porciones, la magnética y la no magnética, ambas porciones fueron pesadas.

A fin de comprobar que el número de ciclos de recirculación del material por el separador magnético, aumenta la eficiencia de la recuperación de los minerales magnéticos se realizó el ensayo B. La muestra B fue pasada una vez por el equipo y se obtuvieron dos porciones, la magnética y la no magnética. Luego la porción magnética fue recirculada por el equipo por 10 ocasiones, obteniéndose las mismas 2 porciones y, de éstas, la porción magnética fue realimentada por 5 ocasiones más. Al final, se agruparon las porciones no magnéticas de los distintos ciclos, y en otro recipiente la fracción magnética del último ciclo.

Se tomaron fotografías y se registraron las masas de las porciones obtenidas después del procesamiento de las muestras A y B, con la balanza analítica KERN ABS 220-4 No. WB0310251, 220 g, 0,001 g.

2.1.2 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LOS RELAVES

Dentro de las características químicas se determinó la composición química elemental tanto por espectroscopía de dispersión de rayos X característicos (EDS) como por espectroscopía de plasma inducido por láser (LIBS).

2.1.2.1 Determinación de la composición química por espectroscopía de dispersión de rayos X característicos (EDS)

Se determinó la composición química elemental semi-cuantitativa de los relaves utilizando la técnica EDS del microscopio electrónico de barrido ASPEX, con límite de detección 0,1 % p/p, de la Escuela Politécnica Nacional.

2.1.2.2 Determinación de la composición química por espectroscopía de plasma inducido por láser (LIBS)

Se utilizó un espectrómetro LIBS-2000+ (con láser de neodimio) - 2000+, con rango espectral de 200-1100 nm y resolución de 0,1 nm-0,3 nm/pixel, para realizar una determinación cualitativa (cuantitativa relativa) de hierro. Para esto, se tomó una muestra de cada una de las fracciones de relaves retenidos en los tamices usados para el análisis granulométrico (tamices ASTM 60, 80, 100, 140, 200, 325 y base), y con cada una de ellas se preparó una placa para análisis como se describe a continuación.

- Se cortó un pedazo de 1 cm² de cinta adhesiva de doble faz y se pegó sobre un porta objetos de vidrio.
- Se colocó una pequeña cantidad de cada muestra sobre la faz libre de la cinta y se formó una capa uniforme de material que cubra la superficie adhesiva por completo.
- Se colocó el porta objetos con la muestra preparada dentro de la cámara de análisis del equipo LIBS sobre una plataforma desplazable XY, ubicada a la distancia focal (7 cm) de la lente que enfoca el haz láser. El punto de impacto se visualizó usando una cámara de video acoplada al equipo.
- En cada una de las muestras se recogieron espectros de diez puntos diferentes. En cada punto se realizaron dos disparos con el láser Nd: YAG que emite pulsos en 1 064 nm con duración de 8 ns. La energía por pulso utilizada fue de alrededor de 60 mJ. Los 20 disparos se promediaron para tener una buena estadística.

- Espectros referenciales de la cinta de doble faz y del vidrio del sustrato fueron adquiridos bajo las mismas condiciones indicadas, para garantizar que no se presentaron interferencias de los picos correspondientes en el análisis de cada muestra.
- Para cada muestra se tomó una fotografía con la video cámara para estimar la cantidad relativa de sulfuros de hierro presentes en cada una de las muestras.
- Los espectros promedio obtenidos se procesaron en OriginPro 8 (Origin Lab Corporation, Northampton, Massachusetts) para su interpretación y presentación.

Las muestras preparadas para el análisis LIBS se pueden observar en la Figura 2.3.

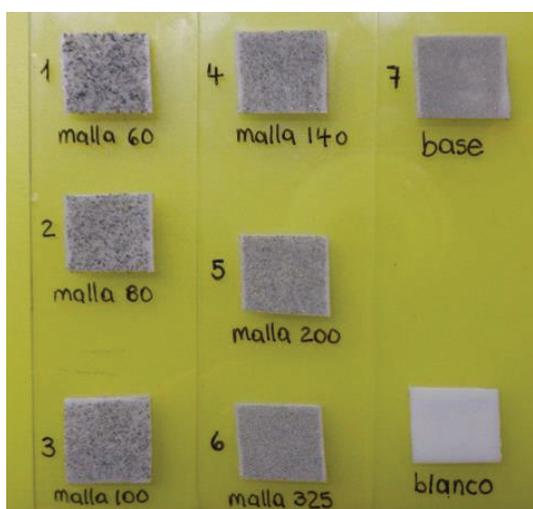


Figura 2.3. Muestras de relaves retenidos en los diferentes tamices y blanco (cinta doble faz) para el análisis con LIBS

2.1.3 CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA DE LOS RELAVES

Para la caracterización mineralógica de los relaves se utilizó el equipo de difracción de rayos X modelo D8 Advance Bruker, con límite de detección 1 %p/p. Para lo cual se pulverizó la muestra hasta un tamaño de partícula menor que 50 μm con el molino de discos BICO MFG. UA53. El difractograma obtenido fue

analizado con el programa Diffrac Plus (EVA y Topas) para cualificación y cuantificación.

2.2 ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA DE LA MUESTRA Y DE LA TEMPERATURA DE CALCINACIÓN EN LA FORMACIÓN Y SEPARACIÓN DE FERRITAS

Para este estudio se tomaron en consideración dos variables: tamaño de partícula y temperatura de calcinación como se detalla en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Variables consideradas en el proceso de obtención de ferritas

| Nº | Variable | 1 | 2 | 3 | 4 |
|----|---------------------------------|------|-----------|-----------|-------|
| 1 | Temperatura de calcinación (°C) | 600 | 800 | 900 | 1 000 |
| 2 | Tamaño de partícula (µm) | >177 | 177 - 149 | 149 - 105 | <44 |

Se realizaron 16 ensayos, cada uno con diferente granulometría y temperatura de calcinación. Los ensayos del 1 al 12 fueron realizados con el objetivo de determinar la granulometría y temperatura de calcinación más favorable para el proceso de obtención de ferritas, mientras que los ensayos del 13 al 16 se realizaron con el objeto de demostrar que las granulometrías finas no favorecen la separación de ferritas, debido a la ceramización que se produciría de acuerdo con la Figura 1.9 del capítulo anterior. La Figura 2.4 describe la metodología seguida en los ensayos del 1 al 12. Los ensayos 13, 14, 15 y 16 siguieron la misma metodología hasta el proceso de la primera y segunda separación magnética conjuntas, ya que para dichos ensayos no fue necesario pulverizar el material ni proceder con la tercera separación magnética.

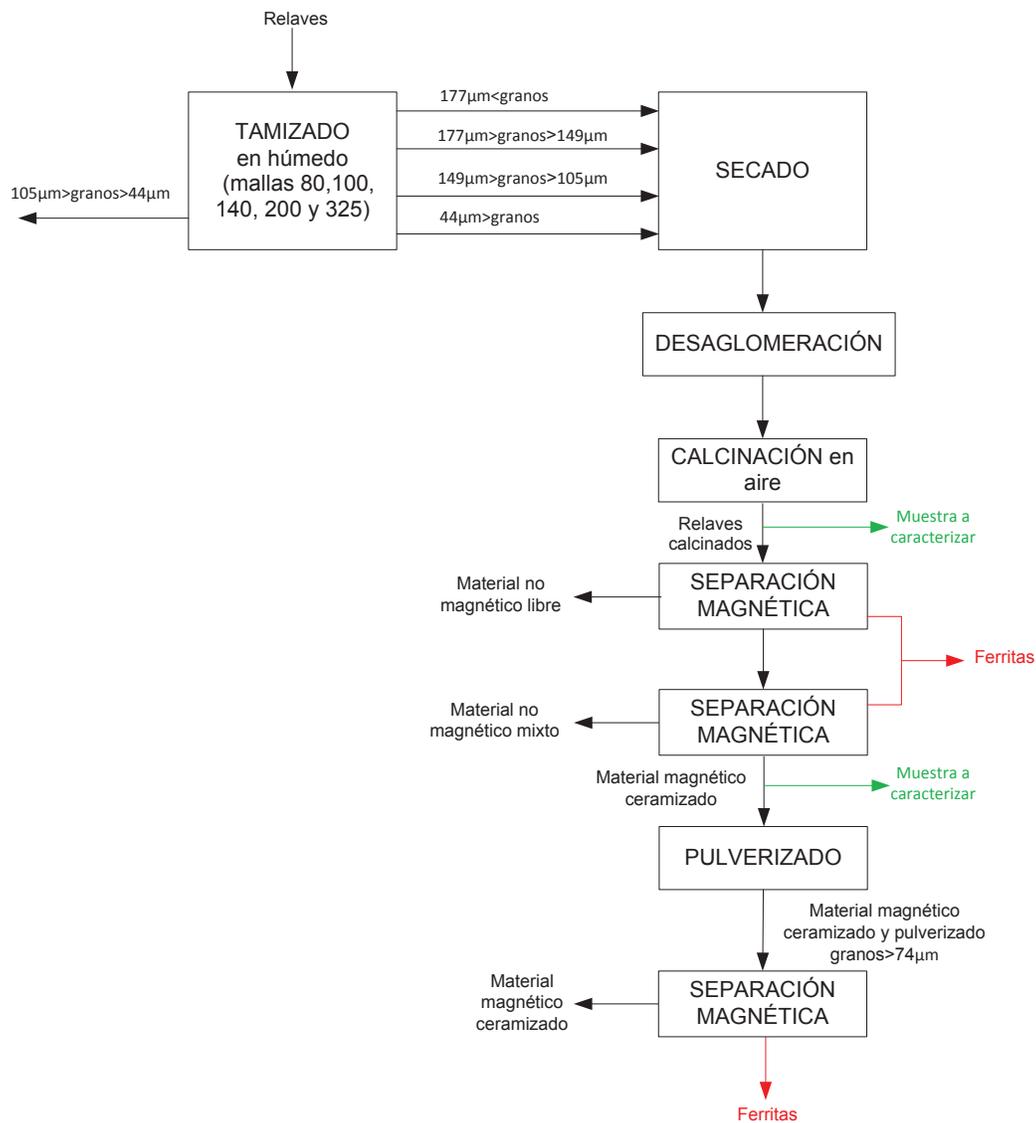


Figura 2.4. Esquema de la metodología seguida para analizar la influencia del tamaño de partícula y de la temperatura de calcinación para el proceso de obtención y separación de ferritas. Este esquema corresponde a una versión más detallada de la metodología descrita en la Figura 2.1

2.2.1 CLASIFICACIÓN GRANULOMÉTRICA

Debido a que se analizan arenas finas, la clasificación granulométrica se la realizó en húmedo. Para esto se usaron los mismos equipos y materiales utilizados en el análisis granulométrico de los relaves, con base en la norma ASTM C325-07 que se detalla en el Anexo II; con la variación de que en este caso no se usó el tamiz

Nº 60 y se usaron tinas plásticas de mayor capacidad para lavar los materiales retenidos sobre las diferentes mallas y que, en lugar de secar los materiales retenidos en los mismos tamices, se secaron en cápsulas de porcelana a 110 °C por 24 h en el horno eléctrico Memmert U10, cuya temperatura máxima llega a 220 °C. Una vez secas las fracciones retenidas sobre las mallas de los distintos tamices se desaglomeraron con un mortero de porcelana.

A continuación, con balanza KERN 440-49N, de capacidad 4000 g y apreciación 0,1 g, se procedió a pesar 250 g de muestra de cada fracción retenida para 4 ensayos individuales, los mismos que fueron calcinados a 4 diferentes temperaturas, como se detalla en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Combinación de variables para la realización de ensayos

| Tamaño de grano (µm) | Granos retenidos sobre la malla | Ensayos | | | |
|----------------------|---------------------------------|------------------|-------|-------|-------|
| | | Temperatura (°C) | | | |
| | | 600 | 800 | 900 | 1 000 |
| >177 | 80 | Nº 1 | Nº 2 | Nº 3 | Nº 4 |
| 177 - 149 | 100 | Nº 5 | Nº 6 | Nº 7 | Nº 8 |
| 149 - 105 | 140 | Nº 9 | Nº 10 | Nº 11 | Nº 12 |
| <44 | base | Nº 13 | Nº 14 | Nº 15 | Nº 16 |

2.2.2 CALCINACIÓN

Se usó el horno eléctrico Carbolite, tipo CWF 13/5 programable, cuya temperatura máxima llega a 1 300 °C, para calcinar en aire cada una de las muestras detalladas en la Tabla 2.3, desde temperatura ambiente hasta la temperatura de calcinación seleccionada (600, 800, 900 o 1 000 °C), la misma que se programó para que permaneciera constante por 2 h. La velocidad de calentamiento y enfriamiento fue de 1 °C/min. La Figura 2.5 muestra una representación del tratamiento térmico.

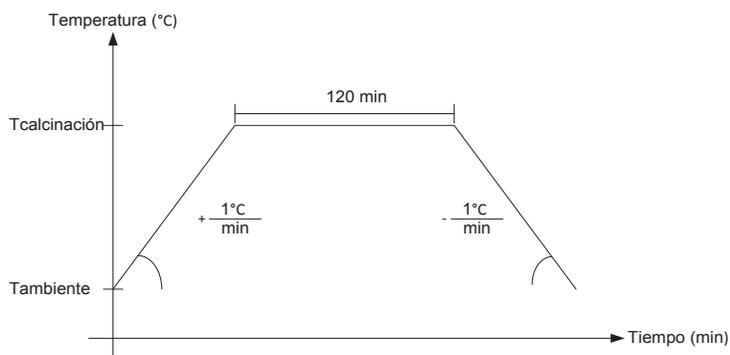


Figura 2.5. Perfil del tratamiento térmico realizado

Después de sacar las muestras del horno, se registró su masa con la balanza KERN 440-49N, para determinar las pérdidas por calcinación. A continuación, y en cada ensayo, se tomó una muestra para análisis como se muestra en el Anexo III.

2.2.3 CICLOS DE SEPARACIÓN MAGNÉTICA

Para este proceso se usó el separador magnético CARPCO. El ciclo de separación magnética constó de dos separaciones magnéticas en serie, cada una con diferentes condiciones de operación, luego un proceso de pulverización y finalmente una tercera separación magnética con sus propias condiciones de operación. Las condiciones de trabajo se detallan en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Condiciones de operación del separador magnético para los tres procesos de separación magnética

| Condiciones de operación | Separaciones magnéticas | | |
|---------------------------------|-------------------------|---------|---------|
| | 1ra | 2da | 3ra |
| Velocidad del cilindro (rpm) | 20 | 70 | 90 |
| Nivel de vibración (unidades/t) | 40 | 60 | 60 |
| Corriente (A) | 2,5 | 2,5-3,0 | 2,5-3,0 |

Con la primera separación magnética se buscó separar la mayor cantidad de material no magnético libre (granos sin incrustaciones de minerales magnéticos). La segunda separación magnética se hizo con la finalidad de separar el material

no magnético mixto (granos con mínimas incrustaciones de minerales magnéticos en su microestructura). A continuación, la pulverización se realizó al material denominado ceramizado (granos mixtos con contenidos altos de minerales magnéticos incrustados), para liberar a los minerales magnéticos incrustados; dicha pulverización se la realizó hasta obtener un tamaño de partícula mínimo de 74 μm , ya que éste es el tamaño mínimo de grano al cual el separador magnético es eficiente. Finalmente, la tercera separación magnética se realizó para obtener los minerales magnéticos liberados (ferritas), productos de la pulverización.

Al usar un separador magnético siempre se espera obtener dos porciones de material clasificado, una porción magnética y otra no magnética; sin embargo, en la práctica se obtuvieron tres fracciones, una fracción magnética, otra no magnética y una altamente magnética, la descripción gráfica de este proceso se observa en el Anexo IV.

Con la primera separación magnética, a la cual se alimentaron los relaves calcinados, se obtuvieron tres fracciones, la de material magnético, la de material no magnético y una pequeña porción de material muy magnético. La porción magnética de la primera separación se alimentó al separador magnético para la segunda separación, con la que nuevamente se obtuvieron las tres fracciones siguientes: la de material magnético, que para estas instancias se lo denominó como “ceramizado” (ya que se encuentra formado por una gran cantidad de silicatos, sin embargo presenta cierto comportamiento magnético que indicaría que existen minerales de origen magnético dentro de la matriz de los silicatos), la de material no magnético mixto y una pequeña porción de material muy magnético.

Una vez cumplidas las dos primeras separaciones magnéticas se registraron las masas de cada fracción. Las masas del material no magnético libre, material no magnético mixto y material ceramizado se registraron con la balanza KERN 440-49N y la masa de material muy magnético se registró con la balanza analítica KERN ABS 220 – 4. Además, se tomó una muestra del material ceramizado para análisis como se muestra en el Anexo III.

A continuación se pulverizó con el molino de discos BICO el material ceramizado, obtenido de la segunda separación magnética. Se registró la masa del material, luego de pulverizarlo, para poder calcular las pérdidas por pulverización, ya que este equipo no cuenta con empaques que impidan la pérdida de material.

Finalmente, se realizó una tercera separación magnética al material pulverizado y se obtuvieron 2 porciones: material magnético ceramizado y material muy magnético. Se registraron los pesos de ambas porciones. Un resumen gráfico del procedimiento descrito se muestra en el Anexo V. Con los datos registrados se realizaron los balances de masa para los 16 ensayos, cuyo resumen de corrientes se presentan en el Anexo VI.

2.2.4 CARACTERIZACIÓN DURANTE TODO EL PROCESO

A lo largo de todo el proceso se realizó la caracterización de las muestras del material calcinado, del material no magnético libre, del material no magnético mixto, del material ceramizado y de las ferritas separadas. Las técnicas de análisis seleccionadas fueron la microscopía petrográfica y óptica, DRX, EDS y LIBS. La nomenclatura de las muestras para los análisis se indica en el Anexo III.

2.2.4.1 Apreciación visual de la concentración de minerales por microscopía petrográfica

El análisis por microscopía petrográfica se lo realizó con el microscopio petrográfico marca ZEISS, a la muestra de ferritas separadas correspondientes al ensayo N° 1, por ser las de mayor tamaño de partícula; sin embargo, los resultados obtenidos no fueron los esperados, como se explica más adelante en la discusión de resultados. Por tal motivo, la determinación visual de la concentración de minerales se la hizo por microscopía óptica.

2.2.4.2 Apreciación visual de la concentración de minerales por microscopía óptica

El análisis por microscopía óptica se realizó a todas las muestras en sus diferentes niveles. Para esta determinación se usaron 2 microscopios. El primero, un estereomicroscopio trinocular Motic BA4310 con lentes objetivos EF-Plan 4 X y EF-N Plan 10 X, que cuenta con una cámara para registrar imágenes de 5 PM a través de un adaptador de 0,5 X aumentos. Y el segundo un estereomicroscopio binocular OLYMPUS SD 30.

- **Caracterización con el estereomicroscopio trinocular**

Las muestras del material calcinado, material no magnético libre, material no magnético mixto, material ceramizado y ferritas fueron observadas con las lentes de 4 X y 10 X, y fotografiadas con la cámara de 0,5 X del estereomicroscopio Motic.

Las observaciones con la lente de 4 X se hicieron con la finalidad de obtener una imagen que permita tener una idea de la concentración visual de minerales, es decir, las proporciones y disposición en las que los minerales se presentan en una pequeña cantidad de masa.

Las observaciones con la lente de 10 X fueron realizadas para obtener una imagen lo más clara y cercana posible de los granos y así estudiar su morfología, color y pureza relativa.

- **Caracterización con el estereomicroscopio binocular**

Con el uso del estereomicroscopio binocular se observaron las muestras de ferritas con la lente de 30 X. Para esto se colocó un pedazo de papel milimetrado sobre un portaobjetos y, encima de éste, una pequeña porción de ferritas (100 granos aproximadamente) y se procedió a contar los granos clasificándolos como:

ganga, ferritas y granos mixtos. Dicho conteo se realizó por 3 ocasiones para cada muestra y se promediaron los resultados.

2.2.4.3 Caracterización mineralógica por DRX

Para los análisis de DRX se seleccionó el mejor conjunto de muestras, con base en los resultados del balance de masa realizado a las 16 muestras, es decir, que se seleccionó el ensayo con mayor rendimiento de ferritas separadas. Entonces, se tomaron las muestras del material calcinado, material no magnético libre, material no magnético mixto, material ceramizado y ferritas separadas para llevarlas a análisis.

Se siguió el mismo procedimiento que para las muestras de relaves, detallado en la sección 2.1.3. Salvo que en esta ocasión los difractogramas obtenidos del material calcinado y ferritas, fueron analizados de forma cualitativa y cuantitativa con la base de datos Diffrac Plus (EVA y Topas), mientras que los difractogramas del material no magnético libre, material no magnético mixto y material ceramizado fueron analizados cualitativamente con la base de datos “Power Diffraction File – 2 (PDF-2)” versión 2009, del Centro Internacional para la Información de Difracción (ICDD).

2.2.4.4 Determinación de la composición química por espectroscopía de dispersión de rayos X característicos (EDS)

Utilizando la técnica EDS del MEB ASPEX se determinó la composición química elemental semi-cuantitativa de la muestra de ferritas pertenecientes al ensayo con mayor rendimiento. Se tomaron también fotografías de las mismas muestras con el MEB Tescan-Vega con detector “Bruker”, cuyo límite de detección es de 1 nm, ya que la video cámara integrada de éste cuenta con mejor resolución de imágenes que el MEB ASPEX, para así observar la morfología de las ferritas.

2.2.4.5 Determinación de la composición química por espectroscopía de plasma inducido por láser (LIBS)

Se siguió el mismo procedimiento que para las muestras de relaves, detallado en la sección 2.1.2.2. Este análisis se lo realizó a la muestra de ferritas resultantes del ensayo con mayor rendimiento.

2.3 DISEÑO DE UN PROCESO PARA LA OBTENCIÓN DE FERRITAS

2.3.1 ELABORACIÓN DEL DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO PARA LA OBTENCIÓN DE FERRITAS

De acuerdo con la información proporcionada por la empresa SODIREC S.A., se tiene alrededor de 0,56 t/h de relave grueso clasificado por el hidrociclón proveniente del proceso de carbón en pulpa para la extracción de oro. Por lo que aquí se propone producir una tonelada mensual de ferritas, a partir de una cantidad de relaves gruesos que será determinada por balances de masa y energía para cumplir con dicho propósito. Para la definición del diagrama de bloques se compararon los resultados de los balances de masa de los ensayos del 1 al 12 obtenidos a escala de laboratorio, y se seleccionó el ensayo con el cual se obtuvo la mayor recuperación de ferritas.

2.3.2 DIMENSIONAMIENTO DE EQUIPOS

Luego de haber definido el diagrama de bloques del proceso, las operaciones unitarias adecuadas y las condiciones de operación, se procedió a dimensionar y seleccionar los equipos principales y auxiliares, lo que permitió realizar los balances de masa y energía, el diagrama de bloques (BFD por sus siglas en inglés) y el diagrama de flujo (PFD por sus siglas en inglés), para la producción a escala industrial.

2.3.3 ESTIMACIÓN ECONÓMICA PRELIMINAR DEL COSTO PARA LA OBTENCIÓN DE FERRITAS A PARTIR DE DESECHOS SÓLIDOS PROVENIENTES DE LOS PROCESOS DE EXTRACCIÓN DE ORO

Con base en los diagramas de bloques (BFD) y de flujo (PFD), los balances de masa y energía y la selección de los equipos principales de la planta, se elaboró una estimación de la factibilidad técnico-económica con base en el total por inversiones en equipos y el total por costos de operación, tanto fijos (instalación, mantenimiento, reparación y depreciación de equipos) como variables (servicios industriales). Se calculó el costo del kilogramo de ferritas separadas y se elaboró un flujo de caja para un tiempo de 5 años, y se calcularon el TIR y el VAN.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de los ensayos realizados, a escala de laboratorio, para obtener ferritas a partir del tratamiento térmico de desechos sólidos provenientes de la extracción de oro. Además, se detallan el diagrama de bloques y de flujo propuestos con base en los mejores resultados de obtención y separación de ferritas. Adicionalmente, se realiza una estimación económica preliminar para determinar el costo del proceso para la obtención de ferritas mediante un análisis de indicadores económicos como el TIR y el VAN.

3.1 RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS DE DESECHOS SÓLIDOS PROVENIENTES DE LOS PROCESOS DE EXTRACCIÓN DE ORO

A continuación se presentan los resultados de la caracterización física, química y mineralógica de los relaves.

3.1.1 RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LOS RELAVES

En esta sección se presentan los resultados de la determinación de la densidad real, de la densidad aparente, del análisis granulométrico y de la separación magnética de los relaves.

3.1.1.1 Resultados de la determinación de la densidad real y de la densidad aparente de los relaves

Los resultados de densidad real y de la densidad aparente que se determinaron experimentalmente siguiendo el procedimiento descrito en el Anexo I se presentan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Resultados de la densidad real y de la densidad aparente de los relaves

| Propiedad | Resultado |
|--|------------------|
| Densidad real (g/cm ³) | 2,8 |
| Densidad aparente (g/cm ³) | 1,5 |

Se debe considerar que la densidad real es un parámetro que no toma en cuenta la porosidad del suelo, es decir, los espaciamientos, por lo que tiene un valor mayor que la densidad aparente. Sin embargo, la densidad aparente es más importante puesto que permite tener una idea clara de la densidad del relave sin ningún proceso de compactación que elimine la porosidad propia del material.

En este caso el valor de la densidad real refleja que se trata de un suelo esquelético (bajo contenido de materia orgánica), debido al alto contenido de sulfuros y silicatos en la arcilla, mientras que el valor de densidad aparente indica que no es un suelo bien compactado. Entonces el valor de densidad aparente resulta ser menor que el valor de la densidad real debido a que se trata de un suelo arcilloso no compactado.

3.1.1.2 Resultados del análisis granulométrico de los relaves

Un resumen de los resultados obtenidos del análisis granulométrico de los relaves realizado con base en la norma ASTM C325-07, cuyo procedimiento se detalla en el Anexo II, se muestra en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Resultados del análisis granulométrico de los relaves

| Tamiz (malla #) | Abertura (μm) | Peso retenido (g) | % Retenido | %Retenido acumulado | %Pasado acumulado |
|----------------------------|---|------------------------------|-------------------|--------------------------------|------------------------------|
| 60 | 250 | 51,9809 | 10 | 10 | 90 |
| 80 | 177 | 85,8379 | 17 | 28 | 72 |
| 100 | 149 | 36,1696 | 7 | 35 | 65 |

Tabla 3.2. Resultados del análisis granulométrico de los relaves (continuación...)

| Tamiz (malla #) | Abertura (μm) | Peso retenido (g) | % Retenido | %Retenido acumulado | %Pasado acumulado |
|--------------------|-------------------------|----------------------|------------|------------------------|----------------------|
| 140 | 105 | 96,8350 | 19 | 54 | 46 |
| 200 | 74 | 83,1328 | 17 | 71 | 29 |
| 325 | 45 | 57,2313 | 11 | 82 | 18 |
| Base | 0 | 87,3194 | 18 | 100 | 0 |
| Sumatoria | | 498,5069 | 100 | | |

Los resultados que se muestran en la Tabla 3.2 evidencian que la naturaleza del tamaño de grano del relave es fina y que concuerda con lo expuesto por Chia (2014), quien manifestó que “cerca del 90 % del ‘underflow’ pasa la malla N° 60 y alrededor del 10 % se queda retenido sobre la malla N° 100” (comunicación personal).

Además, se puede observar que la sumatoria de los pesos retenidos no es de 500 g, que fue la masa dispuesta para el análisis. Esto se debe a que pequeñas cantidades de material quedaron atrapadas en los intersticios de las diferentes mallas; sin embargo, dicha diferencia no representa ni el 1 % de la masa total, por lo cual se la podría considerar como despreciable.

Con base en los resultados de los porcentajes retenidos sobre cada malla de la Tabla 3.2 y con referencia a la Figura 1.9 mostrada en el capítulo anterior, se seleccionaron los rangos de interés con los cuales se estudió la influencia del tamaño de partícula en la separación magnética, de acuerdo con lo siguiente:

- Los relaves acumulados en los tamices N° 60, 80, 100 y 140 se consideraron para estudiar la formación de las ferritas cuando la ceramización es parcial, ya que para granos entre 500 μm (malla N° 35) y 125 μm (malla N° 120) el hierro funde parcialmente.
- Los relaves acumulados en la base, es decir que pasan por el tamiz N° 325 (44 μm) se consideraron para estudiar la formación de las ferritas cuando la ceramización es total, ya que para granos menores que 125 μm (malla N° 120)

el hierro se incorpora en la matriz cerámica. Dicha clasificación se resume en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Rangos de tamaño de partícula considerados para el estudio de la obtención y separación de ferritas

| Ceramización | Relaves acumulados en el tamiz N° | Rango de tamaño de partícula (μm) |
|--|-----------------------------------|--|
| Parcial ($125 \mu\text{m} < \text{granos} < 500 \mu\text{m}$) | 60 | >250 |
| | 80 | 250 - 177 |
| | 100 | 177 - 149 |
| | 140 | 149 - 105 |
| Total ($\text{granos} < 125 \mu\text{m}$) | Base | <44 |

Además, del análisis granulométrico se pudo obtener el valor del d_{80} , como se puede apreciar en la Figura 3.1.

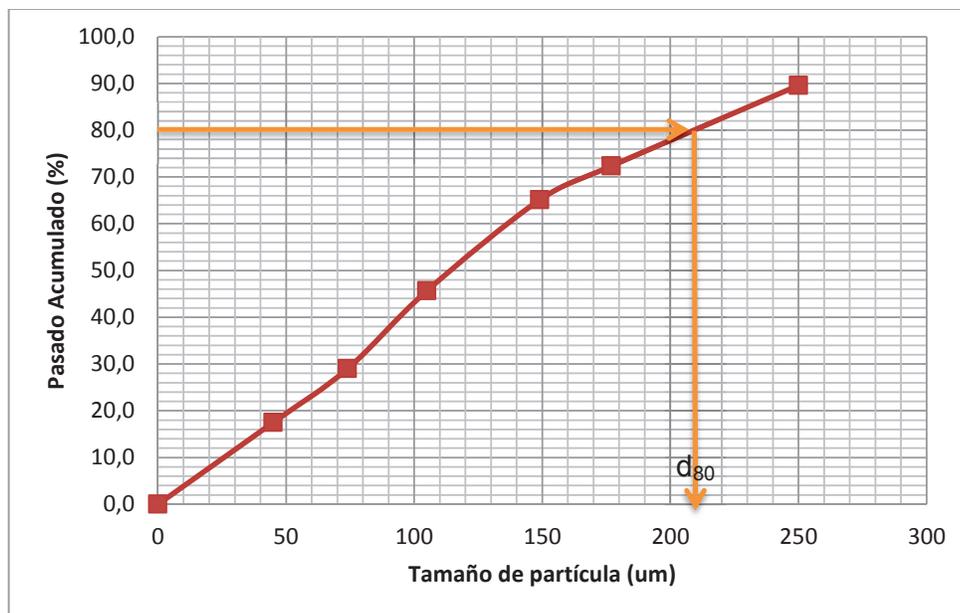


Figura 3.1. Análisis granulométrico de los relaves y determinación del d_{80}

De acuerdo con la Figura 3.1 se tiene que la abertura del tamiz a la cual el 80 % de la muestra ha pasado es de 210 μm , o que el 80 % del material tiene un tamaño de partícula menor que 210 μm .

3.1.1.3 Resultados de la separación magnética de los relaves

Los resultados obtenidos del análisis de separación magnética aplicado a los relaves se resumen en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Resultados de la separación magnética aplicada a los relaves

| | Muestra | |
|--|-------------------|------------------|
| | A | B |
| Alimentación (g) | 150 | 150 |
| Fracción magnética (g) | 113,0486 (75,37%) | 99,0248 (66,02%) |
| Fracción no magnética (g) | 36,4747 (24,32%) | 48,6397 (32,43%) |
| Pérdidas por la separación magnética (%) | 0,32 | 1,56 |

La Tabla 3.4 permite observar que la fracción de material magnético supera el 60 % para ambas muestras, pero esto no quiere decir necesariamente que este material está formado por minerales magnéticos 100 % puros, sino que más bien se trata de minerales con estructura de cuarzo (no magnético) con impregnaciones de sulfuros magnéticos como la pirita. Además, se puede observar que al recircular el material, como es el caso de la muestra B, el porcentaje de pérdidas por separación magnética aumenta, y esto se debe a que las partículas más pequeñas del material pasan al aire a manera de polvo.

Tanto a la fracción magnética como a la no magnética de ambas muestras fueron fotografiadas. Las imágenes se muestran en la Figura 3.2.

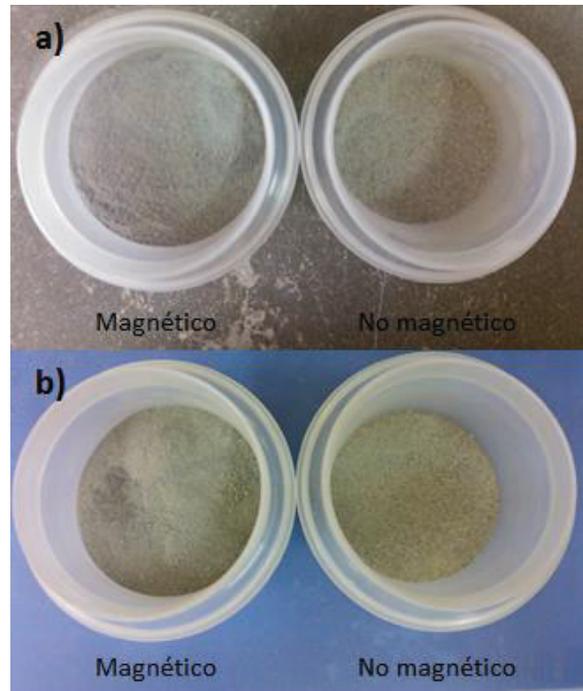


Figura 3.2. a) Fracciones magnética y no magnética de la muestra A. b) Fracciones magnética y no magnética de la muestra B

En la Figura 3.2 se puede observar que existe un ligero cambio de coloración entre las fracciones magnéticas y no magnéticas de ambas muestras, siendo la porción no magnética la más clara. Además, se ve que las porciones no magnéticas presentan granos de mayor tamaño comparados con los granos de la porción magnética.

Finalmente, se puede observar que en ambos fragmentos existen pequeños minerales con brillo metálico que corresponden a sulfuros; al parecer existirían sulfuros de naturaleza magnética como la pirita y no magnética como la pirrotina. Debido a esto se descarta la posibilidad de emplear el proceso de separación magnética previo a la calcinación, ya que al desechar cualquiera de las dos porciones, se estaría perdiendo materia prima para la formación de ferritas, conforme con lo expuesto por García (2013), quien señala que “los sulfuros de hierro son una posible fuente de imantación” (p. 9).

3.1.2 RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LOS RELAVES

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de la caracterización química de los relaves, utilizando las técnicas de espectroscopía de dispersión de rayos X característicos (EDS) y de espectroscopía de plasma inducido por láser (LIBS).

3.1.2.1 Resultados de la determinación de la composición química por espectroscopía de dispersión de rayos X característicos (EDS)

La determinación de la composición química elemental semi-cuantitativa por EDS, usando el microscopio electrónico de barrido (MEB), se realizó de la muestra de relaves secados a 110 °C por 24 h.

La fotografía de la porción de relaves analizados se muestra en la Figura 3.3. En ésta, se analizaron las composiciones elementales tanto de los elementos que existen en toda la muestra, como en cuatro granos específicos, elegidos por su morfología y composición.

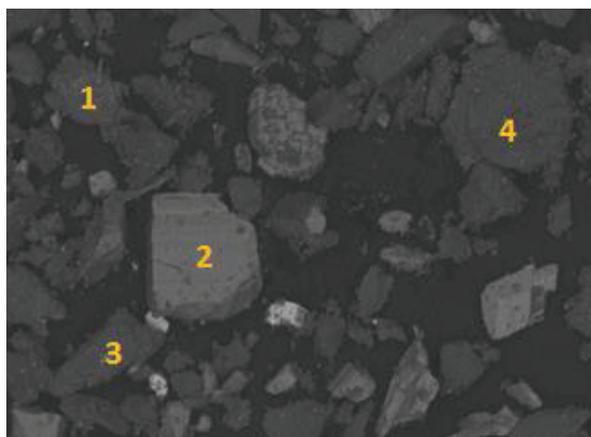


Figura 3.3. Fotografía de la muestra de relaves capturada con la video cámara interna del equipo de microscopía electrónica de barrido ASPEX, en la cual se realizó el análisis químico elemental semi-cuantitativo, tanto de la muestra general como de cuatro granos específicos. Acercamiento 255 X

Los resultados de la composición elemental se presentan en las Tabla 3.5 y 3.6, donde los elementos detectados más relevantes para esta investigación se resaltan en color celeste.

Tabla 3.5. Resultados del análisis químico elemental semi-cuantitativo por EDS de los relaves en toda la muestra

| Elemento | % en peso | Elemento | % en peso | Elemento | % en peso |
|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|
| Na | 0,0 | Cr | 0,0 | Cd | 0,0 |
| Mg | 2,6 | Mn | 0,0 | Sn | 1,6 |
| Al | 8,2 | Fe | 3,7 | Sb | 0,1 |
| Si | 36,9 | Co | 0,1 | Te | 0,0 |
| P | 0,6 | Ni | 0,0 | Ba | 0,2 |
| S | 16,4 | Cu | 0,2 | La | 0,7 |
| Cl | 6,2 | Zn | 0,3 | Au | 0,0 |
| K | 2,9 | As | 0,0 | Pb | 0,0 |
| Ca | 0,4 | Zr | 0,0 | Bi | 18,6 |
| Ti | 0,2 | Ag | 0,0 | | |

Al analizar los resultados de la Tabla 3.5 se observa que los relaves contienen alto porcentaje de silicio el cual puede encontrarse formando óxido de silicio que es el mineral más abundante de la corteza terrestre, o puede ser parte de minerales como feldespatos, micas, anfíboles, piroxenos, caolinitas, entre otros. El aluminio puede ser parte de minerales como feldespatos, micas y anfíboles. El magnesio puede tener origen en la clorita y también en los anfíboles. El azufre, puede hallarse en forma de sulfuro de hierro, de arsénico, de cobre, de zinc o de plomo. Y el titanio puede ser parte del rutilo. Todas estas conjeturas tienen base en que todos estos elementos químicos son de los minerales más comunes en suelos, de acuerdo con la Tabla 1.2.

Estos resultados, también permiten corroborar la información de la Tabla 1.1, ya que los porcentajes indicados en la Tabla 3.5 son muy similares a los porcentajes de abundancia de los elementos químicos en rocas y suelos, para elementos como el aluminio, hierro, magnesio, potasio y silicio.

Tabla 3.6. Resultados del análisis químico elemental semi-cuantitativo por EDS para cuatro granos específicos en la muestra de relaves

| Elemento | Grano 1 (% p/p) | Grano 2 (% p/p) | Grano 3 (% p/p) | Grano 4 (% p/p) |
|----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Na | 0,0 | 0,8 | 0,0 | 0,0 |
| Mg | 8,9 | 0,0 | 3,2 | 1,8 |
| Al | 16,8 | 0,5 | 17,3 | 15,2 |
| Si | 23,3 | 0,0 | 30,4 | 51,1 |
| P | 1,1 | 0,0 | 0,9 | 1,8 |
| S | 12,7 | 37,8 | 6,4 | 3,5 |
| Cl | 3,7 | 10,3 | 3,4 | 3,8 |
| K | 3,3 | 0,0 | 16,6 | 12,8 |
| Ca | 3,6 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Ti | 0,2 | 0,1 | 0,0 | 0,0 |
| Cr | 0,1 | 0,0 | 0,5 | 0,3 |
| Mn | 0,0 | 0,0 | 0,8 | 0,3 |
| Fe | 2,4 | 3,2 | 5,3 | 0,3 |
| Co | 0,3 | 0,2 | 0,9 | 0,0 |
| Ni | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Cu | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,2 |
| Zn | 0,0 | 0,1 | 0,0 | 0,3 |
| As | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Ag | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Cd | 0,0 | 0,3 | 0,0 | 0,0 |
| Sn | 4,0 | 0,0 | 7,2 | 6,4 |
| Sb | 6,2 | 0,1 | 0,0 | 0,0 |
| Ba | 0,5 | 0,0 | 0,0 | 0,3 |
| La | 0,6 | 0,1 | 0,0 | 0,0 |
| Au | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Pb | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |

Al analizar los resultados de la Tabla 3.6 se observa que para el caso del grano 1, éste presenta 8,9 % de magnesio, por lo que se puede decir que se trata de un grano de olivino, clorita, tal vez óxido de magnesio o un anfíbol; dicho magnesio puede llegar a formar parte de la estructura de las ferritas en la posible recristalización, producto del enfriamiento de la masa fundida de minerales, después de haber sido sometidos a calcinación a temperaturas entre 600 y 1 000 °C. El grano 2 presenta un alto porcentaje de azufre (37,8 %), dicha concentración indica que posiblemente se trata de un sulfuro y por el contenido de hierro (3,2 %), se podría tratar de pirita o pirrotina. Los granos 3 y 4 presentan los porcentajes más altos de silicio, 30,4 % y 51,1 % respectivamente, lo que permite especular que se trata de granos de cuarzo o de algún feldespato.

Algunos de los granos contienen titanio, níquel, magnesio, bario, zinc, cromo, aluminio, manganeso y cobre, elementos que más tarde podrían formar parte de la estructura de las ferritas de acuerdo con lo señalado en las secciones 1.2.1.2.3.3 y 1.2.1.4.

3.1.2.2 Resultados de la determinación de la composición química por espectroscopía de plasma inducido por láser (LIBS)

Se obtuvieron varios espectros LIBS, de los cuales se seleccionaron los más significativos para la discusión de resultados; el resto de espectros se los muestra en el Anexo VII.

El primer análisis se realizó a muestras de relaves retenidos sobre las diferentes mallas usadas en el análisis granulométrico, con la finalidad de estudiar el contenido de hierro, ya sea por una concentración visual de sulfuros, como se observa en la Figura 3.4, o por análisis cualitativo (cuantitativo relativo) del contenido de hierro, como se puede observar en la Figura 3.5.

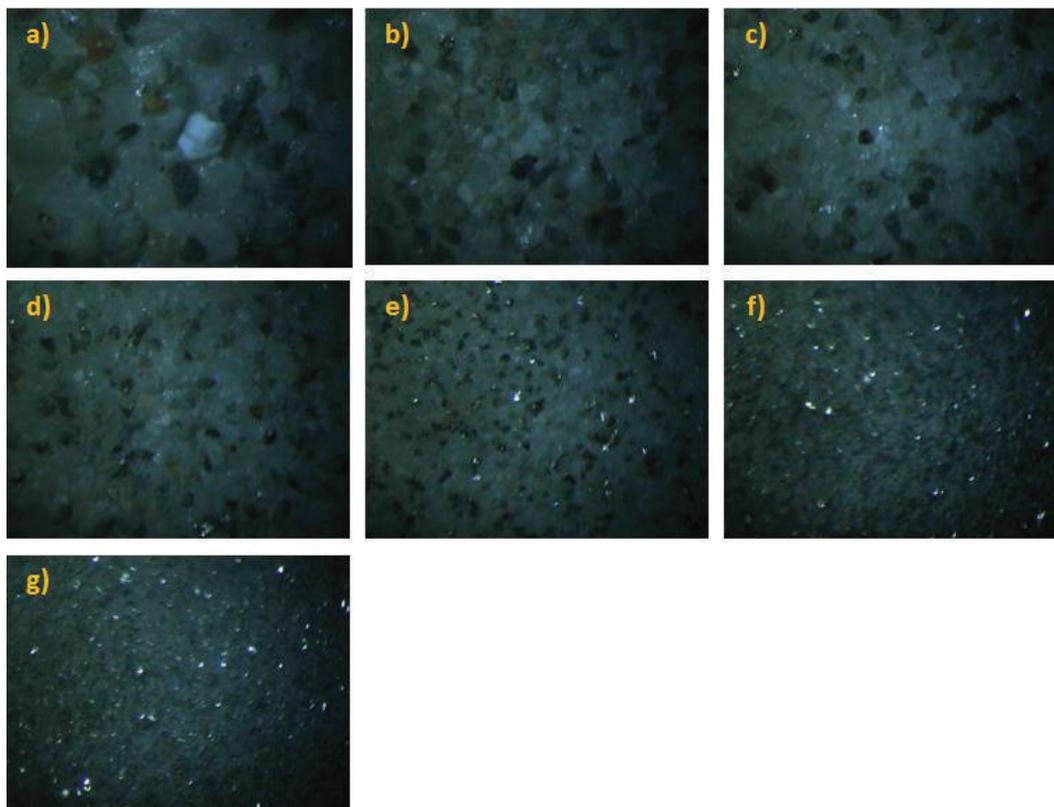


Figura 3.4. Fotografías de las muestras de relaves retenidos sobre las distintas mallas obtenidas con la video cámara del equipo LIBS. a) malla 60, b) malla 80, c) malla 100, d) malla 140, e) malla 200, f) malla 325 y g) base

El conjunto de fotografías recopiladas en la Figura 3.4 muestra que el contenido de minerales de brillo metálico, identificados como sulfuros, es mayor conforme disminuye el tamaño de partícula del relave. De hecho, las fotografías que corresponden a los relaves retenidos sobre las mallas N° 60 (a) y 80 (b) no presentan brillos metálicos, por lo que se puede decir que el contenido de sulfuros es muy bajo.

La Figura 3.5 corresponde al espectro LIBS para el elemento hierro presente en los relaves retenidos en las diferentes mallas. El espectro no está completo en el eje de longitud de onda, y fue cortado para mostrar el rango en donde se pueden observar los picos más representativos del hierro. Si bien la intensidad (número de cuentas) detectada no es un indicativo de la concentración, sí es una magnitud que permite tener una idea de la concentración relativa de un elemento en una

muestra frente a otra; por tal motivo, se presenta un acercamiento a uno de los picos en donde es posible distinguir que la cantidad de hierro es mayor cuando menor es el tamaño de grano, lo que concuerda con la apreciación de concentración visual de sulfuros mostrado en la Figura 3.4.

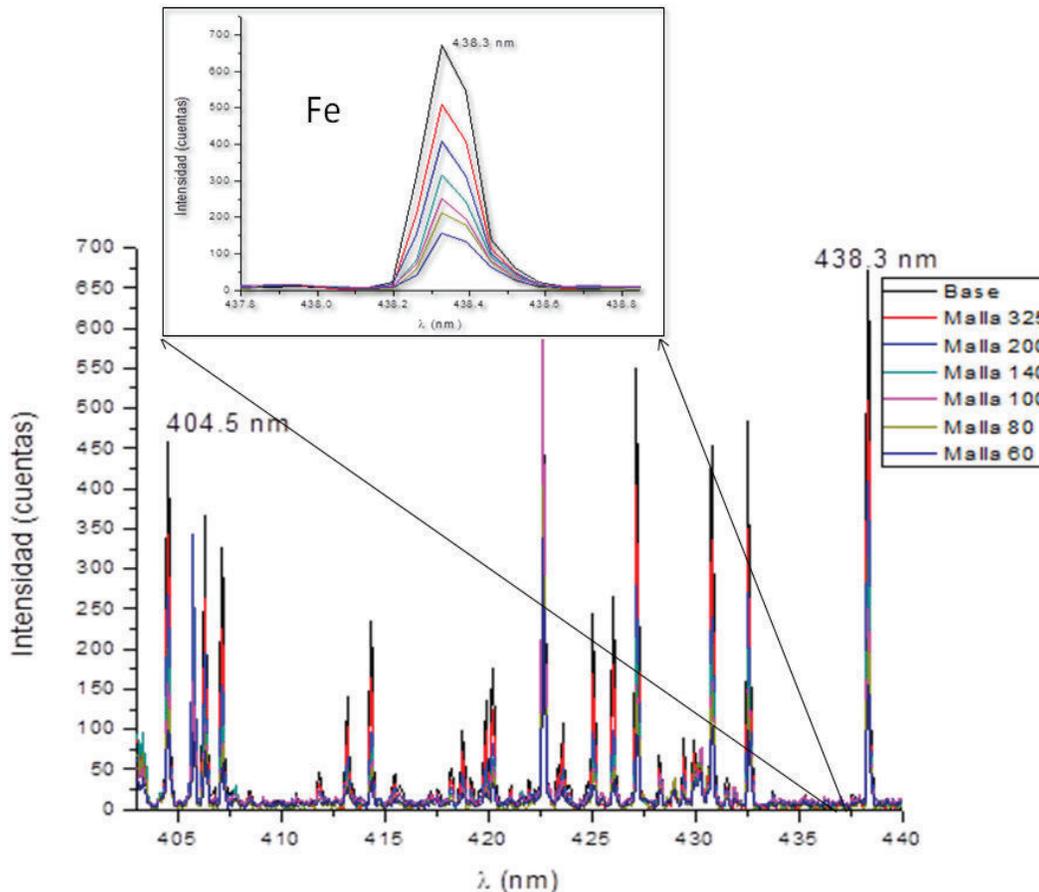


Figura 3.5. Espectro LIBS (405 – 440 nm) de los relaves retenidos sobre las diferentes mallas. Se muestra el acercamiento a un pico de longitud de onda comprendida entre 437,8 y 438,8 nm. Este espectro muestra las cuentas frente a longitud de onda únicamente para el elemento hierro donde se evidencia el aumento de intensidad de los picos característicos en relación con el tamaño de grano

Adicional al estudio del contenido de hierro en las muestras de relaves retenidos sobre las distintas mallas, se realizó un análisis elemental cualitativo (cuantitativo relativo), de los relaves retenidos sobre la malla N° 140 (con granulometría comprendida entre 105 – 149 μm). El espectro obtenido se muestra en la Figura 3.6 que presenta los correspondientes acercamientos a los picos representativos de hierro. Además, se puede observar que para la muestra de

relaves, los elementos significativos detectados fueron Fe, Si, Mg, Mn, Ti, Co, Al, Cu, Pb, Zn, Ca, Li, K y Na.

Estos resultados son posibles, ya que los relaves son suelos formados por una amplia gama de elementos, como se muestra en la Tabla 1.1, formando distintos minerales. Además, se debe considerar que éstos fueron alterados químicamente como consecuencia de los procesos de extracción de oro. El silicio tiene origen en el cuarzo (SiO_2); el cobre tiene origen en la calcopirita ($CuFeS_2$); el hierro en la pirita (FeS_2) y pirrotina; el titanio en el rutilo (TiO_2); el cinc en la wurtzita (ZnS), lo cual puede deberse al uso de polvo de Zn en la cementación Merrill Crowe; el potasio, sodio, calcio y aluminio pueden encontrarse formando feldespatos; el magnesio puede provenir de la periclasa (MgO); al manganeso es común encontrarlo en combinación con el hierro; finalmente al cobalto se lo encuentra relacionado con el níquel que normalmente se encuentra con el manganeso. Todo esto concuerda con lo expuesto en la sección 1.2 de la revisión bibliográfica.

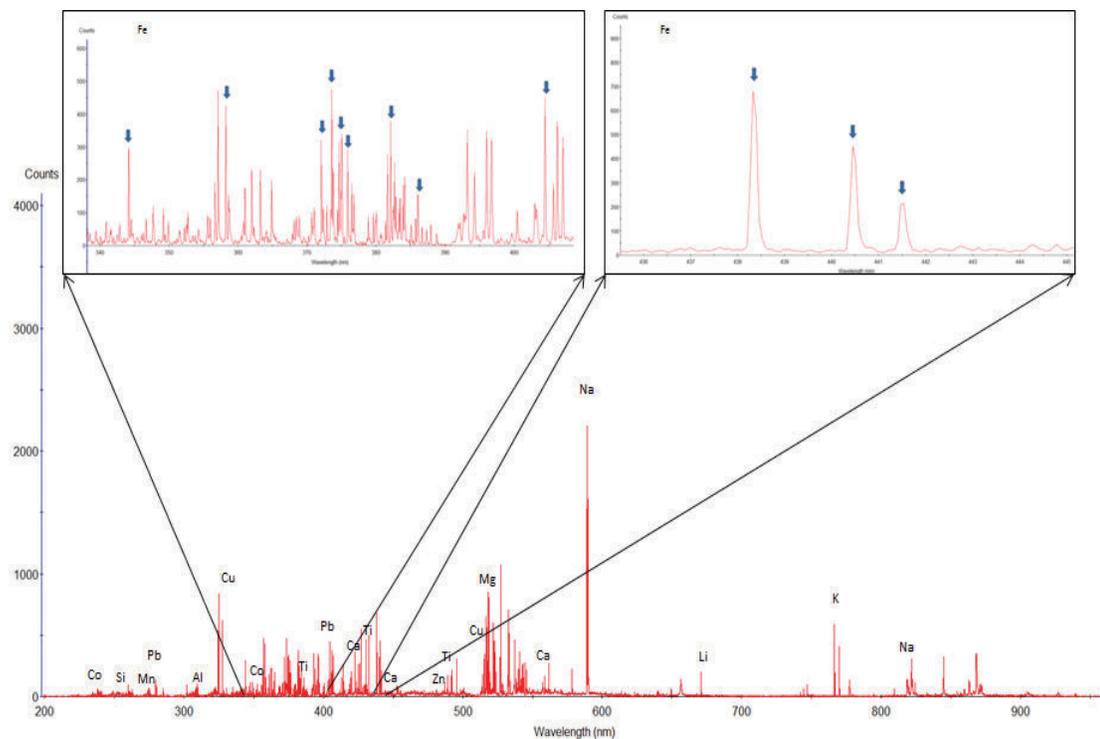


Figura 3.6. Espectro LIBS (con el eje de longitud de onda completo) realizado a la muestra de relaves secos retenidos sobre la malla N^o 140. Se presentan acercamientos a los segmentos del espectro en donde se pueden identificar los picos característicos del hierro

3.1.3 RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA DE LOS RELAVES

La caracterización mineralógica tiene por objeto determinar los compuestos que conforman los relaves, para lo cual se procedió como se detalla en la sección 2.1.3 y se obtuvo el difractograma de la Figura 3.7, en donde se señalan los picos característicos más importantes de los minerales detectados con esta técnica.

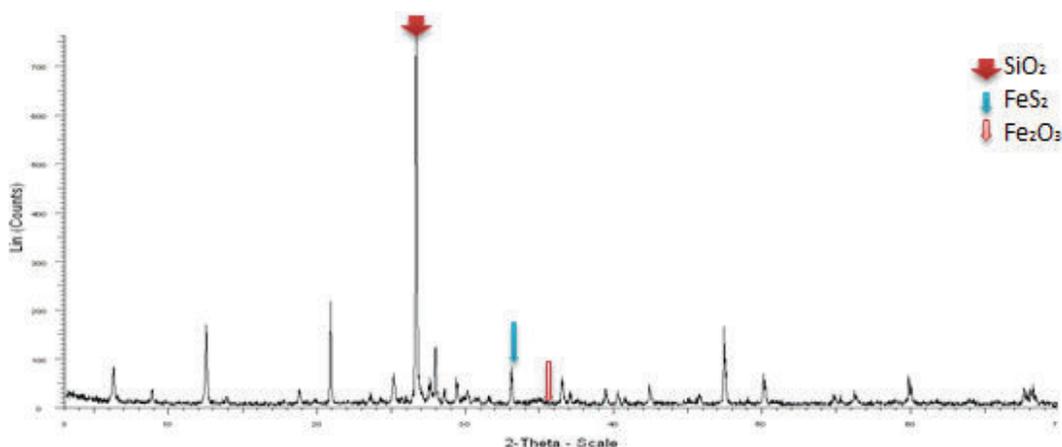


Figura 3.7. Difractograma de los relaves obtenido con el difractómetro D8 Advance, Bruker

El difractograma de la Figura 3.7 se analizó de forma cualitativa con el programa de reconocimiento Diffrac plus EVA. Aquí se puede observar que uno de los picos característicos del cuarzo (SiO_2) es bastante prominente frente al resto de picos de los demás minerales, ya que el número de cuentas es mayor que para el resto de éstos, lo que indica que la concentración de cuarzo es predominante en la muestra de relaves secos sin tratamiento. Además, se detectó la existencia de pirita (FeS_2), hematita (Fe_2O_3), entre otros minerales, cuyos picos no son tan destacados como los del cuarzo, lo que permite tener una idea de la baja concentración en la que se hallan dentro de la muestra de relaves.

A partir del difractograma y del programa de reconocimiento Diffrac Plus TOPAS del equipo se realizó el análisis cuantitativo de la muestra, el cual se muestra en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7. Resultados cualitativos y cuantitativos obtenidos mediante el análisis de DRX para la muestra de relaves sin tratamiento térmico

| Mineral | (% p/p) | Mineral | (% p/p) |
|----------------------------|--------------|--------------|---------|
| Hematita | 3 | Clinocloro | 6 |
| Magnetita | - | Plagioclasas | 18 |
| Cuarzo | 54 | Caolinita | 4 |
| Pirita | 6 | Muscovita | 4 |
| Calcopirita | 2 | Enstatita | 2 |
| Olivina | - | Diopside | 1 |
| Total (cristalinos) | 100 % | | |

La Tabla 3.7 muestra que en los minerales cristalinos detectados que conforman los relaves, tomados en conjunto como el 100 % de minerales cristalinos dentro de la muestra, se encuentra mayoritariamente cuarzo (SiO_2), lo cual es un resultado fiable ya que el cuarzo es un mineral muy abundante en suelos, así como los minerales del grupo de las plagioclasas. Además se evidencia la presencia de pirita (FeS_2), sulfuro de hierro que resulta ser muy importante, ya que a partir de éste se obtendrían ferritas. Minerales como el clinocloro se encuentran comúnmente relacionados con el cuarzo y la pirita. También se observa la presencia de hematita (Fe_2O_3), la cual es natural encontrarla en zonas cálidas de acuerdo con lo indicado en la Tabla 1.2.

Además, se debe resaltar que se detectó 6 % de pirita y 2 % de calcopirita, es decir, un total de 8 % de sulfuros, porcentajes que se encuentran muy próximos a los valores reportados por Chia (2014), quien manifestó que los relaves del “underflow” contienen aproximadamente 12 % de sulfuros, de los cuales entre el 9 y 10 % corresponde a pirita y el resto a sulfuros de zinc, cobre, arsénico y plomo (comunicación personal). Se puede notar en el difractograma de la Figura 3.7 que los picos se encuentran bien definidos, razón por la cual se presume que el contenido de minerales amorfos en la muestra es bajo.

3.2 RESULTADOS DEL ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA DE LA MUESTRA Y DE LA TEMPERATURA DE CALCINACIÓN EN LA FORMACIÓN Y SEPARACIÓN DE FERRITAS

A continuación se presentan los resultados del estudio de la influencia del tamaño de partícula de la muestra y de la temperatura de calcinación en la formación y separación de ferritas.

3.2.1 RESULTADOS DE LA CLASIFICACIÓN GRANULOMÉTRICA

Con base en los resultados expuestos en la sección 3.1.2.2, en la que se analizó el contenido de sulfuros y de hierro en las muestras de relaves retenidos sobre las diferentes mallas usadas para el análisis granulométrico, y se observó que los relaves retenidos sobre las mallas N° 60 y 80 muestran bajo contenido de sulfuros y de hierro, se decidió eliminar el tamiz N° 60 para la clasificación granulométrica de los relaves, y usar el material que queda retenido sobre la malla N° 80. Esto permite reducir a cuatro los grupos de relaves para el estudio de la influencia del tamaño de partícula en la obtención de ferritas, los mismos que se presentan en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8. Rangos de tamaño de partícula usados para el estudio de la obtención y separación de ferritas

| Ceramización | Relaves acumulados en el tamiz N° | Rango de tamaño de partícula (μm) |
|--|--|--|
| Parcial (125 μm < granos < 500 μm) | 80 | >177 |
| | 100 | 177 - 149 |
| | 140 | 149 - 105 |
| Total (granos < 125 μm) | Base | <44 |

3.2.2 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CALCINACIÓN REALIZADOS PARA LA OBTENCIÓN DE LAS FERRITAS

Después de seguir el procedimiento señalado en la metodología experimental (sección 2.2.2) se obtuvieron los resultados que se indican en el Anexo VIII. Las Figuras 3.8 y 3.9 son un resumen fotográfico de estos resultados.

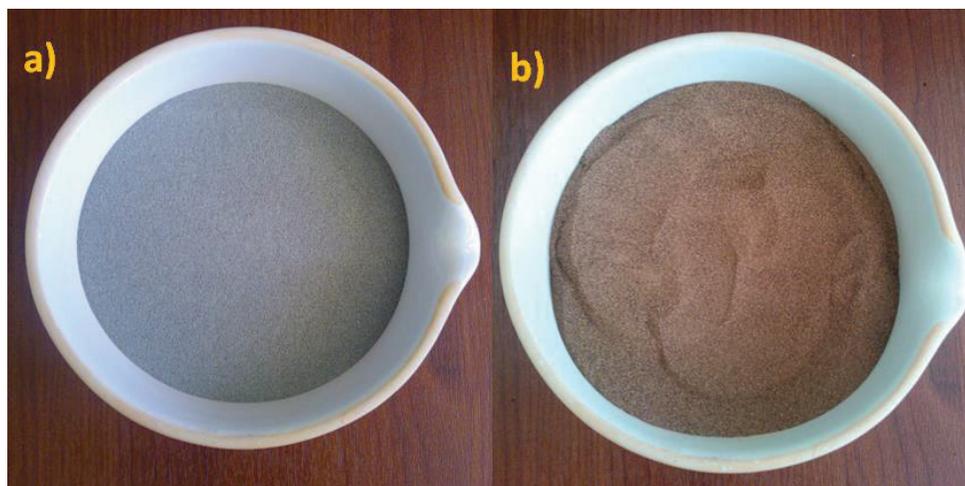


Figura 3.8. Fotografías que evidencian el cambio de coloración de las muestras de relaves después de haber sido calcinadas. Estos resultados corresponden al ensayo N° 10 (105um <granos<149um, 800 °C). a) Relaves sin calcinar b) Relaves calcinados

La Figura 3.8 es clara evidencia de la oxidación que sufren los relaves después de ser calcinados, puesto que ocurre cambio de coloración a un tono anaranjado rojizo, lo que además indica la presencia de hierro que probablemente se encuentra formando hematita (Fe_2O_3). Esto concuerda con Elias (2009), quien enuncia que la hematita una vez cocida entra a formar parte de la fase amorfa y tiñe la cerámica de color rojo (p. 284).

En la Figura 3.9 se presentan fotografías de las muestras de relaves de los distintos ensayos después de haber sido calcinadas. Se observa que todas las muestras se tornan de color anaranjado. Además, conforme disminuye el tamaño de partícula, la coloración se torna un tanto más rojiza, lo cual evidencia que el grado de ceramización guarda relación con el tamaño de partícula, lo que concuerda con lo expresado por Elias (2009), quien señala que un ceramista

conoce que al trabajar con la misma arcilla, ésta será más roja una vez cocida, si tritura más la materia prima (p. 284).

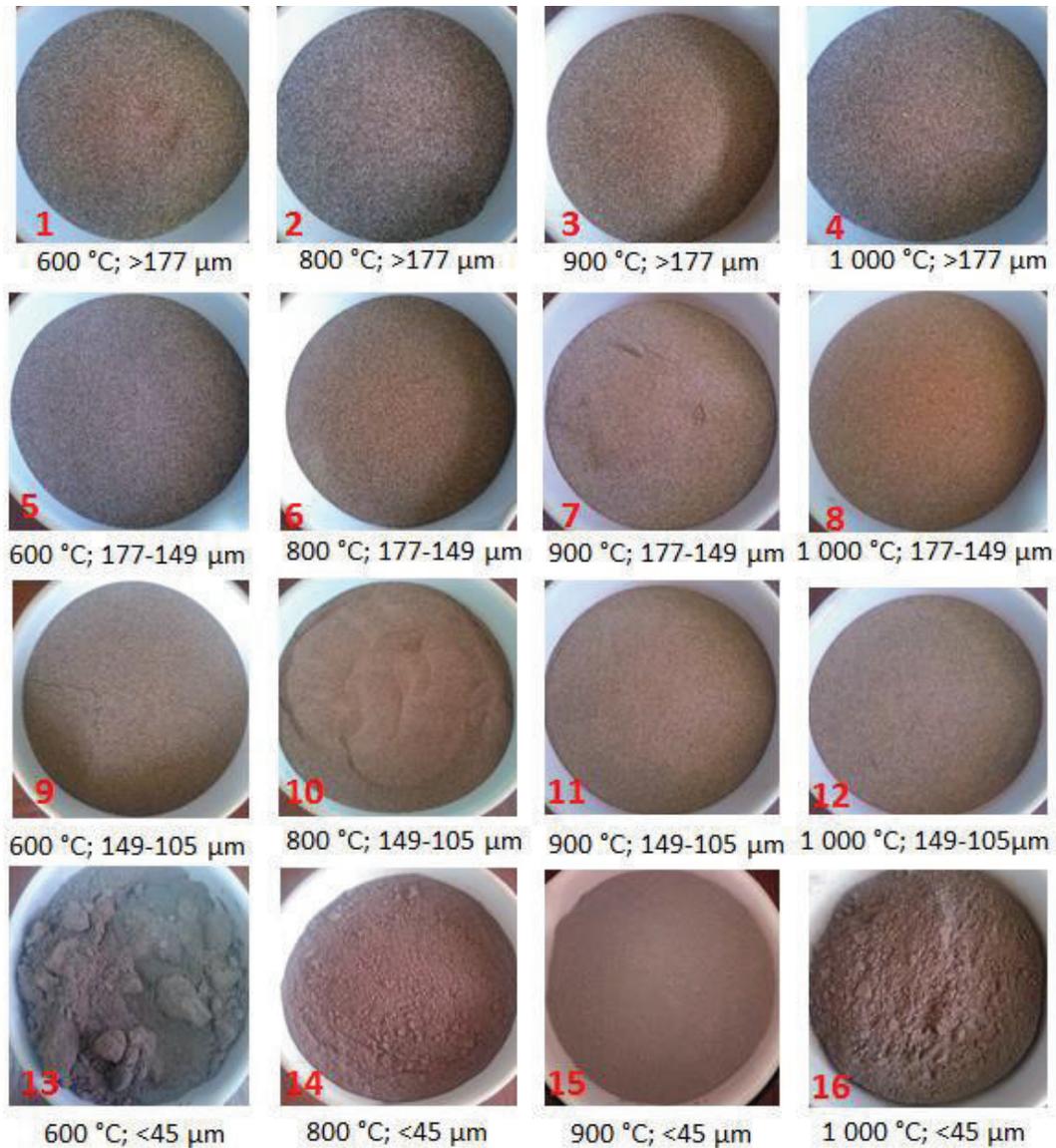


Figura 3.9. Fotografías de los relaves calcinados en los ensayos del 1 al 16

Otra de las finalidades de esta investigación fue la de probar la ceramización total del hierro dentro de la matriz cerámica, formada por los minerales presentes en los relaves, después de la posible recristalización producto del enfriamiento de la masa fundida obtenida en la calcinación. Para esto se realizaron los ensayos del 13 al 16 con tamaño de partícula menor que $45 \mu m$ y sus fotografías se muestran

dentro del resumen fotográfico de la Figura 3.9. Aquí, se puede observar que éste grupo de ensayos, que corresponde al grupo con el menor tamaño de partícula estudiado en esta investigación, es el que presenta la coloración más rojiza, lo que concuerda con lo expuesto en la sección 1.2.2.1, en donde se habla sobre el mecanismo de la ceramización y se indica que cuanto mayor es la superficie específica del material (menor tamaño de partícula), mayor es el grado de ceramización, que se evidencia por el tono con el cual se tiñe la cerámica.

Otro de los factores que permiten la identificación de la ceramización es el endurecimiento del material, lo que se puede observar en la Figura 3.10, que corresponde al ensayo N° 16 (granos $< 45 \mu m$; $1\ 000\ ^\circ C$). En dicha figura se ve la formación de un pequeño bloque con forma del recipiente en el cual se sometió a la muestra a calcinación. Dicho bloque permite demostrar que la temperatura es el factor desencadenante por excelencia en la ceramización, ya que al someter a los relaves a una elevada temperatura, que en este caso fue de $1\ 000\ ^\circ C$ (la más alta en esta investigación), la viscosidad de la fase líquida cohesiona y rigidiza completamente el conjunto (Elias, 2009, pp. 121, 344). Lo que no se vio en las otras tres muestras calcinadas a temperaturas menores. De hecho, esta muestra resulta ser la combinación de los dos factores más importantes que intervienen en la ceramización, el tamaño de partícula y la temperatura.



Figura 3.10. Fotografía de la muestra de relaves correspondiente al ensayo N° 16 (granos $< 45 \mu m$, $1\ 000\ ^\circ C$), después de haber sido calcinada

Finalmente, se realizó un análisis cuantitativo para determinar las pérdidas de material por calcinación. Los resultados se presentan en la Figura 3.11.

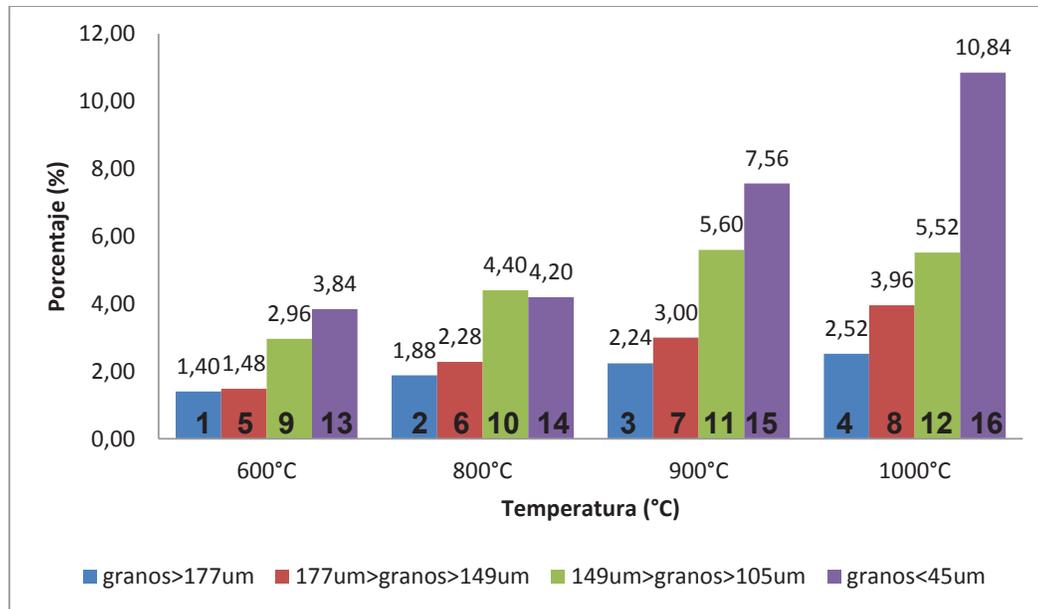


Figura 3.11. Resultados de las pérdidas por calcinación de las muestras de relaves sometidas a distintas temperaturas de calcinación. Cada barra se encuentra identificada con el respectivo número de ensayo

De acuerdo con lo que se puede observar en la Figura 3.11, existen mayores pérdidas de material conforme aumenta la temperatura de calcinación. Además, se dan mayores pérdidas al disminuir el tamaño de grano.

Los valores de porcentajes correspondientes a las pérdidas por calcinación, corresponden a la masa de agua de constitución que se pierde entre 400 – 500 °C, y a la materia orgánica que se pierde en forma de gases por la pirólisis que ocurre en el mismo rango de temperatura; dichos valores en su mayoría se hallan por debajo del 10 %, lo que indica que los relaves contienen bajas cantidades de materia orgánica en su estructura, por lo que se confirma que se trata de un suelo esquelético

3.2.3 RESULTADOS DE LOS CICLOS DE SEPARACIÓN MAGNÉTICA REALIZADOS PARA LA SEPARACIÓN DE LAS FERRITAS

Se realizó una primera separación magnética con la finalidad de separar el material magnético libre presente en las muestras sometidas al proceso de calcinación, seguida de una segunda separación magnética para separar el material no magnético mixto. Las condiciones de operación de ambas separaciones magnéticas se indican en la Tabla 2.4, los resultados de esta etapa se presentan en el Anexo VIII, y el resumen de los mismos se muestra en la Figura 3.12.

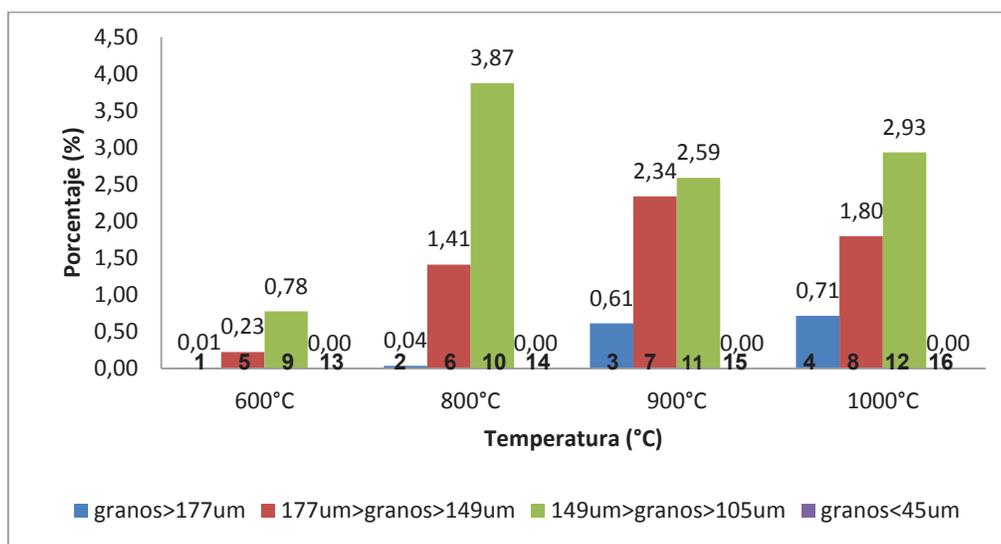


Figura 3.12. Porcentajes de ferritas separadas en función de la temperatura, en la 1ra y 2da separación magnética conjuntas, para los ensayos del 1 al 16

La Figura 3.12 muestra que conforme disminuye el tamaño de partícula de los relaves hasta $105 \mu\text{m}$, el porcentaje de ferritas separadas aumenta. Esto es explicable ya que en la sección 3.1.2.2 se señaló que las muestras de relaves retenidos sobre las mallas más finas contienen mayor cantidad de sulfuros y de hierro; por tal motivo, se forma mayor cantidad de ferritas. Sin embargo, para las muestras con tamaño de partícula menor que $45 \mu\text{m}$ el porcentaje de separación de ferritas es de 0. Esto último se explica porque para granos de este tamaño se

produce una ceramización total, según la Figura 1.9, razón por la cual resulta imposible separar las ferritas formadas.

También se puede observar que el mayor porcentaje de separación de ferritas se logró de la muestra calcinada a la temperatura de 800 °C con tamaño de partícula comprendida entre 177 y 149 μm , que corresponde al ensayo N° 10. Lo que lleva a analizar el por qué de su formación a esta temperatura y no a temperaturas mayores o menores. Posiblemente la temperatura de 600 °C no es suficiente para provocar el rompimiento de los enlaces cristalinos de los diferentes minerales que componen el relave; por el contrario, a temperaturas mayores que 800 °C, se rompen mayor cantidad de enlaces cristalinos provocando que la fase fundida se vuelva muy reactiva, atacando así a otros minerales y provocando que se formen nuevos minerales no magnéticos en el enfriamiento.

Debido a que la cantidad de material magnético obtenido conjuntamente de la primera y segunda separación magnética supera el 30 % en todos los ensayos, como se puede observar en la Tabla AVIII.3, se pulverizó dicha fracción hasta un tamaño de partícula mínimo de 74 μm . A continuación se realizó una tercera separación magnética, cuyos resultados se presentan en el Anexo VIII y su resumen en la Figura 3.13.

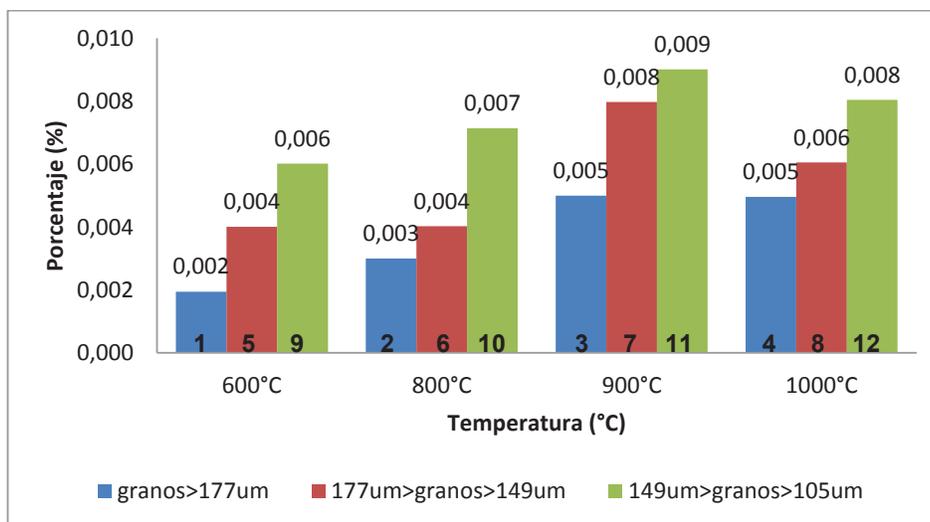


Figura 3.13. Resultados de los porcentajes de ferritas separadas en la 3ra separación magnética para los ensayos del 1 al 12

La Figura 3.13 muestra que conforme disminuye el tamaño de partícula de los relaves, el porcentaje de ferritas separadas aumenta. Sin embargo, este porcentaje en la tercera separación magnética es muy bajo, menor que el 1 %, lo que indica que la pulverización que se realizó para lograr un tamaño de grano más fino y así conseguir liberar las ferritas no aporta mayormente al incremento de la masa de ferritas separadas. Esto se debe a que se está trabajando para un tamaño de partícula para el cual el equipo de separación magnética está en el límite máximo de su eficiencia. Por tal motivo, se decidió suprimir la tercera separación magnética como parte del proceso para la separación de ferritas.

Finalmente, conforme al análisis de resultados de esta sección, se elige al ensayo N° 10, con tamaño de partícula comprendido entre 105 y 149 μm (relaves retenidos sobre la malla N° 140) y calcinado a temperatura de 800 °C, como el ensayo con mejores resultados, en base al cual se realizará el diseño del proceso a escala industrial.

Además, conviene señalar que para el proceso industrial, la primera y segunda separaciones magnéticas que fueron realizadas a escala de laboratorio a diferentes condiciones de operación (por motivos de estudio), se acoplarán en una sola separación magnética con las condiciones de operación de la segunda separación magnética, ya que a escala industrial tanto el material no magnético libre como el material no magnético mixto constituyen desechos del proceso y por tal motivo no es recomendable la separación selectiva de éstos.

3.2.4 RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS DURANTE TODO EL PROCESO

A continuación se presentan los resultados de la caracterización de muestras tomadas en diferentes etapas del proceso de obtención de ferritas a partir del tratamiento de desechos sólidos provenientes de los procesos de extracción de oro.

3.2.4.1 Resultados de la apreciación visual de la concentración de minerales por microscopía petrográfica

La apreciación visual de la concentración de minerales por microscopía petrográfica, se lo realizó con base en los estudios realizados por Forero (2008), quien señaló que “para la caracterización de la magnetita, el análisis petrográfico ayuda a la identificación de los componentes presentes en una muestra mediante la técnica de luz reflejada, ya que la magnetita es un mineral opaco” (p.19).

Con este análisis se logró determinar las características macroscópicas de los granos de ferritas como el aspecto, el color y el hábito, lo cual se puede observar en la Figura 3.14. Allí se puede observar, en cuanto al aspecto, que los granos de ferritas separadas corresponden a un material granular complejo con presencia de minerales opacos y traslúcidos. Que su color es gris oscuro a negro, en ocasiones con incrustaciones de minerales traslúcidos correspondientes a silicatos. Y que su hábito es granular con exoriaciones finas, es decir que no presenta una superficie pulida.

Sin embargo, esta técnica de análisis no resultó ser la más apropiada para determinar la concentración visual de minerales en las muestras, ya que para la aplicación de esta técnica es necesario que el mineral en estudio pueda ser susceptible a la preparación de la muestra, es decir, que se pueda elaborar una lámina delgada y pulida, lo que no se aplica para los granos de ferritas obtenidos, ya que no son susceptibles a ser laminados y pulidos debido al tamaño de partícula que presentan, por lo que, se decidió estimar visualmente la concentración de minerales en las muestras de ferritas a través de la técnica de microscopía óptica.



Figura 3.14. Fotografía de un grano de ferritas correspondiente al ensayo N° 1, observado con el microscopio petrográfico ZEISS, con analizador

3.2.4.2 Resultados de la apreciación visual de la concentración de minerales por microscopía óptica

Los resultados que se presentan a continuación fueron obtenidos con el uso de los estereomicroscopios trinocular Motic y binocular OLYMPUS.

- **Caracterización con el estereomicroscopio trinocular**

Con la cámara acoplada del estereomicroscopio trinocular se tomaron fotografías a las siguientes muestras: material calcinado, material no magnético libre, material no magnético mixto, material ceramizado y ferritas, para lo cual se utilizaron las lentes con aumentos 4 X y 10 X. Las fotografías se presentan en el Anexo IX. El resumen fotográfico de las muestras obtenidas durante todo el proceso del ensayo con mejores resultados (ensayo N° 10) se muestra en la Figura 3.15; allí se observan los cambios de coloración que se presentan a lo largo de todo el proceso hasta obtener las ferritas. Claramente se puede notar la coloración rojiza que adquieren los relaves después de ser calcinados, y que las fracciones no magnéticas obtenidas después de separaciones magnéticas son más claras que las porciones magnéticas. Esto es debido a que los minerales como la magnetita

presente en las fracciones magnéticas son de coloración negra, por lo que oscurecen su masa.

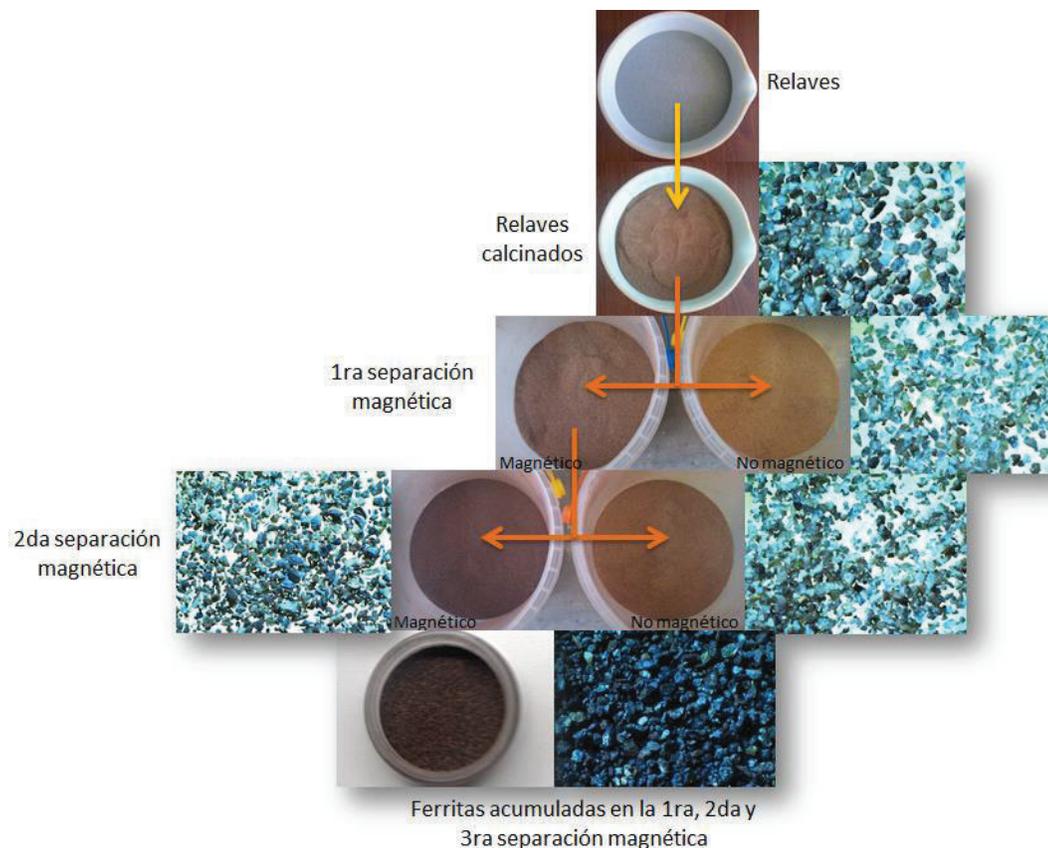


Figura 3.15. Fotografías de muestras obtenidas a lo largo del proceso para la obtención de ferritas. Las fotografías corresponden al ensayo con mejores resultados (ensayo N° 10) y junto a cada una de ellas se presenta una fotografía realizada con la cámara del estereomicroscopio Motic de los granos de cada muestra. Se usó la lente de aumento 4 X

Con el aumento 10 X del estereomicroscopio trinocular se observaron granos de ferritas del ensayo N° 10, y se clasificaron de acuerdo con su pureza visual como “ganga”, “mixto” y “ferritas”, lo cual se presenta en la Figura 3.16.

Para este caso de estudio, el cuarzo o los minerales que presentan la misma apariencia física que el cuarzo se denominaron “ganga”, ya que no tienen ningún valor para esta investigación. Los minerales con coloración negra y brillo pardo o rojizo se designaron como ferritas con base en las características físicas de la magnetita expresadas en la sección 1.2.1 de la revisión bibliográfica, y los granos

cuyas características físicas son la mezcla de las dos denominaciones anteriores se nombraron como granos mixtos.

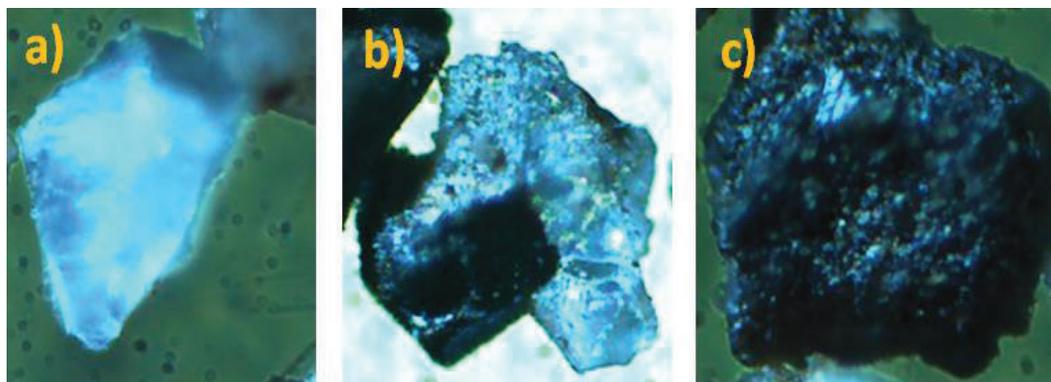


Figura 3.16. Fotografías de granos de la muestra de ferritas del ensayo N° 10, tomadas con la cámara del estereomicroscopio Motic, con la lente de aumento 10 X. a) Grano denominado como “ganga” b) Grano denominado como “mixto” y c) Grano denominado como “ferrita”

- **Caracterización con el estereomicroscopio binocular**

Con la ayuda de una cámara de fotos SONY de 12 MP, que se adaptó externamente a las lentes del estereomicroscopio binocular OLYMPUS SD 30, se tomaron fotografías de las muestras de ferritas acumuladas, para lo cual se hizo uso de la lente de aumento 30 X. El resumen de las imágenes obtenidas al igual que los resultados del conteo de granos se muestran en el Anexo IX, y los porcentajes del conteo de granos se presentan en las Tablas 3,9, 3,10 y 3.11, donde el orden de los ensayos es el mismo que el expresado en la Tabla 2.3.

Tabla 3.9. Resumen de los porcentajes de granos de ganga contados en las muestras de ferritas acumuladas de los ensayos del 1 al 12

| Tamaño de partícula (μm) | Malla | GANGA (%) | | | |
|---------------------------------------|-------|-----------|-------|-------|---------|
| | | 600°C | 800°C | 900°C | 1 000°C |
| >177 | 80 | 13,25 | 3,72 | 6,14 | 0,49 |
| 177 - 149 | 100 | 7,21 | 3,55 | 4,47 | 0,67 |
| 149 - 105 | 140 | 3,69 | 6,04 | 5,87 | 2,52 |
| PROMEDIO | | 4,80 | | | |

La Tabla 3.9 muestra que después del ciclo de separación magnética el porcentaje de ganga que contamina la porción de ferritas separadas llega hasta un máximo de 13,25 % para el ensayo 1 y un mínimo de 0,67 % correspondiente al ensayo 8, con un promedio de ganga contaminante de 4,80 %. Ya que se eligió al ensayo 10 como el de mejores resultados, se observa que para este ensayo la ganga se encuentra en un 6,04 %, valor que se encuentra por debajo del 10 % de granos contados, lo que indica que para este ensayo el porcentaje de ganga presente en la muestra es relativamente bajo.

Tabla 3.10. Resumen de los porcentajes de granos mixtos contados en las muestras de ferritas acumuladas de los ensayos del 1 al 12

| Tamaño de partícula (μm) | Malla | MIXTOS (%) | | | |
|---------------------------------------|-------|------------|-------|-------|---------|
| | | 600°C | 800°C | 900°C | 1 000°C |
| >177 | 80 | 8,55 | 6,89 | 10,51 | 10,33 |
| 177 - 149 | 100 | 13,48 | 5,78 | 11,04 | 9,58 |
| 149 - 105 | 140 | 10,85 | 7,61 | 8,40 | 6,56 |
| PROMEDIO | | 9,13 | | | |

La Tabla 3.10 muestra que como consecuencia del ciclo de separación magnética el porcentaje de granos mixtos que contamina la porción de ferritas llega hasta un máximo de 13,48 % para el ensayo 5 y un mínimo de 5,78 % correspondiente al ensayo 6, con un promedio de mixtos contaminantes de 9,13 %. Para el ensayo 10 se observa que los mixtos se encuentran en un 7,61 %, valor que se encuentra por debajo del 10 % de granos totales, lo cual no representa mayor inconveniente ya que los granos mixtos también exhiben respuesta frente a un estímulo magnético, lo cual se observó al acercarse un imán de neodimio.

Tabla 3.11. Resumen de los porcentajes de granos de ferritas libres contados en las muestras denominadas como ferritas acumuladas de los ensayos del 1 al 12

| Tamaño de partícula (μm) | Malla | FERRITAS (%) | | | |
|---------------------------------------|-------|--------------|-------|-------|---------|
| | | 600°C | 800°C | 900°C | 1 000°C |
| >177 | 80 | 78,21 | 89,40 | 83,35 | 89,18 |
| 177 - 149 | 100 | 79,30 | 90,67 | 84,48 | 89,75 |

Tabla 3.11. Resumen de los porcentajes de granos de ferritas libres contados en las muestras denominadas como ferritas acumuladas de los ensayos del 1 al 12 (continuación...)

| Tamaño de partícula (μm) | Malla | FERRITAS (%) | | | |
|---------------------------------------|-------|--------------|-------|-------|---------|
| | | 600°C | 800°C | 900°C | 1 000°C |
| 149 - 105 | 140 | 85,46 | 86,35 | 85,73 | 90,92 |
| PROMEDIO | | 86,07 | | | |

La Tabla 3.11 muestra que después del ciclo de separación magnética el porcentaje de ferritas llega hasta un máximo de 90,92 % para el ensayo 12 y un mínimo de 78,21 % correspondiente al ensayo 1, con un promedio de ferritas separadas de 86,07 %. Para el ensayo 10 se observa que el porcentaje de ferritas se encuentra en un 86,35 %, valor que indica que los ciclos de separación magnética dan buenos resultados.

3.2.4.3 Resultados de la caracterización mineralógica por DRX

La caracterización mineralógica tiene por objeto determinar las fases cristalinas presentes en los compuestos de los materiales denominados como: calcinado, no magnético libre, no magnético mixto, ceramizado y ferritas, obtenidos de los procesos de calcinación y ciclos de separación magnética. El difractograma de las ferritas se presenta en la Figura 3.17 y los difractogramas restantes se presentan en el Anexo X. La Tabla 3.12 muestra los resultados cualitativos y cuantitativos.

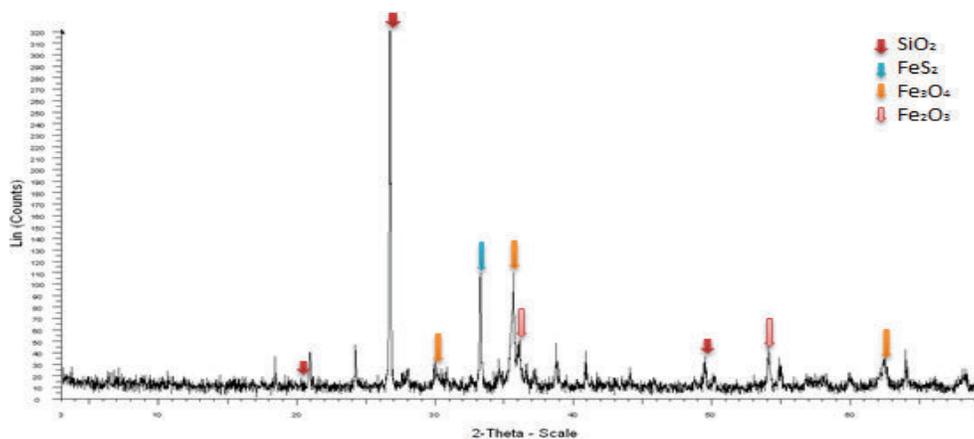


Figura 3.17. Difractograma de las ferritas separadas (correspondientes al ensayo N° 10)

Tabla 3.12. Resultados cualitativos y cuantitativos obtenidos mediante el análisis de DRX

| Mineral | Muestra | | | | |
|---------------------|-----------|--------------|--------------|------------|----------|
| | Calcinado | No magnético | No magnético | Ceramizado | Ferritas |
| | (%) | libre | mixto | | (%) |
| Hematita | 5 | - | - | ✓ | 15 |
| Magnetita | 2 | - | - | ✓ | 4 |
| Cuarzo α | 59 | ✓ | ✓ | ✓ | 38 |
| Pirita | 3 | - | - | - | 8 |
| Calcopirita | - | - | - | - | - |
| Olivina | - | - | - | ✓ | 4 |
| Carbonato de calcio | - | ✓ | ✓ | ✓ | - |
| Plagioclasas | 20 | ✓ | ✓ | ✓ | 14 |
| Ferrosilicio | - | - | ✓ | ✓ | - |
| Moscovita | 4 | ✓ | - | - | 4 |
| Enstatita | 3 | - | - | - | 5 |
| Diópsido | 4 | - | - | - | 8 |

En la Tabla 3.12 se puede observar que fue posible detectar hematita (Fe_2O_3) y magnetita (Fe_3O_4) cristalizadas en la muestra de material calcinado. Así mismo, se observa que el porcentaje de ambos minerales presentes también en la muestra de ferritas aumenta con respecto al porcentaje de estos minerales en la muestra de material calcinado, lo cual indica que los ciclos de separación magnética sí permitieron concentrar dichos minerales. Además, se puede observar la presencia un 3 % de pirita (FeS_2), la cual quizá se quedó sin reaccionar por falta de tiempo de estadía de los relaves en el horno de calcinación.

También se detectaron varios minerales pertenecientes al grupo de las plagioclasas ($(Na, Ca)(Si, Al)_3O_8$), los cuales estuvieron presentes tanto en las muestras de material calcinado, no magnético libre, no magnético mixto y ferritas. Este resultado es lógico ya que las plagioclasas, por los elementos que las conforman, no deberían presentar un comportamiento magnético y por tal motivo

fue posible separar una porción de éstas en las fracciones de material no magnético libre y no magnético mixto; sin embargo, su presencia en el material ceramizado y ferritas (que presentan un comportamiento magnético), se ve explicado en que el aluminio al ser un elemento paramagnético como se explica en la sección 1.2.1.3, pudo actuar como un conductor del campo magnético al momento se pasar por el separador magnético y por tal motivo estos minerales fueron clasificados por el equipo como material magnético.

Otros minerales detectados de gran relevancia fueron la olivina $((Mg, Fe)_2SiO_4)$, el ferrosilicio $(FeSi_2)$, la enstatita $((Mg, Fe)_2Si_2O_6)$ y el diópsido $((Fe, Mg)CaSi_2O_6)$, los cuales al contener hierro en su estructura son susceptibles a ser materiales ferrimagnéticos, por tal motivo se encuentran formando parte del material denominado como ferritas.

Finalmente, la cantidad de cuarzo (SiO_2) encontrado es alta, y el difractograma presenta picos característicos de éste, muy bien definidos, por lo que podría existir un solapamiento de picos de ferritas con fases presentes en concentraciones muy bajas.

3.2.4.4 Resultados de la determinación de la composición química por espectrometría de dispersión de rayos X característicos (EDS)

Para la determinación de la composición química elemental semi-cuantitativa por EDS del microscopio electrónico de barrido ASPEX, se analizó la muestra de ferritas obtenida de los ciclos de separación magnética del ensayo N° 10. La fotografía de la porción de ferritas analizadas se muestra en la Figura 3.18.

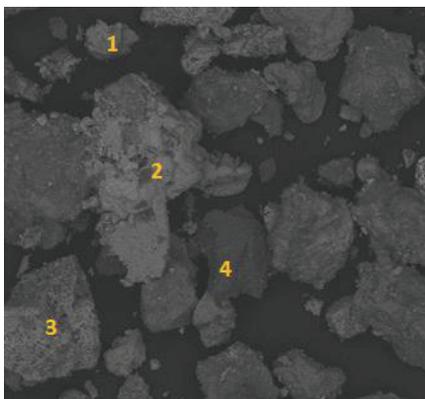


Figura 3.18. Fotografía de la muestra de ferritas obtenidas en el ensayo N° 10 capturada con la video cámara interna del equipo de microscopía electrónica de barrido ASPEX, en la cual se realizó el análisis químico elemental semi-cuantitativo, tanto de la muestra general como de cuatro granos específicos. Acercamiento 255 X

Es importante mencionar que se analizó la composición elemental tanto de los elementos que existen en toda la muestra, como en cuatro granos específicos, elegidos por su morfología y composición.

Los resultados de la composición elemental se presentan en las Tabla 3.13 y 3.14.

Tabla 3.13. Resultados del análisis químico elemental semi-cuantitativo por EDS de las ferritas obtenidas del ciclo de separación magnética del ensayo N° 10. Análisis realizado en toda la muestra

| Elemento | % en peso | Elemento | % en peso | Elemento | % en peso |
|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|
| Na | 0,0 | Cr | 0,6 | Cd | 0,0 |
| Mg | 4,6 | Mn | 0,0 | Sn | 1,6 |
| Al | 7,8 | Fe | 14,0 | Sb | 0,0 |
| Si | 28,0 | Co | 4,0 | Te | 0,0 |
| P | 1,1 | Ni | 0,5 | Ba | 0,7 |
| S | 12,6 | Cu | 0,9 | La | 0,0 |
| Cl | 5,0 | Zn | 1,4 | Au | 0,0 |
| K | 2,9 | As | 0,6 | Pb | 0,0 |
| Ca | 0,6 | Zr | 0,0 | Bi | 13,2 |
| Ti | 0,0 | Ag | 0,0 | | |

Al analizar los resultados de la Tabla 3.13 se observa que las ferritas aún después de pasar por el ciclo de separación magnética, contienen alto porcentaje de silicio; lo cual indica que, a pesar de que las ferritas obtenidas presentan un comportamiento altamente magnético ante un imán de neodimio, dentro de los granos que conforman la muestra deben existir granos mixtos, es decir, granos formados en parte por material magnético (ferritas) y por material no magnético (cuarzo y feldespatos), motivo por el cual estos granos mixtos pasaron a la porción magnética al momento de realizarse el ciclo de separación magnética.

Otro elemento relevante es el hierro, ya que forma parte de la estructura de las ferritas. Al comparar la Tabla 3.5, correspondiente a la muestra de relaves con la Tabla 3.13, se puede observar que el contenido de hierro aumentó significativamente de 3,7 % a 14 %, lo cual indica que el ciclo de separación magnética tuvo resultados favorables. Además, se verifica que aún existe azufre, que a lo mejor representa una porción que quedó sin reaccionar, lo cual indica que uno de los factores que pudo haber afectado fue el tiempo de estadía en el horno o a su vez la velocidad de calentamiento con la cual se trabajó.

Finalmente, se observa que existen pequeños porcentajes de titanio, níquel, magnesio, bario, zinc, cromo, aluminio y cobre; elementos que pueden encontrarse formando parte de la estructura de las ferritas.

Tabla 3.14. Resultados del análisis químico elemental semi-cuantitativo por EDS para cuatro granos específicos en la muestra de ferritas obtenidas del ciclo de separación magnética del ensayo N° 10

| Elemento | Grano 1 (% p/p) | Grano 2 (% p/p) | Grano 3 (% p/p) | Grano 4 (% p/p) |
|----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Na | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Mg | 4,8 | 0,4 | 0,8 | 0,4 |
| Al | 10,1 | 0,8 | 5,0 | 2,1 |
| Si | 15,6 | 3,7 | 9,7 | 77,4 |
| P | 2,3 | 0,7 | 0,4 | 0,9 |
| S | 18,8 | 0,1 | 4,6 | 3,9 |
| Cl | 4,9 | 0,2 | 1,2 | 4,6 |

Tabla 3.14. Resultados del análisis químico elemental semi-cuantitativo por EDS para cuatro granos específicos en la muestra de ferritas obtenidas del ciclo de separación magnética del ensayo N° 10 (continuación...)

| Elemento | Grano 1 (% p/p) | Grano 2 (% p/p) | Grano 3 (% p/p) | Grano 4 (% p/p) |
|----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| K | 4,4 | 0,0 | 2,0 | 1,7 |
| Ca | 0,0 | 0,2 | 0,0 | 0,0 |
| Ti | 0,8 | 1,1 | 0,4 | 0,0 |
| Cr | 0,5 | 0,0 | 1,1 | 0,2 |
| Mn | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Fe | 12,9 | 77,7 | 53,8 | 0,2 |
| Co | 0,0 | 5,4 | 6,2 | 0,0 |
| Ni | 0,2 | 2,0 | 0,0 | 0,0 |
| Cu | 0,0 | 1,5 | 0,0 | 0,3 |
| Zn | 0,0 | 0,0 | 1,5 | 0,3 |
| As | 0,0 | 2,0 | 0,0 | 0,0 |
| Ag | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Cd | 0,0 | 0,0 | 1,3 | 0,0 |
| Sn | 0,0 | 0,0 | 1,9 | 0,3 |
| Sb | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,1 |
| Ba | 0,0 | 0,0 | 1,5 | 1,6 |
| La | 2,6 | 2,2 | 1,6 | 0,0 |
| Au | 0,5 | 0,4 | 1,5 | 0,0 |
| Pb | 0,0 | 1,7 | 0,0 | 0,9 |
| Bi | 21,8 | 0,0 | 5,6 | 4,3 |

Al analizar los resultados de la Tabla 3.14 se observa que para el caso del grano 1, éste presenta 4,8 % de magnesio, 10,1 % de aluminio, 15,6 % de silicio y 12,9 % de hierro, a más de un pequeño porcentaje de titanio y cromo, composiciones que indican que se puede tratar de un grano mixto de ferritas. El grano 2, puede ser una ferrita, ya que el porcentaje de silicio presente es muy bajo, apenas de 3,7 %, y el porcentaje de hierro es del 77,7 %, porcentaje que es inclusive superior al porcentaje característico de minerales como magnetita

(72,4 %) y hematita (70 %), de acuerdo con lo señalado en las secciones 1.2.1.2.3.2 y 1.2.1.2.3.3. Además, presenta pequeñas concentraciones de titanio, níquel, y cobre, lo que indica que la ferrita puede estar dopada con estos metales. El grano 3, también puede tratarse de una ferrita sólo que con menor concentración de hierro y tal vez puede estar dopada con cinc o con cobre. El grano 4, presenta 77,4 % de silicio, 3,9 % de azufre y apenas 0,2 % de hierro, lo que indica que podría tratarse de un grano de cuarzo con una pequeña incrustación de un sulfuro, lo cual coincide con lo indicado en la revisión bibliográfica, en donde se indica que el yacimiento del cual provienen la materia prima presenta una estructura mineralógica formada por cuarzo con incrustaciones de sulfuros. La presencia de este grano, en particular, indica que algunos granos no magnéticos continúan contaminando la muestra de ferritas, aún después de los ciclos de separación magnética.

Finalmente, se puede decir de manera general, que se detectó la presencia de oro, pero en una concentración muy baja, lo cual indica que aún existe oro en los relaves de la empresa SODIREC.

Con la finalidad de completar el análisis de las ferritas, se tomó una fotografía a los granos que conforman la misma muestra con la que se realizó el análisis químico, pero esta vez con la cámara integrada del equipo MEB Tescan-Vega, ya que cuenta con mejor resolución de imágenes, dicha fotografía se muestra en la Figura 3.19.



Figura 3.19. Fotografía de granos procedentes de la muestra del ensayo N° 10 capturada con la video cámara interna del equipo de microscopía electrónica de barrido Tescan-Vega. Acercamiento 500 X

En la Figura 3.19 se pueden observar dos granos relevantes, el primero un grano que presenta porosidades, al cual se lo identificó como un óxido de hierro, ya que coincide con lo expresado por Días (1997), quien enuncia que en condiciones oxidantes la pirita y pirrotina se transforman en hematita porosa (p. 95). Además, granos de esta apariencia fueron analizados con el MEB ASPEX y se determinó que son los granos con mayores concentraciones de hierro en su estructura, lo cual se determinó en el análisis de los resultados presentados en la Tabla 3.14 (granos 2 y 3). Y se observa un segundo grano que por sus características físicas y por el tipo de cristalización que presenta, podría tratarse de cuarzo, ya que granos como éste (muy similares al grano 4 de la Figura 3.18) presentaron alto contenido de silicio en su estructura de acuerdo con los análisis EDS del MEB ASPEX.

3.2.4.5 Resultados de la determinación de la composición química por espectroscopía de plasma inducido por láser (LIBS)

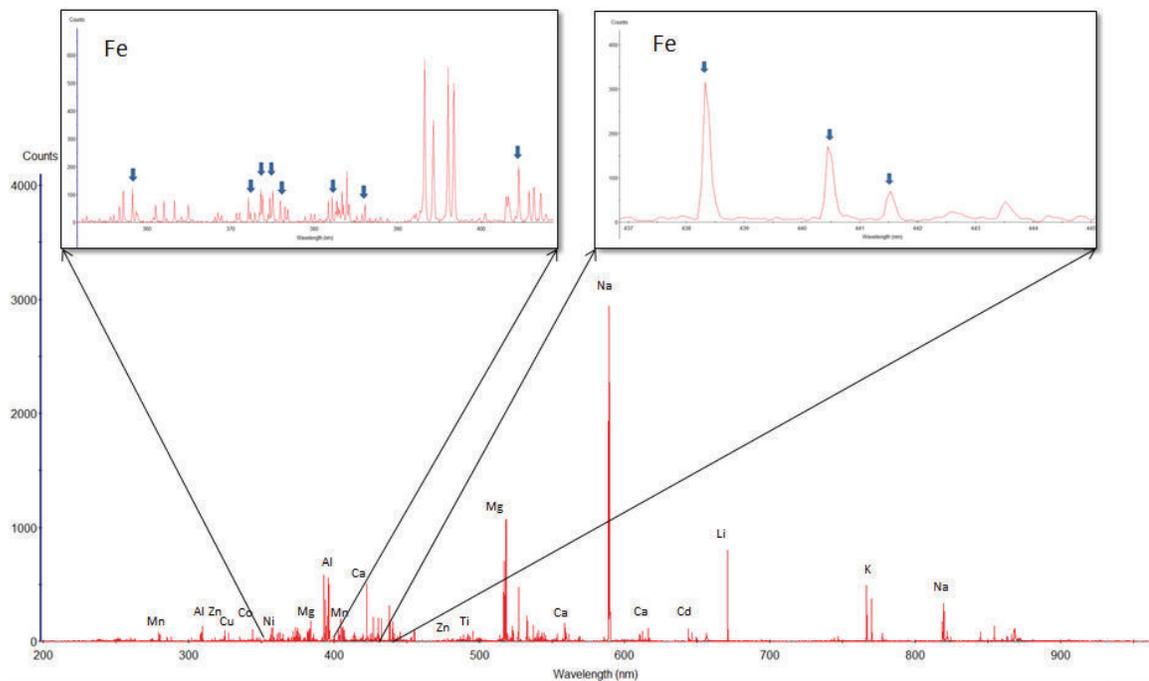


Figura 3.20. Espectro LIBS (con el eje de longitud de onda completo) realizado a la muestra de ferritas correspondientes al ensayo N° 10. Se presentan acercamientos a los segmentos del espectro en donde se pueden identificar los picos característicos del hierro

En la Figura 3.20 se puede observar el espectro LIBS para la muestra de ferritas obtenidas en el ensayo N° 10, los elementos significativos detectados fueron Fe, Mn, Mg, Ni, Ti, Co, Al, Cu, Zn, Ca, Li, K y Na. El cobre, que como ya se había mencionado tiene origen en la calcopirita ($CuFeS_2$), si bien fue detectado mediante esta técnica de análisis, sin embargo, su mineral no fue detectado por DRX. Esto puede tener origen en que su contenido es menor que el 1 % y, por tal motivo, no fue posible detectarlo por esta técnica de análisis. El hierro puede tener origen en la pirita (FeS_2), la hematita (Fe_2O_3) y la magnetita (Fe_3O_4); el cinc, el manganeso, el magnesio y el níquel pueden estar formando parte de la estructura de las ferritas junto con la hematita y magnetita; el titanio en el rutilo (TiO_2) y el potasio, el sodio, el calcio y el aluminio pueden encontrarse formando feldespatos.

3.3 RESULTADOS DEL DISEÑO DEL PROCESO PARA LA OBTENCIÓN DE FERRITAS

Para el diseño del proceso se elaboraron los diagramas de bloques y de flujo para la obtención de una tonelada mensual de ferritas a partir del tratamiento de desechos sólidos provenientes de los procesos de extracción de oro. Dicho proceso tiene base en los resultados obtenidos a escala de laboratorio, en el balance de masa y en la selección y dimensionamiento de equipos. A continuación se realizó el balance de energía y luego una descripción detallada del proceso.

3.3.1 DEFINICIÓN DEL DIAGRAMA DE BLOQUES (BFD) Y DEL DIAGRAMA DE FLUJO (PFD) DEL PROCESO PARA LA OBTENCIÓN DE FERRITAS

Para la definición del diagrama de bloques (BFD) y el dimensionamiento de los equipos para el diseño del proceso, se analizaron los resultados obtenidos en los ensayos del 1 al 12, en donde existe ceramización parcial, y se tomó como referencia al ensayo con mejores resultados. Por tal motivo, las condiciones de

operación y los rendimientos de los procesos tienen origen en el ensayo N° 10, es decir, en el ensayo realizado para relaves con tamaño de partícula entre 105 - 149 μm calcinados a 800 °C.

A partir de los resultados de las mejores condiciones antes mencionadas obtenidas a escala de laboratorio, y de la capacidad de procesamiento para la obtención de una tonelada de ferritas mensual, se define la alternativa tecnológica, la cual comprende las operaciones unitarias de tamizado, secado, desaglomeración, calcinación y separación magnética. Las Tablas de la 3.15 a la 3.18 muestran las condiciones de cada operación unitaria, basadas en los resultados experimentales obtenidos a escala de laboratorio.

Tabla 3.15. Condiciones de operación del tamizado

| | |
|---|--------|
| Tipo de tamizado | Húmedo |
| Separador estático 1 | |
| Tamaño de abertura de la malla N° 100 (μm) | 149 |
| Porcentaje de sólidos a la entrada (%) | 10 |
| Separador estático 2 | |
| Tamaño de abertura de la malla N° 140 (μm) | 105 |

Tabla 3.16. Condiciones de operación para el secado

| | |
|---|---------|
| Tamaño de partícula de entrada al secador (μm) | 105-149 |
| Tiempo de secado (h) | 24 |
| Temperatura de operación (°C) | 110 |

Tabla 3.17. Condiciones de operación para la calcinación

| | |
|---|------|
| Velocidad de calentamiento (°C/min) | 1 |
| Temperatura de operación (°C) | 800 |
| Tiempo de calcinación a la temperatura de operación (h) | 2 |
| Velocidad de enfriamiento (°C/min) | 1 |
| Temperatura a la salida del horno (°C) | ~110 |

Tabla 3.18. Condiciones de operación para la separación magnética

| | |
|-------------------------------|---------|
| Tipo de separación magnética | Seca |
| Velocidad del cilindro (rpm) | ~70 |
| Corriente (A) | 2,5-3,0 |
| Nivel de vibración (unidades) | 60 |

A partir de las condiciones de operación detalladas en las tablas anteriores se realizaron los balances de masa y de energía.

3.3.1.1 Balance de masa para la producción de una tonelada mensual de ferritas

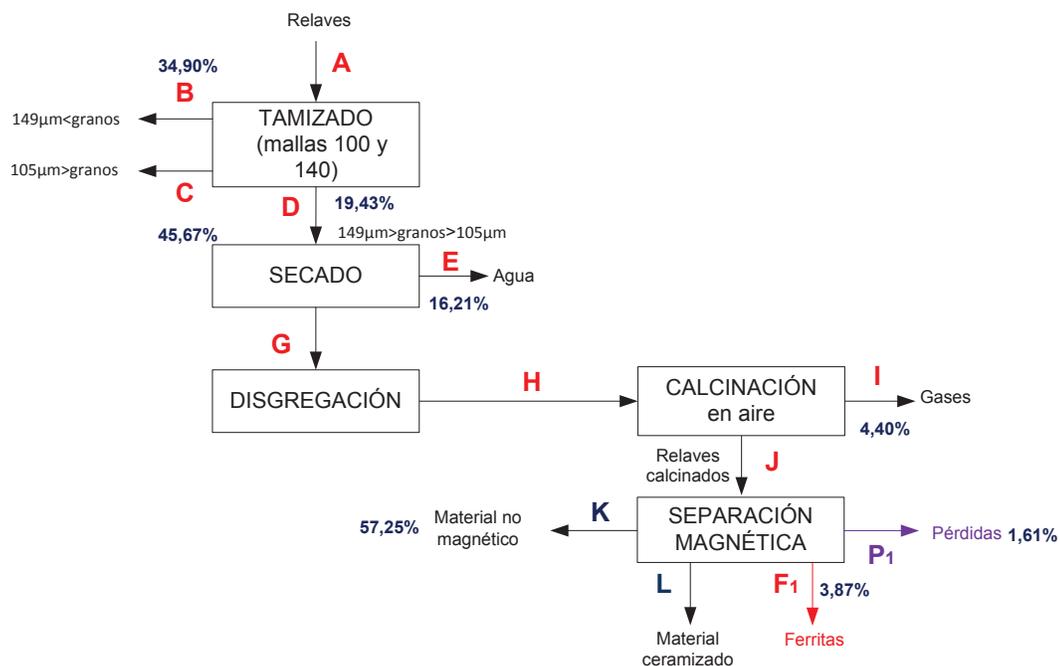


Figura 3.21. Diagrama de bloques para realizar el balance de masa para la obtención de una tonelada mensual de ferritas

Los porcentajes mostrados en la Figura 3.21 fueron determinados en las diferentes etapas del desarrollo experimental de la investigación.

Para el tamizado a escala industrial, se usará un separador estático con malla N° 100, lo que permitirá clasificar a los relaves en dos grupos, el retenido

(granos $>149 \mu m$) que será desechado, y el pasado (granos $<149 \mu m$) que continuará y pasará al separador estático con malla N° 140. El porcentaje de esta fracción fue determinado mediante el análisis granulométrico realizado a los relaves sin tratamiento. Como se puede ver en la Tabla 3.2, los porcentajes que se retienen sobre la malla N° 100 son 10,43 %, 17,22 % y 7,26 % correspondientes a las mallas N° 60, 80 y 100 respectivamente, sumando estos valores da un total de 45,67 %, que equivale al porcentaje de material de desecho que se logrará con el primer separador estático.

La fracción que pasa al separador estático con malla N° 140 es clasificado nuevamente en dos porciones, el retenido ($105 \mu m >$ granos $>149 \mu m$) que continuará con el proceso, y el pasado (granos $< 105 \mu m$) que será desechado. Los porcentajes de estas corrientes se determinaron mediante el análisis granulométrico. Como se puede ver en la Tabla 3.2, el porcentaje que se retiene sobre la malla N° 140 es 19,43 %, que representa a la masa con granulometría esperada. Para las mallas N° 200, 325 y base se tienen porcentajes retenidos de 16,68, 11,48 y 17,52 %, respectivamente; sumando estos valores da un total de 34,9 %, que equivale al porcentaje de material de desecho que se conseguirá con el segundo separador estático.

Para el secado, el porcentaje de humedad fue determinado experimentalmente como parte de la determinación de la densidad aparente de los relaves. Se pesó una masa de relaves húmedos, luego se los sometió a secado por 24 h a $110 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y nuevamente se los pesó, determinando que se encontraban constituidos por 16,21 % de agua.

En la calcinación, el porcentaje de pérdidas constituye el valor determinado en el ensayo N° 10, en donde se determinó que existió 4,40 % de pérdidas en forma de gases, como se puede ver en la Figura 3.11.

Finalmente, en la separación magnética el porcentaje de material no magnético fue determinado por la suma de los porcentajes de material no magnético libre y no magnético mixto obtenidos en el ensayo N° 10 con la 1ra y 2da separaciones

magnéticas, como se puede ver en la Tabla AVIII.4. Es decir, 20,46 y 36,79 % respectivamente, dando un total de 57,35 %. Mediante este ensayo también se estableció el porcentaje de ferritas separadas, como se puede ver en la Figura 3.12 o en la Tabla AVIII.4 en donde se muestra que el porcentaje de ferritas es de 3,87 %. Además se determinó el porcentaje de pérdidas de material que corresponde a 1,61 %.

Un resumen de las corrientes de entrada, intermedias y de salidas obtenidas con el balance de masa, se muestra en la Tabla 3.19 y los cálculos en el Anexo XI.

Tabla 3.19. Corrientes obtenidas con el balance de masa para la producción de una tonelada mensual de ferritas *

| Corriente | F1 | L | K | P1 | J | I | H | G | E | D | C | B | A |
|-----------|------|------|-------|-----|-------|------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|--------|
| (t/mes) | 1,0 | 9,6 | 14,8 | 0,4 | 25,8 | 1,2 | 27,0 | 27,0 | 5,2 | 32,2 | 75,8 | 57,9 | 165,9 |
| (kg/mes) | 1000 | 9622 | 14779 | 417 | 25818 | 1188 | 27006 | 27006 | 5224 | 32230 | 75780 | 57909 | 174034 |
| (kg/día) | 33 | 321 | 493 | 14 | 861 | 40 | 900 | 900 | 174,1 | 1074,3 | 2526 | 1930,3 | 5530,6 |

* Ver la nomenclatura en la Figura 3.21

La corriente A representa la masa de relaves total que se debe acumular en un día; por tal motivo, al dividir la masa de relaves que se necesita por día para la masa de relaves que se obtiene por hora del proceso de extracción, se obtiene el tiempo (en horas) necesario para acumular la materia para un día de trabajo, determinándose que este valor es de 9,88 h.

3.3.1.2 Dimensionamiento de equipos

Se seleccionaron los equipos necesarios para llevar a cabo cada operación unitaria, empezando por el tamizado en húmedo, para el cual se seleccionaron dos separadores estáticos con mallas N° 100 y 140 conectados en serie. El requerimiento para la alimentación de los relaves, para el primer separador estático con malla N° 100, es que la pulpa debe contener 10 % de sólidos, por lo cual se debe acondicionar a los relaves provenientes de la extracción de oro en un tanque con agitación al cual se le agrega agua hasta alcanzar dicha condición.

Para esto, es necesario calcular la densidad de la pulpa bajo estas condiciones, es decir un volumen de sólidos del 10 %, aplicando la Ecuación 3.1. Se toma una densidad del agua de 1 000 kg/m³ y una densidad real de los relaves de 2 800 kg/m³.

$$\delta_{pulpa} = \frac{V_{sólido(\%)}(\delta_{real} - \delta_{agua})}{100} + \delta_{agua} \quad [3.1]$$

Donde:

δ_{pulpa} : Densidad de la pulpa (10 % de sólidos)

δ_{real} : Densidad real

δ_{agua} : Densidad del agua

$V_{sólido(\%)}$: Porcentaje del volumen de sólidos

Obteniéndose así una densidad de pulpa de 1 180 kg/m³. Con esta densidad y los 560 kg/h, que es la masa de la pulpa del “underflow” que viene de los procesos de extracción de oro, se determina el volumen de la pulpa al 10 % de sólidos, aplicando la ecuación 3.2. Este dato es necesario para la determinación del volumen del líquido (agua), que debe ser agregada para lograr dicho acondicionamiento de la pulpa, para lo cual se usan las Ecuaciones 3.3 y 3.4, con las cuales se obtiene un volumen de agua de 0,47 m³.

$$V_{pulpa} = \frac{m_{pulpa}}{\delta_{pulpa}} \quad [3.2]$$

$$V_{sólido} = \frac{V_{pulpa}(\delta_{pulpa} - \delta_{agua})}{(\delta_{real} - \delta_{agua})} \quad [3.3]$$

$$V_{líquido} = V_{pulpa} - V_{sólido} \quad [3.4]$$

Donde:

V_{pulpa} : Volumen de la pulpa

m_{pulpa} : Masa de la pulpa

δ_{pulpa} : Densidad de la pulpa (10 % de sólidos)

$V_{sólido}$: Volumen del sólido

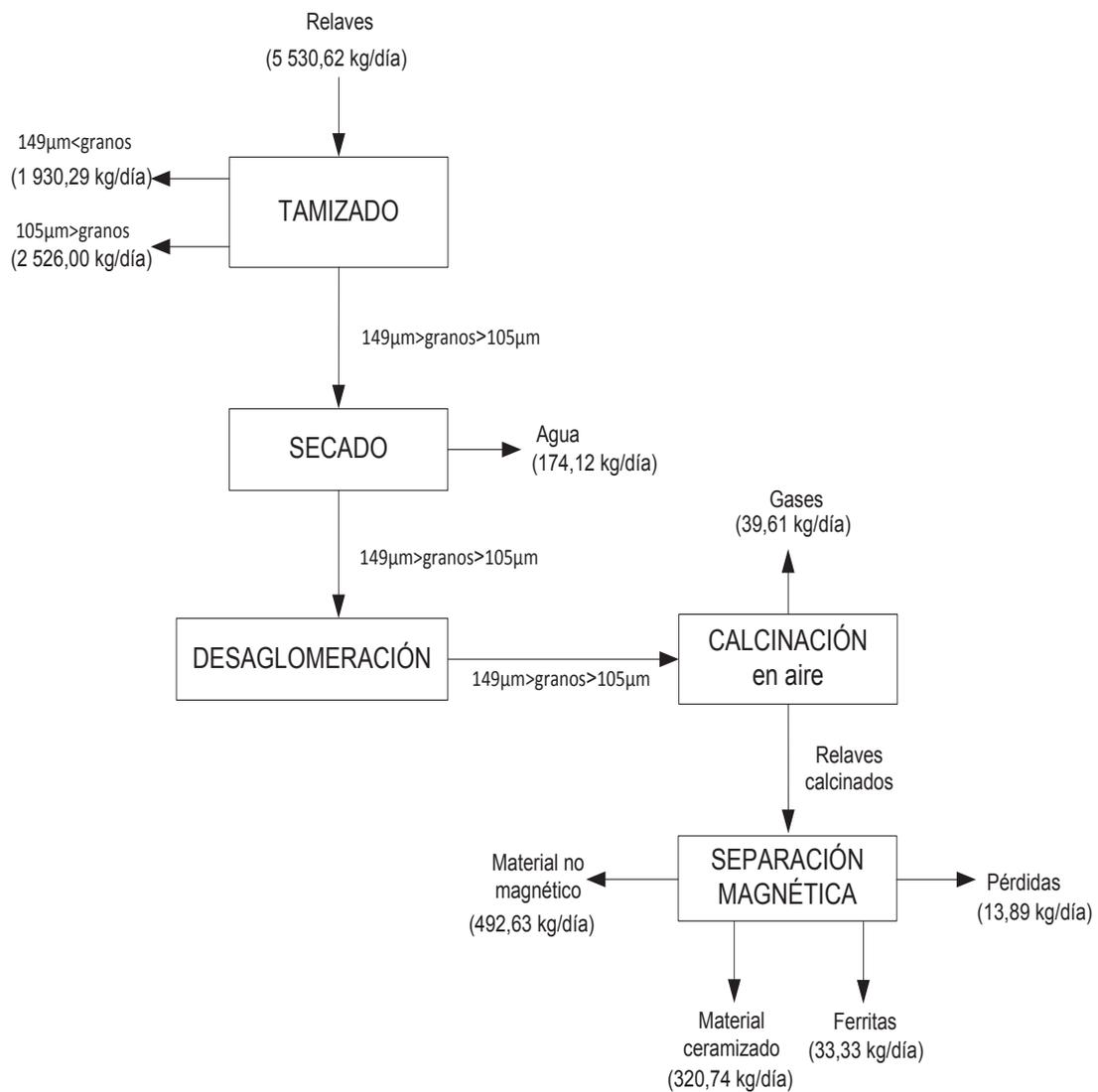
- $\delta_{pulp\ U/F}$: Densidad de la pulpa del “underflow”
 δ_{real} : Densidad real
 δ_{agua} : Densidad del agua
 $V_{liquido}$: Volumen del líquido (agua)

Con lo que se obtiene un volumen de agua de 0,27 m³, equivalente a una masa de 270 kg por cada 560 kg/h de relaves, ó 2 654,6 kg/día, ya que un día de trabajo comprende 9,88 h.

El tanque de acondicionamiento de la pulpa será diseñado para albergar la mezcla de relaves con agua por cada hora de relaves acumulados, es decir, para un volumen de pulpa de 0,47 m³; si se considera un sobredimensionamiento del 25 %, el volumen total es 0,59 m³.

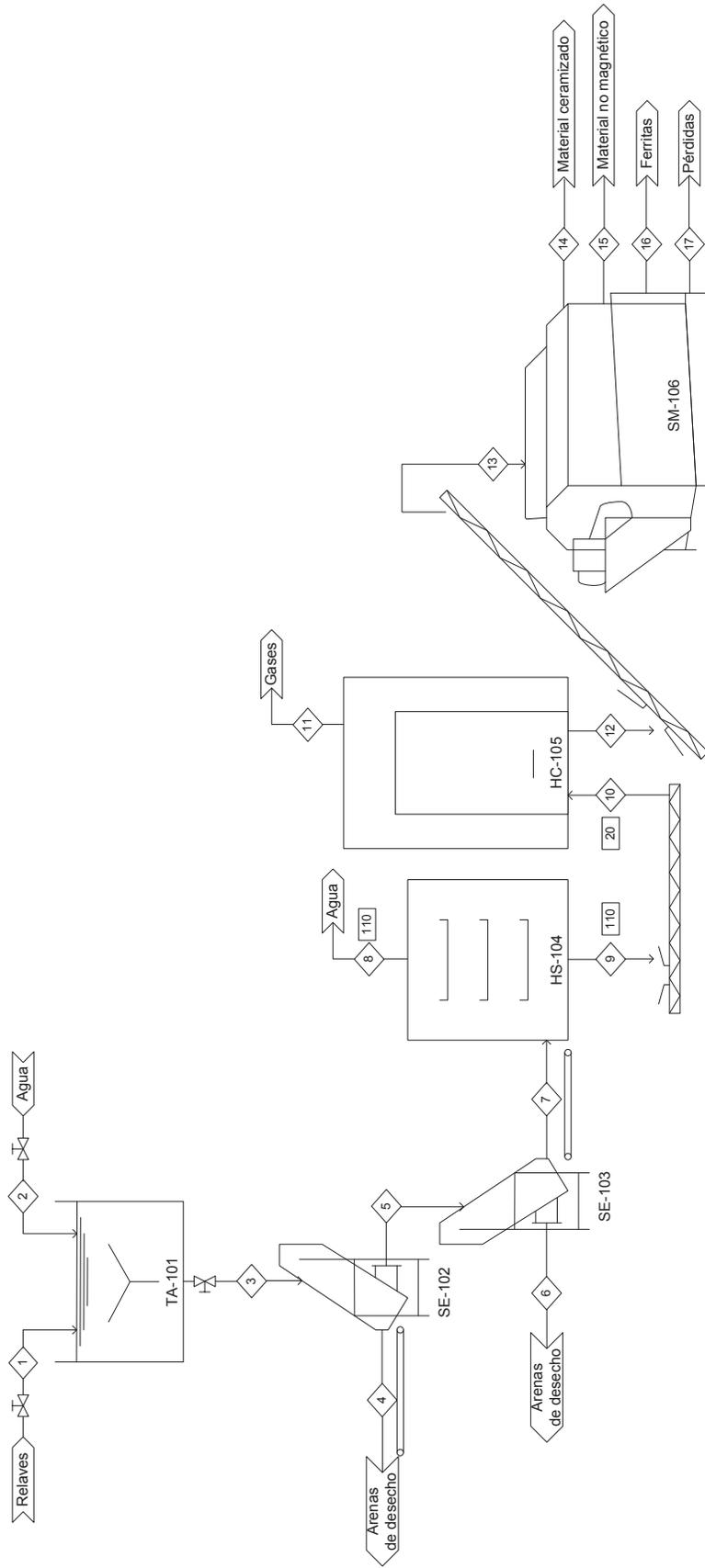
El horno de secado debe tener un hogar con capacidad para acoger 1 074,3 kg/día de relaves, por lo que su volumen se calcula con este parámetro y con el valor de la densidad aparente (1 510 kg/m³) determinada en la caracterización física. El resultado es un volumen de 0,72 m³. El mismo cálculo se realiza para el horno de calcinación, que debe tener una capacidad para calcinar 900,2 kg/día de relaves secos; en este caso se toma el valor de la densidad real (2 800 kg/m³), también determinada en la caracterización física, obteniéndose como resultado un volumen de 0,32 m³. Finalmente la capacidad de procesamiento del separador magnético debe ser de 860,6 kg/día de material calcinado.

Luego se elaboraron los diagramas de bloques (BFD) y de flujo (PFD) que se observan en las Figuras 3.22 y Figura 3.23, respectivamente.



| | |
|---|-----|
|  ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL | |
| “Proceso para la obtención de ferritas” | |
| Línea de Ferritas | |
| María José Bautista Moya | 1/1 |
| 10 de abril de 2015 | BFD |

Figura 3.22. Diagrama de bloques del proceso para la obtención de ferritas a partir del tratamiento de desechos sólidos provenientes de los procesos de extracción de oro



| Número de corriente | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|
| Estado | S/L | L | S/L | S/L | S/L | S/L | S/L | G | S | S | G | S | S | S | S | S | S |
| Temperatura (°C) | - | - | - | - | - | - | - | 110 | 110 | 20 | - | - | - | - | - | - | - |
| Flujo mástico (kg/día) | 5801,1 | 2653,5 | 8454,7 | 3351,5 | 5103,2 | 3976,3 | 1126,9 | 226,7 | 900,2 | 900,2 | 39,61 | 860,6 | 860,6 | 320,74 | 492,63 | 33,33 | 13,89 |
| Relaves (kg/día) | 5801,1 | - | 5801,1 | 2024,7 | 3776,4 | 2649,6 | 1126,9 | - | 900,2 | 900,2 | - | 860,6 | 860,6 | - | - | - | - |
| Agua (kg/día) | - | 2653,5 | 2653,5 | 1326,8 | 1326,8 | 1526,8 | - | 226,7 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Gases (kg/día) | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 39,61 | - | - | - | - | - | - |
| Material ceramizado (kg/día) | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 320,74 | - | - | - |
| Material no magnético (kg/día) | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 492,63 | - | - | - |
| Ferritas (kg/día) | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 33,33 | - |
| Pérdidas (kg/día) | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 13,89 |

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
 "Proceso para la obtención de ferritas"
 Línea de Ferritas
 María José Bautista Moya
 10 de abril de 2015

Figura 3.23. PFD del proceso para la obtención de una tonelada de ferritas mensual

Una vez determinadas las capacidades de los equipos y sus tiempos de operación se realiza el balance de energía por día, el cual se detalla en la Tabla 3.20.

Tabla 3.20. Balance de energía por día para los equipos eléctricos en el proceso de obtención de ferritas

| Proceso | Equipo | Cantidad | Potencia (kW) | Tiempo (h) | Energía (kWh)/día |
|-----------------------------|------------------------|----------|---------------|------------|-------------------|
| Tamizado | Separador estático | 2 | NA | NA | NA |
| | Tanque con agitación | 1 | 0,19 | 9,88 | 1,9 |
| Secado | Horno para secado | 1 | 18 | 24,0 | 432,0 |
| Calcinación | Horno para calcinación | 1 | 50 | 26,5 | 662,5 |
| Separación magnética | Separador magnético | 1 | 7,5 | 1,0 | 2,5 |
| Total (kWh) | | | | | 1098,9 |

3.3.1.3 Plano de simbología y abreviaturas usadas en los equipos y líneas de corriente

Tabla 3.21. Simbología y abreviaturas usadas en los equipos y líneas de corriente

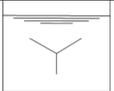
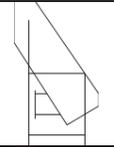
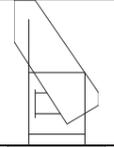
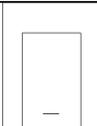
| Símbolo | Nomenclatura | Equipo |
|---|--------------|-----------------------------|
|  | TA-101 | Tanque de acondicionamiento |
|  | SE-102 | Separador estático |
|  | SE-103 | Separador estático |
|  | HS-104 | Horno de secado |

Tabla 3.21. Simbología y abreviaturas usadas en los equipos y líneas de corriente (continuación...)

| Símbolo | Nomenclatura | Equipo |
|---|--------------|-----------------------------|
|  | HC-105 | Horno de calcinación |
|  | SM-106 | Separador magnético |
|  | -- | Bandera de entrada o salida |
|  | -- | Identificador de corriente |
|  | -- | Temperatura del proceso |

3.3.1.4 Descripción detallada del proceso

El proceso se inicia con la recolección del “underflow” entregado por el hidrociclón que se encuentra instalado para clasificar los relaves provenientes de los procesos de extracción de oro, antes de ser depositados en la piscina de lixiviación N° 5. Dicha recolección se hace en el tanque con agitación TA-101, por 1 h, luego se alimenta agua a temperatura ambiente hasta alcanzar una pulpa con el 10 % de sólidos. Esta recolección intermitente de relaves se la realizará por 9,88 h diarias.

A continuación se vierte la pulpa sobre el separador estático SE-102, con el que se obtienen dos porciones de relaves: la porción retenida sobre la malla que es desechada llevándose consigo una cantidad de agua de alrededor del 50 % y la que pasa, que continúa hasta el segundo separador estático SE-103. De éste también se obtienen dos fracciones, la fracción pasada que también se considera contiene el 50 % de agua restante, y la fracción retenida que presenta una humedad del 16,21 % (porcentaje determinado mediante la caracterización de la materia prima).

Una vez obtenida la fracción de relaves con la granulometría de interés, éstos serán conducidos por medio de una banda transportadora hacia el horno de

secado HS-104, en el cual se acumularán 1 126,9 kg/día de relaves antes de ser secados a 110 °C por 24 h. Producto de este proceso se obtendrá un material seco y aglomerado, por lo que conviene desaglomerarlo, lo cual se conseguirá con un tornillo sin fin, el mismo que a la vez servirá para enfriar el material y transportarlo hacia el horno de calcinación HC-105. Pero antes, se acumularán 2 cargas provenientes del horno de secado para cumplir con la capacidad del horno de calcinación. Este horno calcinará en aire a los relaves desde la temperatura ambiente con una velocidad de calentamiento de 1 °C/min hasta 800 °C por 2 h, y luego se enfriará con una velocidad de 1 °C/min hasta aproximadamente 110 °C. Debido a la calcinación el material se aglomerará, motivo por el cual se usará otro tornillo sin fin para transportar el producto hacia el separador magnético SM-106, con el que finalmente se logrará separar las ferritas, trabajando con un nivel de vibración de 60, con una corriente entre 2,5 y 3,0 A y con la velocidad del cilindro de aproximadamente 70 rpm.

3.3.2 RESULTADOS DE LA ESTIMACIÓN ECONÓMICA PRELIMINAR DEL COSTO PARA LA OBTENCIÓN DE FERRITAS A PARTIR DE DESECHOS SÓLIDOS PROVENIENTES DE LOS PROCESOS DE EXTRACCIÓN DE ORO

Para la evaluación económica se calcularán los costos fijos y variables de operación, para determinar el costo total por kilogramo de relaves procesados y por kilogramo de ferritas obtenidas. Para determinar los costos se fijaron parámetros del proyecto de inversión, los cuales se detallan en la Tabla 3.22.

Tabla 3.22. Parámetros del proyecto de inversión para el proceso de obtención de ferritas

| Parámetro | Unidad | Valor del parámetro |
|---|--------------------------------|----------------------------|
| Fecha de ejecución del perfil de factibilidad | MM DD, AAAA | Junio,2015 |
| Duración del capital de operación | meses | 6 |
| Mantenimiento de maquinaria y equipos | % valor de maquinaria y equipo | 2 |

Tabla 3.22. Parámetros del proyecto de inversión para el proceso de obtención de ferritas (continuación...)

| Parámetro | Unidad | Valor del parámetro |
|--------------------------------|---------------------------------------|---------------------|
| Interés bancario por anualidad | % | 10,99* |
| Reparación de maquinaria | % de Inversión en maquinaria y equipo | 2 |
| Depreciación de equipos | años | 5 |
| Imprevistos | % de costos de producción | 10 |

*(Banco Central del Ecuador, 2014, recuperado de <http://www.bce.fin.ec/index.php/nuevas-publicaciones1>)

Para establecer el costo de operación se determinan los costos fijos y variables. Dentro de los costos fijos se consideran la depreciación, mantenimiento y reparación de equipos. Dentro de los costos variables se considera el costo de los servicios. En este proyecto no se considera el costo de los relaves usados como materia prima, ya que no se conoce un valor comercial definido. Tampoco se considera la mano de obra ya que es un proyecto que si llega a implementarse no requeriría de la contratación de nuevo personal dentro de la planta minera, sino que será suficiente con delegar nuevas funciones a operarios ya contratados. En la Tabla 3.23 se detallan los costos fijos.

Tabla 3.23. Costos fijos anuales para la implementación del proceso de obtención de ferritas

| Detalle | Valor anual (USD) | % |
|-----------------------------|-------------------|-------|
| Depreciación de los equipos | 18 831,84 | 83,33 |
| Mantenimiento de equipos | 1 883,184 | 8,33 |
| Reparación de equipos | 1 883,184 | 8,33 |
| Total sin imprevistos | 22 598,208 | 100 |
| Total con imprevistos | 24 858,0288 | 110 |

Para el cálculo de los costos variables se considera únicamente el servicio industrial de energía eléctrica utilizado en el proceso, como se muestra en la Tabla 3.24.

Tabla 3.24. Costos de servicios industriales

| Detalle | Unidad | Costo unitario (USD) | N° de unidades / mes | Costo mensual (USD) | Costo anual (USD) | % |
|----------------|---------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------------|----------|
| Electricidad | kW-h | 0,12 | 32 966,29 | 3 955,96 | 47 471,46 | 100,00 |
| TOTAL | | | | 3 955,96 | 47 471,46 | 100,00 |

En la Tabla 3.25, se detalla el costo de operación total para el proceso de obtención de una tonelada mensual de ferritas.

Tabla 3.25. Costo de operación para el proceso de obtención de ferritas

| Detalle | Valor anual (USD) | % |
|------------------|--------------------------|----------|
| Costos variables | 47 471,46 | 65,63 |
| Costos fijos | 24 858,03 | 34,37 |
| TOTAL | 72 329,49 | 100,00 |

En la Tabla 3.26 se presentan el costo de operación, la masa total de relaves procesados y la masa total de ferritas separadas. Cabe mencionar que el costo de operación no considera el costo de la materia prima, es decir de los relaves, ya que la empresa SODIREC S.A. los considera como desechos, sin ningún costo comercial. Con los costos de operación anual se puede determinar el costo por kilogramo de relaves procesados y el costo por kilogramo de ferritas obtenidas como se muestra en la Tabla 3.27

Tabla 3.26. Resumen de costos del proceso de obtención de ferritas

| Denominación | Anual |
|--------------------------|--------------|
| Costo de operación (USD) | 72 329,49 |
| Relaves procesados (kg) | 1 991 022,70 |
| Ferritas separadas (kg) | 12 000 |

Tabla 3.27. Resultados del costo de kilogramo de relaves procesados y kilogramo de ferritas obtenidas

| Ítem | Costo unitario |
|-----------------------------|----------------|
| Relaves procesados (USD/kg) | 0,036 |
| Ferritas separadas (USD/kg) | 6,027 |

Para determinar el total de la inversión necesario para el flujo de caja se consideraron el costo de los equipos y el capital de operación. Los equipos se detallan en la Tabla 3.28, mientras que el capital de operación considera seis meses del costo de operación.

Tabla 3.28. Costo de equipos principales para el proceso de obtención de ferritas

| Equipo | Nombre | Costo unitario (USD) | Factor de instalación | Costo total (USD) | % | Dividendo de amortización (USD) |
|-----------------------------|--------|----------------------|-----------------------|-------------------|--------|---------------------------------|
| Tanque de acondicionamiento | TA-101 | 2 000 | 1,2 | 2 400 | 2,55 | 480 |
| Separador estático | SE-102 | 6 733 | 1,2 | 8 079,6 | 8,58 | 1 615,92 |
| Separador estático | SE-103 | 6 733 | 1,2 | 8 079,6 | 8,58 | 1 615,92 |
| Horno de secado | HS-104 | 15 000 | 1,2 | 18 000,0 | 19,12 | 3 600 |
| Horno de calcinación | HC-105 | 40 000 | 1,2 | 48 000,0 | 50,98 | 9 600 |
| Separador magnético | SM-106 | 8 000 | 1,2 | 9 600,0 | 10,20 | 1 920 |
| TOTAL | | | | 94 159,2 | 100,00 | 18 831,84 |

Tabla 3.29. Monto total de inversión para el proceso de obtención de ferritas a partir del tratamiento de desechos sólidos provenientes de los procesos de extracción de oro

| Denominación | Valor (USD) | % |
|--------------------------------|-------------|--------|
| Equipos | 94 159,20 | 79,87 |
| Capital de operación (6 meses) | 23 735,73 | 20,13 |
| TOTAL | 117 894,93 | 100,00 |

Antes de realizar el flujo de caja se debe mencionar que el precio comercial de las ferritas puede variar en un rango muy amplio, debido a diferentes factores como el porcentaje de hematita (Fe_2O_3) ó magnetita (Fe_3O_4) presentes, el tipo de ferrita (elemento con el cual está formada, Ca, Mn, Ti, Ni, etc.), el tamaño de grano, las impurezas presentes y si es de origen natural o sintético. Dicho esto, el precio que puede tomar el gramo de ferritas puede estar entre 0,01 – 14,85 USD/g (Alibaba, 2014).

Si se toma el precio más bajo al cual se pueden comercializar las ferritas, se puede calcular el ingreso mensual y anual por ventas como se detalla en la Tabla 3.30.

Tabla 3.30. Resumen de ventas de ferritas

| Producto | Precio unitario (USD/kg) | kg/mes | kg/año | Ingreso mensual (USD) | Ingreso anual (USD) |
|-----------------|-------------------------------------|---------------|---------------|----------------------------------|--------------------------------|
| Ferritas | 10 | 1 000 | 12 000 | 10 000 | 120 000 |
| TOTAL | | | | 10 000 | 120 000 |

Para realizar el flujo de caja, inicialmente se considera que las ferritas obtenidas se comercializan a un precio de 0,01 USD/g. Además, que la actual tasa de interés para créditos para las PYMES (acrónimo de pequeña y mediana empresa) es de 10,99 % anual y que el plazo para el proyecto es de 5 años. El flujo de caja se muestra en la Tabla 3.31.

Tabla 3.31. Flujo de caja considerando un costo de ferritas comercializadas a 0,01 USD/g

| Designación | Año 0 | Año 1 | Año 2 | Año 3 | Año 4 | Año 5 |
|---|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Inversión total | (117 894,93) | | | | | |
| Aportación de socios | - | | | | | |
| Ventas | | 120 000,00 | 120 000,00 | 120 000,00 | 120 000,00 | 120 000,00 |
| (-) Costo de operación | | (72 329,49) | (72 329,49) | (72 329,49) | (72 329,49) | (72 329,49) |
| (-) Costo de los relaves | | - | - | - | - | - |
| Depreciación | | (18 831,84) | (18 831,84) | (18 831,84) | (18 831,84) | (18 831,84) |
| UAI (Utilidad antes de impuestos e intereses) | | 28 838,67 | 28 838,67 | 28 838,67 | 28 838,67 | 28 838,67 |
| Préstamo | 117 894,93 | (24 230,76) | (24 230,76) | (24 230,76) | (24 230,76) | (24 230,76) |
| Flujo antes de impuestos | | 4 607,91 | 4 607,91 | 4 607,91 | 4 607,91 | 4 607,91 |
| (-) Impuesto a la renta | | (691,19) | (691,19) | (691,19) | (691,19) | (691,19) |
| Flujo después de impuestos | | 3 916,73 | 3 916,73 | 3 916,73 | 3 916,73 | 3 916,73 |
| (-) Utilidades | | (587,51) | (587,51) | (587,51) | (587,51) | (587,51) |
| Flujo de efectivo del proyecto | (117 894,93) | 3 329,22 | 3 329,22 | 3 329,22 | 3 329,22 | 3 329,22 |
| Flujo de efectivo acumulativo | (117 894,93) | (114 565,72) | (111 236,50) | (107 907,28) | (104 578,07) | (101 248,85) |

En la Tabla 3.32 se observan los valores de los indicadores económicos TIR y VAN para un flujo de caja que considera un costo de ferritas comercializadas en 0,01 USD/g.

Tabla 3.32. Valores de TIR, VAN y período de recuperación para un flujo de caja considerando un costo de ferritas comercializadas a 0,01 USD/g

| | |
|---------------------------------------|-----------|
| TIR (%) | -42,65 % |
| VAN (USD) | 91 418,67 |
| Período de recuperación (años) | 35,45 |

En la Tabla 3.32, se observa que el VAN es de 91 418,67 USD, lo que significa que los socios aumentarían en este valor su capital invertido. Sin embargo, el TIR es negativo, y por ende, menor que el interés del préstamo del banco; por lo que se puede decir que el proyecto no es rentable si el costo de las ferritas obtenidas es de 0,01 USD/g. Por esto se elabora una gráfica que permita determinar la factibilidad del proyecto a partir del TIR en función del costo por gramo de ferritas, lo que se muestra en la Figura 3.24, para así determinar el precio que podría llegar a tener un gramo de ferritas en el mercado actual para que el proyecto resulte rentable.

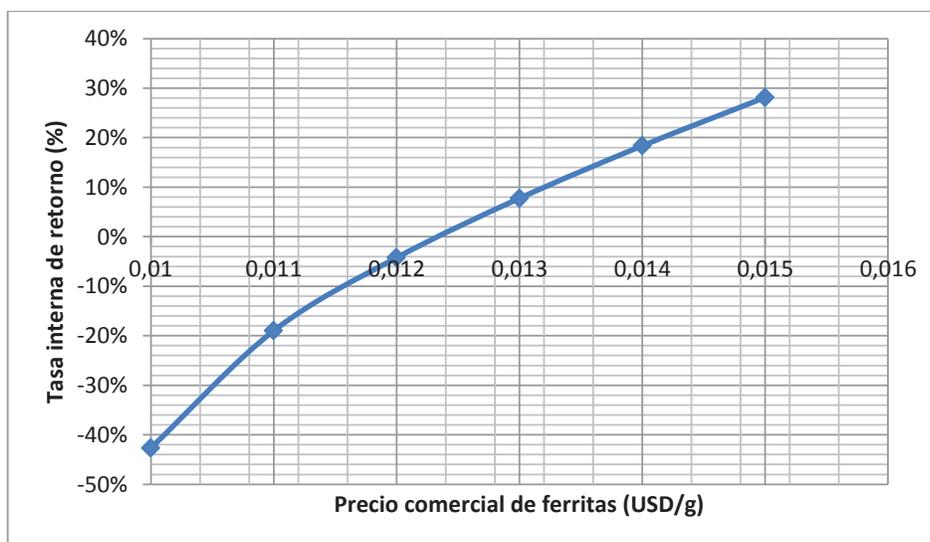


Figura 3.24. Gráfica de TIR en función del costo por gramo de ferritas obtenidas

De la Figura 3.24 se deduce que el proyecto sería rentable si las ferritas obtenidas se comercializan a un precio mayor o igual que 0,014 USD/g, ya que el TIR sería de aproximadamente 19 %, porcentaje mayor al entregado por el préstamo bancario.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

- Los relaves gruesos depositados en la periferia de la piscina de lixiviación N° 5 de la empresa SODIREC S.A. presentaron una densidad real de $2,8 \text{ g/cm}^3$ y una densidad aparente de $1,5 \text{ g/cm}^3$.
- El 65,11 % de los relaves gruesos pasó la malla N° 100, el 19 % se quedó retenido sobre la malla N° 140 y el 46 % pasó la malla N° 140. La abertura del tamiz a la cual el 80 % de la muestra pasó fue de $210 \mu\text{m}$, es decir, que el 80 % de los relaves gruesos tienen un tamaño de partícula menor que $210 \mu\text{m}$.
- De acuerdo con el análisis de separación magnética los relaves gruesos sin tratamientos previos exhibieron propiedades magnéticas, por tal motivo fue posible separar dos porciones de minerales: una porción magnética y otra porción no magnética.
- Los elementos químicos más relevantes presentes en los relaves gruesos y detectados por LIBS fueron: Fe, Si, Ti, Co, Mg, Mn, Al, Cu, Zn, Pb, Ca, Li, K, y Na.
- El contenido de minerales de brillo metálico, identificados como sulfuros, así como el contenido de hierro, fueron mayores conforme disminuyó el tamaño de partícula de los relaves gruesos.
- La composición química elemental de los relaves gruesos determinada por EDS en cuanto a los elementos más relevantes fue hierro 3,7 %, silicio 36,9 %, azufre 16,4 %, magnesio 2,6 %, titanio 0,2 %, cinc 0,3 % y cobre 0,2 %. La cantidad de hierro es considerable y atractiva para ser recuperada en forma de ferritas.

- El difractograma obtenido por DRX de los relaves gruesos, muestra que el mineral predominante en los relaves es el cuarzo (SiO_2) con un 54 %. Además, que existe un 6 % de pirita (FeS_2) y 3 % de hematita (Fe_2O_3).
- El grado de ceramización guarda relación con el tamaño de partícula, ya que al disminuir el tamaño de partícula de los relaves sometidos a calcinación, aumentó la tonalidad rojiza, evidenciando que la hematita (Fe_2O_3) formada pasó a formar parte de la fase amorfa de los relaves cocidos.
- La temperatura fue un factor desencadenante en la ceramización, ya que al someter a los relaves con menor tamaño de partícula (mayor superficie específica) a la temperatura de 1 000 °C, se rigidizaron completamente formando un bloque, es decir, que se sinterizaron en gran medida sin la necesidad de compactarlos con una presión externa.
- Conforme disminuyó el tamaño de partícula de los relaves hasta 105 μm , el porcentaje de ferritas separadas aumentó. Sin embargo, para relaves con tamaño de partícula menor que 45 μm , el porcentaje de separación de ferritas fue de cero, debido a que se produjo una ceramización total impidiendo así su separación.
- El mayor porcentaje de separación de ferritas fue de 3,87 %, y se logró con relaves de un tamaño de partícula entre 105 y 149 μm a la temperatura de calcinación de 800 °C.
- Es claro que ni utilizando pulverización hasta conseguir un tamaño de partícula con un mínimo de 74 μm , se logró liberar de la matriz cerámica a las ferritas formadas, lo que confirma que éstas se encuentran ocluidas en el interior de la matriz cerámica, producto de la posible recristalización en el enfriamiento de los minerales calcinados.

- Los granos de ferritas separadas son un material granular complejo, en su mayoría con presencia de minerales opacos de color gris oscuro a negro y una pequeña cantidad de minerales traslúcidos.
- En una base de alrededor de 100 granos de ferritas separadas se determinó que este material se encuentra formado por 4,80 % de ganga, 9,13 % de minerales mixtos y 86,07 % de ferritas valores que indican que los ciclos de separación magnética fueron convenientes.
- El difractograma obtenido de los relaves calcinados muestra que sí se logró formar hematita (Fe_2O_3) y magnetita (Fe_3O_4), fases cristalinas que forman la base de las ferritas.
- El difractograma obtenido del material denominado como “ceramizado”, muestra que aún existen hematita y magnetita que no fueron posibles separarlas con los ciclos de separación magnética, debido a la ceramización.
- El difractograma obtenido de las ferritas muestra que el contenido de cuarzo continua siendo alto, razón por la cual se puede decir que las ferritas separadas no son de alta pureza.
- La morfología de las ferritas formadas muestra que se trata de granos porosos, producto de la eliminación de compuestos consumidores de oxígeno (sulfoarseniuros) en el proceso de calcinación.
- La composición química elemental en toda la muestra de ferritas determinada por EDS, en cuanto a los elementos más relevantes, fue hierro 14 %, silicio 28 %, azufre 12,6 %, magnesio 4,6 %, cinc 1,4 %, níquel 0,5 % y cromo 0,6 %. Y para un grano específico de ferritas la composición química elemental fue de hierro 77,7 %, silicio 3,7 %, azufre 0,1 %, magnesio 0,4 %, titanio 1,1 % y níquel 2 %.

- Los elementos químicos significativos en las ferritas detectados por LIBS fueron Mg, Ti, Ni y Fe, los cuales pueden estar formando parte de la estructura cristalina de ciertas ferritas en baja concentración.
- El proyecto de obtención de ferritas es rentable si se las puede comercializar con un valor mayor o igual que 0,014 USD/g, valor con el cual se obtienen un TIR de 19 %.

4.2 RECOMENDACIONES

- Debido al alto contenido de cuarzo en los relaves se recomienda investigar un método para la obtención de ferritas que implique una separación previa del cuarzo. Investigar posibles aplicaciones al material cerámico no magnético y al ceramizado obtenidos del proceso de separación magnética (en el cual constituyen desechos sin valor), para posteriormente comercializarlos y así aumentar la rentabilidad del proceso.
- Se recomienda aplicar el presente proceso diseñado para la obtención de ferritas a una muestra de relaves en la que los sulfuros se encuentren libres y no incrustados en el cuarzo.
- La calcinación genera serios problemas ambientales asociados a las emisiones de partículas finas, dióxido de azufre y principalmente arsénico, razón por la cual se recomienda controlar dichas emisiones mediante sistemas de lavado, neutralización y/o limpieza de los gases de chimenea.
- Se recomienda estudiar más acerca de la ceramización de metales pesados, ya que desde la óptica ambiental, el hecho de que un componente tóxico sea incorporado en la masa cerámica con la finalidad de inertizarlo, y pase a formar parte de la fase amorfa o de un mineral recristalizado, resulta importante, ya que esto podría representar una disminución en las posibilidades de lixiviación de estos contaminantes.

- Estudiar la influencia que podría tener en la obtención de ferritas la incorporación de una tercera variable como el tiempo de calcinación, o la velocidad de calentamiento y enfriamiento en el proceso de calcinación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aguaiza, S. (2014). Formación de Hematita a partir de desechos sólidos producidos en la extracción de oro, mediante tratamientos térmicos. *Revista Politécnica*, 34(1), 157-160.
2. Aguaiza, S. (2013), *Análisis por difracción de rayos X de fases cristalinas presentes en muestras de desechos sólidos producidos en la extracción de oro, sin y con tratamientos térmicos*. (Proyecto de titulación previo a la obtención del Título de Físico). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
3. Alibaba. (2014). *Magnetic ferrite compound for fridge door magnet*. Recuperado de http://www.alibaba.com/product-detail/Magnetic-ferrite-compound-for-fridge-door_60047537393.html?s=p (Diciembre, 2014).
4. Arredondo, C., Parra, F. y Rodríguez, A. (2007). Evaluación técnica de una alternativa para obtener pellet feed desde un mineral de baja ley de minas El Romeral. *Revista de la Facultad de Ingeniería*. 13(22). 13-22.
5. Banco Central del Ecuador. (2014). *Tasas de interés*. Recuperado de <http://www.bce.fin.ec/index.php/nuevas-publicaciones1> (Noviembre, 2014).
6. Brindley, G. y Brown, G. (1980). *Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification*. (5ta. ed.). Londres, Inglaterra: Spottiswoode Ballantyne.
7. Chia, C. (2014). Gerente de producción SODIREC. Comunicación personal.
8. Checura, J. (2009). *Prefactibilidad técnica y económica de una planta productora de concentrados de hierro*. (Proyecto de titulación previo a

la obtención del Título de Ingeniero Civil Industrial). Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile.

9. De la Torre, E. (1995). Monografía del área mineralurgia y metalurgia extractiva de metales en el Ecuador. *Escuela Politécnica Nacional*, 5-13.
10. De la Torre, E. (1997). El procesamiento de minerales en el Ecuador: Visión de un metalurgista. *Jornadas de Ingeniería Química*, 1(1), 28-39.
11. Díaz, X. (1997). Recuperación de oro refractario de sulfuros y sulfoarseniuros de hierro y cobre. *Jornadas de Ingeniería Química*, 1(1), 95-101.
12. Duque, G. (2003). *Manual de geología para ingenieros*. Recuperado de file:///C:/Users/Jose/Documents/1POLI/01TESIS/Papers/MineralesHematitaPirrotinamagn%C3%A9tica.pdf (Junio, 2014).
13. Elias, X. (2009). *Reciclaje de Residuos Industriales*. (2da. ed.). Barcelona, España: Díaz de Santos.
14. Forero, A., Ardila, M., y Díaz, S., (2008). Caracterización y beneficio de un mineral de magnetita para lavado de carbones en medios densos. *Revista Prospectiva*, 6(1), 18-22.
15. García, L., Rodríguez, O., Betancourt, R. y Saldívar, R. (2003). Síntesis de ferrofluidos de magnetita. *Superficies y Vacío*, 16(1), 28-31.
16. Gómez, C. (2013). *Propiedades magnéticas de las arenas recientes de Portmán, Murcia*. (Proyecto de titulación previo a la obtención del Título de Máster en Geofísica y Meteorología). Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España.
17. Ghosh, A. (2004). *Textbook of Materials and Metallurgical Thermodynamics*. (1ra. ed.). New York, United States: Prentice-Hall.

18. González, A., Cesari, R. (2009). *Cátedra de Tecnología Electrónica*. Recuperado de http://www1.frm.utn.edu.ar/tecnologiae/apuntes/materiales_magneticos.pdf (Septiembre, 2014).
19. Hernández, J. y Meurer, E. (1997). Óxidos de hierro en los suelos: sus propiedades y su caracterización con énfasis en los estudios de retención de fósforo. *Agrociencia*. 1(1). 1-14.
20. Hernández, J. (2007). *Métodos para el análisis de suelos. Manual de laboratorio*. (1ra. ed.). La Habana, Cuba: Ediciones INCA.
21. Klein, C. y Dutrow, B. (2007). *The Manual Mineral Science*. (23ava. ed.). Estados Unidos: John Wiley & Sons.
22. Lunar, R. (1977). *Mineralogénesis de los yacimientos del hierro del noroeste de la Península*. Recuperado de http://books.google.com.ec/books?id=9PDgXX1xW6sC&pg=PA85&lpg=PA85&dq=reaccion+de+pirrotina+a+magnetita&source=bl&ots=0o016DhfPy&sig=6PcJR4qaSPONbsuoMAr_JS4dsE&hl=es419&sa=X&ei=iy4mU_qXlSrQ0gHR4YDwDQ&ved=0CDoQ6AEwAg#v=onepage&q=reaccion%20de%20pirrotina%20a%20magnetita&f=false (Octubre, 2014).
23. Mazo, J., Barrero, C., Díaz, T., Jerez, A., Restrepo, J. y Morales, A. (2001). Transformación Magnetita-Hematita inducida térmicamente. *Revista Colombiana de Física*, 33(2), 230-233.
24. Mazo, J., (2011). Una mirada al estudio y aplicaciones tecnológicas y biomédicas de la magnetita. *Escuela de Ingeniería de Antioquia*, 16(1), 207-223. Recuperado de: [http://revista.eia.edu.co/articulos16/EIA%2016.%20Art.%2015%20\(207-223\)%20pdf.pdf](http://revista.eia.edu.co/articulos16/EIA%2016.%20Art.%2015%20(207-223)%20pdf.pdf) (Marzo, 2013).
25. Mesa, J. (2009). *Materiales Magnéticos*. Recuperado de http://www.joseluisesarueda.com/documents/TEMA_12_000.pdf (Marzo, 2014).

26. López, D. (2012). *Menas de hierro*. Recuperado de https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CB0QFjAA&url=http%3A%2F%2Fmateriales.wikispaces.com%2Ffile%2Fview%2FMenas%2Bde%2Bhierro.doc&ei=RbtsVL2YNIKrgwSpjYHoBA&usg=AFQjCNHj2pUzG_NJUroDEfoMimnsZuzn9g&sig2=2XQ_DwkmCeN6ecs4kLzLAg&bvm=bv.80120444,d.eXY (Abril, 2014).
27. Rodríguez, S. (2005), *Estudio de la desulfuración en los minerales de Peña Colorada*. (Tesis para obtener el Título de Maestro en Ciencias con especialidad en Metalurgia). Universidad de Colima, Coquimatlán, México.
28. Romero, A. y Flores, S. (2010). Caracterización de la pasta de relave para uso como relleno en labores mineras. *Revista del Instituto de Investigación*. 13(26), 1-9.
29. Sigma-Aldrich. (2014). *Iron (II), (III) oxide*. Recuperado de <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/518158?lang=en®ión=US> (Diciembre, 2014).
30. Torrent, J., Schwertmann, U. y Alferez, F. (1983). Quantitative relationships between soil color and hematite content. *Soil Science*. 136(6). 354-358.
31. Universidad de Chile. (2013). *Laboratorio de separación de minerales*. Recuperado de www.geologia.uchile.cl/images/stories/protocolos%20web_cc18711.pdf (Julio, 2014).
32. Universidad de Vigo. (2011). *Magnetismo*. Recuperado de http://webs.uvigo.es/quintans/recursos/Web_electromagnetismo/magnetismo_materiales.htm (Julio, 2014).

33. Universidad Carlos III de Madrid. (2013). *Estructuras Cristalinas*. Recuperado de http://ocw.uc3m.es/ciencia-e-oin/ceramicas-y-vidrios/Bloque_I-Estructuras_cristalinas.pdf (Marzo, 2014).
34. U.S. Environmental Protection Agency. (1994). Extraction and Beneficiation of ores and minerals. *Technical Resource Document*, 3(1), 1-17. Recuperado de: <http://www.epa.gov/osw/nonhaz/industrial/special/mining/techdocs/iron.pdf> (Marzo, 2013).
35. Urquijo, J. (2007). *Síntesis de nanopartículas magnéticas y su implementación como ferrofluidos*. (Trabajo de investigación para aspirar al título de Magister). Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
36. Urquijo, J., Morales, A., Casanova, H. y Garces, J. (2009). Preparación y caracterización de un ferrofluido. *Revista Colombiana de Física*, 41(1), 99-101.
37. Vargas, J., Castañeda, E. y Forero, S. (2011). Obtención de hierro a partir de arenas negras del Atlántico Colombiano desembocadura Río Magdalena. *Revista de la Facultad de Ingeniería*. 19(26). 19-26.
38. Vikentyev, I. (2014). Mineralogy and Formation Conditions of Portovelo-Zaruma Gold-sulphide Vein Deposit. *Geochemistry, Mineralogy and Petrology Magazine*, 43(1), 148-154.

ANEXOS

ANEXO I

PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD REAL Y DE LA DENSIDAD APARENTE DE LOS RELAVES CON BASE EN LA METODOLOGÍA PROPUESTA POR JUVENAL LUIS HERNÁNDEZ EN SU MANUAL DE LABORATORIO “MÉTODOS PARA EL ANÁLISIS FÍSICO DE LOS SUELOS”

Determinación de la densidad Real

Este es un método de caracterización del suelo para evaluar la densidad de las partículas sólidas que lo componen.

A la relación existente entre la masa del suelo seco y la masa de igual volumen de agua, se le llama densidad de la fase sólida del suelo (densidad real). En ocasiones hay autores que la tratan como peso específico.

Para calcular la densidad real del suelo, es necesario determinar con exactitud el volumen de la parte sólida. En este caso, para esta determinación se utilizó el método picnométrico, el cual está basado en el principio de exclusión de las sustancias. Esto quiere decir que cuando un sólido se sumerge en un recipiente lleno de agua destilada, la cantidad de agua desplazada es igual al volumen de la parte sólida sumergida.

Procedimiento

- Se utilizó un picnómetro de 25 mL de capacidad, se lo lavó con agua destilada y se lo secó en la estufa a 60 °C por 2 h. Luego se lo dejó enfriar en un desecador y a continuación se registró su masa con la balanza analítica KERN ABS 220-4.
- Se determinó la temperatura del agua destilada con un termómetro y se procedió a llenar con ésta el picnómetro, luego se colocó la tapa del picnómetro y se registró la masa.

- Se vertió el contenido del picnómetro y se lo volvió a secar bajo las condiciones señaladas anteriormente.
- Se pesaron 5 g de suelo en el picnómetro que previamente fue tarado, luego se llenó el picnómetro con agua destilada hasta el borde, se colocó la tapa y se registró el peso. La determinación de la densidad real se calculó mediante las siguientes ecuaciones:

$$\delta_r = \frac{P_2}{V} \left[\frac{g}{cm^3} \right] \quad [A1.1]$$

$$P_2 = \frac{P_1 - P}{100 + W_h} (100) \quad [A1.2]$$

$$V = V_2 - V_1 \quad [A1.3]$$

$$V_2 = \frac{PA - P}{\delta_{H_2O}} \quad [A1.4]$$

$$V_1 = \frac{P_3 - (P + P_2)}{\delta_{H_2O}} \quad [A1.5]$$

Donde:

δ_r : Densidad real

P_2 : Peso del suelo absolutamente seco

P_1 : Peso del picnómetro más el suelo

P : Peso del picnómetro vacío y seco

W_h : Humedad higroscópica

V : Volumen del suelo

V_2 : Volumen del picnómetro

V_1 : Volumen del agua

PA : Peso del picnómetro más agua

δ_{H_2O} : Densidad del agua a la temperatura medida

P_3 : Peso del picnómetro más suelo y más agua

Determinación de la densidad Aparente

La densidad aparente se define como el cociente entre la masa de sólidos del suelo y el volumen total que éste ocupa (incluyendo el volumen de poros). Como

el volumen total del suelo no es constante en toda su extensión, se habla de densidad aparente refiriéndose siempre al volumen a una determinada humedad.

La densidad aparente para un mismo suelo siempre es menor que la densidad real.

El método utilizado fue el del cilindro de volumen conocido, el cual está fundamentado en la determinación de la densidad aparente de una muestra de suelo de volumen conocido. Esta muestra se toma en el campo por medio de un cilindro de volumen predeterminado, en el que la muestra extraída no es completamente inalterada, sino que se produce compresión con los bordes del cilindro al momento de tomar la muestra ya que es necesario aplicar un poco de presión para introducir el cilindro dentro del suelo.

Procedimiento

- La muestra fue tomada en el campo de trabajo es decir en la planta SODIREC S.A.; para esto se contó con un cilindro de PVC de dimensiones conocidas, las mismas que se detallan en la Tabla AI. 1.
- El cilindro fue introducido con una ligera presión en el suelo en donde se depositan los relaves gruesos clasificados por el hidrociclón, y se procuró introducirlo hasta que quede lleno.
- Luego se sacó el cilindro y se igualaron los bordes con la ayuda de una espátula; enseguida el cilindro fue guardado en una funda plástica muy bien cerrada para evitar pérdidas por humedad.
- Una vez en el laboratorio se vació el contenido del cilindro en una cápsula de porcelana previamente pesada y se registró su peso. Luego, se sometió a secado en una estufa a 110 °C por 24 h y, pasado este tiempo, se la dejó enfriar en un desecador para luego registrar su peso. La determinación de la densidad aparente se calculó mediante las siguientes ecuaciones:

$$\delta_a = \frac{P_2 - P}{V_{cilindro}} \left[\frac{g}{cm^3} \right] \quad [AI.6]$$

$$V_{cilindro} = \pi \cdot r_i^2 \cdot h \quad [AI.7]$$

Donde:

δ_a : Densidad aparente

P_2 : Peso de la cápsula más el suelo seco

P : Peso de la cápsula vacía

$V_{cilindro}$: Volumen del cilindro

r_i : Radio interno del cilindro

h : Altura del cilindro

Tabla AI. 1. Dimensiones del cilindro usado para la determinación de la densidad aparente de los relaves

| | |
|-----------------------|-------|
| Diámetro externo (mm) | 62,87 |
| Diámetro interno (mm) | 58,86 |
| Altura (mm) | 71,70 |

Las dimensiones indicadas en la Tabla AI. 1 fueron tomadas con el calibrador digital marca Buffalo que cuenta con un rango de medición de 0 - 150 mm, resolución de 0,01 mm y repetibilidad de 0,01 mm.

ANEXO II

DETERMINACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DE LOS RELAVES CON BASE EN LA NORMA ASTM C325-07

Alcance

Esta norma abarca el análisis del tamizado en húmedo de arcillas de loza cerámica. Esta guía está destinada a ser utilizada, tanto para pruebas de materia prima, como para pruebas de control en planta.

Equipos

- Dispositivo de agitación
- Tamices. Los tamices deben cumplir con la especificación E11 y son los tamices N° 100 (150 μm), N° 140 (106 μm), N° 200 (75 μm) y N° 325 (45 μm). La tela de alambre para estos tamices debe ser tejida (no entrecruzada) y se montará en marcos de metal circulares de 203 mm de diámetro, construidos de forma que permitan la anidación de dos o más tamices. Además, se requiere de una bandeja y una tapa para los tamices. En este caso, además de los tamices que requiere la norma, se utilizaron los tamices N° 60 (250 μm) y N° 80 (177 μm), ya que previamente se conocía que de estos relaves el 90 % pasa la malla 60 (Chia, 2014, comunicación personal).

Muestreo

La muestra recibida se coloca en un horno de secado a 100 o 110 °C durante un período de no menos de 5 h antes de realizarse la prueba.

Procedimiento

- Se pesó una porción de la muestra de relaves secos de 500 g, y se transfirió a un recipiente con capacidad de al menos 2 L. La muestra fue pesada con la

balanza KERN 440-49N. Se humedeció la muestra con 1,5 L de agua y se dejó reposar por 2 h.

- Pasado el tiempo de reposo, se removió y agitó la mezcla con la ayuda de una varilla de agitación por 10 min.
- Se tomó un recipiente de una capacidad mínima de 3 L y se lo colocó en un lavabo bajo una llave de agua. Sobre el recipiente se ubicó el tamiz más fino (N° 325, 45 μm) y se transfirió al tamiz la muestra reposada y agitada. Se lavó con la ayuda de un chorro de agua proveniente de una suave manguera conectada a la llave de agua potable. Se tuvo cuidado de no perder muestra por salpicaduras. Se lavó hasta que el agua que pasa a través del tamiz fuera transparente; a esta agua se la reservó y se la dejó decantar, al tener 2 fases se eliminó la mayor cantidad de agua y a los sólidos se los transfirió a una cápsula de porcelana para secarlos posteriormente.
- Se colocó el material retenido sobre la malla del tamiz en un recipiente, usando un pequeño chorro de agua. Se mojaron los tamices restantes que se usaron en el análisis, y se colocaron en secuencia correcta encima del tamiz más fino.
- Se tomó el material del recipiente y se vertió en el tope de la pila de tamices y se tomó la precaución de verter todo el contenido.
- Se tomó una lavacara con una profundidad de al menos 10 cm y diámetro mayor al de los tamices, y se la llenó con agua hasta una altura de 2 dedos. Se colocó en ella al primer tamiz de la pila, es decir el tamiz N° 60, y se lavó el residuo retenido de la siguiente manera: se sujetaron el recipiente y el tamiz con las manos y se provocó un movimiento horizontal haciendo que el agua suba al tamiz.; este movimiento en conjunto con movimientos circulares permitió que se lave bien el residuo. Entonces se reservó el tamiz con el material retenido a un lado y el agua que quedó en la lavacara se transfirió sobre el siguiente tamiz en la pila, es decir, sobre el tamiz N° 80, y a continuación se repitió el procedimiento de lavado hasta llegar al tamiz más fino de la pila.
- Los tamices con los materiales retenidos sobre las mallas junto con la cápsula de porcelana se llevaron a un horno de secado a 110 °C por 2 h. Una vez secos se volvieron a apilar, se colocaron la tapa y la base y se golpeó al

conjunto sobre una mesa, por al menos 1 min. Se separaron los tamices y se cepillaron cuidadosamente las mallas para retirar todo el material, y se transfirió sobre papel para pesar.

- Se pesaron las porciones separadas en la balanza analítica KERN ABS 220-4.

ANEXO III

RESUMEN DE LAS MUESTRAS SELECCIONADAS PARA CARACTERIZACIÓN EN TODO EL PROCESO

Tabla AIII. 1. Resumen de las muestras seleccionadas para caracterización en todo el proceso

| ENSAYO | Calcinado | | | No magnético libre | | | No magnético mixto | | | Cerámico | | | Ferritas | | | | | |
|--------|-----------|----------|----|--------------------|----------|-----|--------------------|----------|----|------------|----------|----|----------|-----|------|-----|----|-----|
| | Muestra | Análisis | | Muestra | Análisis | | Muestra | Análisis | | Muestra | Análisis | | Muestra | DRX | LIBS | MEB | MO | |
| | | DRX | MO | | MT | DRX | | MO | MT | | DRX | MO | | | | | MT | DRX |
| 1 | JB 01 CAL | | X | NM 01 | | X | NM 01' | | X | JB 01 CERM | | X | | | | | X | X |
| 2 | JB 02 CAL | | X | NM 02 | | X | NM 02' | | X | JB 02 CERM | | X | | | | | X | X |
| 3 | JB 03 CAL | | X | NM 03 | | X | NM 03' | | X | JB 03 CERM | | X | | | | | X | X |
| 4 | JB 04 CAL | | X | NM 04 | | X | NM 04' | | X | JB 04 CERM | | X | | | | | X | X |
| 5 | JB 05 CAL | | X | NM 05 | | X | NM 05' | | X | JB 05 CERM | | X | | | | | X | X |
| 6 | JB 06 CAL | | X | NM 06 | | X | NM 06' | | X | JB 06 CERM | | X | | | | | X | X |
| 7 | JB 07 CAL | | X | NM 07 | | X | NM 07' | | X | JB 07 CERM | | X | | | | | X | X |
| 8 | JB 08 CAL | | X | NM 08 | | X | NM 08' | | X | JB 08 CERM | | X | | | | | X | X |
| 9 | JB 09 CAL | | X | NM 09 | | X | NM 09' | | X | JB 09 CERM | | X | | | | | X | X |
| 10 | JB 10 CAL | X | X | NM 10 | X | X | NM 10' | X | X | JB 10 CERM | X | X | X | X | X | X | X | X |
| 11 | JB 11 CAL | | X | NM 11 | | X | NM 11' | | X | JB 11 CERM | | X | | | | | X | X |
| 12 | JB 12 CAL | | X | NM 12 | | X | NM 12' | | X | JB 12 CERM | | X | | | | | X | X |
| 13 | JB 13 CAL | | X | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | JB 14 CAL | | X | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | JB 15 CAL | | X | | | | | | | | | | | | | | | |
| 16 | JB 16 CAL | | X | | | | | | | | | | | | | | | |

DRX: Difracción de rayos X

MO: Microscopía óptica

MB: Microscopio binocular

MT: Microscopio trinocular

LIBS: Espectroscopia de plasma inducido por láser

MEB: Microscopía electrónica de barrido

ANEXO IV

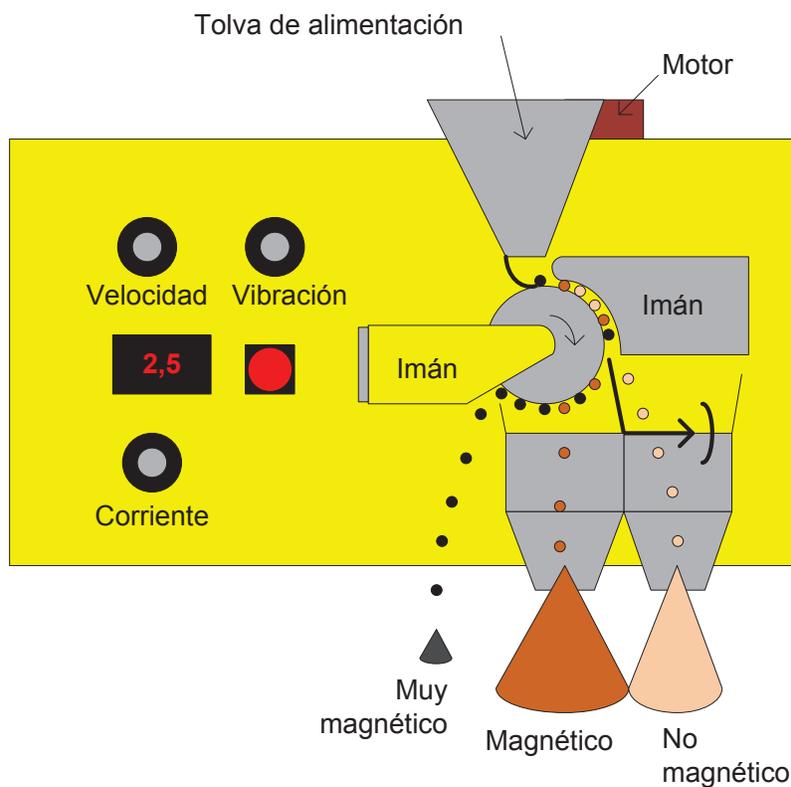
FRACCIONES QUE SE PUEDEN OBTENER CON EL SEPARADOR
MAGNÉTICO

Figura AIV. 1. Esquema del separador magnético CARPCO en el que se representan las fracciones clasificadas luego de separar magnéticamente una muestra

ANEXO V

CICLOS DE SEPARACIÓN MAGNÉTICA

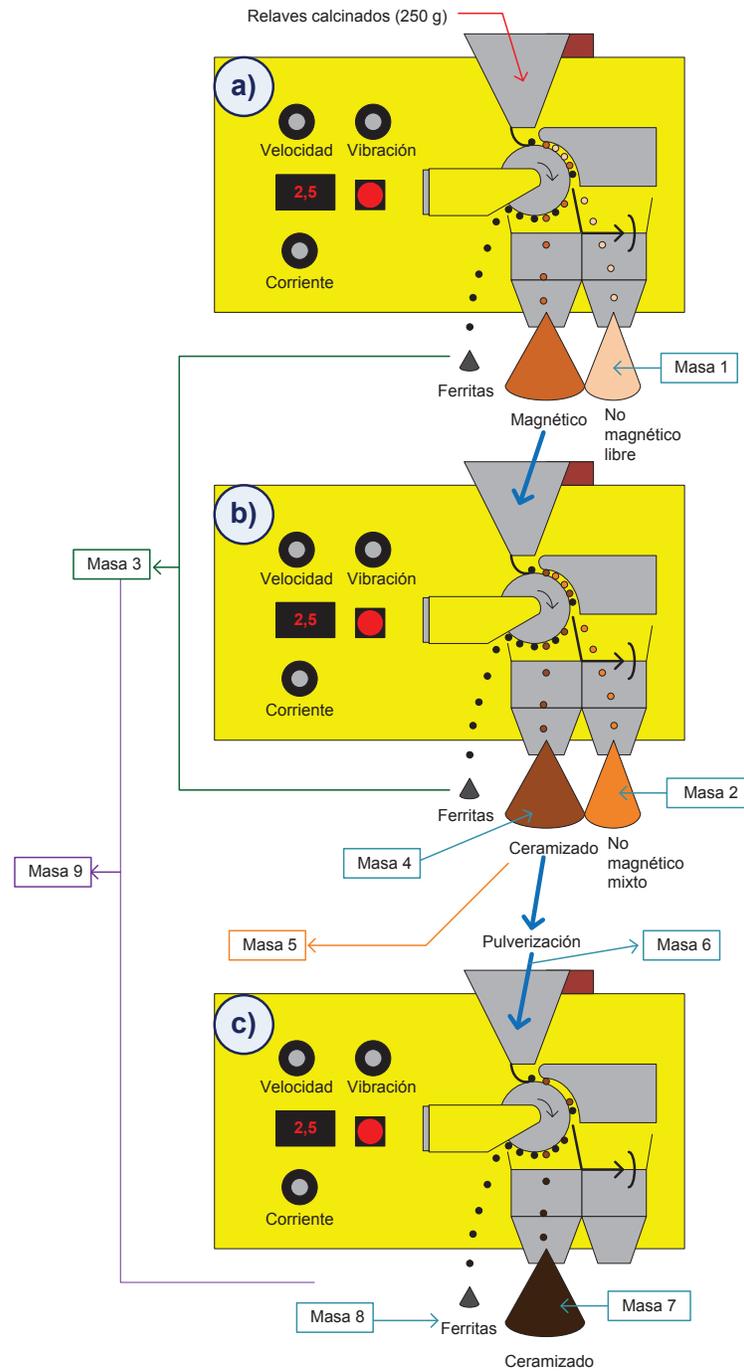


Figura AV. 1. Resumen gráfico del procedimiento de separación magnética seguido para separar las ferritas obtenidas luego de la calcinación de los relaves. a) 1ra separación magnética. b) 2da separación magnética. c) 3ra separación magnética

ANEXO VI

**RESULTADOS DEL BALANCE DE MASA PARA LOS ENSAYOS
DEL 1 AL 16**

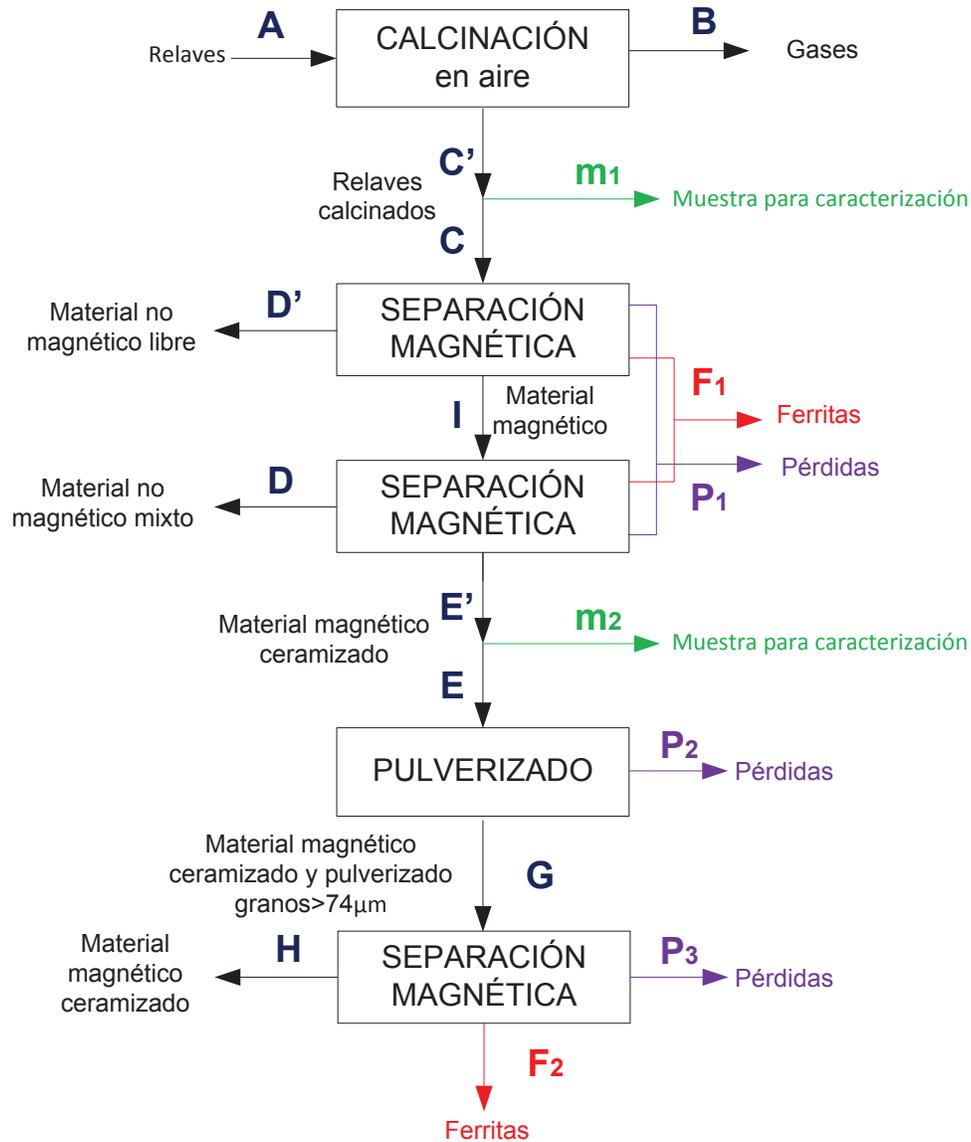


Figura AVI. 1. Diagrama de bloques para determinar el mejor tamaño de partícula y la mejor temperatura de calcinación para el proceso de obtención y separación de ferritas. Esta metodología fue seguida en los ensayos del 1 al 12. Los ensayos del 13 al 16 fueron realizados hasta el proceso de la 1ra separación magnética

Tabla AVI. 1. Resultados del balance de masa de los ensayos del 1 al 16 (corrientes de la A a la m2)

| CORRIENTES | | | | | | | | | |
|-------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|------------------------|----------------------------|---|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| | A | B | C' | m1 | C | D | D' | E' | m2 |
| Ensayo | Alimentación de relaves secos (g) | Gases (pérdidas por calcinación) (g) | Relaves calcinados (g) | Muestra de calcinación (g) | Relaves calcinados que entran a SM1 (g) | Material no magnético libre (g) | Material no magnético mixto (g) | Material magnético ceramizado (g) | Muestra de material ceramizado (g) |
| 1 | 250 | 3,5 | 246,5 | 11,7 | 234,8 | 91,3 | 55,9 | 86,6 | 5,7 |
| 2 | 250 | 4,7 | 245,3 | 10,2 | 235,1 | 84,6 | 32,1 | 117,7 | 6,8 |
| 3 | 250 | 5,6 | 244,4 | 9,9 | 234,5 | 77,9 | 47,6 | 107,4 | 6,3 |
| 4 | 250 | 6,3 | 243,7 | 12 | 231,7 | 79,7 | 61,2 | 88,4 | 6,5 |
| 5 | 250 | 3,7 | 246,3 | 12,1 | 234,2 | 71,5 | 62,6 | 98,6 | 7,8 |
| 6 | 250 | 5,7 | 244,3 | 10,9 | 233,4 | 64,5 | 86,4 | 78,3 | 6 |
| 7 | 250 | 7,5 | 242,5 | 11,3 | 231,2 | 93,5 | 55,9 | 75,4 | 6,3 |
| 8 | 250 | 9,9 | 240,1 | 9,6 | 230,5 | 64,2 | 88,9 | 70,6 | 6 |
| 9 | 250 | 7,4 | 242,6 | 11,3 | 231,3 | 49,3 | 85 | 91,4 | 6 |
| 10 | 250 | 11 | 239 | 11,2 | 227,8 | 46,6 | 83,8 | 84,9 | 6,8 |
| 11 | 250 | 14 | 236 | 11,9 | 224,1 | 24,4 | 90,3 | 100 | 7,3 |
| 12 | 250 | 13,8 | 236,2 | 10,6 | 225,6 | 44,7 | 85,4 | 84,3 | 6 |
| 13 | 250 | 9,6 | 240,4 | 8 | 232,4 | 0 | 0 | 225,89 | 0 |
| 14 | 250 | 10,5 | 239,5 | 6,7 | 232,8 | 0 | 0 | 225,94 | 0 |

Tabla AVI. 1. Resultados del balance de masa de los ensayos del 1 al 16 (corrientes de la A a la m2) (continuación...)

| CORRIENTES | | | | | | | | | |
|-------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|------------------------|----------------------------|---|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| | A | B | C' | m1 | C | D | D' | E' | m2 |
| | Alimentación de relaves secos (g) | Gases (pérdidas por calcinación) (g) | Relaves calcinados (g) | Muestra de calcinación (g) | Relaves calcinados que entran a SM1 (g) | Material no magnético libre (g) | Material no magnético mixto (g) | Material magnético ceramizado (g) | Muestra de material ceramizado (g) |
| 15 | 250 | 18,9 | 231,1 | 8,8 | 222,3 | 0 | 0 | 215,6 | 0 |
| 16 | 250 | 27,1 | 222,9 | 9,4 | 213,5 | 0 | 0 | 206,88 | 0 |

Tabla AVI. 2. Resultados del balance de masa de los ensayos del 1 al 16 (corrientes de la E a la P3)

| CORRIENTES | | | | | | | | | | |
|-------------------|---|------------------------|----------------------|--|--------------------------------|-----------------------------------|------------------------|----------------------|--------------------------------------|----------------------|
| | E | F1 | P1 | G | P2 | H | F2 | P3 | TOTAL | F1+F2 |
| | Material magnético que pasa a pulverización (g) | Ferritas separadas (g) | Pérdidas por SM1 (g) | Material pulverizado que pasa a la SM2 (g) | Pérdidas por pulverización (g) | Material magnético ceramizado (g) | Ferritas separadas (g) | Pérdidas por SM2 (g) | Comprobación del balance de masa (g) | Ferritas Totales (g) |
| 1 | 80,9 | 0,0191 | 0,9809 | 77,2 | 3,7 | 76,0985 | 0,0015 | 1,1 | 250 | 0,0206 |
| 2 | 110,9 | 0,0896 | 0,6104 | 110,2 | 0,7 | 109,0967 | 0,0033 | 1,1 | 250 | 0,0929 |
| 3 | 101,1 | 1,4349 | 0,1651 | 100,1 | 1 | 98,895 | 0,005 | 1,2 | 250 | 1,4399 |

Tabla AVI. 2. Resultados del balance de masa de los ensayos del 1 al 16 (corrientes de la E a la P3) (continuación...)

| Ensayo | CORRIENTES | | | | | | | | | | TOTAL | F1+F2 |
|--------|------------|--------|--------|------|-----|---------|--------|-----|--------------------------------------|--------------------------------|--------|--------|
| | E | F1 | P1 | G | P2 | H | F2 | P3 | Comprobación del balance de masa (g) | Ferritas separadas por SM2 (g) | | |
| 4 | 81,9 | 1,6556 | 0,7444 | 80,8 | 1,1 | 78,996 | 0,004 | 1,8 | 250 | 0,0036 | 1,6596 | 1,6596 |
| 5 | 90,8 | 0,528 | 0,972 | 89,9 | 0,9 | 88,8964 | 0,0036 | 1 | 250 | 0,0036 | 0,5316 | 0,5316 |
| 6 | 72,3 | 3,2945 | 0,9055 | 72,1 | 0,2 | 71,2971 | 0,0029 | 0,8 | 250 | 0,0029 | 3,2974 | 3,2974 |
| 7 | 69,1 | 5,4028 | 0,9972 | 69 | 0,1 | 68,1945 | 0,0055 | 0,8 | 250 | 0,0055 | 5,4083 | 5,4083 |
| 8 | 64,6 | 4,1437 | 2,6563 | 64,5 | 0,1 | 63,3961 | 0,0039 | 1,1 | 250 | 0,0039 | 4,1476 | 4,1476 |
| 9 | 85,4 | 1,7941 | 3,8059 | 84,9 | 0,5 | 83,6949 | 0,0051 | 1,2 | 250 | 0,0051 | 1,7992 | 1,7992 |
| 10 | 78,1 | 8,8234 | 3,6766 | 77,1 | 1 | 76,1945 | 0,0055 | 0,9 | 250 | 0,0055 | 8,8289 | 8,8289 |
| 11 | 92,7 | 5,8012 | 3,5988 | 92,2 | 0,5 | 91,1917 | 0,0083 | 1 | 250 | 0,0083 | 5,8095 | 5,8095 |
| 12 | 78,3 | 6,621 | 4,579 | 75,9 | 2,4 | 74,4939 | 0,0061 | 1,4 | 250 | 0,0061 | 6,6271 | 6,6271 |
| 13 | 0 | 0 | 6,51 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 250 | 0 | 0 | 0 |
| 14 | 0 | 0 | 6,86 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 250 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 0 | 0 | 6,7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 250 | 0 | 0 | 0 |
| 16 | 0 | 0 | 6,62 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 250 | 0 | 0 | 0 |

ANEXO VII

**DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA ELEMENTAL
DE LOS RELAVES MEDIANTE ESPECTROSCOPIA DE PLASMA
INDUCIDO POR LÁSER (LIBS)**

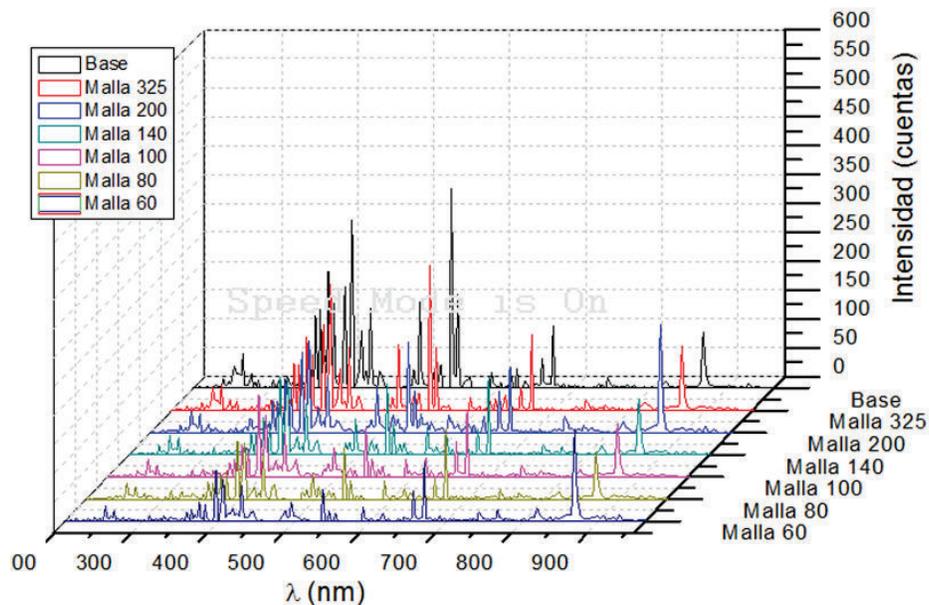


Figura AVII. 1. Espectro LIBS (con el eje de longitud de onda completo) para el elemento hierro, obtenido para las muestras de relaves retenidos sobre las diferentes mallas usadas en el análisis granulométrico

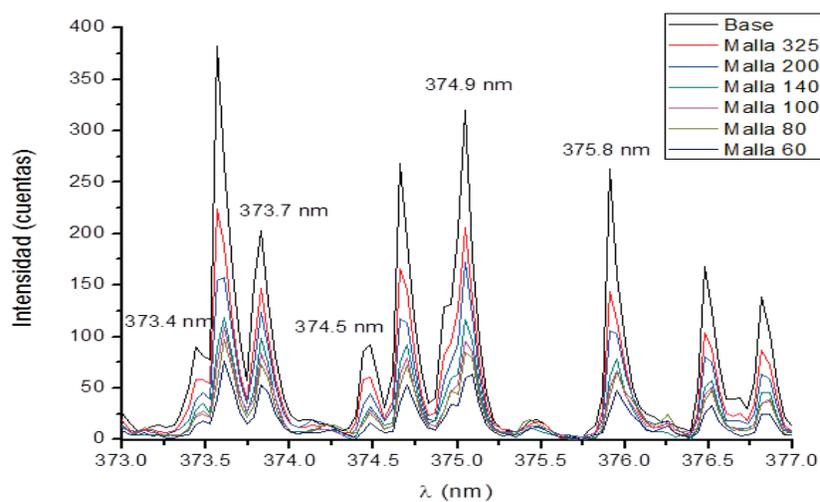


Figura AVII. 2. Espectro LIBS 2D (373,0 – 377,0 nm) para el elemento hierro, obtenido para las muestras de relaves retenidos sobre las diferentes mallas usadas en el análisis granulométrico

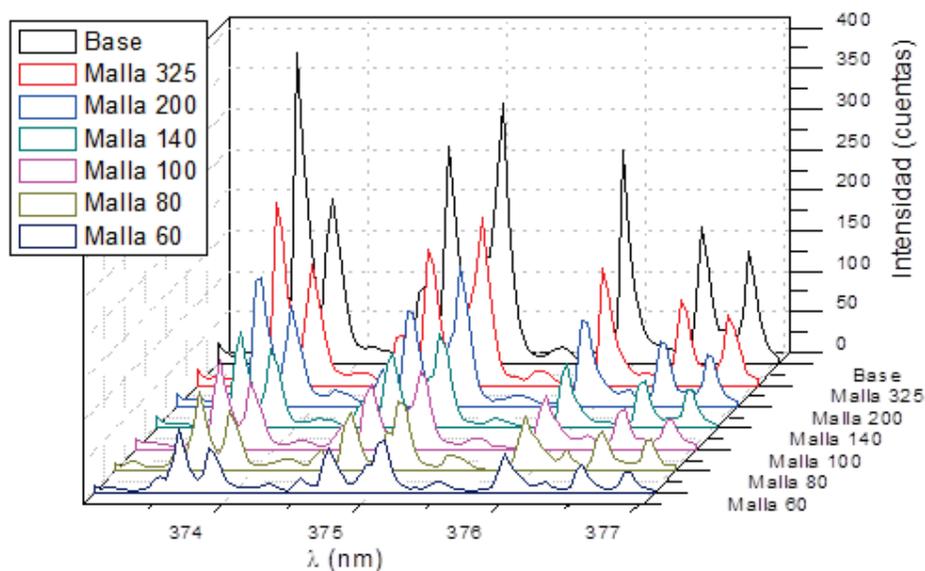


Figura AVII. 3. Espectro LIBS 3D (373,0 – 377,0 nm) para el elemento hierro, obtenido para las muestras de relaves retenidos sobre las diferentes mallas usadas en el análisis granulométrico

Tabla AVII. 1. Resultados del análisis LIBS para el contenido de hierro en las muestras de relaves retenidos sobre las diferentes mallas empleadas en el análisis granulométrico

| Longitud de onda (nm) | Intensidad (cuentas) | | | | | | |
|-----------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | M60 | M80 | M100 | M140 | M200 | M325 | Base |
| 344,061 | 52 | 71,5 | 85,5 | 104 | 146 | 187,5 | 289 |
| 358,119 | 73 | 93 | 111 | 123,5 | 170,5 | 194 | 318 |
| 371,994 | 55,5 | 68 | 81,5 | 89 | 114 | 145 | 269,5 |
| 373,486 | 76 | 97,5 | 109 | 118,5 | 158 | 223,5 | 383 |
| 373,713 | 76 | 97,5 | 109 | 118,5 | 158 | 223,5 | 383 |
| 374,556 | 53 | 71,5 | 79 | 91,5 | 117,5 | 166 | 268 |
| 374,949 | 64 | 84,5 | 95,5 | 116 | 172,5 | 206 | 320,5 |
| 375,823 | 48 | 66 | 66,5 | 78,5 | 105,5 | 143,5 | 263 |
| 382,043 | 57,5 | 77 | 86,5 | 93 | 122,5 | 188 | 328,5 |
| 385,991 | 36,5 | 52,5 | 63,5 | 66,5 | 96,5 | 113 | 162 |
| 404,581 | 97 | 133 | 156 | 200,5 | 267 | 343 | 458 |
| 438,354 | 155,5 | 212,5 | 251,5 | 315,5 | 407,5 | 510,5 | 672 |

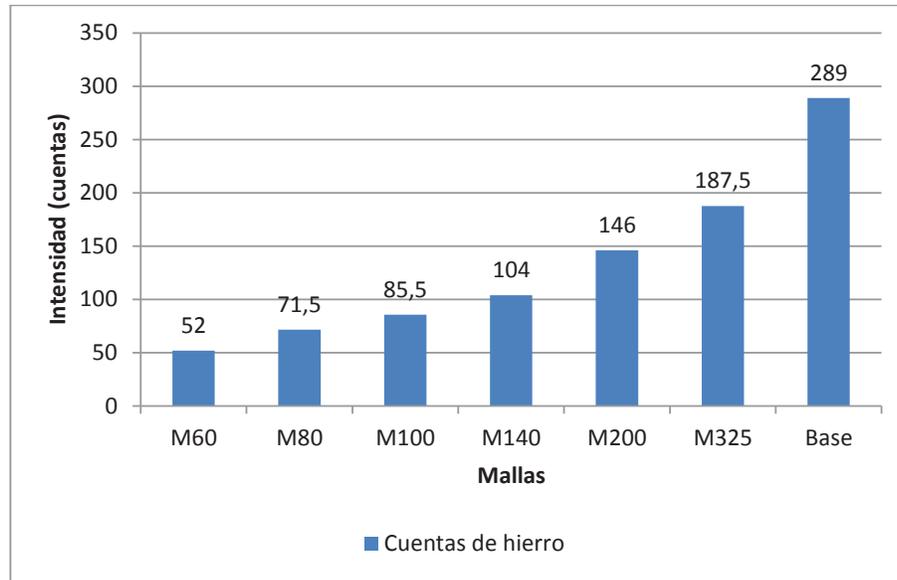


Figura AVII. 4. Resultados del análisis LIBS (344,061 nm) para el contenido de hierro en las muestras de relaves retenidos sobre las diferentes mallas empleadas en el análisis granulométrico

ANEXO VIII

**RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CALCINACIÓN,
SEPARACIÓN MAGNÉTICA Y PULVERIZACIÓN DE LAS
MUESTRAS DE RELAVES**

Tabla AVIII. 1. Resultados de las pérdidas por calcinación de las muestras de relaves sometidas a distintas temperaturas de calcinación

| Ensayo N° | Peso de los relaves antes de calcinar (g) | Peso de los relaves después de calcinar (g) | Pérdidas por calcinación (g) | Porcentaje de pérdidas por calcinación (%) |
|----------------------|--|--|---|---|
| 1 | 250 | 246,5 | 3,50 | 1,40 |
| 2 | 250 | 245,3 | 4,70 | 1,88 |
| 3 | 250 | 244,4 | 5,60 | 2,24 |
| 4 | 250 | 243,7 | 6,30 | 2,52 |
| 5 | 250 | 246,3 | 3,70 | 1,48 |
| 6 | 250 | 244,3 | 5,70 | 2,28 |
| 7 | 250 | 242,5 | 7,50 | 3,00 |
| 8 | 250 | 240,1 | 9,90 | 3,96 |
| 9 | 250 | 242,6 | 7,40 | 2,96 |
| 10 | 250 | 239,0 | 11,00 | 4,40 |
| 11 | 250 | 236,0 | 14,00 | 5,60 |
| 12 | 250 | 236,2 | 13,80 | 5,52 |
| 13 | 250 | 240,4 | 9,60 | 3,84 |
| 14 | 250 | 239,5 | 10,50 | 4,20 |
| 15 | 250 | 231,1 | 18,90 | 7,56 |
| 16 | 250 | 222,9 | 27,10 | 10,84 |

Tabla AVIII. 1. Resumen de resultados de las pérdidas por calcinación de las muestras de relaves sometidas a distintas temperaturas de calcinación

| Tamaño de partícula (μm) | Malla N° | Pérdidas por calcinación (%) | | | |
|---------------------------------------|----------|------------------------------|-------|-------|---------|
| | | 600°C | 800°C | 900°C | 1 000°C |
| >177 | 80 | 1,4 | 1,9 | 2,2 | 2,5 |
| 177 - 149 | 100 | 1,5 | 2,3 | 3,0 | 4,0 |
| 149 - 105 | 140 | 3,0 | 4,4 | 5,6 | 5,5 |
| <44 | base | 3,8 | 4,2 | 7,6 | 10,8 |

Tabla AVIII. 2. Resultados de las cantidades de material clasificado después de la 1ra y 2da separación magnética conjuntas

| Ensayo N° | Muestra que entra al separador magnético (g) | Porción magnética (g) | Porción no magnética libre (g) | Porción no magnética mixta (g) | Porción de ferritas (g) | Pérdidas por la 1ra y 2da separación magnética conjuntas (g) |
|-----------|--|-----------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------|--|
| 1 | 234,8 | 86,6 | 91,3 | 55,9 | 0,0 | 1,0 |
| 2 | 235,1 | 117,7 | 84,6 | 32,1 | 0,1 | 0,6 |
| 3 | 234,5 | 107,4 | 77,9 | 47,6 | 1,4 | 0,2 |
| 4 | 231,7 | 88,4 | 79,7 | 61,2 | 1,7 | 0,7 |
| 5 | 234,2 | 98,6 | 71,5 | 62,6 | 0,5 | 1,0 |
| 6 | 233,4 | 78,3 | 64,5 | 86,4 | 3,3 | 0,9 |
| 7 | 231,2 | 75,4 | 93,5 | 55,9 | 5,4 | 1,0 |
| 8 | 230,5 | 70,6 | 64,2 | 88,9 | 4,1 | 2,7 |
| 9 | 231,3 | 91,4 | 49,3 | 85,0 | 1,8 | 3,8 |
| 10 | 227,8 | 84,9 | 46,6 | 83,8 | 8,8 | 3,7 |
| 11 | 224,1 | 100,0 | 24,4 | 90,3 | 5,8 | 3,6 |
| 12 | 225,6 | 84,3 | 44,7 | 85,4 | 6,6 | 4,6 |
| 13 | 232,4 | 225,9 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 6,5 |
| 14 | 232,8 | 225,9 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 6,9 |
| 15 | 222,3 | 215,6 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 6,7 |
| 16 | 213,5 | 206,9 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 6,6 |

Tabla AVIII. 3. Porcentajes de las cantidades de material clasificado después de la 1ra y 2da separación magnética conjuntas

| Ensayo N° | Material magnético (%) | Material no magnético libre (%) | Material no magnético mixto (%) | Ferritas (%) | Pérdidas por la 1ra y 2da separación magnética conjuntas (%) |
|-----------|------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------|--|
| 1 | 36,88 | 38,88 | 23,81 | 0,01 | 0,42 |
| 2 | 50,06 | 35,98 | 13,65 | 0,04 | 0,26 |
| 3 | 45,80 | 33,22 | 20,30 | 0,61 | 0,07 |
| 4 | 38,15 | 34,40 | 26,41 | 0,71 | 0,32 |
| 5 | 42,10 | 30,53 | 26,73 | 0,23 | 0,42 |
| 6 | 33,55 | 27,63 | 37,02 | 1,41 | 0,39 |
| 7 | 32,61 | 40,44 | 24,18 | 2,34 | 0,43 |
| 8 | 30,63 | 27,85 | 38,57 | 1,80 | 1,15 |
| 9 | 39,52 | 21,31 | 36,75 | 0,78 | 1,65 |
| 10 | 37,27 | 20,46 | 36,79 | 3,87 | 1,61 |
| 11 | 44,62 | 10,89 | 40,29 | 2,59 | 1,61 |
| 12 | 37,37 | 19,81 | 37,85 | 2,93 | 2,03 |
| 13 | 97,20 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 2,80 |
| 14 | 97,05 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 2,95 |
| 15 | 96,99 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 3,01 |
| 16 | 96,90 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 3,10 |

Tabla AVIII. 4. Resumen del porcentaje de ferritas separadas en la 1ra y 2da separación magnética conjunta, en los ensayos del 1 al 16

| Tamaño de partícula (μm) | Malla N° | Ferritas separadas (%) | | | |
|---------------------------------------|----------|------------------------|-------|-------|---------|
| | | 600°C | 800°C | 900°C | 1 000°C |
| >177 | 80 | 0,01 | 0,04 | 0,61 | 0,71 |
| 177 - 149 | 100 | 0,23 | 1,41 | 2,34 | 1,80 |
| 149 - 105 | 140 | 0,78 | 3,87 | 2,59 | 2,93 |
| <44 | base | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

Tabla AVIII. 5. Registros del material magnético sometido al proceso de pulverización

| Ensayo N° | Muestra magnética que se pulverizará (g) | Muestra pulverizada (g) | Pérdidas por pulverización (g) | Pérdidas por pulverización (%) |
|-----------|--|-------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 1 | 80,9 | 77,2 | 3,7 | 4,79 |
| 2 | 110,9 | 110,2 | 0,7 | 0,64 |
| 3 | 101,1 | 100,1 | 1,0 | 1,00 |
| 4 | 81,9 | 80,8 | 1,1 | 1,36 |
| 5 | 90,8 | 89,9 | 0,9 | 1,00 |
| 6 | 72,3 | 72,1 | 0,2 | 0,28 |
| 7 | 69,1 | 69,0 | 0,1 | 0,14 |
| 8 | 64,6 | 64,5 | 0,1 | 0,16 |
| 9 | 85,4 | 84,9 | 0,5 | 0,59 |
| 10 | 78,1 | 77,1 | 1,0 | 1,30 |
| 11 | 92,7 | 92,2 | 0,5 | 0,54 |
| 12 | 78,3 | 75,9 | 2,4 | 3,16 |

Tabla AVIII. 6. Resultados de las cantidades de material clasificado después de la 3ra separación magnética

| Ensayo N° | Muestra pulverizada que entra al separador (g) | Porción magnética (g) | Ferritas separadas (g) | Pérdidas por la 3ra separación magnética (g) |
|-----------|--|-----------------------|------------------------|--|
| 1 | 77,2 | 76,1 | 0,0015 | 1,1 |
| 2 | 110,2 | 109,1 | 0,0033 | 1,1 |
| 3 | 100,1 | 98,9 | 0,0050 | 1,2 |
| 4 | 80,8 | 79,0 | 0,0040 | 1,8 |
| 5 | 89,9 | 88,9 | 0,0036 | 1,0 |
| 6 | 72,1 | 71,3 | 0,0029 | 0,8 |
| 7 | 69,0 | 68,2 | 0,0055 | 0,8 |
| 8 | 64,5 | 63,4 | 0,0039 | 1,1 |
| 9 | 84,9 | 83,7 | 0,0051 | 1,2 |
| 10 | 77,1 | 76,2 | 0,0055 | 0,9 |
| 11 | 92,2 | 91,2 | 0,0083 | 1,0 |
| 12 | 75,9 | 74,5 | 0,0061 | 1,4 |

Tabla AVIII. 7. Porcentajes de las cantidades de material clasificado después de la 3ra separación magnética

| Ensayo N° | Material magnético (%) | Ferritas separadas (%) | Pérdidas por la 3ra separación magnética (%) |
|-----------|------------------------|------------------------|--|
| 1 | 98,57 | 0,002 | 1,42 |
| 2 | 99,00 | 0,003 | 1,00 |
| 3 | 98,80 | 0,005 | 1,20 |
| 4 | 97,77 | 0,005 | 2,23 |
| 5 | 98,88 | 0,004 | 1,11 |
| 6 | 98,89 | 0,004 | 1,11 |
| 7 | 98,83 | 0,008 | 1,16 |
| 8 | 98,29 | 0,006 | 1,71 |
| 9 | 98,58 | 0,006 | 1,41 |
| 10 | 98,83 | 0,007 | 1,17 |
| 11 | 98,91 | 0,009 | 1,08 |
| 12 | 98,15 | 0,008 | 1,84 |

Tabla AVIII. 8. Resumen del porcentaje de ferritas separadas en la 3ra separación magnética en los ensayos del 1 al 12

| Tamaño de partícula (μm) | Malla N° | Ferritas separadas (%) | | | |
|---------------------------------|----------|------------------------|-------|-------|---------|
| | | 600°C | 800°C | 900°C | 1 000°C |
| >177 | 80 | 0,002 | 0,003 | 0,005 | 0,005 |
| 177 - 149 | 100 | 0,004 | 0,004 | 0,008 | 0,006 |
| 149 - 105 | 140 | 0,006 | 0,007 | 0,009 | 0,008 |

ANEXO IX

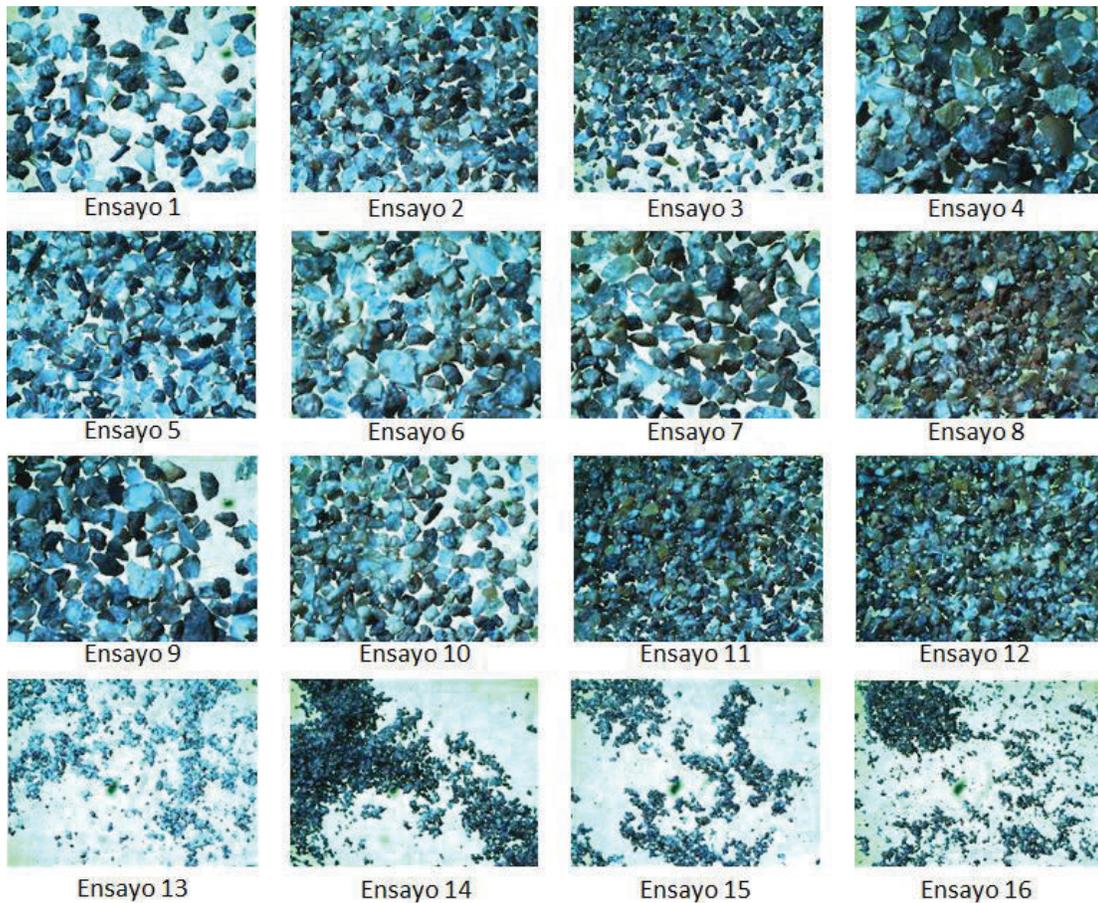
**RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE MICROSCOPIA ÓPTICA
REALIZADA CON LOS ESTEREOMICROSCOPIOS MOTIC BA4310
Y OLYMPUS SD 30**

Figura AIX. 1. Fotografías de las muestras de relaves después de haber sido calcinadas, obtenidas con la cámara acoplada al estereomicroscopio Motic BA4310. (Para estos registros fotográficos se usó la lente de aumento 4 X)

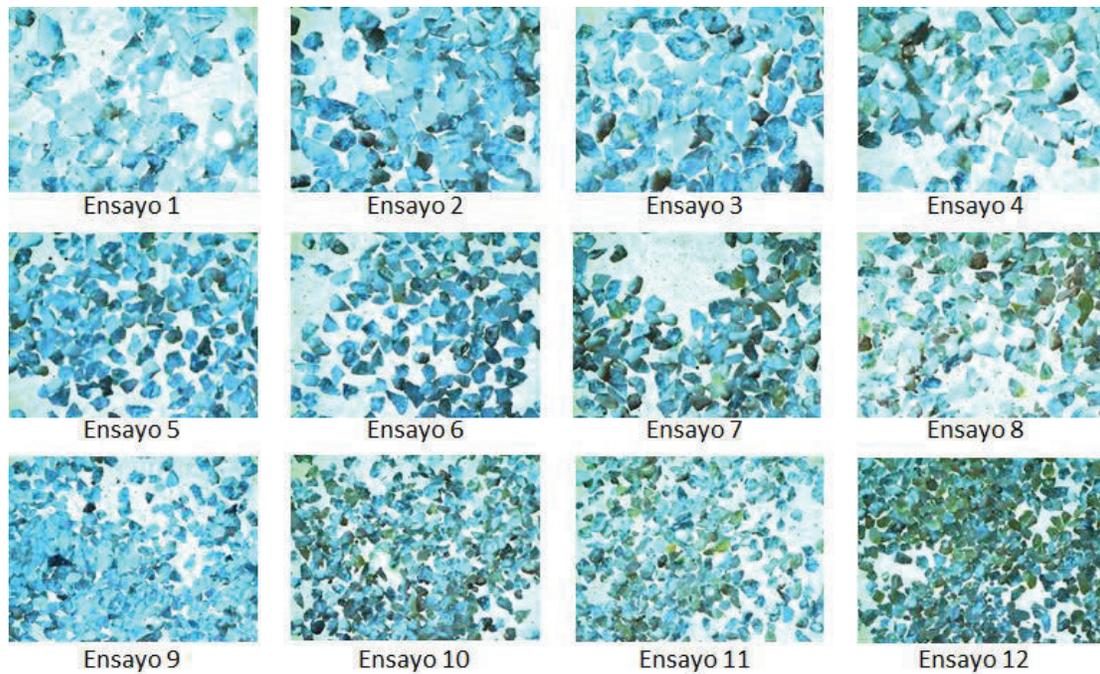


Figura AIX. 2. Fotografías del material no magnético libre conseguido después de la 1ra separación magnética, obtenidas con la cámara acoplada al estereomicroscopio Motic BA4310. (Para estos registros fotográficos se usó la lente de aumento 4 X)

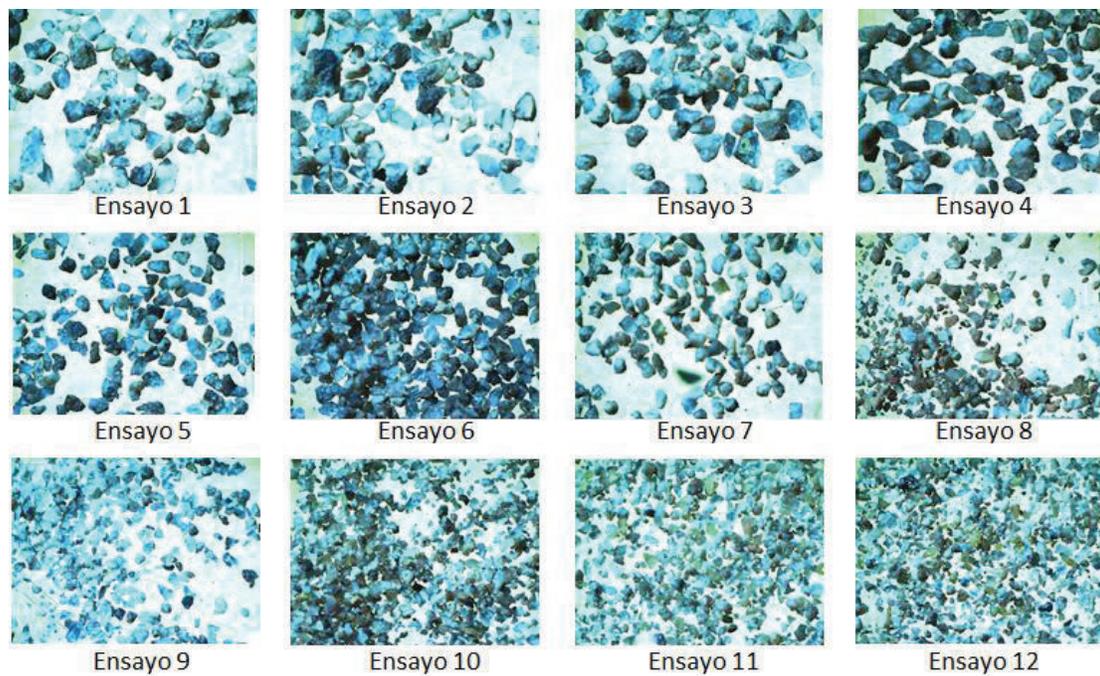


Figura AIX. 3. Fotografías del material no magnético mixto conseguido después de la 2da separación magnética, obtenidas con la cámara acoplada al estereomicroscopio Motic BA4310. (Para estos registros fotográficos se usó la lente de aumento 4 X)

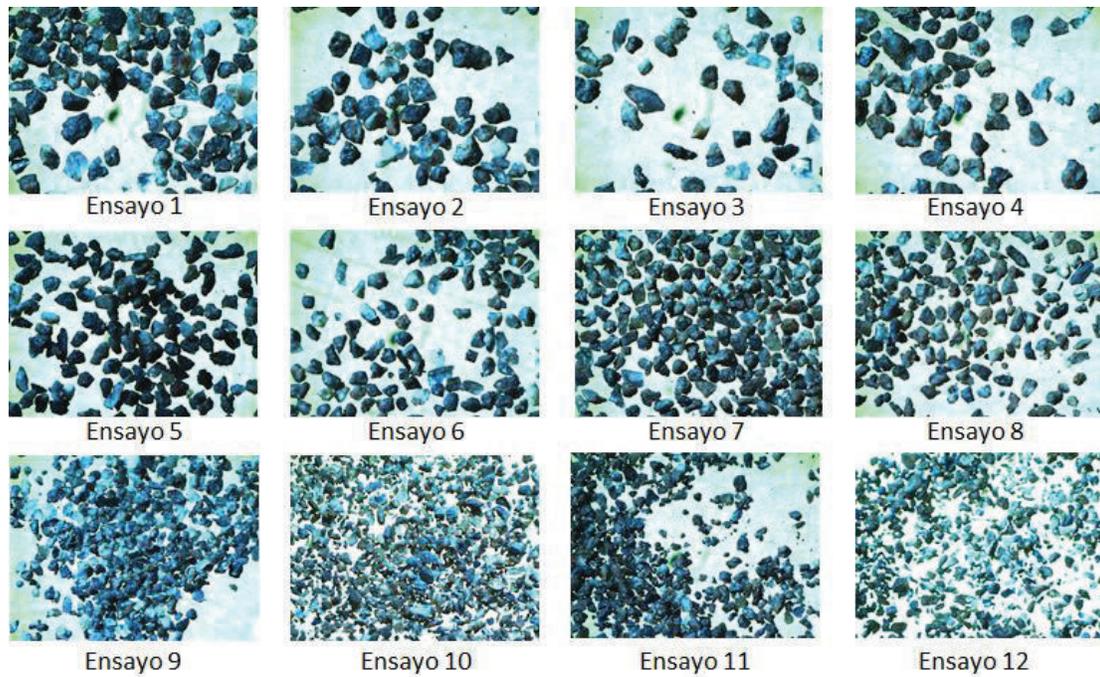


Figura AIX. 4. Fotografías del material ceramizado conseguido después de la 2da separación magnética, obtenidas con la cámara acoplada al estereomicroscopio Motic BA4310. (Para estos registros fotográficos se usó la lente de aumento 4 X)

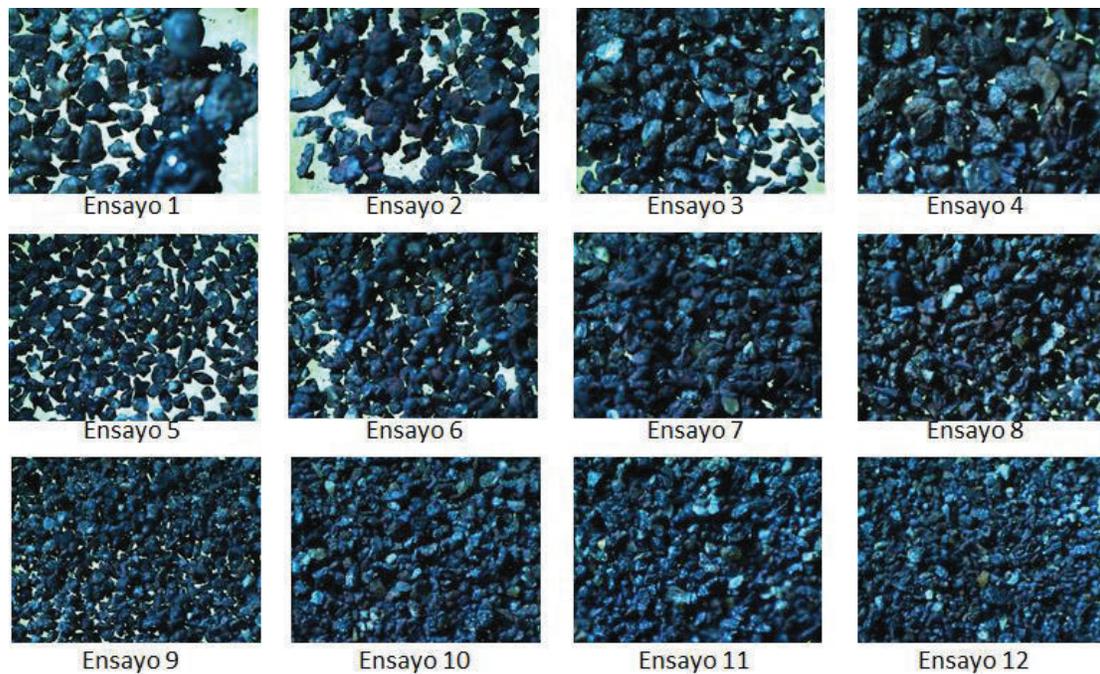


Figura AIX. 5. Fotografías de las ferritas acumuladas después de la 1ra, 2da y 3ra separación magnética, obtenidas con la cámara acoplada al estereomicroscopio Motic BA4310. (Para estos registros fotográficos se usó la lente de aumento 4 X)

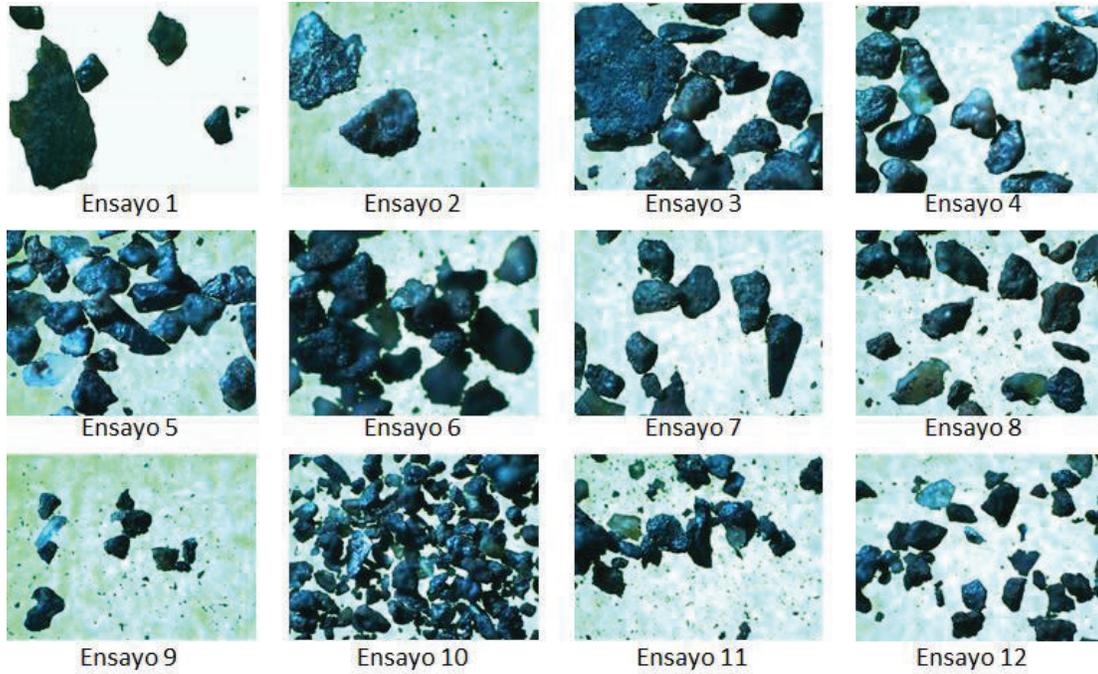


Figura AIX. 6. Fotografías de las ferritas acumuladas después de la 1ra, 2da y 3ra separación magnética, obtenidas con la cámara acoplada al estereomicroscopio Motic BA4310. (Para estos registros fotográficos se usó la lente de aumento 10 X)

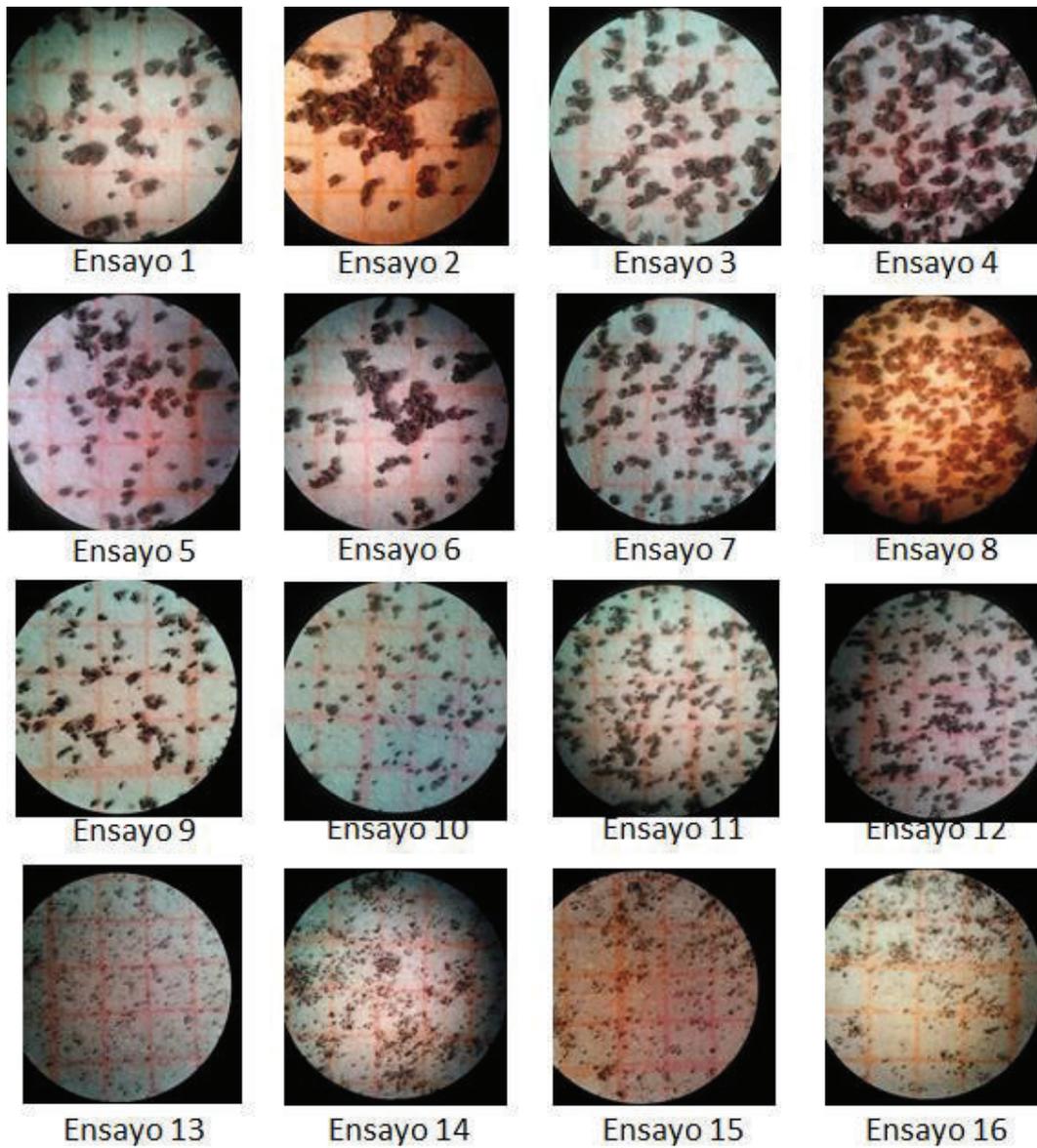


Figura AIX. 7. Fotografías de los granos de ferritas acumuladas después de la 1ra, 2da y 3ra separación magnética, obtenidas con la cámara SONY de 8 MP acoplada al estereomicroscopio OLYMPUS SD 30. (Para estos registros fotográficos se usó la lente de aumento 30 X)

Tabla AIX. 1. Resultados del conteo de granos de las ferritas acumuladas en los ensayos del 1 al 12

| Ensayo | 1er conteo | | | | 2do conteo | | | | 3er conteo | | | |
|-----------|------------|-------|----------|----------------|------------|-------|----------|----------------|------------|-------|----------|----------------|
| | Ganga | Mixto | Ferritas | Granos totales | Ganga | Mixto | Ferritas | Granos totales | Ganga | Mixto | Ferritas | Granos totales |
| 1 | 3 | 5 | 31 | 39 | 8 | 2 | 42 | 52 | 13 | 7 | 58 | 78 |
| 2 | 5 | 11 | 73 | 89 | 4 | 6 | 102 | 112 | 2 | 3 | 97 | 102 |
| 3 | 6 | 8 | 100 | 114 | 7 | 14 | 82 | 103 | 7 | 12 | 91 | 110 |
| 4 | 1 | 16 | 111 | 128 | 1 | 10 | 134 | 145 | 0 | 13 | 99 | 112 |
| 5 | 7 | 9 | 71 | 87 | 4 | 11 | 61 | 76 | 8 | 15 | 73 | 96 |
| 6 | 4 | 8 | 100 | 112 | 6 | 6 | 119 | 131 | 4 | 9 | 147 | 160 |
| 7 | 4 | 22 | 117 | 143 | 11 | 10 | 142 | 163 | 6 | 18 | 131 | 155 |
| 8 | 0 | 17 | 158 | 175 | 2 | 16 | 160 | 178 | 2 | 23 | 204 | 229 |
| 9 | 10 | 22 | 160 | 192 | 5 | 8 | 101 | 114 | 2 | 19 | 114 | 135 |
| 10 | 9 | 11 | 99 | 119 | 10 | 11 | 131 | 152 | 5 | 8 | 113 | 126 |
| 11 | 12 | 14 | 174 | 200 | 6 | 25 | 180 | 211 | 18 | 13 | 174 | 205 |
| 12 | 6 | 23 | 203 | 232 | 1 | 10 | 177 | 188 | 10 | 10 | 205 | 225 |

Tabla AIX. 2. Resultados de los porcentajes del conteo de granos de las ferritas acumuladas en los ensayos del 1 al 12

| Ensayo | 1er conteo | | | 2do conteo | | | 3er conteo | | | Promedio (%) | | |
|--------|------------|-----------|--------------|------------|-----------|--------------|------------|-----------|--------------|--------------|-------|----------|
| | Ganga (%) | Mixto (%) | Ferritas (%) | Ganga (%) | Mixto (%) | Ferritas (%) | Ganga (%) | Mixto (%) | Ferritas (%) | Ganga | Mixto | Ferritas |
| 1 | 7,69 | 12,82 | 79,49 | 15,38 | 3,85 | 80,77 | 16,67 | 8,97 | 74,36 | 13,25 | 8,55 | 78,21 |
| 2 | 5,62 | 12,36 | 82,02 | 3,57 | 5,36 | 91,07 | 1,96 | 2,94 | 95,10 | 3,72 | 6,89 | 89,40 |
| 3 | 5,26 | 7,02 | 87,72 | 6,80 | 13,59 | 79,61 | 6,36 | 10,91 | 82,73 | 6,14 | 10,51 | 83,35 |
| 4 | 0,78 | 12,50 | 86,72 | 0,69 | 6,90 | 92,41 | 0,00 | 11,61 | 88,39 | 0,49 | 10,33 | 89,18 |
| 5 | 8,05 | 10,34 | 81,61 | 5,26 | 14,47 | 80,26 | 8,33 | 15,63 | 76,04 | 7,21 | 13,48 | 79,30 |
| 6 | 3,57 | 7,14 | 89,29 | 4,58 | 4,58 | 90,84 | 2,50 | 5,63 | 91,88 | 3,55 | 5,78 | 90,67 |
| 7 | 2,80 | 15,38 | 81,82 | 6,75 | 6,13 | 87,12 | 3,87 | 11,61 | 84,52 | 4,47 | 11,04 | 84,48 |
| 8 | 0,00 | 9,71 | 90,29 | 1,12 | 8,99 | 89,89 | 0,87 | 10,04 | 89,08 | 0,67 | 9,58 | 89,75 |
| 9 | 5,21 | 11,46 | 83,33 | 4,39 | 7,02 | 88,60 | 1,48 | 14,07 | 84,44 | 3,69 | 10,85 | 85,46 |
| 10 | 7,56 | 9,24 | 83,19 | 6,58 | 7,24 | 86,18 | 3,97 | 6,35 | 89,68 | 6,04 | 7,61 | 86,35 |
| 11 | 6,00 | 7,00 | 87,00 | 2,84 | 11,85 | 85,31 | 8,78 | 6,34 | 84,88 | 5,87 | 8,40 | 85,73 |
| 12 | 2,59 | 9,91 | 87,50 | 0,53 | 5,32 | 94,15 | 4,44 | 4,44 | 91,11 | 2,52 | 6,56 | 90,92 |

ANEXO X

DIFRACTOGRAMAS OBTENIDOS DE LAS MUESTRAS DE MATERIAL CALCINADO, NO MAGNÉTICO LIBRE, NO MAGNÉTICO MIXTO, CERAMIZADO Y FERRITAS

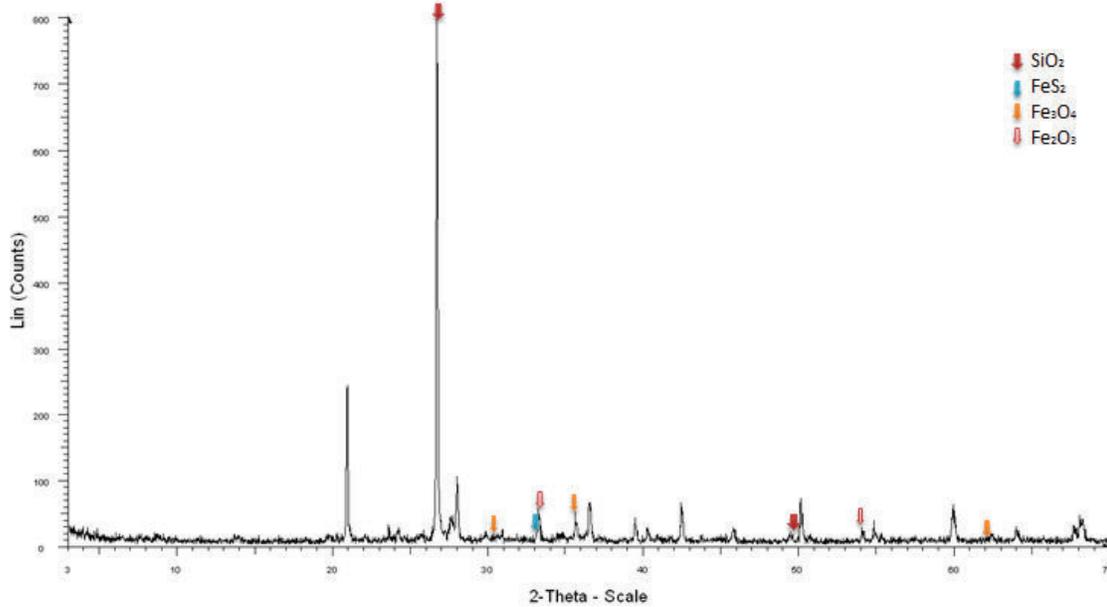


Figura AX. 1. Difractograma de la muestra de relaves con tamaño de partícula entre 105 y 149 μm luego de haber sido calcinados a 800 °C (ensayo N° 10)

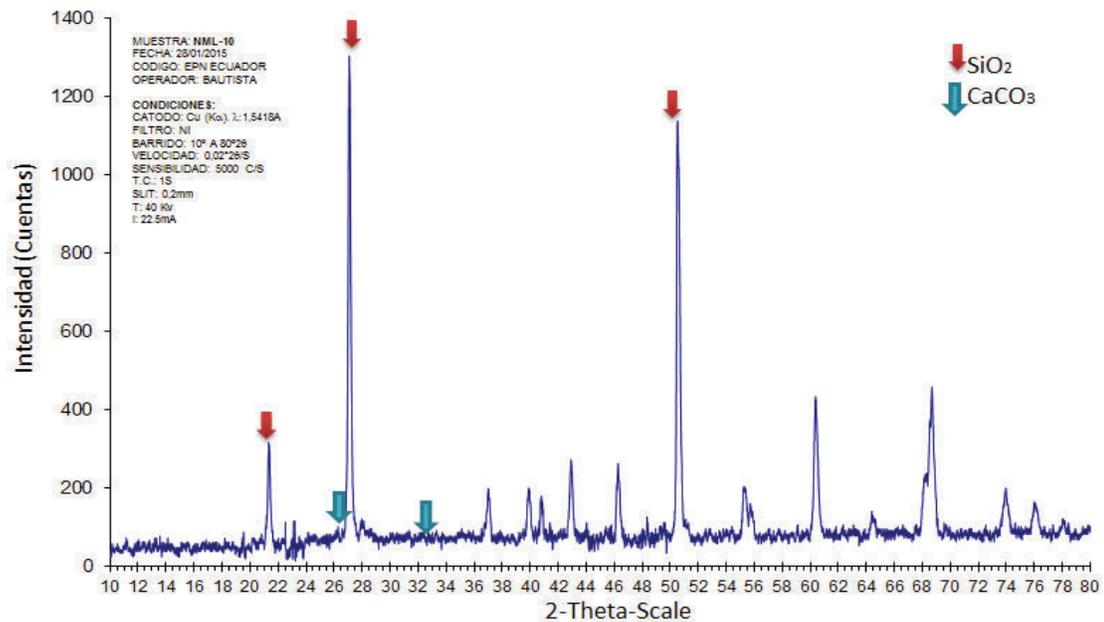


Figura AX. 2. Difractograma del material no magnético libre (correspondiente al ensayo N° 10), obtenido luego de la 1ra separación magnética

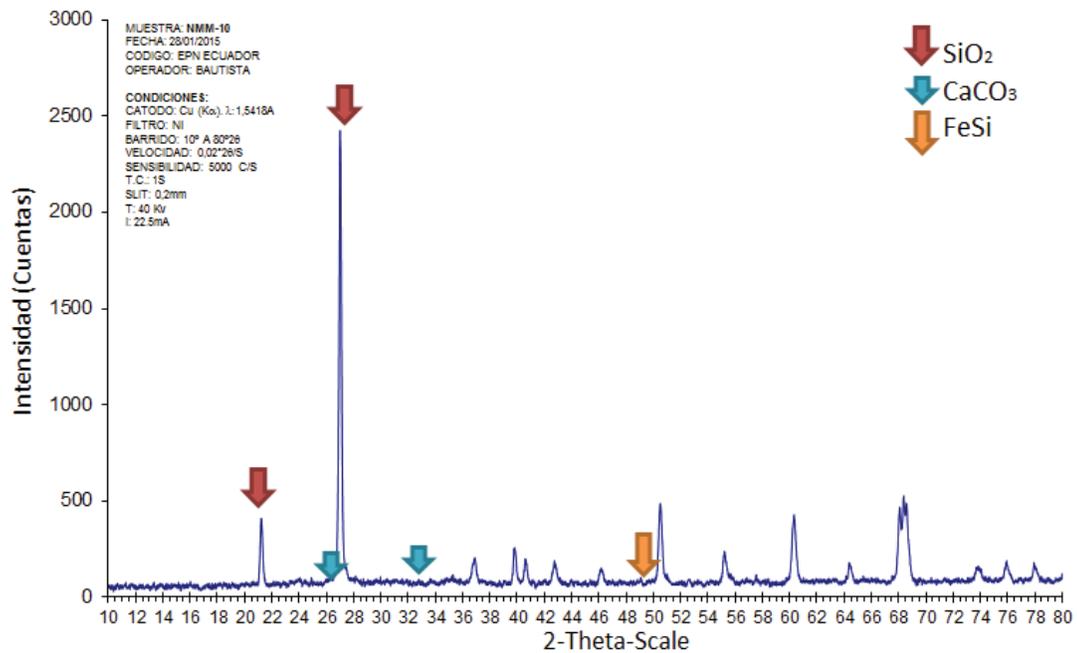


Figura AX. 3. Difractograma del material no magnético mixto (correspondiente al ensayo N° 10), obtenido luego de la 2da separación magnética

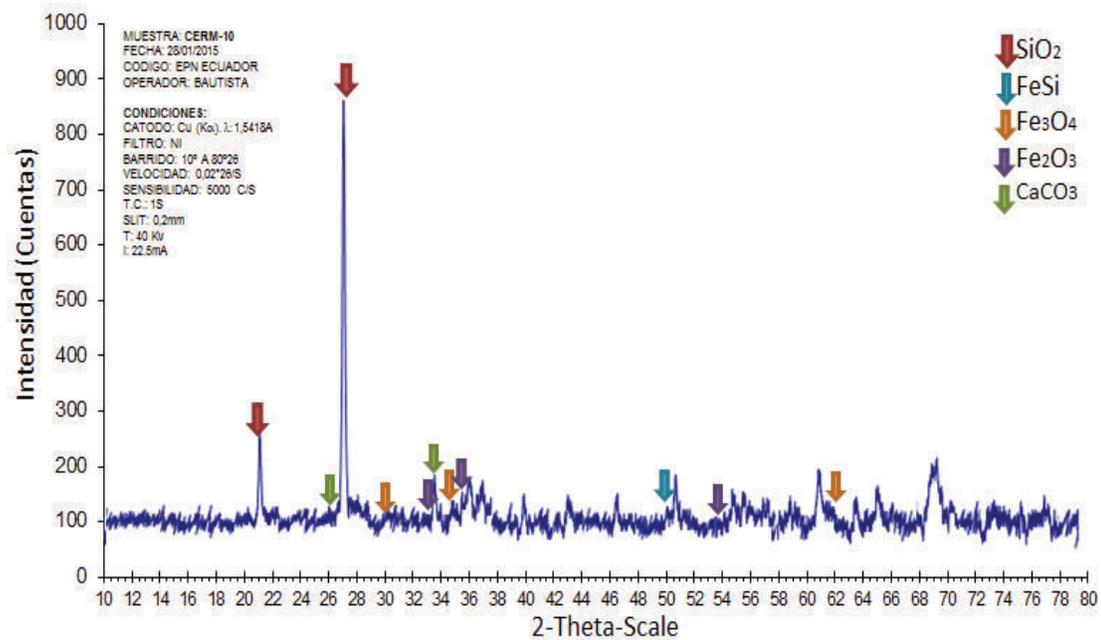


Figura AX. 4. Difractograma del material ceramizado (correspondiente al ensayo N° 10), obtenido luego de la 3ra separación magnética

ANEXO XI

BALANCE DE MASA PARA LA OBTENCIÓN DE UNA TONELADA MENSUAL DE FERRITAS

- Balance en la separación magnética

$$J = K + L + F1 + P1 \quad [AXI.1]$$

$$F1 = 1 \text{ t/mes} = 3,87\%$$

$$\begin{array}{cc} F1 & K \\ 3,87\% & 57,25\% \\ 1 \text{ t} & \end{array} \Rightarrow K = \frac{57,25\% * 1 \text{ t}}{3,87\%} = 14,8 \text{ t/mes}$$

$$100\% = 57,25\% + L + 3,87\% + 1,61\%$$

$$L = 37,27\%$$

$$\begin{array}{cc} F1 & L \\ 3,87\% & 37,27\% \\ 1 \text{ t} & \end{array} \Rightarrow L = \frac{37,27\% * 1 \text{ t}}{3,87\%} = 9,6 \text{ t/mes}$$

$$\begin{array}{cc} F1 & P1 \\ 3,87\% & 1,61\% \\ 1 \text{ t} & \end{array} \Rightarrow P1 = \frac{1,61\% * 1 \text{ t}}{3,87\%} = 0,4 \text{ t/mes}$$

$$J = (14,8 + 9,6 + 1 + 0,4) \text{ t/mes}$$

$$J = 25,8 \text{ t/mes}$$

- Balance en la calcinación

$$H = I + J \quad [AXI.2]$$

$$100\% = 4,40\% + J$$

$$J = 95,6\%$$

$$\begin{array}{cc} J & I \\ 95,6\% & 4,40\% \\ 25,8 \text{ t} & \end{array} \Rightarrow I = \frac{4,40\% * 25,8 \text{ t}}{95,6\%} = 1,2 \text{ t/mes}$$

$$H = (1,2 + 25,8) \text{ t/mes}$$

$$H = 27 \text{ t/mes}$$

- Balance en la disgregación

$$G = H$$

[AXI.3]

$$G = 27 \text{ t/mes}$$

- Balance en el secado

$$D = E + G$$

[AXI.4]

$$100 \% = 16,21 \% + G$$

$$G = 83,79 \%$$

$$\frac{G}{27 \text{ t}} \quad \frac{E}{16,21 \%} \Rightarrow E = \frac{16,21 \% * 27 \text{ t}}{83,79 \%} = 5,2 \text{ t/mes}$$

$$D = (5,2 + 27) \text{ t/mes}$$

$$D = 32,2 \text{ t/mes}$$

- Balance el en tamizado

$$A = B + C + D$$

[AXI.5]

$$\frac{D}{32,2 \text{ t}} \quad \frac{C}{45,67 \%} \Rightarrow C = \frac{45,67 \% * 32,2 \text{ t}}{19,43 \%} = 75,8 \text{ t/mes}$$

$$\frac{D}{32,2 \text{ t}} \quad \frac{B}{34,90 \%} \Rightarrow B = \frac{34,90 \% * 32,2 \text{ t}}{19,43 \%} = 57,9 \text{ t/mes}$$

$$A = (57,9 + 75,8 + 32,2) \text{ t/mes}$$

$$A = 165,9 \text{ t/mes}$$

ANEXO XII

DISEÑO DEL TANQUE DE ACONDICIONAMIENTO TA-101

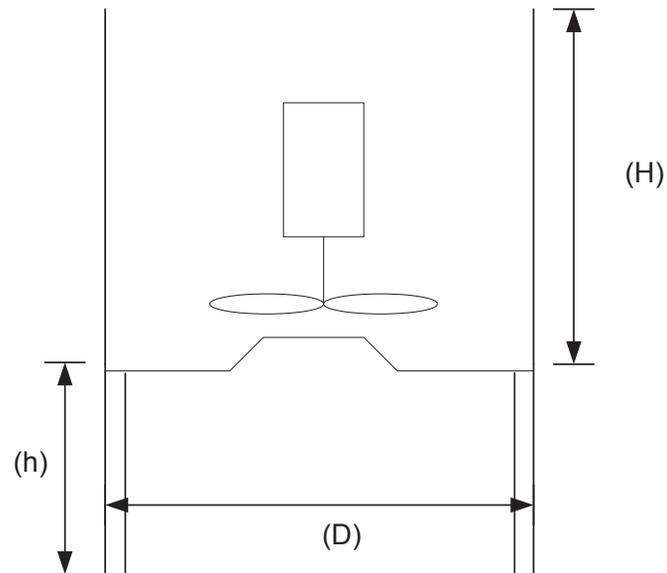


Figura AXII. 1. Esquema del tanque de acondicionamiento

$$V = \frac{\pi D^2}{4} H$$

[AXII.1]

Donde:

V : Volumen total o capacidad del tanque

D : Diámetro del tanque

H : Altura del tanque

Por tanto,

$$0,59 \text{ m}^3 = \frac{\pi(0,75 \text{ m})^2}{4} H$$

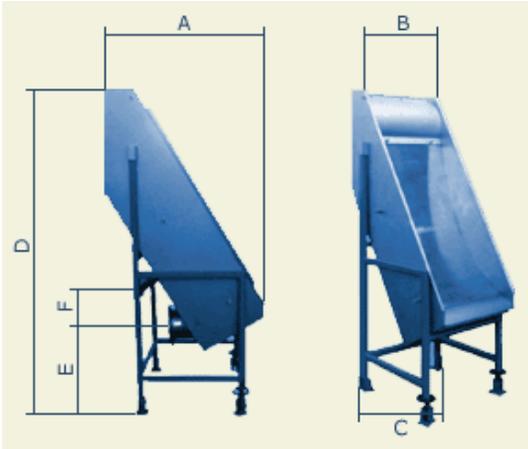
$$\text{Si } D = 1,0 \text{ m}$$

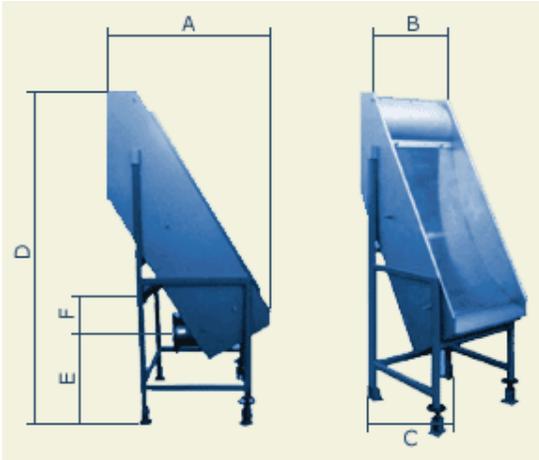
$$H = 0,75 \text{ m}$$

ANEXO XIII

**HOJAS DE ESPECIFICACIONES DE EQUIPOS SELECCIONADOS
PARA EL PROCESO DE OBTENCIÓN DE FERRITAS DE
CAPACIDAD UNA TONELADA MENSUAL**

| Hoja de especificación No. | | | | | 01 |
|----------------------------|---------|--|--|--------------------------|---------|
| Nombre del equipo | | Tanque de acondicionamiento con agitación TA – 101 | | | |
| Fabricante: | Acindec | Modelo: | --- | Número en planta: | 1 |
| Dimensiones: | | | Parámetros de diseño del motor eléctrico monofásico: | | |
| Diámetro total (D) | : | 1 000 mm | Potencia eléctrica | : | 1/4 Hp |
| Altura total (H) | : | 750 mm | Velocidad nominal | : | 1 750 |
| Altura del suelo (h) | : | 2 100 mm | Velocidad de agitación con reducción | : | 300 rpm |
| | | | Características: | | |
| | | | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Agitador vertical ✓ Construido en acero inoxidable A305 ✓ Capacidad de 593,4 L | | |
| Tipo de operación: | | Semicontinuo | | | |
| Esquema del equipo: | | | | | |
| | | | | | |

| Hoja de especificación No. | | | | 02 | |
|--|--|---|---|----|----------------------------|
| Nombre del equipo | | Separador estático SE-102 | | | |
| Fabricante: | | Labopolis | Modelo: | | Número en planta: 1 |
| Dimensiones: | | | Parámetros de diseño y características: | | |
| A : 1 050 mm D : 2 100 mm B : 600 mm E : 550 mm C : 900 mm F : 310 mm | | | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Capacidad de procesamiento: 50 m³/h, con un máximo de 10 % de sólidos en el líquido ✓ Construido en acero inoxidable AISI – 304 ✓ Construido bajo especificaciones ASTM con malla N° 100 | | |
| Principio de funcionamiento: | | <p>El separador estático no utiliza ningún motor. Es una herramienta simple pero de alta eficacia que puede trabajar durante mucho tiempo sin vigilancia y sin obstrucción. El tamizado se realiza por medio de una criba con perfil triangular, consistente en unas barras horizontales con forma triangular, separando el líquido del sólido que fluye hacia abajo debido a la energía cinética. La utilización de tamices curvados permite una entrada uniforme en el tamiz (utilizando toda su superficie), una alta velocidad del flujo del tamiz y un aumento de la eficiencia de la clasificación.</p> | | | |
| Tipo de operación: | | Semicontinuo | | | |
| Esquema del equipo: | | | | | |
|  | | | | | |

| Hoja de especificación No. | | | | 03 | |
|--|--|---|--|----|----------------------------|
| Nombre del equipo | | Separador estático SE-103 | | | |
| Fabricante: | | Labopolis | Modelo: | | Número en planta: 1 |
| Dimensiones: | | | Parámetros de diseño y características: | | |
| A : 1 050 mm D : 2 100 mm B : 600 mm E : 550 mm C : 900 mm F : 310 mm | | | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Capacidad de procesamiento: 50 m³/h, con un máximo de 10 % de sólidos en el líquido ✓ Construido en acero inoxidable AISI – 304 ✓ Construido bajo especificaciones ASTM con malla N^o 140 | | |
| Principio de funcionamiento: | | <p>El separador estático no utiliza ningún motor. Es una herramienta simple pero de alta eficacia que puede trabajar durante mucho tiempo sin vigilancia y sin obstrucción. El tamizado se realiza por medio de una criba con perfil triangular, consistente en unas barras horizontales con forma triangular, separando el líquido del sólido que fluye hacia abajo debido a la energía cinética. La utilización de tamices curvados permite una entrada uniforme en el tamiz (utilizando toda su superficie), una alta velocidad del flujo del tamiz y un aumento de la eficiencia de la clasificación.</p> | | | |
| Tipo de operación: | | Semicontinuo | | | |
| Esquema del equipo: | | | | | |
|  | | | | | |

| Hoja de especificación No. | | | | | 04 |
|--|------------|---|--|--------------------------|----|
| Nombre del equipo | | Horno de secado HS-104 | | | |
| Fabricante: | Nabertherm | Modelo: | N 1000/.. | Número en planta: | 1 |
| Dimensiones internas: | | | Parámetros de diseño: | | |
| Ancho (An) : 1 000 mm | | | Potencia eléctrica : 18 kW | | |
| Profundidad (P) : 1 000 mm | | | Características: | | |
| Altura (H) : 1 000 mm | | | ✓ T _{máx} : 260 °C | | |
| | | | ✓ Volumen: 1 000 L | | |
| | | | ✓ Tasa de circulación: 3 600 m ³ /h | | |
| | | | ✓ Conexión eléctrica: trifásica | | |
| | | | ✓ Calentamiento por electricidad o por gas | | |
| Principio de funcionamiento: | | El principio fundamental que rige en este horno de secado es el de eliminar la humedad de un cuerpo con aire circulante a temperaturas de hasta 260 °C. | | | |
| Tipo de operación: | | Batch | | | |
| Esquema del equipo: | | | | | |
|  | | | | | |

| Hoja de especificación No. | | | | | 05 |
|-------------------------------------|--|----------------|--|--------------------------|----|
| Nombre del equipo | Horno de calcinación HC-105 | | | | |
| Fabricante: | Nabertherm | Modelo: | W 1000/.A | Número en planta: | 1 |
| Dimensiones internas: | | | Parámetros de diseño: | | |
| Ancho (An) : 800 mm | | | Potencia eléctrica : 50 kW | | |
| Profundidad (P) : 1 600 mm | | | Características: | | |
| Altura (H) : 800 mm | | | ✓ Tmáx: 850 °C | | |
| Dimensiones externas: | | | ✓ Volumen: 1 000 L | | |
| Ancho (An) : 1 800 mm | | | ✓ Conexión eléctrica: trifásica | | |
| Profundidad (P) : 2 390 mm | | | ✓ Ventiladores de refrigeración para favorecer el proceso de refrigeración | | |
| Altura (H) : 2 305 mm | | | | | |
| Principio de funcionamiento: | <p>Los hornos de vagoneta con potente circulación de aire se emplean cuando se requiere una muy buena homogeneidad de la temperatura en el margen de temperatura inferior. Gracias a un amplio programa de equipamientos adicionales, los hornos se pueden adaptar de forma óptima a los respectivos procesos.</p> <p>Calentamiento en tres zonas de ambos laterales y la vagoneta para los modelos de 850 °C.</p> | | | | |
| Tipo de operación: | Batch | | | | |
| Esquema del equipo: |  | | | | |

| Hoja de especificación No. | | | | | 06 |
|--|--------|---|--|--------------------------|----|
| Nombre del equipo | | Separador magnético SM-106 | | | |
| Fabricante: | Zenith | Modelo: | CTL-0816 | Número en planta: | 1 |
| Dimensiones del cilindro: | | | Parámetros de diseño: | | |
| <p>Diámetro (D) : 800 mm</p> <p>Longitud (L) : 1 600 mm</p> <p>Dimensiones generales:</p> <p>Ancho (An) : 3 053 mm</p> <p>Profundidad (P) : 1 671 mm</p> <p>Altura (H) : 1 295 mm</p> | | | <p>Potencia eléctrica : 7,5 kW</p> <p>Características:</p> <p>✓ Velocidad: 0-63 rpm</p> <p>✓ Capacidad: 35-55 t/h</p> <p>✓ Peso: 2,75 t</p> | | |
| Principio de funcionamiento: | | El principio fundamental que rige el comportamiento de este separador magnético es simple en términos de estructuras. Puede ser fácilmente instalado en las cabeceras de las bandas de transportadoras. Son principalmente usados para separar minerales paramagnéticos de diferentes tamaños de partícula. | | | |
| Tipo de operación: | | Batch | | | |
| Esquema del equipo: | | | | | |
|  | | | | | |