



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Estudio de recuperabilidad y calidad de minerales de tierras raras como subproducto de la minería aluvial de oro

Lucía Inés Ochoa Correa

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Materiales y Minerales
Medellín, Colombia
2022

Estudio de recuperabilidad y calidad de minerales de tierras raras como subproducto de la minería aluvial de oro

Lucía Inés Ochoa Correa

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Recursos Minerales

Director:

PhD. Gustavo Neira Arenas

Línea de Investigación:

Recursos Minerales

Grupo de Investigación:

Explotación y Aprovechamiento Sostenible de Recursos Minerales - GEAMIN

This thesis was supported by The Royal Academy of Engineering under the Industry Academia Partnership Programme scheme IAPP18-19-124

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Materiales y Minerales

Medellín, Colombia

2022

(Dedicatoria o lema)

La tierra no esconde metales en sus profundidades porque no quiere que los hombres los extraigan, sino porque la naturaleza benévola y sagaz ha designado para cada cosa un lugar.

Georgius Agrícola

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



Lucía Inés Ochoa Correa

Fecha 13/08/2022

Agradecimientos

Inicialmente agradezco a mi familia por la motivación y disciplina que me han inculcado, que, como consecuencia, ha generado el esmero y dedicación la cual he desarrollado en este ejercicio académico y en mi vida en general. De la misma forma a mis compañeros de trabajo, quienes se han convertido en una fuente de aprendizaje tanto técnico como emocional, sin su apoyo mucho de este trabajo no hubiese sido posible.

Un agradecimiento muy especial a la empresa Mineros Aluvial SAS BIC por facilitar e impulsar el desarrollo de esta investigación, la cual abrirá muchas puertas en el camino hacia el plan estratégico de la misma.

Del mismo modo, gratitud hacia los colaboradores y dirigentes del instituto de minerales CIMEX, quienes compartieron los recursos materiales y su conocimiento para el desarrollo de algunos de los ensayos de separación que ejecuté.

Un reconocimiento al apoyo recibido en el marco del proyecto “BUILDING RESEARCH AND INNOVATION CAPABILITIES FOR THE SUSTAINABLE EXPLOITATION OF BLACK SANDS AS A SOURCE OF RARE EARTH ELEMENTS” financiado por The Royal Academy of Engineering, desarrollado en conjunto con la Universidad de Leeds de Inglaterra, la Universidad Nacional de Colombia y la empresa Mineros Aluvial SAS BIC, liderado por el profesor Gustavo Neira Arenas.

Finalmente agradezco al Servicio Geológico Colombiano donde aprendí la técnica de separación por medios densos, un reconocimiento muy especial a la calidad del trabajo realizado en esta institución que aporta al desarrollo técnico y científico del país.

Resumen

Estudio de recuperabilidad y calidad de minerales de tierras raras como subproducto de la minería aluvial de oro

Este trabajo presenta una posible ruta de beneficio para minerales de tierras raras (REE) y otros minerales como magnetita, ilmenita, rutilo y circones contenidos en las arenas negras de un proceso industrial de minería aluvial de oro. Esta ruta de beneficio comprende separaciones por tamaño, magnéticas, gravimétricas y electrostáticas de una corriente que hace parte de los relaves actuales de la explotación de un depósito de placer aluvial de oro ubicado en el Bajo Cauca Antioqueño (Colombia). Esta corriente presenta una concentración de minerales pesados superior al 50%, distribuidos en diferentes rangos de tamaño y asociaciones mineralógicas. Se encontró que la monacita, mineral de tierras raras de mayor interés, se encuentra concentrado en la fracción gruesa (+20 mallas, tamaño mayor a 0,85 milímetros), con un 1,4% de participación en esta fracción, esta fracción de gruesos a su vez equivale al 7% del total de la corriente sometida a estudio, y en la fracción fina (-70 mallas, tamaños menores a 0,212 milímetros), con un 0,23% de participación en esta fracción que a su vez equivale al 27% de la corriente de este estudio. Partiendo de un muestreo sistemático de la corriente de interés del proceso actual de beneficio aluvial, ensayos de separación y con ayuda del software LIMN®, se establecieron parámetros para la concentración de monacita y otros minerales de interés. La caracterización óptica, física, química y mineralógica de los concentrados obtenidos permitió inferir que, para lograr la recuperación de los minerales de tierras raras puede ser necesario un proceso de liberación mediante conminución, a fin de alcanzar los requerimientos de comercialización de concentrados, esto requiere un análisis técnico económico más profundo. El estudio de calidad realizado evidenció la potencialidad de aprovechamiento de minerales principales de hierro (como magnetita), titanio (ilmenita), monacita y circones, con variadas asociaciones mineralógicas.

Palabras clave: Arenas negras, REE, minerales pesados, concentración, aluvial

Abstract

Recovery and quality study of rare earth minerals as byproducts of alluvial gold mining

This paper presents a possible route to rare minerals benefit, and also other minerals such as magnetite, ilmenite, rutile, and circones, present in the black sands of an industrial aluvial gold mining company. This benefit route includes size, magnetic, gravimetric, and electrostatic separation of one of the currents that are part of the dredge tails in the mining process of an aluvial placer deposit located in El Bajo Cauca Antioqueño (Colombia). This current contains a heavy mineral concentration higher than 50%, distributed in different ranges of size and mineralogical associations. It was found that the monacite, the rare sands mineral of greater interest is concentrated in the gross section (+20 mesh, size bigger than 0.85 millimeters), with a 1,4% participation in this fraction, which represents the 7% of the total current under study, and in the fine fraction (-70 mesh, sizes under 0,212 millimeters), with a 0.23% of participation in this fraction, which also represents 27% of the current under study. Starting from systematic sampling of the currents of interest of the actual aluvial benefit process and with the support of the Software LIMN®, separation test and based of the, the parameters of concentration of the minerals of interest were stablished, for monacita. The optical, physical, chemical, and mineralogical characterization of the concentrates obtained, allowed to infer that the recovery of the minerals in the rare sands may require a comminution liberation process, with the purpose of achieving the requirements to commercialize the concentrates, which also requires a deeper technical and economic analysis. The quality study, showed the potential of the exploitation of the principal minerals of iron (such us magnetite), titanium (ilmenite), monacite and circones, with various mineralogical associations.

Keywords: Black sands, REE, concentration, alluvial, heavy minerals

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Abstract	XI
Lista de figuras	XV
Lista de tablas	XVII
Lista de Símbolos y abreviaturas	20
Introducción	21
1. Marco teórico	25
1.1 Geología, depósitos de placer y tierras raras	28
1.1.1 Depósitos de placer en el mundo.....	31
1.2 Minado de los depósitos de placer	32
1.3 Procesamiento de minerales	35
1.3.1 Balance de masa	38
1.3.2 Software de balances máxicos LIMN®	39
1.3.3 Separación gravimétrica	43
1.3.4 Separación magnética y electrostática.....	52
2. Caracterización de las muestras y su procedencia	61
2.1 Descripción del proceso y toma de muestras	61
2.2 Propiedades físicas y mineralogía.....	65
2.2.1 Ángulo de reposo.....	65
2.2.2 Distribución de tamaño de partícula.....	67
2.2.3 Densidad	70
2.2.4 Separación con medios densos (Flotados y Hundidos).....	72
2.2.5 Microscopía óptica	76
3. Ensayos de separación de minerales	83
3.1 Separación magnética de baja intensidad	83
3.1.1 Separación magnética (SM) cabeza de baja intensidad (BI)	84

3.1.2	Separación magnética por fracciones de baja intensidad (BI)	85
3.2	Separación gravimétrica	88
3.2.1	Separación de mineral de cabeza en mesa Wilfley	88
3.2.2	Separación en mesa por fracciones +40 y -40 mallas	89
3.3	Separación electrostática (SE).....	91
3.4	Separación magnética (SM) de alta intensidad (AI)	92
3.5	Análisis de eficiencia de separación en mesa	94
3.6	Caracterización de productos de ensayos de separación	96
4.	Posible ruta de beneficio.....	111
4.1	Etapa de clasificación por tamaños.....	113
4.2	Separación magnética de baja intensidad.....	115
4.3	Concentración gravimétrica (mesa Wilfley)	116
4.4	Desaguado y secado	117
4.5	Separación electrostática.....	118
4.6	Separación magnética de alta intensidad.....	119
5.	Estudio de calidad	125
6.	Conclusiones y recomendaciones	139
6.1	Conclusiones	139
6.2	Recomendaciones	141
	Bibliografía	143

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1:	Esquema de un proceso de concentración con dos productos 38
Figura 1-2:	Visualización de la barra de selección de Wizards..... 42
Figura 1-3:	Rangos de operación para unidades de concentración gravimétrica. 48
Figura 1-4:	Efectos de separación y productos de una mesa vibratoria Wilfley. 49
Figura 1-5:	Campo de flujo uniforme..... 55
Figura 1-6:	Campo convergente que genera fuerza sobre la partícula..... 55
Figura 1-7:	Producción de un gradiente de campo con un polo laminado. 55
Figura 1-8:	Sistemas OGMS, (a) y (b) caída libre (c) tambor. 56
Figura 2-1:	Localización de la explotación aluvial de Mineros Aluvial SAS BIC..... 61
Figura 2-2:	Delimitación del área de operación de Mineros Aluvial SAS BIC. 62
Figura 2-3:	Esquema de explotación en Mineros Aluvial SAS BIC..... 63
Figura 2-4:	Proceso de beneficio de oro en Mineros Aluvial. 64
Figura 2-5:	Pila formada durante el ensayo de ángulo de reposo. 66
Figura 2-6:	Distribución de tamaños de partícula en la corriente de interés. 69
Figura 2-7:	Modelo de distribución de tamaños de partículas Rosin-Rammler..... 70
Figura 2-8:	Esquema para el proceso de separación con LST..... 73
Figura 2-9:	Montaje experimental de separación con LST. 75
Figura 2-10:	Grano mineral con características típicas de una monacita. 76
Figura 2-11:	Imágenes del producto magnético fracciones+20 y 20+40 mallas. 77
Figura 2-12:	Imágenes del producto magnético fracción -40+70 mallas. 78
Figura 2-13:	Imágenes del producto magnético fracción -70 mallas. 78
Figura 2-14:	Imágenes producto no magnético fracciones +20 y -20+40 mallas..... 79
Figura 2-15:	Imagen producto no magnético fracción -40+70 mallas. 80
Figura 2-16:	Imagen microscopio no magnéticos -70 mallas. 81
Figura 2-17:	Imagen microscopio no magnéticos -40 mallas. 81
Figura 3-1:	Equipo de separación magnética Carpco, Inc..... 84
Figura 3-2:	Flujograma del proceso de separación magnética (muestra cabeza)..... 85
Figura 3-3:	Resultados separación magnética de baja intensidad fracción -40 mallas..... 86
Figura 3-4:	Resultados separación magnética de baja intensidad fracción +40 mallas..... 87
Figura 3-5:	Resultados totales de la separación magnética de baja intensidad. 87
Figura 3-6:	Flujograma de separación en mesa (mineral de cabeza)..... 89

Figura 3-7:	Flujograma separación en mesa Wilfley fracción fina -40 mallas.....	90
Figura 3-8:	Flujograma separación en mesa Wilfley fracción gruesa +40 mallas.....	91
Figura 3-9:	Flujograma de separación electrostática (SE) de finos -40 mallas.....	92
Figura 3-10:	Flujograma SM de Al sobre los medios de la SE.....	93
Figura 3-11:	Flujograma SM de Al sobre los no conductores de la SE.....	93
Figura 3-12:	Análisis de DRX para la fracción magnética de mineral +20 mallas.	97
Figura 3-13:	Análisis de DRX para la fracción no magnética de mineral +20 mallas. .	98
Figura 3-14:	Análisis de DRX para la fracción magnética de mineral -20+40 mallas. .	99
Figura 3-15:	Análisis de DRX para la fracción no magnética de mineral -20+40 mallas.....	100
Figura 3-16:	Análisis de DRX para la fracción magnética de mineral -40+70 mallas.	102
Figura 3-17:	Análisis de DRX para la fracción no magnética de mineral -40+70 mallas.....	103
Figura 3-18:	Análisis de DRX para la fracción magnética de mineral -70 mallas.	105
Figura 3-19:	Análisis de DRX para la fracción no magnética de mineral -70 mallas. .	106
Figura 3-20:	Análisis de DRX para la fracción magnética de la SM Al fracción -40 mallas.....	109
Figura 3-21:	Análisis de DRX para la fracción no magnética SM Al fracción -40 mallas.....	109
Figura 4-1:	Flujograma del proceso de beneficio de minerales de tierras raras modelado por medio del software LIMN®.	112
Figura 4-2:	Flujograma etapa de clasificación	114
Figura 4-3:	Flujograma para la separación magnética de baja intensidad	115
Figura 4-4:	Flujograma separación en mesa Wilfley.....	117
Figura 4-5:	Flujograma etapas de desaguado y secado.....	118
Figura 4-6:	Flujograma separación electrostática	119
Figura 4-7:	Flujograma separación magnética de alta intensidad.....	120
Figura 5-1:	SEM/EDS de una partícula de mineral con asociación de tierras raras	126
Figura 5-2:	Mapeo composicional SEM/EDS de mineral con presencia de EER. ...	127
Figura 5-3:	Partícula de asociación compleja de óxidos analizada mediante SEM/EDS.....	128
Figura 5-4:	Imagen de análisis SEM/EDS de la fracción magnética de minerales finos.....	129
Figura 5-5:	Mapeo composicional SEM/EDS de fracción magnética de finos.	131
Figura 5-6:	Mapeo composicional SEM/EDS mineral magnético (finos P2).	132
Figura 5-7:	Imagen de análisis SEM/EDS de una partícula de circón.....	133
Figura 5-8:	Mapeo composicional SEM/EDS no magnético (finos P2).....	134
Figura 5-9:	Mapeo composicional SEM/EDS no magnético (finos P2).....	135

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1: Principales características de algunos minerales de arenas negras.....	27
Tabla 1-2: Clasificación de los depósitos de placer.....	30
Tabla 1-3: Sistemas de minado en seco vs. Húmedo.....	34
Tabla 1-4: Listado de Wizards predeterminadas en el software LIMN®.....	41
Tabla 1-5: Listado de modelos generales en la asistente (Wizards) 1D_Vertical.....	41
Tabla 1-6: Guía de criterios de concentración para la separación por gravedad.....	44
Tabla 1-7: Condiciones de operación de una mesa Wilfley para diversas tareas.....	50
Tabla 1-8: Efecto de las variables en el rendimiento de la mesa.....	51
Tabla 1-9: Diferentes equipos de separación electrostática.....	59
Tabla 2-1: Diámetros de la pila de muestra para el ángulo de reposo.....	67
Tabla 2-2: Resultados de la distribución granulométrica.....	68
Tabla 2-3: Tamaños de partícula para el 20%, 50% y 75% retenidos.....	70
Tabla 2-4: Resultados de densidad por tamaños y total.....	72
Tabla 2-5: Porcentajes calculados en SM previa a separación con LST.....	74
Tabla 2-6: Porcentajes calculados en la separación con LST.....	74
Tabla 2-7: Porcentajes de separaciones respecto al total.....	74
Tabla 2-8: Porcentajes de minerales pesados (THM) y livianos.....	75
Tabla 3-1: Pícnometría productos de la SM BI (mineral de cabeza).....	85
Tabla 3-2: Densidades medidas en las corrientes de la SM BI por fracciones.....	88
Tabla 3-3: Condiciones en separación en mesa de las fracciones +40 y -40 mallas.....	90
Tabla 3-4: Resultados de la separación con LST sobre colas de la mesa Wilfley.....	94
Tabla 3-5: Densidades de productos de las separaciones con LST (colas mesa).....	95
Tabla 3-6: Estructuras identificadas en DRX para la fracción magnética +20 mallas.....	97
Tabla 3-7: Estructuras identificadas en DRX para los no magnéticos +20 mallas.....	98
Tabla 3-8: Estructuras identificadas en DRX para los magnéticos -20+40 mallas.....	100
Tabla 3-9: Estructuras identificadas en DRX para los no magnéticos -20+40 mallas. 101	101
Tabla 3-10: Estructuras identificadas en DRX para los magnéticos -40+70 mallas..	102
Tabla 3-11: Estructuras identificadas en DRX para los no magnéticos -40+70 mallas.....	103
Tabla 3-12: Estructuras identificadas en DRX para los magnéticos -70 mallas.....	104

Tabla 3-13:	Estructuras identificadas en DRX para los no magnéticos -70 mallas. .	106
Tabla 3-14:	Composición en cabeza reconstruida con información de los DRX.	107
Tabla 3-15:	Comparativo densidades ponderadas del Ritveld y de picnometría.....	108
Tabla 3-16:	Resultados DRX para las algunas corrientes de interés.....	108
Tabla 4-1:	Rangos de tamaño definidos en entorno de LIMN®.....	112
Tabla 4-2:	Especies definidas en el entorno de LIMN®.	113
Tabla 4-3:	Concentraciones para las especies en la alimentación (balance LIMN®)	113
Tabla 4-4:	Parámetros de separación en el proceso de clasificación LIMN ®.....	114
Tabla 4-5:	Productos de la etapa de clasificación (modelación en LIMN®).....	115
Tabla 4-6:	Productos de separación magnética a baja intensidad (en LIMN®).	116
Tabla 4-7:	Productos de separación gravimétrica en mesa Wilfley (LIMN ®).....	117
Tabla 4-8:	Productos de la separación electrostática (modelación en LIMN ®).....	119
Tabla 4-9:	Productos de la separación magnética de alta intensidad (LIMN ®)	120
Tabla 4-10:	Resumen de corrientes del balance por minerales especies (LIMN ®).	121
Tabla 4-11:	Razones de concentraciones por etapas en el balance (LIMN ®)	121
Tabla 4-12:	Índices metalúrgicos calculados a partir del balance de minerales (LIMN ®).....	122
Tabla 5-1:	Aportes elementales SEM/EDS mineral de elementos de tierras raras....	127
Tabla 5-2:	Aportes elementales en SEM/EDS punto de partícula de la Figura 5-3 ...	129
Tabla 5-3:	Análisis elemental SEM/EDS de la fracción fina de mineral magnético (P1).....	130
Tabla 5-4:	Análisis elemental SEM/EDS de fracción fina de mineral magnético (P2)	132
Tabla 5-5:	Análisis elemental SEM/EDS de fracción fina no magnético (finos P1)....	134
Tabla 5-6:	Análisis elemental SEM/EDS fracción fina no magnético (finos P2).....	136
Tabla 5-7:	Análisis elemental productos de la SM Al (finos -40M).	137
Tabla 5-8:	Estándar Chino para los concentrados de monacita.	138

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
B	Densidad de flujo magnético	T	
°C	Temperatura (grados celcius)	°C	
H	Intensidad de campo magnético	A/m	
HP	Caballos de fuerza (potencia)	kW	1HP=0.75kW
k W	Potencia eléctrica	kW	J/s
SG	Gravedad específica	1	$\rho_{H2O}/\rho_{sólidos}$

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
ρ	Densidad	t/m ³	$\rho = \frac{masa}{v}$
μm	Tamaño		
ϕ_{rep}	Ángulo de reposo	°	
μ	Viscosidad	1	

Abreviaturas

Abreviatura	Término
AN	Arenas negras
AI	Alta intensidad
BI	Baja Intensidad
CC	Criterio de Concentración
LST	Politungstato de litio
REE	Elementos de tierras raras (siglas en inglés)
ERR	Elementos de tierras raras (siglas en español)
RPM	Revoluciones por minuto
SE	Separación electrostática
SM	Separación magnética
THM	"Total Heavy Minerals" Total de minerales pesados

Introducción

Las explotaciones de oro aluvial en Colombia pueden representar una alternativa para la obtención de subproductos, dada las condiciones geomorfológicas de diferentes regiones en el país, las cuales son aptas para la concentración de ciertos minerales pesados que se consideran estratégicos para el desarrollo tecnológico mundial. Estos minerales estratégicos incluyen, principalmente, ilmenita y rutilo, circones, magnetita y monacita, fuente de elementos de tierras raras. En el Bajo Cauca Antioqueño, la compañía Mineros Aluvial S.A.S BIC realiza una operación de extracción y beneficio de oro por medio de dragado y concentración gravimétrica, removiendo diariamente miles de metros cúbicos de material con contenidos variables de minerales pesados, los cuales son concentrados en el equipo de recuperación gravimétrica junto con el oro dados sus rangos de densidad (entre 3,7 a 5,5 t/m³). Hasta el momento, no se ha desarrollado una metodología adecuada para su recuperación como subproductos de la operación.

Los precios del oro permiten el movimiento de grandes volúmenes de estéril, el cual debe luego ser dispuesto correctamente en el ambiente. En las operaciones mineras aluviales auríferas, el hecho de no aprovechar otros minerales pesados removidos (arenas negras), puede representar ciertas desventajas; por ejemplo, desde el punto de vista energético dado que, para Mineros Aluvial S.A.S. BIC., por cada tonelada de mineral procesado, para la extracción del oro (el cual puede llegar a equivaler, al 0,0001% de la masa removida), es necesario generar 1,25 kW. Esta operación minera, por día, extrae un total de 102.000 toneladas, de las cuales el 1% puede estar asociado a minerales pesados según el primer estimado de producción de arenas negras (Díaz, 1992). Si se lograra la separación y beneficio de los minerales en las arenas negras, por día, se estarían aprovechando los 1275 kW/día de 81600 kW/día para extraer a lo sumo 102.000 toneladas de minerales de los cuales alrededor de 1020 toneladas ya no serán dispuestas como relave, escenario que acercaría esta operación minera a una economía circular.

En esta tesis de maestría se intenta conocer, con un adecuado nivel de detalle, las características físicas y composicionales de las arenas residuales en las etapas finales de concentración de oro a bordo de dragas, y plantear una metodología para la recuperación de ciertos minerales de interés económico (principalmente los minerales fuente de tierras raras) que son diariamente dispuestos como residuo del beneficio de oro libre, llenando el vacío de conocimiento que se presenta actualmente respecto a la distribución de equipos y variables operativas más adecuadas para la recuperación de los minerales de tierras raras y otros minerales contenidos en las arenas negras de la zona de explotación aluvial de Mineros Aluvial SAS BIC del bajo cauca Antioqueño.

El reto en este trabajo de investigación fue alto dada la dificultad en la separación de los minerales en las arenas negras, debido, principalmente a la similitud en su densidad, y las asociaciones mineralógicas presentes, tal y como se menciona en el trabajo de investigación de Clara Lamus titulada "Mineralogía aplicada al uso y aprovechamiento de las arenas negras", 2005. Se menciona en (Lamus, 2005) que, para la ilmenita y la magnetita, se forman granos poliminerales y diversas texturas, cerca del 15% de la magnetita aparece intercrecido con otras fases minerales, que incluyen pequeñas inclusiones con frecuencia apatito o silicatos, venillas o gotículas de otros minerales como ilmenita, magnetita o rutilo, y en el caso de la monacita, con frecuencia se presentan asociados a minerales como xenotima y torita, a manera de gotículas de exsolución o intercrecimientos en granos bifásicos o trifásicos. (Lamus, 2005).

El conocimiento en detalle de las características de los minerales contenidos en la corriente de interés permitió lograr una adecuada más no exitosa separación (no se logró obtener en el concentrado final un porcentaje de REO superior al 50%). Fueron aprovechadas propiedades como la reacción al campo eléctrico, susceptibilidad magnética, densidad y tamaño de partícula, pero fue necesario determinar en qué condiciones y en qué orden se debían llevar a cabo las etapas de separación de forma tal que se maximice la recuperación de los minerales de interés.

Dentro de los posibles minerales de interés económico en las arenas negras, ha aumentado el interés de la industria por aquellos minerales con contenidos de ERR, dado el actual crecimiento del mercado de energías limpias, estos minerales de tierras raras

están tomando cada vez más fuerza, el desconocimiento real del potencial económico, su calidad y sus posibilidades de beneficio, se ha indagado en investigaciones anteriores, pero hasta ahora, una investigación específica y sistemática enfocada al aprovechamiento no se ha ubicado en las diferentes revisiones bibliográficas en el marco de desarrollo colombiano.

1. Marco teórico

En este capítulo se abordarán los principales aspectos teóricos relacionados con los minerales pesados presentes en arenas negras, y con más detalle, aquellos minerales relacionados con los elementos de las tierras raras. Se abordan aspectos que van desde su formación hasta las metodologías de extracción, separación de los minerales, y todo el conocimiento que tuvo que ser revisado para el análisis y desarrollo de este trabajo de investigación.

Las arenas negras (AN) son una combinación natural de minerales pesados que en su mayoría están constituidos por óxidos de hierro y titanio, que vienen asociados con otros metales como: manganeso (Mn), magnesio (Mg), aluminio (Al), calcio (Ca), vanadio (V) y cromo (Cr). Algunos de estos minerales incluyen ilmenita, magnetita, hematita, rutilo, además de circón, monacita, entre otros (Trujillo, 2015). Según (Elsner, 2010), el término arenas negras hace referencia a arenas en las cuales se presenta un contenido de minerales oscuros y opacos.

Elsner Harald (Elsner, 2010), del instituto gubernamental Alemán de Geociencias y Recursos Naturales, afirma que los minerales enriquecidos en placeres posiblemente explotables con beneficio económico incluyen ilmenita (y sus productos de meteorización hasta el leucoxeno), rutilo y anatasa, circón, monacita y xenotima, estaurolita, minerales de sílice y aluminio, como, cianita, andalucita y silimanita, minerales del grupo de los granates, magnetita, cromita, casiterita, columbita-tantalita, wolframita y scheelita, así como metales preciosos, incluyendo, oro, plata y platino y piedras preciosas como los diamantes, rubí y zafiro (Elsner, 2010).

Autores como H. Elsner, B. Van Gosen, D. Bleiwas, G. Bedinger, K. Ellefsen, A. Shah, E. Garzanti, S. Andó, C. Gonçalves, P. Braga y C. Sanding, coinciden en definir el término

minerales pesados con base en la densidad, el valor exacto establecido entre todos los autores mencionados varía; por ejemplo, B. Van Gosen, D. Bleiwas, G. Bedinger, K. Ellefsen, A. Shah, E. Garzanti, S. Andó, citan que un mineral se considera pesado si su densidad es superior a $2,9 \text{ g/cm}^3$ (Van Gosen et al., 2016) (Garzanti & Andò, 2019), C. Gonçalves y P. Braga mencionan que los minerales pesados son aquellos que su densidad es mayor a $3,32 \text{ g/cm}^3$ (Gonçalves & Braga, 2019), mientras que, en el caso de C. Standing se citan valores de densidad hasta de 4 g/cm^3 (Standing, 2016). Realmente el valor más mencionado, está relacionado con el límite de densidad para separar minerales pesados, $2,9 \text{ g/cm}^3$, exactamente $2,89 \text{ g/cm}^3$, que corresponde a la densidad del bromoformo usado durante mucho tiempo como separador de medios densos y que luego, fue eliminado para la técnica por resultar cancerígeno, en su reemplazo se introdujeron compuestos como el politunstanato de litio (Garzanti & Andò, 2019) e incluso el tretrabromometano ($2,94 \text{ g/cm}^3$) (Elsner, 2010).

De más de 250 posibles minerales con contenidos de elementos de tierras raras (ERR), únicamente la xenotima, monacita y bastnacita son las tres menas de ERR que resultan ser económicamente explotables (Jordens et al., 2013), (Kim & Jeong, 2019). Todos los minerales de ERR pueden incorporar diferentes cantidades de uranio y especialmente torio en sus redes cristalinas, otorgándole diferentes grados de radioactividad (Elsner, 2010).

Los elementos de tierras raras (metales de transición) representan en total 17 elementos de la tabla periódica, de los cuales 15 corresponden a los elementos de la serie de los lantánidos, sumados el itrio (Y) y el escandio (Sc) (Dushyantha et al., 2020), (Hoshino et al., 2016), (Jordens et al., 2013) . Los elementos de la serie de los lantánidos de la tabla periódica son: lantano (La), cerio (Ce), praseodimio (Pr), neodimio (Nd), prometio (Pm), samario (Sm), europio (Eu), gadolinio (Gd), terbio (Tb), disprosio (Dy), holmio (Ho), erbio (Er), tulio (Tm), iterbio (Yb) y lutecio (Lu) (IUPAC, 2005). En la **Tabla 1-1**, se resume la fórmula química, nomenclatura, densidad, el sistema cristalino o celda unitaria, la dureza, colores, puntos de fusión, las respuestas a campos magnéticos y electrostáticos, el índice de refracción y las aplicaciones más importantes e interesantes que se reportan en la bibliografía (Noval et al., 2017) (Pellant, 2000) (Elsner, 2013) (Mazo.Z, 2011) (Kim & Jeong, 2019) (Mange & Maurer, 1992) (Hikichi & Nomura, 1987), para algunos de los minerales

de las arenas negras como lo son la magnetita, la ilmenita, el rutilo, el circón y la monacita (Elsner, 2010)

Tabla 1-1: Principales características de algunos minerales de arenas negras.

Propiedad	Magnetita	Circones	Ilmenita	Rutilo	Monacita
Formula Química	Fe ₃ O ₄ ²	ZrSiO ₄ ²	FeTiO ₃ ²	TiO ₂ ²	(Ce, La, Nd, Th)PO ₄ ²
Nomenclatura	Óxido de hierro (II, III)	Metasilicato de circonio (IV)	Óxido de Hierro (II) Titanio (IV)	Oxido de titanio (II)	Fosfato de REE
Densidad (g/cm³)	5,16 (5,18) ¹	4,6-4,7 ¹	4,72 ⁵	4,23-5,50 ⁸	4,6-5,4 ⁵
Celda Unitaria	Cúbica centrada en las caras FCC ³	Tetragonal ⁴	Trigonal/hexagon ⁴	Tetragonal ⁴	Monoclínica ⁴
Dureza (Mohs)	5,5 ²	7,5 ³	5-6 ⁴	6-6,5 ⁴	4,8-5,5 ²
Color	Negro ⁴	Incoloro, amarillento, rosado, rojizo, parduzco, raramente, azul verde y negro ⁴	Negro, café oscuro ⁴	Café rojizo, rojo, amarillo o negro ⁴	Café, café rojizo, café amarillento, rosado, amarillo, verdoso, o cercano a blanco ⁴
Punto de Fusión (°C)	1594 ²	>2430 ⁵	1370 ²	1710 ²	1900-2100 ⁹
Propiedad Magnética	Ferromagnético	Paramagnético	Diamagnético	Diamagnético	Paramagnético
Propiedad Electrostática	Conductor	No Conductor	Conductor	Conductor	No Conductor
Índice de refracción	1,24 ²	1,92-1,96 ⁵	2,4 ²	2,899-2,901 ⁸	1,774-1,851 ⁸
Aplicaciones	Soporte catalítico, manufactura de materiales magnéticos, películas de protección sensible y pigmentos, en los campos de la medicina y la biología ⁴ Ferrofluidos, biomedicina ⁶	Refractario, industria cerámica, fundiciones, aplicaciones de alta temperatura, bombillas fotográficas, aceros y aleaciones especiales, baterías de alta densidad, en mecanismos de ignición, pigmentos ²	Fuente de pigmento blanco para pinturas, barnices, tintas de impresión, plásticos, caucho, linóleos, fibra artificial, papel, vidrio, esmaltes y cerámicos ² .	Imanes, aleaciones de baterías y aleaciones de metales ⁷ . El cerio se usa para electrodos de arco, pesticidas y aleaciones. En general los REE se usan en pulido, catálisis, vidrio, cerámicos, imanes, aleaciones de metales, entre otros ²	

Fuente: Traducido de ²(Elsner, 2010). ³(Noval et al., 2017). ⁴(Pellant, 2000). ⁵(Elsner, 2013). ⁶(Mazo.Z, 2011). ⁷(Kim & Jeong, 2019) ⁸(Mange & Maurer, 1992). ⁹(Hikichi & Nomura, 1987).

Estos elementos de tierras raras, REE por sus siglas en inglés, se encuentran divididos en dos grupos según su masa molecular. El primer grupo, los lantanos séricos o livianos, está conformado por el lantano, el cerio, el praseodimio, el neodimio, el prometio y el samario, mientras que en el segundo grupo, los pesados o ítricos, de menor concentración en la corteza terrestre, incluyen el europio, el gadolinio, el terbio, el disprosio, el holmio, el erbio, el tulio, el iterbio y el lutecio (Zhou et al., 2017), (Echeverri L. & Parra B., 2019).

Las propiedades excepcionales de estos elementos se presentan principalmente por el poco poder de apantallamiento, consecuencia de los electrones presentes en los orbitales d y f, estos subniveles albergan electrones muy alejados del núcleo del elemento, lo que significa más espacio entre átomos, lo que a su vez hace que estos átomos sean un poco más pequeños de lo que deberían de ser, a este fenómeno se le conoce como contracción de los lantánidos (Echeverri L. & Parra B., 2019).

1.1 Geología, depósitos de placer y tierras raras

Uno de los principales aportes al conocimiento de los depósitos de placer, proviene del colegio de ciencias oceánicas y atmosféricas de la universidad estatal de Oregon, Estados Unidos (College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Oregon State University), por parte del investigador Paul D. Komar, quien establece que un placer es un depósito de arena y/o grava transportado por un fluido que contiene granos de minerales pesados valiosos como por ejemplo oro y magnetita, partículas que, originalmente fueron erosionadas de una roca madre y luego fueron transportados (Komar, 2019).

En otras palabras, un depósito de placer es un tipo de depósito mineral en el cual los detritos minerales pesados o más densos, han sido concentrados durante el asentamiento estratificado de sedimentos (Laurence, 2005). Estos sedimentos se forman gracias a la concentración gravimétrica superficial de los minerales resistentes y pesados durante los procesos de meteorización en ambientes sedimentarios; la meteorización se presenta por la acción del agua, el aire y/o esfuerzos mecánicos sobre las rocas y minerales.

Los minerales de las arenas negras se encuentran en bajas concentraciones en rocas ígneas y metamórficas, pero se concentran en mayor cantidad a lo largo de las costas

marítimas y en el fondo de los ríos gracias a los procesos de meteorización y en algunos casos de transporte de la roca madre donde logran ser concentrados. La importancia de este tipo de depósitos radica en que son fuente de minerales y metales estratégicos, que incluyen oro, uraninita, diamantes, casiterita, ilmenita, rutilo y circón (Laurence, 2005)

Lo anterior significa que algunos de los escenarios donde pueden acumularse las arenas negras incluyen los deltas, playas, dunas de arenas detrás de las costas, mar adentro, en las barreras de islas, lagunas de marea, así como en llanuras aluviales y canales de estuarios (Van Gosen et al., 2016). Aunque según (Trujillo, 2015), la mayor concentración de minerales pesados se produce en las arenas de playa, y vienen asociados con minerales tipo silicatos, principalmente con cuarzo, el cual se considera como impureza.

Las acumulaciones con posibilidad de beneficio económico en sistemas fluviales, ocurren principalmente en los sistemas de drenaje de ríos donde el gradiente topográfico es bajo y se generan menores energías de transporte, estos escenarios se conocen con nombre de meandros (Slatt, 2006).

Los países que representan depósitos de la plataforma continental económicamente explotables son Alaska (oro), Indonesia (casiterita) y Sudáfrica (Diamantes) (Komar, 2018). Los depósitos de placer más comunes son los de oro, minerales del grupo del platino, piedras preciosas, pirita, magnetita, casiterita, wolframita, rutilo, monacita y circón (Haldar, 2018d).

Existen diferentes categorías para los depósitos tipo placer, las clasificaciones han sido diferentes dependiendo del autor, algunos coinciden en que el factor diferencial de la clasificación sea el tipo de transporte; por ejemplo para S. K. Haldar (Haldar, 2018d) existen cinco tipos de depósitos de placer: los aluviales (donde el medio de transporte de las partículas es el río), los coluviales (transportados por la acción de la gravedad), eluviales (donde el material aún está muy cerca de su fuente primaria), los placeres de playa y los paleoplaceres). Por otro lado, según H. Elsner (Elsner, 2010), estos depósitos se clasifican en eluviales, coluviales, fluviales, glaciares, litorales, eólicos y marinos.

A continuación en la **Tabla 1-2**, se presentan dos clasificaciones para los depósitos de placer, la clásica y la usada por Macdonald (1983), citada por Evans (Evans, 1993) En

esta clasificación se puede observar cómo, para una misma ocurrencia o génesis, se generan diferentes términos que a veces suelen ser mal usados por los diferentes investigadores y profesionales prestándose para confusiones técnicas.

Tabla 1-2: Clasificación de los depósitos de placer.

Génesis	Tipo (Tradicional)	Macdonald (1983)
Acumulación in situ durante la meteorización	Placeres Residuales	Eluvial
Concentración en movimiento-medio sólido	Placeres Eluviales	Coluviales
Concentración en movimiento- medio líquido (agua)	Placeres Aluviales Placeres de playa Placeres mar adentro	Fluvial Strandline Placeres Marinos
Concentración en movimiento-medio gaseoso (aire)	Placeres Eólicos	Desierto

Fuente: Traducido de (Evans, 1993)

Mitchell, 2015 citado en (Dushyantha et al., 2020) especifica los procesos de formación de los depósitos de minerales de REE, los cuales pueden ser de origen primario o secundario. Para los procesos primarios se especifican los magmáticos, hidrotermales y/o metamórficos, mientras que los secundarios implican meteorización y transporte de sedimentos, es decir procesos de formación de placeres.

Por parte del servicio geológico de Estados Unidos (USGS), con autores como Bradley S. Van Gosen, Denver, Gambogi, desde la década de los 80, ha investigado y definido los procesos físicos formadores de los depósitos de tipo placer, los minerales que predominan en dichos depósitos y las locaciones de estos depósitos en el territorio americano y en el mundo (Van Gosen & Sengupta, 2016).

En el caso puntual de las tierras raras, estos elementos se encuentran juntos en la corteza terrestre dadas sus similitudes atómicas (radios iónicos y valencias), algunos de los ambientes geológicos de formación para los minerales asociados a estos elementos son principalmente, magmas alcalinos (rocas ígneas alcalinas ricas en sodio y potasio) y

carbonatitas (rocas ígneas derivadas de magmas ricos en carbonatos), estas últimas presentan las concentraciones más altas de elementos de tierras raras (Bradley S. Van Gosen, Philip L. Verplanck, Robert R. Seal II & Gambogi, 2013).

Los depósitos de tierras raras ocurren en diferentes ambientes geológicos, según (Bradley S. Van Gosen, Philip L. Verplanck, Robert R. Seal II & Gambogi, 2013), los depósitos de REE económicamente explotables ocurren principalmente en los siguientes entornos:

- Carbonatitas.
- Sistemas ígneos per-alcalinos.
- Cuerpos magmáticos de magnetita-hematita.
- Depósitos de óxido de hierro-cobre-oro.
- Acumulaciones de monacita-xenotima en gneis máficos.
- Depósitos de absorción de iones en arcillas.
- Carbonatitas en depósitos de placer que contienen monacita y xenotima.

Desde el punto de vista metalúrgico, es muy importante tener conocimiento de la génesis de los depósitos minerales, al conocer cómo la naturaleza ha terminado formándolos, será posible establecer las posibles formas de separar los minerales de interés de la ganga.

1.1.1 Depósitos de placer en el mundo

Los depósitos de placeres con minerales económicamente explotables se encuentran distribuidos a lo largo y ancho de todo el globo terráqueo. En el mundo los principales depósitos de placer se encuentran en China, Indonesia, Brasil, Myanmar, Nigeria y el Congo, mientras que las variedades de gemas tipo corindón (rubí, zafiro) se presentan en placeres fluviales, especialmente en Myanmar, Sri Lanka, Tailandia y Afganistán. Algo similar sucede con los diamantes presentes en los conglomerados fluviales a lo largo del río Orange y sus afluentes, así como en los depósitos de playa a lo largo de la costa del sur del desierto de Namibia (África Austral) (Frimmel & James, 2021).

Los depósitos de arenas negras económicamente explotables incluyen sedimentos del Holoceno y algunas zonas costeras, como por ejemplo las de India y Brasil, así como los depósitos costeros formados por la transgresión y regresión del mar durante intervalos de

las eras geológicas Terciaria, Cuaternaria y Cretácea en Australia y el sur este de Estados Unidos (Van Gosen et al., 2016). Los principales depósitos de minerales pesados se encuentran en Australia, India, Madagascar, Kenia, Sur África, Sri Lanka, Estados Unidos.

Las tierras raras son relativamente abundantes en la corteza terrestre, pero las concentraciones extraíbles son menos comunes que para la mayoría de los demás productos minerales (minerales diferentes a la monacita, xenotima y bastnasita). En el resumen de productos minerales (específicamente de REE) del servicio geológico de Estados Unidos para el 2021 (Gambogi, 2021), se estima para América del Norte recursos medidos e indicados de tierras raras de 2,7 millones de toneladas en los Estados Unidos y más de 15 millones de toneladas en Canadá.

La monacita y bastnacita son los minerales de REE más comunes en el mundo. Las dos principales locaciones de los depósitos de bastnacita en el globo terráqueo están en Estados Unidos y China, en entornos geológicos tipo vetas, zonas metamórficas de contacto y pegmatitas (Dushyantha et al., 2020). En (Dushyantha et al., 2020) se describe que, para el caso de la monacita, existen depósitos ubicados en Australia, Brasil, China, India, Malasia, Sudáfrica, Sri Lanka, Tailandia y Estados Unidos.

1.2 Minado de los depósitos de placer

La naturaleza de los depósitos de placer, materiales no consolidados y semi consolidados, determina la metodología de extracción. La mayoría de las operaciones mineras de este tipo de depósitos es a cielo abierto, según (Haldar, 2018a). Este tipo de operaciones son más económicas que el minado subterráneo y pueden cubrir un 70% de la producción global de minerales.

La minería de depósitos de placer, en la mayoría de los casos, es un ejercicio de movimiento de tierra a gran escala, en el cual se emplean equipos y maquinaria que también se usan en operaciones de otra índole diferente a la miera. Estas operaciones incluyen la recuperación de tierras, dragado de puertos y vías fluviales, construcción de carreteras y canteras, entre otros.

Existen dos clasificaciones generales para el minado de los depósitos de placer. Inicialmente, si el minado se hace en seco y en segundo lugar, si se hace en húmedo (Jones, 2009) (Macdonald, 1983). En el caso de la extracción en seco, los equipos empleados son maquinaria amarilla, palas, camiones, excavadoras, cargadores, entre otros; mientras que la extracción en húmedo opera normalmente con dragas, las cuales, a su vez pueden ser mecánicas o hidráulicas.

Cada depósito presenta características distintivas, y por lo tanto en cada caso se requiere un estudio de factibilidad técnico-económica que determine la metodología y equipos más adecuados. Según (Macdonald, 1983), los principales factores que influyen la selección del método de minado son: disponibilidad de agua, tamaño y tenor del depósito, características de los minerales y sedimentos, características y geometría de la roca de caja y las condiciones ambientales.

Las dragas de cucharas y de corte y succión son los principales tipos de dragas usados en las operaciones del mundo, cada una cuenta con sus ventajas y desventajas, pero específicamente las dragas de corte y succión, pueden extraer una amplia gama de materiales, con altas tasas de producción y bajos costos en comparación con las dragas de cucharas (Macdonald, 1983).

Luego de los procesos de arranque del material, se deben de descartar las capas de estéril y material orgánico, disponiéndolas en pilas para su uso en las etapas finales de cierre de mina. Para el caso de la capa rica, se requiere en la mayoría de los casos, etapas previas de clasificación, para descartar los gruesos, e incluso, cuando una parte considerable del mineral de interés no se encuentra liberado, es necesario contemplar etapas de conminución previas a la clasificación, fenómeno que no es muy común en los depósitos de placer dado el papel que juegan los fenómenos sedimentarios en la liberación y meteorización de las rocas que permite tener los minerales en forma de arena.

En la **Tabla 1-3**, se presenta un comparativo entre aspectos como tipo de maquinaria, aplicaciones, criterios de selección, entre otros para los métodos de minado de aluviones en húmedo y en seco.

Tabla 1-3: Sistemas de minado en seco vs. Húmedo.

Factor	Minado en seco	Minado en húmedo
Aplicaciones	Depósitos superficiales poco profundos, arenas muy compactadas o resistentes, geometría irregular, dunas de alto nivel, entorno desértico	Entornos donde hay abundante agua disponible para la minería y el beneficio, incluye los depósitos superficiales poco profundos, las dunas de alto nivel y los depósitos marinos.
Maquinaria	Bulldozer, cargadoras frontales articuladas, dragalinas, excavadoras hidráulicas, excavadoras de rueda de cangilones	Bombas y monitores, dragas de succión y de cangilones, dragas de ruedas de cangilones, dragas de concha, dragas de chorro de agua, excavadoras hidráulicas
Factores que gobiernan la selección del método	Escala de propuesta de minado, distribución y valor de minerales, ubicación y características físicas, pendiente y textura de la superficie del terreno, geometría del lecho rocoso, disponibilidad de agua	Escala propuesta de minado, tamaño y ley del depósito, ubicación y características físicas, pendiente y textura del terreno, geometría del lecho rocoso, nivel freático
Ventajas	Capacidad para manejar grupos de depósitos pequeños, velocidad de alimentación constante en condiciones de minado muy diferentes, la minería selectiva conduce a la optimización del control de grado de alimentación.	La minería y el procesamiento se pueden incorporar en una unidad, costos de minado unitario bajo, supervisión y control más cercanos, único método posible en condiciones de exceso de agua
Desventajas	Alto costo operativo, dificultades para manejar grandes volúmenes de agua ocasionales, requiere una base firme para el movimiento de vehículos, necesita grandes talleres en sitio y existencias de repuestos	En ocasiones pérdidas mineras altas, menos selectividad en la minería, posible alto costo de reubicación, altos costos de capital, grandes necesidades de agua pueden afectar grandes secciones del medio ambiente

Fuente: Traducido de (Macdonald, 1983)

Respecto a las compañías mineras en el mundo de REE, las dos operaciones mineras de mayor relevancia en el mundo son el distrito Bayan Obo en China y el depósito de Mountain

Pass, localizado en California, Estados Unidos. La operación Bayan Obo explota un depósito hidrotermal de carbonatitas, y las REE que predominan son el lantano (La), cerio (Ce) y neodimio (Ne), a partir de las menas monacita y bastnacita. Para el 2005, la producción reportada fue de 55300 toneladas de óxidos de tierras raras, que representó el 47% de la producción en China y 45% de la producción a nivel mundial (Dushyantha et al., 2020).

En el caso de la minera estadounidense, “MP Materials”, propietaria de la mina Mountain Pass, el reporte del servicio geológico estadounidense (Gambogi, 2021) identifica como producto principal, un fluorocarbonato de tierras raras, mientras que los concentrados de monacita se extraen de forma separada. Se reporta adicionalmente, para todo el territorio estadounidense, una producción de 38000 toneladas de concentrados de monacita y bastnacita en el año 2020.

El valor estimado de los compuestos y metales de tierras raras importados por Estados Unidos en 2020 fue de \$ 110 millones, representando una disminución significativa de 160 millones de dólares en 2019. La distribución estimada de tierras raras por uso final fue la siguiente: catalizadores 75%; cerámica 6%; pulido de vidrio y cristales 5%, aplicaciones y aleaciones metalúrgicas 4%; y otros, 10% (Gambogi, 2021).

1.3 Procesamiento de minerales

Los materiales minados desde su extracción no exhiben la presentación o calidad que se requiere para su industrialización o como materias primas. En este contexto, es necesaria la transformación del material minado mediante algunos procesos físicos, químicos, térmicos, e incluso biológicos, o en la mayoría de los casos, con una combinación de ellos. Dentro del beneficio de minerales se desarrollan diferentes etapas o procesos (Haldar, 2018b):

- Conminución, liberación o reducción de tamaño de partícula.
- Clasificación de tamaños de partícula.
- Concentración.
- Desaguado (separación sólido/líquido).

Por otra parte, la metalurgia extractiva incluye otra serie de procesos que permiten transformar químicamente los concentrados de minerales para la obtención de metales, compuestos o elementos en sus formas casi puras, mediante técnicas vía hidrometalúrgica, pirometalúrgica, electrometalúrgica, o combinaciones de estas (Haldar, 2018b). Las separaciones sólo son posibles aprovechando las diferentes características físicas y químicas aplicando técnicas o procesos que están relacionados con dichas características.

El procesamiento o beneficio de minerales es la ciencia y arte de separar minerales valiosos metálicos y/o no metálicos de otros no valiosos considerados como ganga o relaves (Haldar, 2018b) (Haldar, 2018c). En los procesos de concentración, el producto de interés se denomina concentrado, mientras que el material descartado se le conoce como colas o relaves

A continuación, se describen las definiciones de parámetros como el tenor y los algunos de los índices metalúrgicos, que permiten evaluar como son separados los minerales en los procesos de concentración.

- Tenor:

El grado o tenor se refiere a la concentración de un mineral en una corriente y se expresa como porcentaje. Se determina mediante ensayo químico en la mayoría de los casos, o físicos, por ejemplo, cuando se batea o separa por métodos gravimétricos el oro libre y se pesa. En el procesamiento de menas metálicas, el tenor suele presentarse en unidades de concentración de ppm o gramos por tonelada. La expresión matemática para el cálculo del tenor se presenta a continuación:

$$Tenor = \frac{\text{Masa del mineral de interés en la corriente}}{(\text{Masa del mineral de interés} + \text{Masa de ganga}) \text{ en la corriente}} \times 100 \quad \dots\dots\dots 1-1$$

- Índices metalúrgicos (porcentaje de recuperación y razón de concentración):

Para determinar la calidad de la separación en un proceso de concentración se calculan los índices metalúrgicos (Bustamante et al., 2008), tales como: Recuperación (R), Razón de Enriquecimiento (RE), Índice de Selectividad (I.S), Razón de Concentración (RC), rendimiento (V) y Eficiencia de separación (E). En este trabajo se hará uso únicamente de dos de los seis índices metalúrgicos ya indicados, el porcentaje de recuperación (R) y la razón de concentración (RC).

El porcentaje de recuperación, Ecuación 1-2, es una expresión matemática que representa la cantidad de mineral de interés en el concentrado en relación con la cantidad de este mineral alimentada al proceso de concentración, así:

$$R = \frac{\text{Masa de mineral o metal en el concentrado}}{\text{Masa de mineral o metal en el alimento}} \times 100 \quad \dots\dots\dots 1-2$$

La razón de concentración (RC), Ecuación 1-3, corresponde a la razón entre el flujo másico de sólidos en el alimento y el flujo másico de sólidos en el concentrado. Este índice no proporciona información sobre la calidad de la concentración de forma directa, pero si es muy útil a la hora del dimensionamiento ya que permite conocer cuántas toneladas deben procesarse (alimento) para obtener una tonelada de concentrado (Bustamante et al., 2008).

$$RC = \frac{\text{Masa total alimentada}}{\text{Masa total del concentrado}} \quad \dots\dots\dots 1-3$$

Una de las referencias bibliográficas en el área de beneficio de minerales en arenas negras, usadas en este trabajo, aborda los procesos de separación desarrollados en la operación de Avalon Rare Metals Inc, de origen canadiense. Su depósito Nechalacho cuenta con 183.4 millones de toneladas de recursos inferidos y una concentración de 1.27% de óxidos de tierras raras totales. Se desarrollan diferentes investigaciones que incluyen las separaciones gravimétricas haciendo uso de equipos centrífugos tipo Falcon y para las separaciones magnéticas equipos tipo tambores permanentes en húmedo (Jordens, Marion, Langlois, Grammatikopoulos, Rowson, et al., 2016) (Jordens, Marion, Langlois, Grammatikopoulos, Sheridan, et al., 2016).

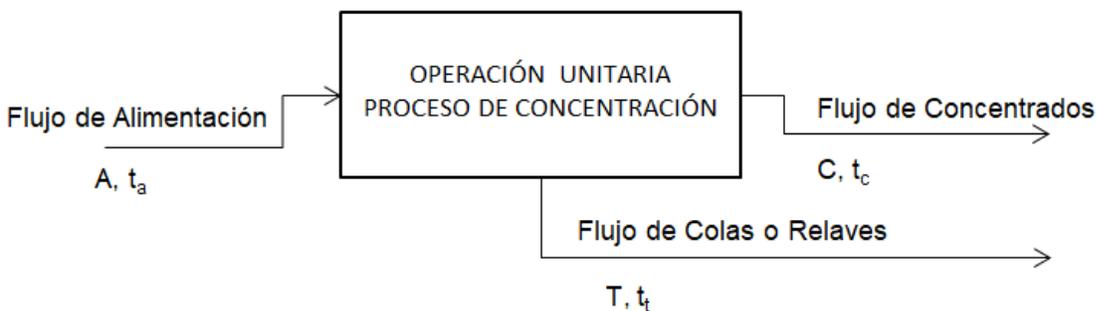
1.3.1 Balance de masa

Los balances de masa son útiles para evaluar operaciones unitarias y su integración a un proceso de beneficio. Se utiliza para calcular recuperaciones y distribuciones de componentes valiosos en las corrientes de un proceso de beneficio (masa o ensayo), bien sea a modo de verificación, o porque no se pueden medir fácilmente. También se usan en las etapas iniciales de diseño de procesos previo al dimensionamiento de equipos.

Los resultados de los balances de masa están fuertemente influenciados por dos factores, la representatividad del muestreo y el análisis sobre la corriente, por tal motivo, cuando se presentan incongruencias en el equilibrio de un circuito, debe de revisarse tanto la metodología de muestreo como la del análisis (Bustamante et al., 2008).

Para explicar cómo se desarrolla un balance de masas, es necesario hacerlo bajo dos principios, primero, la conservación de la masa, y el segundo el estado de equilibrio estacionario (Ver **Figura 1-1**).

Figura 1-1: Esquema de un proceso de concentración con dos productos



Fuente: Elaboración propia.

Aplicando el principio de concentración de masa en estado estacionario, el mineral que entra es igual al mineral que sale, desde dos perspectivas, inicialmente en una macroscópica, el material alimentado es igual a todo lo que sale del proceso (flujos de colas y concentrados), y, en segundo lugar, una microscópica, referida únicamente al flujo

del mineral de interés en la masa total, se obtienen las expresiones de las Ecuaciones 1-4 y 1-5 respectivamente.

$$A = C + T \dots\dots\dots 1-4$$

$$A \times t_a = C \times t_c + T \times t_t \dots\dots\dots 1-5$$

Dónde:

A: Flujo másico total de material alimentado.

C: Flujo másico total de material en el concentrado.

T: Flujo másico total de material en el relave o colas.

t_a : Concentración total del mineral de interés dentro del flujo másico alimentado.

t_c : Concentración total del mineral de interés dentro del flujo másico de concentrado.

t_t : Concentración total del mineral de interés dentro del flujo másico de colas.

Para resolver el sistema de ecuaciones del balance, es necesario conocer dos de las tres corrientes del balance y dos de las tres concentraciones de mineral de interés, o incluso, conociendo el porcentaje de recuperación del proceso, con dos de tres flujos másicos y una de las concentraciones del mineral de interés en cualquiera de las tres corrientes.

1.3.2 Software de balances másicos LIMN®

El software LIMN® fue desarrollado por el australiano David Wiseman y constituye una herramienta diseñada para permitir la simulación y modelamiento de operaciones metalúrgicas. Lo interesante de esta aplicación es que trabaja como complemento dentro de Microsoft Excel, siendo posible desarrollar dentro del entorno de este, los balances completos de plantas metalúrgicas de manera eficaz, eliminando las restricciones de las referencias circulares, cuando se presentan recirculaciones de corrientes al interior de un proceso (Transmin Metallurgical Consultants, 1995).

Existen dos tipos principales de estructura en el software LIMN®, 1D y 2D. El 1D es usado con los datos de primera dimensión, por ejemplo tamaños; y 2D con los datos de 2 dimensiones tales como tamaño de partícula, y densidad (Transmin Metallurgical Consultants, 1995).

Aunque LIMN® es flexible a la hora de modelar los procesos, viene incorporado con modelos predeterminados que permiten realizar balances globales, por distribución de tamaños, especies o por distribución de tamaño y especies, incluye el desarrollo del balance del agua, realizar modelamiento de equipos en plantas de procesamiento de minerales, e incluso la simulación de circuitos existentes para evaluar alternativas de proceso. A estos modelos predeterminados se les conoce en el software LIMN® como Wizards, el software viene en total equipado con once Wizards predeterminadas (ver **Tabla 1-4**), aunque por tratarse de un paquete abierto, estas Wizards pueden ser personalizadas e incluirse como otras opciones de Wizards.

El software identifica las unidades (etapas del proceso de beneficio) y corrientes (alimento, concentrado, colas y adición de agua en el caso que aplique) desde la realización del dibujo o flujograma del proceso. Luego de elaborar el flujograma del proceso, se selecciona la Wizards que se usará para su desarrollo, y, dentro del proceso de aplicación se le asigna a cada unidad el modelo que conmutará sus variables. Cada Wizards (ver **Figura 1-2**) cuenta con su propio paquete de modelos generales.

Para entrar un poco más en detalle sobre los modelos generales del asistente (software LIMN®), se describen a continuación breves definiciones para cada modelo (Transmin Metallurgical Consultants, 1995), estos también se encuentran listados para el caso de las Wizard1D en la **Tabla 1-5**.

Las definiciones de los modelos generales del asistente son:

- Modelo Simple Mixer: el modelo hace una suma de todas las corrientes de ingreso y las transfiere a la corriente de producto.
- Modelo Mass Distributor: el modelo requiere que el usuario ingrese el flujo requerido de masa para las corrientes, luego emplea el flujo de alimento y lo reparte entre las

corrientes de producto de acuerdo con la relación entre los flujos de masa individuales requeridos para cada producto y el flujo de masa del alimento.

- Modelo Bulk Splitter: el modelo requiere que el usuario indique el valor de partición o “split” de masa hacia una de las corrientes.
- •Modelo Component Splitter: este modelo emplea factores de partición para cada uno de los componentes de masa.

Tabla 1-4: Listado de Wizards predeterminadas en el software LIMN®.

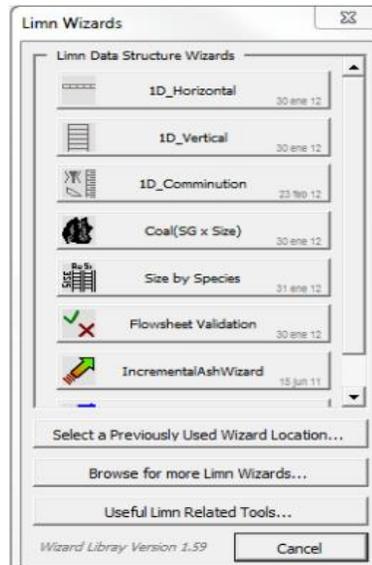
Wizards	Estructura
1D_Vertical	1D
1D_Horizontal	1D
1D_Comminution	1D
Size by SG	2D
Size by Species	2D
Flowsheet Validation	1D & 2D
IncrementalAshWizard	2D
CHOICE Setup	1D & 2D

Fuente: Elaboración propia a partir de información de (Transmin Metallurgical Consultants, 1995)

Tabla 1-5: Listado de modelos generales en la asistente (Wizards) 1D_Vertical.

Número de corrientes de producto	0	1	2	3	4	5	6
<i>1D Asistente Vertical (1D Vertical)</i>							
Modelos generales							
Pila de almacenamiento (Stockpile)	√						
Definido por el usuario		√	√	√	√	√	√
Producto fijo		√					
Mezclador simple		√					
Separador bulk		√	√	√	√	√	√
Distribuidor de masa		√	√	√	√	√	√
Separador por componentes		√	√	√	√	√	√

Fuente: Tomado de (Transmin Metallurgical Consultants, 1995)

Figura 1-2: Visualización de la barra de selección de Wizards.

Fuente: Tomado de (Transmin Metallurgical Consultants, 1995)

El concepto de una dimensión implica que, los componentes que se emplearán para la solución del caso de simulación presentan las mismas características, así, por ejemplo, los sólidos y el agua que forman una pulpa al ser expresados en un flujo másico (t/h) presentan la misma dimensión. De la misma manera, los sólidos pueden expresarse en función de las especies minerales que lo conforman, por ejemplo, oro, plata, sulfuros en base a sus flujos másicos (t/h).

Previo a la asignación de los modelos que regirán cada unidad dentro de la Wizard, el segundo paso del asistente pide al usuario que ingrese el número de “Componentes de Masa Relativos” (Number of Mass Related Components) y el número de “Componentes Derivados”. El número de “Componentes de Masa Relativos” viene a ser el número de componentes que se ha considerado emplear para representar el flujo de pulpa en las corrientes del proceso; mientras que, el número de “Componentes Derivados”, vienen a ser las propiedades de la pulpa que el usuario cree conveniente que sean reportadas en la simulación. Los componentes derivados, son calculados a partir de los componentes de masa, así por ejemplo el porcentaje de sólidos, o la densidad de pulpa son componentes derivados.

1.3.3 Separación gravimétrica

La concentración gravimétrica es la separación de minerales basada en su diferencia de densidad (Wills & Finch, 2016a). Es un método físico en el cual se aprovecha la diferencia entre gravedades específicas de dos o varios minerales para separarlos.

Existen reportes del antiguo Egipto (3000 A.C.), donde se presentaba la separación de oro por medio de la diferencia de densidad (A Gupta & Yan, 2006a), reflejando lo antigua que es esta técnica de separación. Aunque parezca algo simple, la gravimetría no funciona en todos los casos, y se requiere un límite de diferencia entre las gravedades específicas del mineral o minerales de interés respecto a la ganga. Taggart (1945), citado en (Wills & Finch, 2016a) (A Gupta & Yan, 2006a) estableció una constante conocida como criterio de concentración (CC), representada mediante la Ecuación 1-6. Este criterio se define como la gravedad específica de las especies minerales menos la densidad del fluido, dividido por la gravedad específica de las especies livianas menos la densidad del fluido (O.Burt, 1984).

$$CC = \frac{SG \text{ Mineral pesado} - SG \text{ del Fluido}}{SG \text{ Mineral Liviano} - SG \text{ del Fluido}} \dots\dots\dots 1-6$$

Así como para el resto de los métodos de separación de minerales, el conocimiento de la mineralogía es fundamental para el éxito de la separación, permitiendo reconocer los equipos y parámetros más adecuados durante el diseño y operación de las plantas de procesamiento.

Mediante la caracterización mineralógica se obtiene información trascendental para el diseño de los procesos de separación (O.Burt, 1984). En el caso puntual de la separación gravimétrica, esta información incluye: la composición, proporciones, tamaños de partículas, propiedades de los minerales (densidad específicamente), texturas y grado de liberación de los minerales constituyentes.

En la mayoría de la bibliografía revisada sobre concentración gravimétrica, se presenta una tabla de referencia (Ver **Tabla 1-6**) basada en el criterio de concentración relacionada con el tamaño de partícula límite para un proceso de separación probable.

Tabla 1-6: Guía de criterios de concentración para la separación por gravedad

Criterio de concentración (CC)	Conveniencia de la separación gravimétrica
CC>2.5	Fácil hasta 75 μ m
1.75<CC<2.5	Posible hasta 150 μ m
1.5<CC<1.75	Posible hasta 1.75mm
1.25<CC<1.5	Posible hasta 6.35mm
CC<1.25	Imposible

Fuente: Traducido de (A Gupta & Yan, 2006a)

La concentración por gravedad presenta más eficiencia en menas más ricas, con tamaños de liberación más gruesos, en depósitos de placer, procesos de pre concentración y en los casos en los cuales los procesos requieren bajos gastos operativos (O.Burt, 1984).

Entre los aspectos teóricos más relevantes en la separación gravimétrica (A Gupta & Yan, 2006a) se incluyen los expresados mediante las ecuaciones que describen el fenómeno de sedimentación. En el caso de las partículas finas, su comportamiento se describe bajo la ley de Stock, mientras que, en el caso de las partículas gruesas, por medio de la ley de Newton. Ambas ecuaciones incluyen tanto el tamaño como la densidad de las partículas. Sin embargo, en la mayoría de los dispositivos de concentración gravimétrica, la concentración de partículas en el medio fluido es tan alta, que ocurre una mutua interferencia entre partículas debido a colisiones entre las mismas, esto genera una reducción en las velocidades de sedimentación. En consecuencia, los diferentes escenarios para el movimiento de partículas en un fluido, se explica como se muestra a continuación (O.Burt, 1984):

- Las velocidades relativas de partículas de igual densidad son función de su tamaño; una partícula de mayor tamaño sedimenta más rápido que una más pequeña (siempre y cuando su densidad sea igual).
- Cuando dos partículas son del mismo tamaño pero diferente densidad, sedimenta en menos tiempo la que posee mayor densidad.

- Cuando dos partículas presentan la misma densidad y volumen, pero formas radicalmente diferentes, la velocidad de sedimentación está relacionada con la fricción superficial, la cual es función del área superficial. La velocidad terminal máxima es desarrollada por una forma tipo gota, mientras que una forma tipo hojuela presenta una alta resistencia y una mínima velocidad.
- La resistencia a la caída se presenta en función de la velocidad de las partículas que sedimentan; conforme la velocidad incrementa, las fuerzas de resistencia también incrementan hasta el punto de igualar las fuerzas gravitacionales y otras posibles fuerzas presentes (centrífugas, magnéticas, etc.), en este punto se alcanza la velocidad terminal constante.
- La resistencia a la caída aumenta con la densidad y viscosidad del medio fluido. Debido a la floculación de pequeñas partículas y a la presencia de diminutas partículas de aire adsorbidas u ocluidas sobre las superficies, ocurren variaciones en la velocidad de sedimentación.

Como se mencionó anteriormente, la posibilidad de separar minerales por métodos gravimétricos depende de la diferencia entre las velocidades de sedimentación de estas en un medio fluido. Para profundizar más en este aspecto se deben de revisar los apartados de las leyes de Newton en el caso de partículas gruesas (Ecuación 1-8) y Stokes en el caso de las finas (Ecuación 1-7), en estas definiciones se establecen las variables involucradas en la velocidad terminal de partículas esféricas que se descenden en un fluido. En ambas ecuaciones se ven involucradas tanto la densidad como el tamaño de la partícula. Estas ecuaciones se presentan a continuación:

- Ley de Stokes (para resistencia viscosa, número de Reynolds <1) (A Gupta & Yan, 2006a)

$$v_T = \frac{g \times (\rho_s - \rho_f) \times d^2}{18 \times \mu} \dots\dots\dots 1-7$$

- Ley de Newton (para resistencia turbulenta, número de Reynolds >1000) (A Gupta & Yan, 2006a)

$$v_T = \sqrt{\frac{4 \times (\rho_s - \rho_f) \times d}{3 \times C_D \times \rho_f}} \dots\dots\dots 1-8$$

Dónde:

v_T Velocidad terminal

d : diámetro de la partícula.

ρ_s, ρ_f : Densidad del sólido y del fluido respectivamente.

C_D : Coeficiente de arrastre.

μ : Viscosidad del fluido.

g : Aceleración gravitacional.

Dado que tanto la Ecuación 1-7 y la Ecuación 1-8 aplican para un rango de régimen de flujo diferente, los tamaños de partícula que no se incluyen en cada brecha, no pueden ser descritas por ninguna de estas ecuaciones, esto llevo a varios investigadores a desarrollar correlaciones empíricas para llenar esta brecha de tamaños, uno de los pioneros en el desarrollo de estos modelos citado en (A Gupta & Yan, 2006a), es el investigador William E. Dietrich (1982), quien derivó una correlación de un conjunto de 252 datos, utilizando parámetros adimensionales (W , D y W^*). Seguido de Dietrich, Jiménez y Madsen que refinaron y simplificaron estas correlaciones de parámetros adimensionales (V^* y S^*), con estos parámetros es posible establecer las velocidades de sedimentación de los minerales según su forma.

Según (Bustamante et al., 2008), los requerimientos para una concentración gravimétrica eficiente incluyen:

- Una buena liberación de las partículas.
- Distribuciones de tamaño estrechas en la alimentación, entre más gradada la alimentación, menos eficiente el proceso de separación.
- La forma de las partículas, las formas que ofrecen mayor resistencia a la sedimentación presentan separaciones menos eficientes.

- Diferencias de densidades amplias, relacionado con el criterio de concentración (CC).

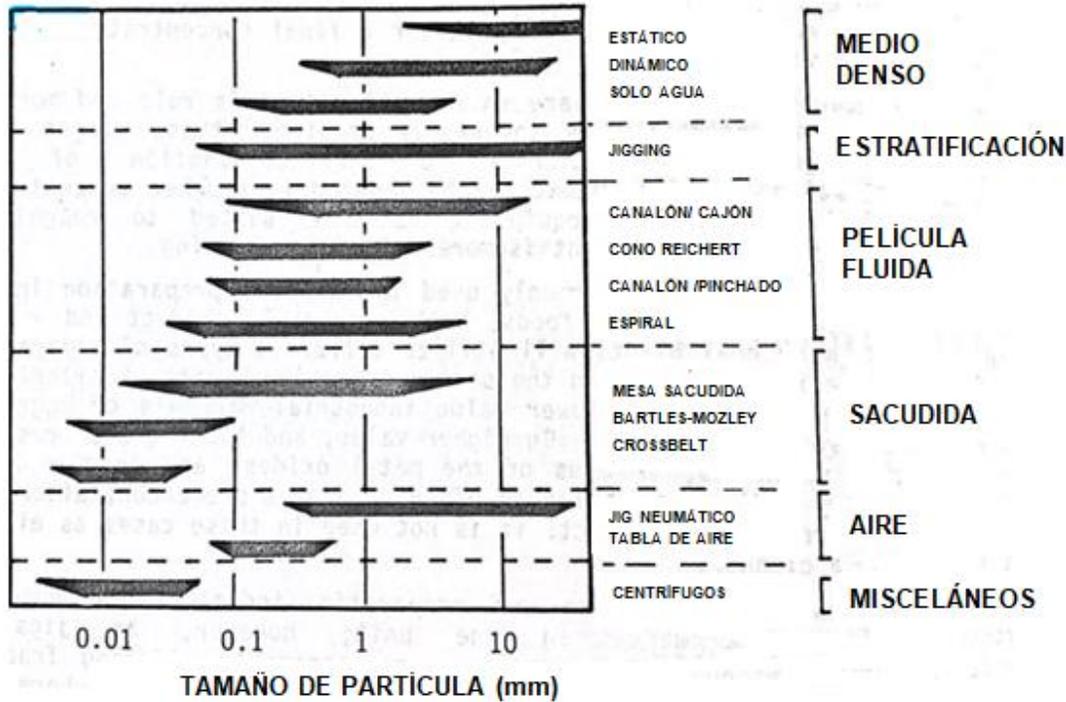
Aunque la separación por gravedad se basa en la diferencia en las tasas de sedimentación o velocidades terminales (v_T) de partículas de diferente densidad y tamaño; en algunos procesos de separación se presentan distancias cortas de viaje, y es posible que las partículas no tengan la oportunidad de alcanzar su velocidad terminal.

Por lo tanto, el tiempo que tardan las partículas en alcanzar su velocidad terminal y cuáles son las distancias de desplazamiento entre las partículas cuando alcanzan su velocidad terminal podría ser un factor determinante en la concentración de partículas por separación gravimétrica.

Los principales dispositivos desarrollados para la separación gravimétrica incluyen: separación manual con bateas, Jigs, canalones (hidráulicos/pinchados), espirales, y mesas de sacudida (Haldar, 2018b). Cada tecnología es útil para cierto rango de tamaños, dadas las características propias de diseño y operación, en la **Figura 1-3**, se puede observar el acercamiento que realizó Richard O. Burt, al establecer los rangos de tamaño adecuados para diferentes tecnologías de recuperación gravimétrica, esta es una herramienta muy útil para seleccionar los equipos más adecuados en condiciones particulares.

Las operaciones por gravedad pueden ser agrupadas a través de tres diferentes mecanismos por los cuales puede lograrse un espaciamiento intermolecular. Estos mecanismos se presentan en los siguientes grupos de equipos (A Gupta & Yan, 2006a):

- Jigs: En los cuales se aplica a un lecho de partículas una expansión y contracción vertical, mediante un pulso con un fluido.
- Mesas de sacudidas: Se aplica un movimiento horizontal a un flujo de sólidos fluidizado provocando una segregación de las partículas ligeras y pesadas.
- Concentradores de película fluida: La separación de partículas se genera cuando una capa de pulpa fluye por una superficie inclinada bajo la influencia de la gravedad. Algunos de los concentradores más antiguos que se conocen, como canalones hidráulicos, son concentradores de película fluida.

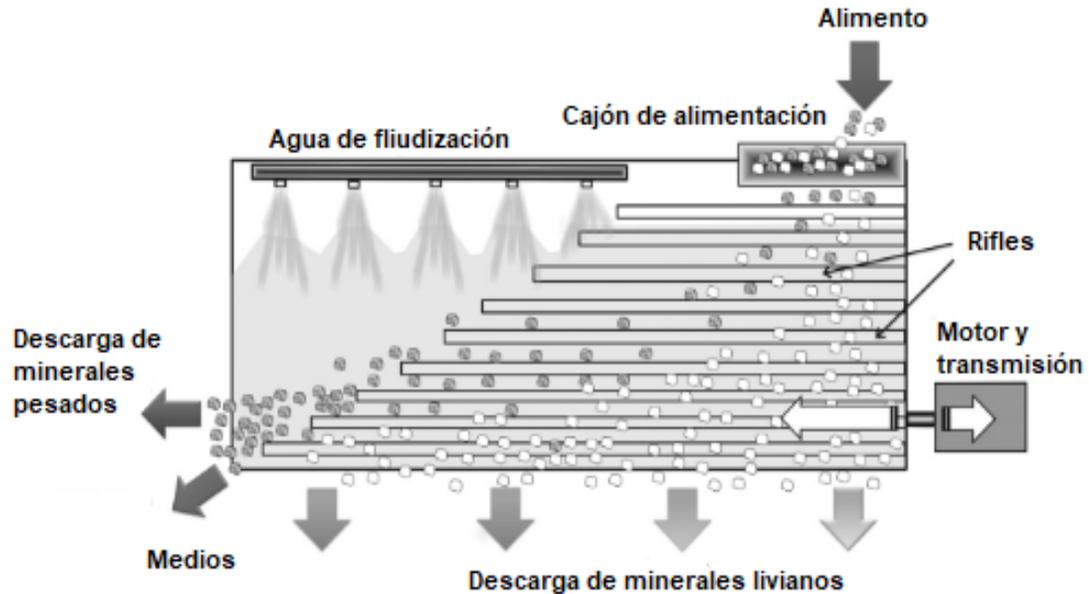
Figura 1-3: Rangos de operación para unidades de concentración gravimétrica.

Fuente: Traducido y editado de (O.Burt, 1984)

En este trabajo de investigación se hizo uso de una mesa de sacudidas tipo Wilfley como equipo de concentración gravimétrica, la forma de este equipo junto con las ubicaciones de sus productos se presenta en la **Figura 1-4**. En este equipo de concentración, el fenómeno que permite la separación de las partículas se presenta cuando estas quedan sumergidas en una película de agua inclinada bajo regímenes de flujo laminares. Las partículas de mayor gravedad específica se moverán más lentamente que las más ligeras, generándose un desplazamiento diferencial lateral. Esta técnica aplica para el tratamiento de corrientes de bajo caudal y difícil separación ya que es quizás uno de los equipos más eficientes dentro de la separación gravimétrica (A Gupta & Yan, 2006a).

En el concentrador tipo mesa vibratoria o de sacudida, se utiliza un movimiento diferencial y una plataforma estriada (rifles) con agua de flujo transversal para crear una separación de partículas (A Gupta & Yan, 2006a).

Figura 1-4: Efectos de separación y productos de una mesa vibratoria Wilfley.



Fuente: Traducido y editado de (A Gupta & Yan, 2006a)

Las variables operativas en mesas vibratorias se (Sivamohan & Forssberg, 1985) dividen en dos grandes categorías: las variables de diseño y las operacionales. Dentro de las variables de diseño se encuentran:

- Tamaño y forma de la mesa.
- Acción diferencial (aceleración y retardo).
- Patrón de rifles.
- Tipo de material y rugosidad de la superficie.

Mientras que dentro de las variables de diseño se citan:

- Pulsaciones por minuto (frecuencia).
- Longitud de la pulsación (amplitud).
- Ángulo frontal.
- Ángulo lateral.
- Densidad de la pulpa.

- Homogeneidad y rata de alimentación.
- Agua de fluidización.
- Posición de los divisores de los productos.

Según las revisiones más completas sobre variables operativas de mesas vibratorias (O.Burt, 1984) los rangos de los parámetros operativos más relevantes, dependiendo de la etapa de concentración en la que se aplique la separación en mesa, se presentan a continuación (**Tabla 1-7y Tabla 1-8**).

Tabla 1-7: Condiciones de operación de una mesa Wilfley para diversas tareas.

Tarea	Condiciones de operación
Desbaste	Incrementar el flujo de agua
	Incrementar la rata de alimentación
	Incrementar la inclinación
	Incrementar la amplitud
	Usar mesas con rifles en toda la superficie
Limpieza	Disminuir el flujo de agua
	Disminuir la rata de alimentación
	Disminuir la inclinación
	Disminuir la amplitud
	Usar una mesa parcialmente riflada
Alimentación fina	Disminuir el flujo de agua
	Disminuir la tasa de alimentación
	Incrementar la frecuencia
	Disminuir la amplitud
	Usar rifles de bajo perfil
Alimentación gruesa	Incrementar el flujo de agua
	Incrementar la rata de alimentación
	Incrementar la frecuencia
	Disminuir la amplitud
	Usar rifles de alto perfil

Fuente: Traducido de (A Gupta & Yan, 2006a)

Tabla 1-8: Efecto de las variables en el rendimiento de la mesa.

Variable	Valor	Efecto
Forma de la mesa	Diagonal	Incremento en la capacidad
		Incremento en el tenor
		Flujo de medios inferior
		Separación de tamaño más fina
Riflado	Parcial	Adecuado para limpieza
		Aplica para mineral gradado
	Total	Adecuado para desbaste
		Aplica para mineral cribado
Flujos de alimentación	2 t/h	Para arena de 1.5 mm
	0.5 t/h	Para limos menores a 150 μ m
	15 t/h	Para carbón superior a 15mm
Frecuencia y amplitud	260-300 ciclos/min y 12-25 mm	Para menas gruesas
	280-320 ciclos/min y 8-20 mm	Para menas finas
	260-285 ciclos/min 20-35 mm	Para carbones
Inclinaciones (lateral y frontal)	11-25mm/m 20-25mm/m	Arena gruesa
	9-15 mm/m 15-30 mm/m	Arena media
	2-9mm/m 8-20mm/m	Arena Fina
	1-7mm/m 4-12mm/m	Limos
	20-25% (masa) 33-40% (masa)	Separación de minerales Separación de carbones

Fuente: Traducido de (A Gupta & Yan, 2006a)

Estudios previos han demostrado mediante ensayos de laboratorio cuatro aspectos operacionales principales en la separación con mesas de sacudida (Manser et al., 1991):

- La densidad de la pulpa en la alimentación debe de mantenerse por debajo de 35% de sólidos, incluso Gupta & Yan (A Gupta & Yan, 2016) especifican como valor óptimo un 25% de sólidos.
- Para una separación efectiva, se debe de ajustar la separación con la mínima cantidad de agua de fluidización posible.
- Cada tipo de material requiere una inclinación óptima.
- El aumento de una densidad particular y una fracción de tamaño de la alimentación provoca un aumento correspondiente en el ancho de banda de este material en su punto de descarga.

1.3.4 Separación magnética y electrostática

Dada la naturaleza de los electrones que hacen parte de los átomos, los cuales a su vez conforman la materia, todos los materiales son afectados en alguna medida al entrar en contacto con un campo magnético. Según (Galsin, 2019), el magnetismo se origina por el movimiento de los electrones (carga eléctrica básica), por lo tanto, las propiedades magnéticas a nivel macroscópico son producto de los momentos magnéticos que poseen los electrones individualmente; Estos momentos magnéticos se pueden originar de dos formas posibles, la primera está relacionada con su movimiento orbital alrededor de núcleo, mientras que la segunda, se presenta por el movimiento del electrón sobre su propio eje, también conocido como spin.

Se conoce como magnetización al fenómeno que sufren los sólidos al ser puestos en contacto con un campo magnético (Svoboda, 2005), y se define como el momento magnético atómico/molecular por unidad de volumen, o la fuerza de magnetismo producida al interior del sólido (Galsin, 2019). La intensidad de campo magnético, simbolizada como H , en el sistema internacional SI, presenta unidades de amperios por metro (A/m), la unidad comúnmente usada para H , es el Oersted (sistema cegesimal), siendo H un vector, presenta longitud y dirección (Svoboda, 2005). La fuerza magnética que actúa sobre una partícula magnetizable se presenta en la Ecuación 1-9 (Rey, 2011).

$$\vec{F}_m = \frac{1}{2} \mu_0 (k_p - k_f) V_p \nabla H^2 \dots\dots\dots 1-9$$

Donde:

V_p : Volumen de la partícula.

k_p : Volumen de susceptibilidad magnética de la partícula.

H: Campo magnético.

k_f : Susceptibilidad magnética del medio fluido.

μ_0 : Permeabilidad magnética del vacío.

En situaciones prácticas, es más fácil expresar la Ecuación 1-9 en función de la inducción magnética, o densidad de flujo magnético, B (Ecuación 1-10) (Rey, 2011). Como se menciona en (Ashok Gupta & Yan, 2016) B se expresa en el sistema internacional (SI) en unidades de weber por metro cuadrado (Wb/m²), también conocido como tesla (T). La inducción magnética (B), en el sistema cegesimal de unidades (CGS) se conoce como gauss (G), un gauss equivale a 10⁻⁴ teslas.

$$\vec{F}_m = \frac{1}{\mu_0} (X_p - X_f) m_p B \nabla B \dots\dots\dots 1-10$$

Donde:

m_p : Masa de la partícula.

X_p : Susceptibilidad magnética de la partícula.

X_f : Susceptibilidad magnética del medio.

B: Inducción o campo magnético.

La Ecuación 1-10, refleja que la fuerza magnética depende tanto de las propiedades físicas de la partícula (masa y susceptibilidad magnética), como del diseño del equipo de separación magnética (inducción magnética y gradiente). El campo magnético no es uniforme, este disminuye al aumentar la distancia desde la fuente, es por tal fenómeno que en la Ecuación 1-10, aparece la inducción magnética como un gradiente (∇B).

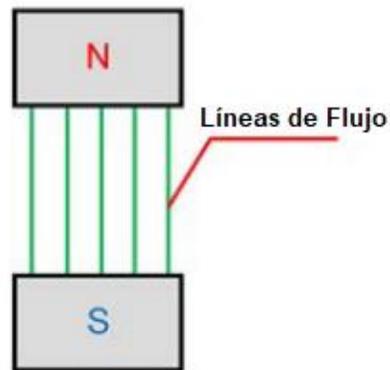
En un separador magnético se presentan una serie de fuerzas externas que compiten con la inducción magnética, estas fuerzas incluyen: la fuerza de gravedad, la fuerza centrífuga y la de arrastre hidrodinámico (Oberteuffer, 1974). También se presentan otros tipos de fuerzas como las de fricción, las fuerzas magnéticas dipolares, y las fuerzas electrostáticas entre partículas (Rey, 2011).

Existen diferentes tipos de separadores magnéticos, pero todos presentan algunos elementos de diseño en común. El elemento principal es la generación de un campo de alta intensidad donde haya un gradiente de intensidad de campo prominente. Para lograr una separación, no es suficiente un flujo de campo magnético uniforme (**Figura 1-5**), ya que solo ocurrirá la orientación de las partículas en función de su polaridad, para que las partículas sean puestas en movimiento en el campo magnético, el campo debe de ser convergente, el método más sencillo para producir un campo convergente es proporcionar un polo en forma de V sobre un polo plano (**Figura 1-6**).

El estrechamiento del polo superior concentra el flujo magnético en un área muy pequeña, creando alta intensidad. El polo plano inferior tiene el mismo flujo magnético total distribuido en un área más grande. Por lo tanto, existe un gradiente de campo pronunciado a través del espacio en virtud de los diferentes niveles de intensidad de campo. Otro método para producir un gradiente de campo alto es mediante el uso de un polo construido con laminaciones alternas magnéticas y no magnéticas (**Figura 1-7**) (Wills & Finch, 2016b).

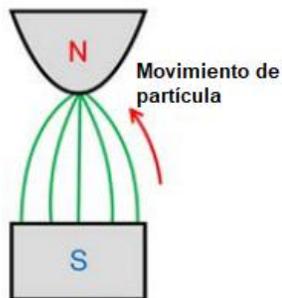
El diseño de gradientes de campo magnético para equipos de separación magnética puede dividirse en dos grandes grupos, los de gradiente abierto (siglas en inglés OGMS) y los de alto gradiente (siglas en inglés HGMS). En un diseño de gradiente abierto (OGMS), el gradiente magnético es creado por los polos de los propios imanes y, como resultado, el gradiente es relativamente débil, ejemplo de estos separadores son los equipos de caída libre y separadores de tambor (**Figura 1-8**) (Wills & Finch, 2016b). En los diseños de alto gradiente (HGMS), se introduce un elemento de matriz ferromagnética en el campo magnético aplicado para crear muchos puntos de alto gradiente de campo, con la intención de capturar las partículas magnéticas y permitir que las partículas no magnéticas fluyan a través del separador (Oberteuffer, 1974) (Rey, 2011).

Figura 1-5: Campo de flujo uniforme.



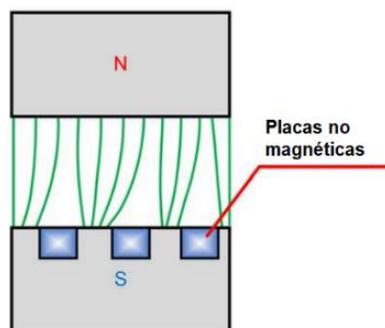
Fuente: Editado y traducido de (Wills & Finch, 2016b)

Figura 1-6: Campo convergente que genera fuerza sobre la partícula.



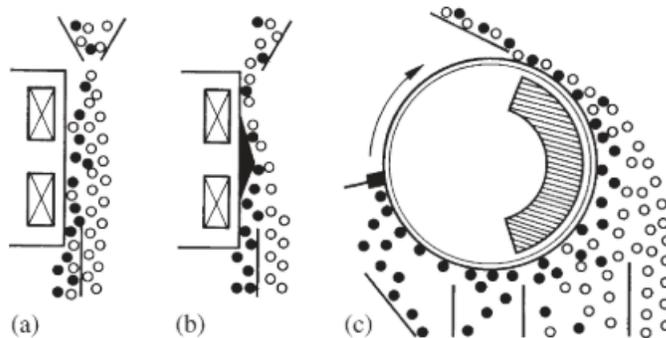
Fuente: Editado y traducido de (Wills & Finch, 2016b)

Figura 1-7: Producción de un gradiente de campo con un polo laminado.



Fuente: Editado y traducido de (Wills & Finch, 2016b)

Figura 1-8: Sistemas OGMS, (a) y (b) caída libre (c) tambor.



Fuente: Editado y traducido de (Rey, 2011)

Antes de continuar desarrollando el tema de los equipos de separación, es necesario, establecer cómo son clasificados los materiales en función de su comportamiento al entrar en contacto con un campo magnético. Existen algunas diferencias entre la bibliografía revisada, ya que en algunos textos se hace referencia a dos grandes grupos de materiales (Wills & Finch, 2016b), mientras que en otros se especifican tres agrupaciones (Ashok Gupta & Yan, 2016) (Halder, 2018b). Cuando se hablan de dos grandes grupos, se especifican los materiales paramagnéticos y diamagnéticos, mientras en el caso de tres grupos se citan los materiales ferromagnéticos, paramagnéticos y diamagnéticos.

En los materiales ferromagnéticos, los dipolos magnéticos se alinean rápidamente al entrar en contacto con un campo magnético, este es un caso especial de paramagnetismo ya que presenta valores de susceptibilidad magnéticas muy elevados (Wills & Finch, 2016b). Esta es la causa de que haya diferencias entre los autores para clasificar los materiales según su respuesta a un campo magnético exterior aplicado, porque, algunos, toman los minerales ferromagnéticos como una agrupación independiente, mientras que otros lo incluyen dentro de los materiales paramagnéticos, como un caso especial de paramagnetismo.

Por lo tanto, los materiales paramagnéticos (de susceptibilidad positiva), son atraídos a lo largo de las líneas de fuerza magnética a puntos de alta intensidad (Wills & Finch, 2016b), el paramagnetismo en un mineral, se origina debido a la presencia de electrones no

apareados que crean dipolos magnéticos, estos materiales requieren, para ser fuertemente atraídos, campos magnéticos de alta intensidad.

Con los materiales diamagnéticos sucede lo opuesto, no experimentan una fuerza de atracción, y son repelidos a lo largo de las líneas de fuerza magnética a un punto donde la intensidad de campo es menor, en este tipo de materiales, las fuerzas involucradas son muy pequeñas, por eso a estos materiales también se les conoce como no magnéticos (Ashok Gupta & Yan, 2016)

Dentro de los minerales ferromagnéticos encontramos la magnetita, pirrotita, el hierro (limaduras), mientras que la monacita, ilmenita, rutilo, cromita, wolframita, hematita, entre otros, se encuentran dentro del grupo de los paramagnéticos. Mientras que algunos de los minerales diamagnéticos incluye las plagioclasas, calcita, circón, apatita (Haldar, 2018b).

Los separadores magnéticos pueden trabajar en seco o en húmedo, pero la clasificación más común está basada en su intensidad, por lo tanto, los equipos de separación magnética se dividen, en la forma más general, en dos grandes grupos, separadores de baja y alta intensidad. Los separadores de baja intensidad son aptos para la separación de materiales ferromagnéticos o paramagnéticos de alta susceptibilidad magnética y / o de gran tamaño de partícula. La intensidad en estos equipos es del orden de 0,3T. Los separadores de tambor de baja intensidad, utilizados en la industria del mineral de hierro, manejan un campo estándar, con imanes a base de ferrita, de 0,12 T a una distancia de 50 mm de la superficie del tambor (Wills & Finch, 2016b). Estos separadores pueden funcionar en modo seco o húmedo. Los imanes suspendidos, las poleas magnéticas y los tambores magnéticos son ejemplos de estos separadores (Rey, 2011).

La separación magnética en seco de baja intensidad se usa principalmente en la concentración de arenas gruesas que son fuertemente magnéticas. Para partículas por debajo de 5 mm, la separación en seco tiende a ser reemplazada por métodos húmedos, que producen menos pérdida de polvo y generalmente producen un producto más limpio (Wills & Finch, 2016b).

Los equipos separadores de alta intensidad se usan para recuperar materiales débilmente paramagnéticos, la intensidad de los campos en estos equipos es del orden de 2T. Hasta la década de 1960, la separación de alta intensidad se limitaba únicamente al mineral seco, habiéndose utilizado comercialmente desde aproximadamente 1908. Este ya no es el caso, ya que se han desarrollado muchas tecnologías nuevas para tratar pulpas (Wills & Finch, 2016b).

Los separadores magnéticos de alta intensidad más conocidos son los de tipo rodillo inducido (siglas en inglés IRM), estos se utilizan para tratar minerales de placeres costeros, menas de wolframita y estaño, arenas de sílice y roca fosfórica. En estos equipos, el rodillo, sobre el que se alimenta el mineral, está compuesto de laminados de acero fosfatado comprimidos, juntos, en un eje de acero inoxidable no magnético. Al utilizar dos tamaños de laminaciones, que difieren ligeramente en el diámetro exterior, se le da al rodillo un perfil dentado, que promueve la alta intensidad de campo y el gradiente requerido (Wills & Finch, 2016b).

La electricidad y el magnetismo son manifestaciones de un mismo fenómeno, las fuerzas magnéticas proceden de las fuerzas originadas entre cargas eléctricas en movimiento. Así, en la separación electrostática se aprovecha la diferencia entre conductividades eléctricas de los materiales para llevar a cabo la separación. El hecho de que un mineral sea o no conductor, depende de sus características atómicas, más exactamente de la movilidad de los electrones, esto ocurre fuertemente en los enlaces metálicos. Este método de separación es quizás uno de los más complejos de aplicar a nivel industrial, ya que, para una separación exitosa debe de garantizarse una alimentación 100% libre de humedad.

Existen tres formas de cargar una partícula electrostáticamente, estas son (Ashok Gupta & Yan, 2016) (Wills & Finch, 2016b):

- Carga por contacto o por fricción (tribocarga o electrificación por contacto)
- Carga por conductancia (Inducción conductiva)
- Carga por bombardeo con iones o alta tensión (carga corona)

Cada uno de estos mecanismos de carga de las partículas está relacionado con un equipo de separación, estos tres diferentes diseños o tipos de dispositivos, se listan a continuación en la **Tabla 1-9**.

Tabla 1-9: Diferentes equipos de separación electrostática.

Mecanismo	Dispositivo/Separador	Características
Bombardeo con iones	Rodillo de alta tensión (HTR)	Electrodo DC de hasta 50kV. Efectivo para partículas entre 60-500 μ m
Inducción conductiva	Placa electrostática (CoronaStat)	Polarización tras la exposición al campo eléctrico
Triboelectrificación	TS (Triboelectric separator)	Capacidades superiores a 40 t/h

Fuente: Elaborado a partir de la información de (Wills & Finch, 2016b)

Tal como lo establece Lockhart, 1984, citado por (Wills & Finch, 2016b), se presentan dos fuerzas distintas que pueden considerarse en el contexto de la separación eléctrica, se trata de las fuerzas electroforética y dielectroforética. La electroforética es la fuerza experimentada por una partícula cargada bajo la influencia de un campo eléctrico, mientras que la fuerza dielectroforética, es la fuerza experimentada por una partícula neutra en un fluido cuando se somete a un campo eléctrico no uniforme. La fuerza dielectroforética es algo análoga a la fuerza magnética, ya que se basa en la polarización de una partícula neutra en un dipolo eléctrico, así como en un campo aplicado no uniforme.

2. Caracterización de las muestras y su procedencia

2.1 Descripción del proceso y toma de muestras

El material utilizado en esta investigación correspondió a muestras tomadas a través de un plan preestablecido durante un periodo de un mes, de una de las corrientes de rechazo del proceso de beneficio de oro de la empresa Mineros Aluvial SAS BIC., la cual se encuentra ubicada en la jurisdicción de los municipios de Zaragoza, El Bagre y Nechí, como se ilustra a continuación (**Figura 2-1**).

Figura 2-1: Localización de la explotación aluvial de Mineros Aluvial SAS BIC.

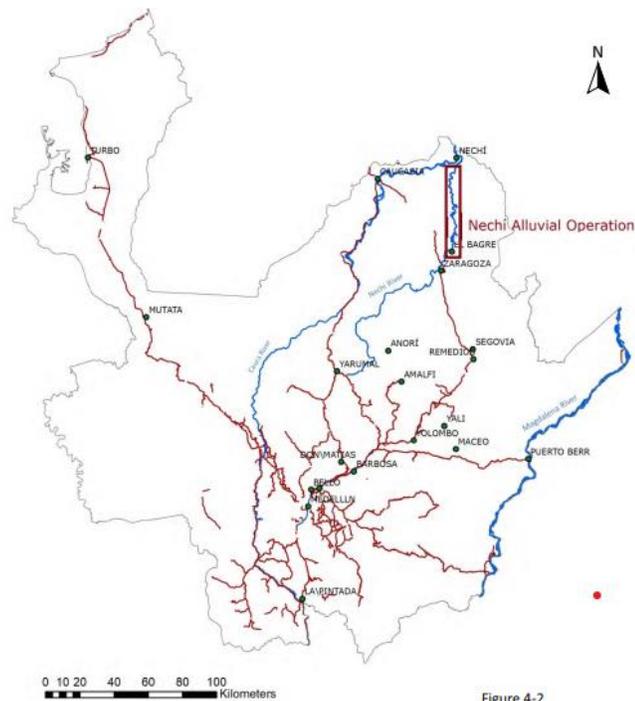
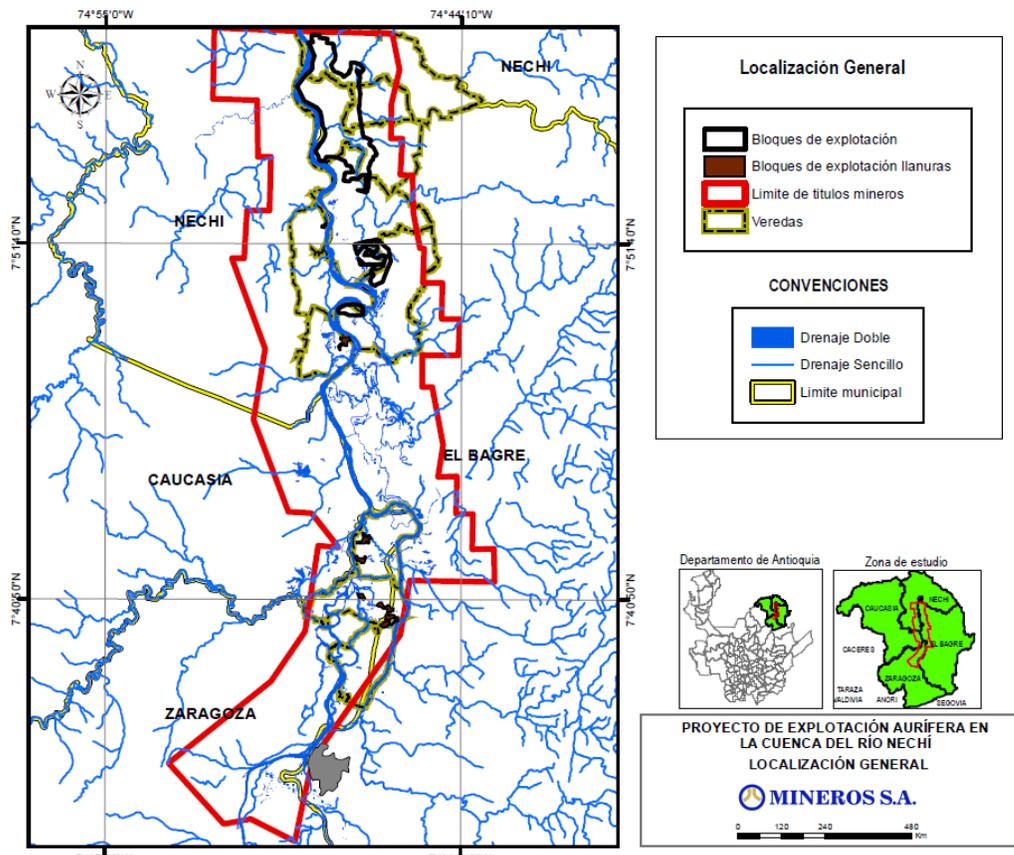


Figure 4-2

Fuente: Mineros SA, 2020

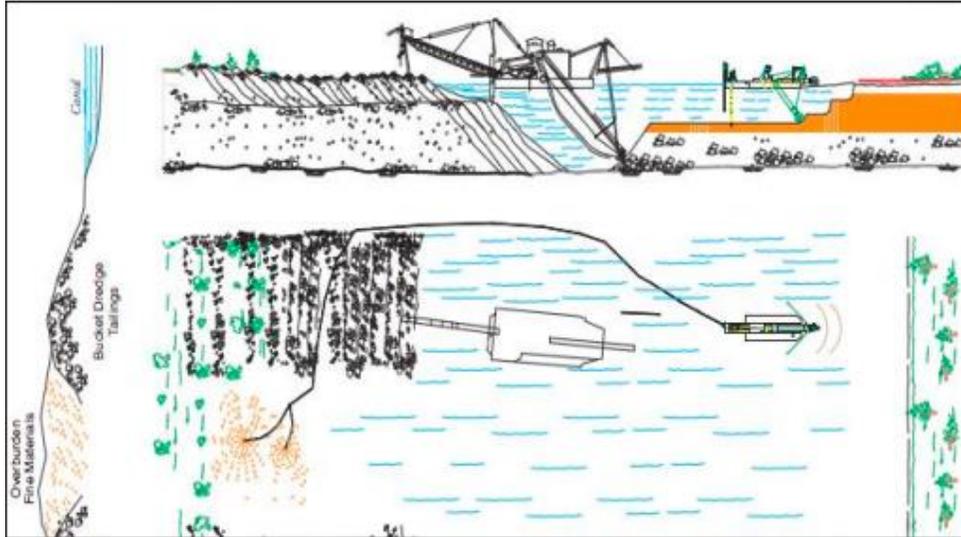
El área de interés económico y operación aluvial de Mineros S.A. está localizada al noreste del departamento de Antioquia, en jurisdicción de los municipios de El Bagre, Zaragoza, Caucaasia y Nechí, a nivel de la planicie de inundación del río Nechí, entre las localidades de El Bagre en la parte Sur y cerca de la confluencia de la quebrada San Pedro en el extremo Norte (ver **Figura 2-2**).

Figura 2-2: Delimitación del área de operación de Mineros Aluvial SAS BIC.



Fuente: PMA Mineros SA 2014

Mineros Aluvial S.A.S BIC realiza la explotación de oro sobre un depósito aluvial, el cual es un conglomerado de arcillas, arenas y gravas. Este depósito es explotado con dragas de cucharas mecánicas (ver **Figura 2-3**), cinco en total, con un descapote previo realizado por dragas de succión (hidráulicas). El proceso de beneficio se compone de una serie de etapas, en las que se aprovecha la diferencia de gravedad específica de los minerales extraídos.

Figura 2-3: Esquema de explotación en Mineros Aluvial SAS BIC.

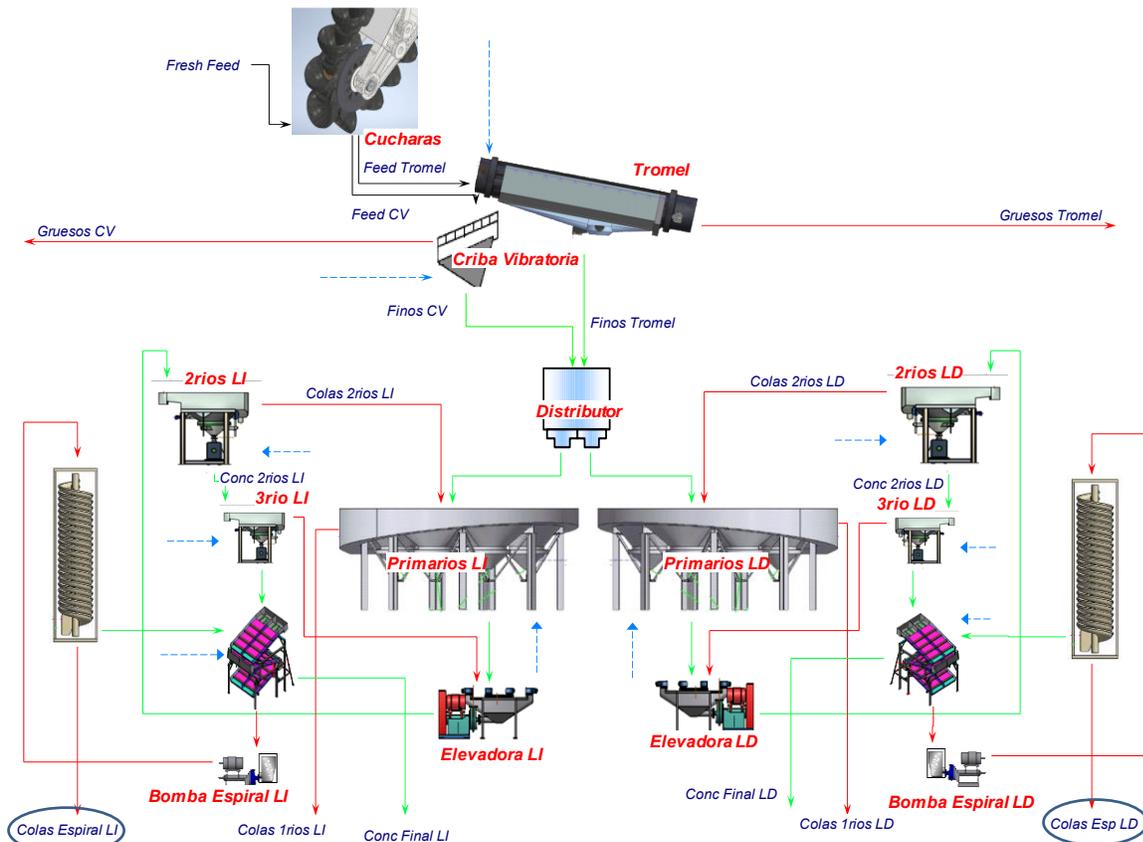
Fuente: Mineros Aluvial SAS BIC

El proceso de recuperación de oro se realiza mediante dos etapas generales, una de clasificación y otra de concentración gravimétrica. Esta última etapa de concentración presenta unas sub-etapas, en las cuales el objetivo es, disminuir la masa de concentrados, para obtener al final un súper concentrado (etapa final de concentración con canalones hidráulicos). En la **Figura 2-4**, se especifica, mediante un flujograma, el proceso de beneficio de oro y la corriente de este proceso que fue sometida a investigación.

Una cuadrilla de Control Producción recolecta y desbasta cada 24 horas el concentrado de los canalones hidráulicos (etapa final de concentración a bordo de draga), este súper concentrado final, es transportado hacia la planta de refinación en tierra (localizada en el casco urbano del municipio del Bagre). A bordo de draga, las colas de los canalones hidráulicos alimentan a una espiral, los concentrados de esta recirculan hacia la tercera línea de canalones hidráulicos, mientras que las colas salen del proceso y terminan como relaves finales, este descargue se da sobre la poza de operaciones donde flotan las dragas (pit minero); La corriente de colas de la espiral es conocida al interior de la compañía como la corriente residual.

El material sometido a análisis y ensayos de separación en esta investigación se proviene de esta corriente residual (colas de la espiral), la cual fue recolectada por medio de la formación de un compósito, consolidado con un muestreo puntal de aproximadamente un mes, entre los meses de diciembre y enero del 2019.

Figura 2-4: Proceso de beneficio de oro en Mineros Aluvial.



Fuente: Elaboración propia

La justificación o premisa para la selección de esta corriente (colas de la espiral) como material de trabajo de este estudio, esta soportada en primer lugar, por el hecho de que el posible proceso de obtención de subproductos no interfiera con el proceso actual de beneficio de oro, y segundo porque esta corriente, de las tres corrientes de rechazo totales del proceso (gruesos, colas 1rios y colas espiral), es la que más concentración de minerales pesados presenta dada su ubicación en el flujograma del proceso. En promedio,

la densidad de los sólidos de esta corriente es 1,5 veces más alta que la de las colas de la etapa primaria de beneficio (colas 1 rios).

Cada draga de cucharas extrae en promedio 500m³/h de sólidos, por tanto, la corriente en estudio termina representando aproximadamente entre 0.06% y el 0.12% del total del proceso, es decir, entre 0.3m³/h y 0,6m³/h, lo cual equivale a 10 ton/h para todas las unidades de producción. El material de estudio se conformó por medio de un compuesto, recolectado de la draga número 5. Este compuesto, 300 kilogramos en total, se conformó entre el 12 de diciembre del 2019 y el 14 de enero del 2020.

2.2 Propiedades físicas y mineralogía

Al tratarse de material particulado (arenas) las propiedades físicas que se evaluaron para su caracterización inicial están relacionadas con la distribución de tamaño de las partículas, ángulo de reposo, densidad, análisis mediante microscopía óptica y la cuantificación de la distribución de los minerales pesados en ciertos rangos de tamaños.

2.2.1 Ángulo de reposo

Para el desarrollo de esta técnica se siguen los lineamientos establecidos por la ASTM, denominada “Measuring the Angle of Repose of Free-Flowing Mold Powders” con código o designación C 1444 – 00 (ASTM C 1444 - 00, 2000). El ángulo de reposo o pendiente natural del material se da cuando el material se mantiene estable sin que se produzcan fallas por deslizamiento. Esta propiedad está determinada por la fricción, cohesión y forma de las partículas. Este ángulo se mide desde la superficie inclinada del montículo hasta la base. Para ángulos mayores que el del ángulo de reposo, el material fluirá (deslizamiento superficial).

El procedimiento seguido para la técnica se especifica a continuación:

- Se homogenizó la muestra.
- Se llenó el cono con material, teniendo la abertura de descarga cerrada.
- Se dejó fluir el material por el cono.
- Cuando el pico del montículo obstruye la salida del cono, se toman cuatro diámetros del montículo.

- Se promediaron los cuatro diámetros, para obtener un diámetro parcial (D1).
- Se repitió el experimento dos veces más (D2 y D3).
- Se promediaron los tres diámetros parciales y se remplazan los datos en la Ecuación 2-1

$$\phi_{rep} = \tan^{-1} \left[\frac{z+H}{D-d} \right] \dots\dots\dots 2-1$$

Donde:

H: Medida entre la superficie y la descarga del cono. (3,8 cm)

D: Promedio de los diámetros parciales. (11,42 cm)

d: Diámetro interno de la salida del cono (0,8 cm).

A partir de los datos recopilados, se calculó el ángulo de reposo mediante la Ecuación 2-1, el cual arrojó un valor de 35,59°. En la **Tabla 2-1**, se presentan los resultados de los diámetros de la pila tomados durante el ensayo, mientras que en la **Figura 2-5**, se presenta una fotografía de la pila conformada.

Figura 2-5: Pila formada durante el ensayo de ángulo de reposo.



Tabla 2-1: Diámetros de la pila de muestra para el ángulo de reposo.

	Diámetro 1 (cm)	Diámetro 2 (cm)	Diámetro 3 (cm)	Diámetro 4 (cm)	Promedio (cm)
Ensayo 1	11,4	11,3	11,7	11,3	11,425
Ensayo 2	11,5	11,3	11,3	11,4	11,375
Ensayo 3	11,6	11,5	11,3	11,4	11,450

2.2.2 Distribución de tamaño de partícula

Existen diferentes metodologías para el análisis de la distribución de tamaño de partícula, las cuales pueden ser en seco o en húmedo, y su aplicación depende en gran medida del rango de tamaños que presente la muestra a analizar, estos métodos se pueden revisar en detalle en B. A. Wills and J. A. Finch, "Chapter 4 - Particle Size Analysis" (Wills & Finch, 2016c).

El método de análisis adecuado para el caso de la muestra utilizada en esta investigación es el tamizado, dados los rangos de tamaños que se presentan en la muestra. Para la realización de este ensayo se consultó como guía, la norma técnica ASTM D422-63 *Standard Test Method For Particle-Size Analysis of Soils*, la cual entrega pautas para el desarrollo del ensayo, realizado en vía seca.

El material para este análisis fue previamente seleccionado con un cuarteador de rifles hasta obtener aproximadamente 500 gramos, el cuarteo es necesario para garantizar la representatividad del material seleccionado para el análisis respecto al total de la muestra. A continuación, se reportan las masas retenidas y su valor correspondiente como porcentaje retenido (**Tabla 2-2**).

Diferentes autores han desarrollado metodologías para modelar las distribuciones de tamaño de partículas, los más comunes son los modelos de Gates-Gaudin-Schumann (1940) y el de Rosin-Rammler (1933). Ambos métodos se derivan de intentos para representar las curvas de distribución del tamaño de partícula por medio de ecuaciones, estos modelos se usan en el campo mineralúrgico para obtener información y modelar procesos de trituración, molienda, y clasificación.

Tabla 2-2: Resultados de la distribución granulométrica.

Malla ASTM E11 2014	Tamaño (µm)	Peso Retenido (g)	Porcentaje Retenido	Porcentaje Retenido Acumulado
+10	2000	0	0.0%	0.0%
-10+30	600	72.55	13.2%	13.2%
-30+40	425	83.15	15.1%	28.4%
-40+50	300	127.95	23.3%	51.7%
-50+70	212	119.4	21.7%	73.4%
-70+100	150	110	20.0%	93.4%
-100+140	106	29.2	5.3%	98.8%
-140	Menor a 106	6.8	1.2%	100.0%
Total		549.05	100.0%	NA

De estos dos modelos, el más reciente es la función de Rosin-Rammler, esta representa la distribución de masa en función de los tamaños de partícula, y consiste en determinar y graficar los valores de $\log[\log 100/R]$ versus $\log(x)$. Para estas expresiones, R, simboliza el porcentaje de retenido acumulado, y x, el tamaño de partícula (A Gupta & Yan, 2006b). La Ecuación 2-2 que representa este modelo se enseña a continuación:

$$R = 100 \exp \left[- \left(\frac{x}{x^l} \right)^b \right] \dots\dots\dots 2-2$$

Dónde:

R: Porcentaje de masa retenida para un tamaño x

x^l: Parámetro de tamaño

b: Parámetro de distribución

Otra forma de visualizar la Ecuación 2-2, se obtiene aplicando logaritmo a ambos términos de la Ecuación (para eliminar el exponente), así obtenemos la siguiente Ecuación 2-3 (A Gupta & Yan, 2006b):

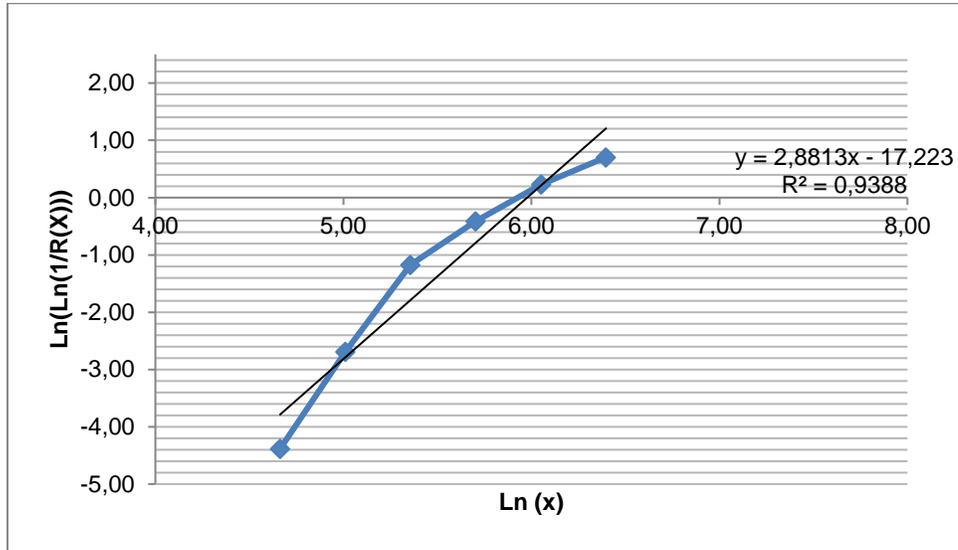
$$\log\left(\log\frac{100}{R}\right) = b \times \log x + \text{CONSTANTE} \dots\dots\dots 2-3$$

Los parámetros de las Ecuaciones 2-2 y 2-3, b y x' , se obtienen, respectivamente, de la pendiente e intersección con el eje al graficar los valores de $\log[\log 100/R]$ versus $\log(x)$ cuando $R= 36.79\%$.

La distribución de tamaño de las partículas en la corriente de interés caracterizada se presenta en la **Figura 2-6**. En la **Figura 2.7** se presenta la gráfica $\log[\log 100/R]$ versus $\log(x)$ o Modelo Roisin-Rambler, en la cual se muestra la línea de tendencia y su respectiva ecuación, de esta, se extraen los valores de pendiente e intercepto, los cuales son respectivamente, 2.8813 y -17.223. Al contar con estos valores, es posible, usando las Ecuaciones 2.2 y 2.3, obtener otra expresión que permite conocer los tamaños de partícula para el 80%, 50% y 25% pasantes, o, en otras palabras, los tamaños de partícula para el 20%, 50% y 75% de material retenido (**Tabla 2-3**).

Figura 2-6: Distribución de tamaños de partícula en la corriente de interés.



Figura 2-7: Modelo de distribución de tamaños de partículas Rosin-Rammler.**Tabla 2-3:** Tamaños de partícula para el 20%, 50% y 75% retenidos.

Retenidos	Tamaño (μm)
R(X75)	255.98
R(X50)	347.34
R(X20)	465.30

2.2.3 Densidad

Para determinar la densidad total se siguió el procedimiento descrito por la norma ASTM D2320-98, Standard Test Method for Density (Relative Density) of Solid Pitch (Pycnometer Method) (D2320-98, 1998). El total de la densidad se obtuvo del ponderado de densidades calculadas para las mismas fracciones de tamaño del análisis granulométrico.

Esta metodología permite calcular la densidad de muestras sólidas usando un picnómetro (esta norma especifica un volumen de 25 mililitros para el picnómetro). El procedimiento es muy simple, y se resume a continuación:

- Registrar el peso del picnómetro lleno de agua a 25°C (W_2)
- Se pesa la masa de muestra (se recomienda menor a 5 gramos) al interior del picnómetro que ya ha sido previamente tarado con su tapón (W).
- Retirar el picnómetro con la muestra de la balanza y agregar un poco de agua destilada a 20°C, procurar que esta cantidad de agua no supere los 10mm en la altura del picnómetro.
- Retirar el aire que queda contenido entre los poros y el agua que ya fue adicionada (con la ayuda de un desecador o bomba de vacío).
- Terminar de llenar el picnómetro con agua a 25°C.
- Dejar reposando la muestra 30 minutos en un baño maría a 25°C.
- Retirar el picnómetro del baño y limpiar cuidadosamente sin retirar el agua del capilar del tapón, pesar inmediatamente para registrar la masa (W_4).

La fórmula usada para el cálculo de la densidad es:

$$\text{Densidad } (\rho) \left(\frac{\text{ton}}{\text{m}^3} \right) = \frac{(W_3 - W_1)}{[(W_2 - W_1) - (W_4 - W_3)]} \dots\dots\dots 2-4$$

La expresión de la Ecuación 2-4 de forma simplificada se puede expresar así:

$$\text{Densidad } (\rho) \left(\frac{\text{ton}}{\text{m}^3} \right) = \frac{W}{[W - (W_4 - W_2)]} \dots\dots\dots 2-5$$

Dónde:

W : Masa de sólidos secos (masa de la muestra).

W_1 : Masa del picnómetro.

W_2 : Masa del picnómetro lleno de agua a 25°C.

W_4 : Masa del picnómetro lleno de agua (a 25°C) junto con la muestra.

W_3 : Masa del picnómetro junto con la muestra.

Los resultados de densidad por tamaños son muy útiles para identificar las fracciones donde se encuentran más concentrados los minerales pesados, a continuación (**Tabla 2-4**)

se presentan los resultados de densidad obtenidos luego de aplicar la técnica descrita anteriormente haciendo uso del picnómetro.

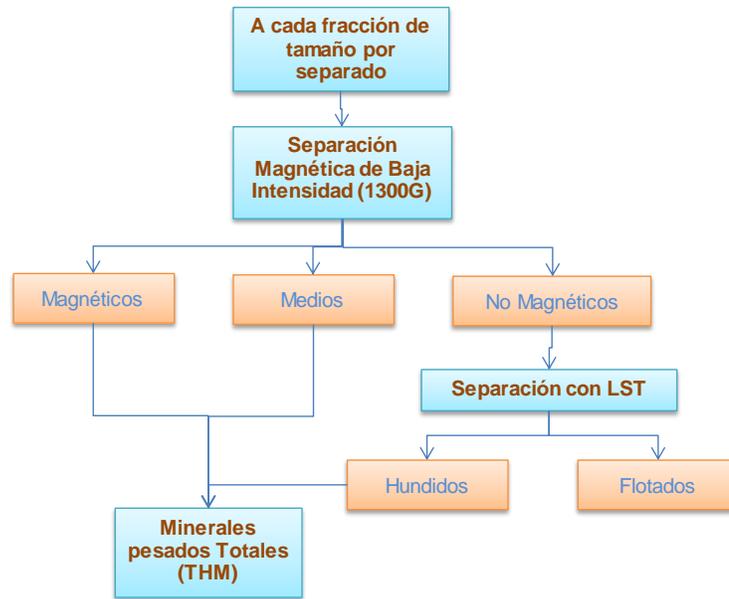
Tabla 2-4: Resultados de densidad por tamaños y total.

Malla ASTM E11 2014	Tamaño (µm)	Porcentaje Retenido	Porcentaje Retenido Acumulado	Densidad (ρ) (t/m ³)
+10	2000	0.0%	0.0%	NA
-10+30	600	13.2%	13.2%	3.00
-30+40	425	15.1%	28.4%	2.88
-40+50	300	23.3%	51.7%	3.10
-50+70	212	21.7%	73.4%	3.73
-70+100	150	20.0%	93.4%	4.40
-100+140	106	5.3%	98.8%	4.64
-140	Menor a 106	1.2%	100.0%	4.33
Total		100.0%	NA	3.50

2.2.4 Separación con medios densos (Flotados y Hundidos)

Con el objetivo de determinar el contenido de minerales pesados en la muestra de este trabajo de investigación, se utilizó la técnica de separación con líquidos (medios) densos, empleando como medio LST (politungstato de litio). El LST es un líquido denso de baja viscosidad, térmicamente estable, con una densidad de operación a 25°C de 2.9 t/m³. Algunas de las ventajas de este reactivo son su baja toxicidad, rápida separación, rápida filtración, es estable y reutilizable.

La separación se realizó por fracciones de tamaño, ensayando en total cinco fracciones de tamaño. Las fracciones de tamaño ensayadas fueron la +20 mallas (mayores a 850µm), la -20+40 mallas (entre 850 y 425 µm), -40+70 mallas (entre 425 y 212 µm) y -70 mallas (menores a 212 µm). Previo a la separación con LST se realizó una separación magnética a 1300 Gauss. El procedimiento seguido para este proceso de separación, realizado con cada fracción de tamaños por separado, se presenta a continuación (**Figura 2-8**).

Figura 2-8: Esquema para el proceso de separación con LST.

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la separación magnética previa se presentan en **Tabla 2-5**, mientras los resultados de la separación posterior con LST se reportan en la **Tabla 2-6**. En la **Tabla 2-7** se presentan los resultados integrados de separación, en porcentajes de magnéticos, medios, flotados y hundidos respecto del total. Según esta tabla de casi un 30% de minerales magnéticos (magnéticos y medios), que se consideran pesados, un 28% corresponde a la fracción menor a 425 μm (-40 mallas). Adicionalmente, los no magnéticos de esta fracción equivalen al 27% de la masa total de la corriente de estudio.

El mayor aporte de livianos se presenta en la fracción de partículas menores a 850 μm y superiores a 425 μm (-20 +40 mallas) con un 13,99%. Cabe resaltar de igual forma que el mayor porcentaje de hundidos se reporta entre las mallas -40+70 (entre 425 y 212 μm), y el porcentaje de magnéticos totales asociados a esta fracción fue de 9,13%, en comparación con la fracción -70 (menores a 212 μm) que presentó un 8,21% de hundidos respecto al total y un 18,63% de magnéticos respecto al total, lo que sugiere que hay más

magnéticos pesados en la fracción -70, y más paramagnéticos y no magnéticos pesados en la fracción -40+70.

Tabla 2-5: Porcentajes calculados en SM previa a separación con LST.

Fracción	Tamaño (µm)	Porcentaje Retenido	Porcentaje Magnéticos	Porcentaje Medios	Porcentaje No Magnéticos
+20	850	7.00%	3.52%	0.00%	96.48%
-20+40	425	27.00%	1.75%	4.32%	93.93%
-40+70	212	39.00%	8.89%	14.77%	76.33%
-70	10	27.00%	49.38%	30.92%	19.69%
Total		100.00%	17.5%	15.28%	67.2%

Tabla 2-6: Porcentajes calculados en la separación con LST.

Fracción	Tamaño (µm)	Porcentaje Retenido	Porcentaje Hundidos	Porcentaje Flotados
+20	850	7.00%	73.0%	27.0%
-20+40	425	27.00%	45.6%	54.5%
-40+70	212	39.00%	66.7%	33.4%
-70	10	27.00%	96.2%	3.8%
Total		100.00%	69.4%	30.6%

Tabla 2-7: Porcentajes de separaciones respecto al total.

Fracción	Tamaño (µm)	Porcentaje Retenido	Porcentaje Magnéticos (Del Total)	Porcentaje Medios (Del Total)	Porcentaje Hundidos (Del Total)	Porcentaje Flotados (Del Total)
+20	850	7.00%	0.24%	0.00%	4.88%	1.80%
-20+40	425	27.00%	0.48%	1.18%	11.70%	13.99%
-40+70	212	39.00%	3.43%	5.70%	19.61%	9.81%
-70	10	27.00%	11.09%	7.54%	8.21%	0.33%
Total		100.00%	15.25%	14.42%	44.40%	25.93%

En la **Tabla 2-8** se consolidan los porcentajes de pesados y livianos totales, en cuyo cálculo se han sumado los minerales pesados junto con los magnéticos (separados en la etapa

inicial de este procedimiento), es decir, se consideran pesados los minerales magnéticos. Teniendo cuenta la ruta de separación esquematizada en la **Figura 2-8**, la muestra presenta, aproximadamente, un total de 74% de minerales pesados y un 26% de minerales livianos. El mayor aporte de livianos se encuentra en la fracción gruesa -20+40 mallas, en las partículas menores a 850 μm y superiores a 425 μm , que equivale a un 86,64% del total de material en la fracción, que a la vez representa un 27% respecto al total de la corriente caracterizada en esta investigación.

Tabla 2-8: Porcentajes de minerales pesados (THM) y livianos

Fracción	Tamaño (μm)	Porcentaje Retenido	Porcentaje de THM	Porcentaje Livianos Totales
+20	850	7.00%	5.12%	94.88%
-20+40	425	27.00%	13.36%	86.64%
-40+70	212	39.00%	28.74%	71.26%
-70	10	27.00%	26.84%	73.16%
Total		100.00%	74.07%	25.93%

Figura 2-9: Montaje experimental de separación con LST.

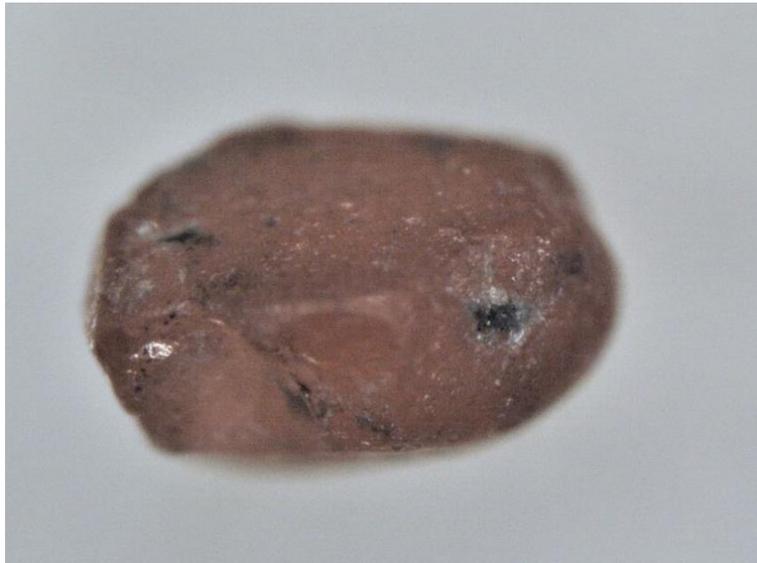


2.2.5 Microscopía óptica

En este análisis se tomaron imágenes de los productos de las diferentes etapas de la separación con LST, empleando un equipo marca Dino-Lite (serial AM73915MZTL), de 150x, con amplia profundidad de campo, y conexión USB 3.0 que permite una velocidad de 45 FPS a una resolución de 1280x960. La microscopía óptica es una técnica de caracterización petrográfica, útil para la obtención de características ópticas como color, brillo, saturación, entre otras, y permite, por ejemplo, conocer la forma de las partículas y si hay minerales asociados que no han sido liberados en la muestra.

La **Figura 2-10**, ilustra un cristal aislado correspondiente a la fracción gruesa de minerales no magnéticos. Como se observa, esta partícula de tamaño mayor a 425 μm , presenta propiedades físicas que corresponden a la monacita, color café rojizo pálido de hábito subhedral con moticas que pueden estar asociadas con inclusiones o exsoluciones de otras fases minerales diferentes al mineral en cuestión.

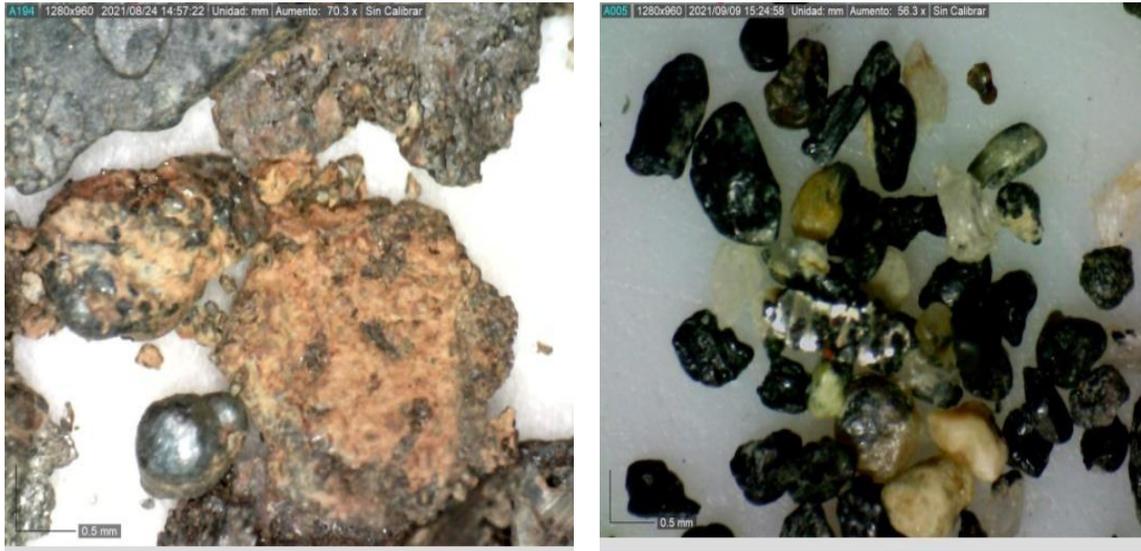
Figura 2-10: Grano mineral con características típicas de una monacita.



En las siguientes figuras se presentan las imágenes correspondientes a los productos de la separación magnética de baja intensidad manual por fracciones de tamaño de partícula.

En la **Figura 2-11**, se presentan las partículas capturadas con el microscopio óptico en las fracciones +20 mallas y -20+40 mallas (partículas mayores a $425\ \mu\text{m}$).

Figura 2-11: Imágenes del producto magnético fracciones+20 y 20+40 mallas.



(a) Fracción magnética +20 mallas (70.3X)

(b) Fracción magnética -20+40 mallas (56.3X) -

En la **Figura 2-11** (a), imagen correspondiente a la fracción +20, se pueden observar rastros de óxido de hierro que no necesariamente están asociados a la mineralogía del depósito, sino que hacen parte de elementos metálicos propios de los equipos de beneficio desprendidos por efectos de desgaste. También es posible observar una partícula con forma redondeada que corresponde a un fragmento de munición de jig (granalla metálica de $\frac{1}{4}$ ", densidad $7,2\ \text{g/cm}^3$).

Para el caso de la **Figura 2-11** (b), partículas magnéticas pasantes malla 20 retenidas en la malla 40 (entre 850 y $425\ \mu\text{m}$), predominan los granos oscuros (colores entre negro y café oscuro) anhedrales y subhedrales con un brillo metálico, estas características mineralógicas están fuertemente relacionadas con minerales tipo óxidos de hierro y titanio, en los cuales se aprecia, en su mayoría granos monominerales, pero también hay casos, más escasos donde se presentan intercrecimientos con silicatos. Cuando se presentan estos intercrecimientos con silicatos o minerales no magnéticos, se genera un efecto de contaminación de los concentrados magnéticos, dado que no ha sido liberado parte de

mineral magnético al cual se encuentran adosadas. También es posible observar partículas de silicatos con brillo vitreo incoloro que pudieron haber terminado en la corriente de magnéticos por temas de arrastre mecánico. A continuación, la **Figura 2-12**, representa las imágenes en microscopio para las partículas magnéticas pasantes de la malla 40 y retenidas en la malla 70 (entre 425 y 212 μm) y en la **Figura 2-13** las partículas magnéticas pasantes malla 70 (menores a 212 μm)

Figura 2-12: Imágenes del producto magnético fracción -40+70 mallas.

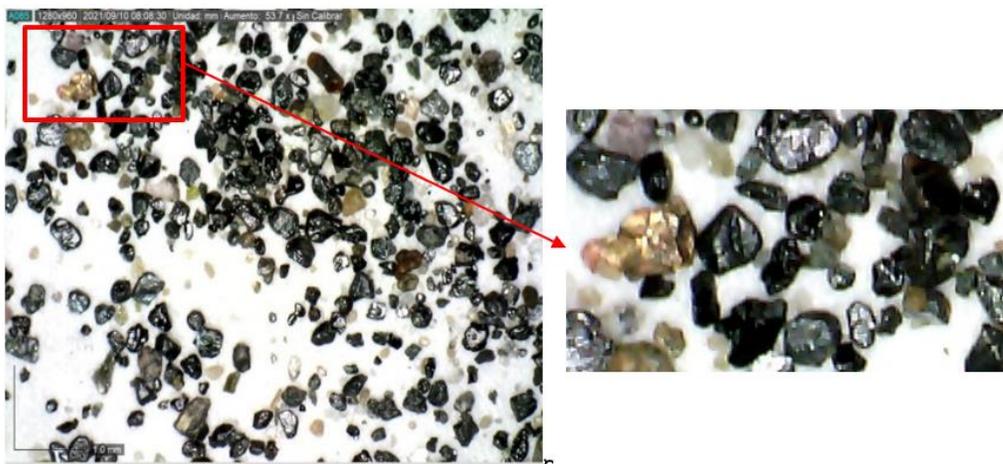
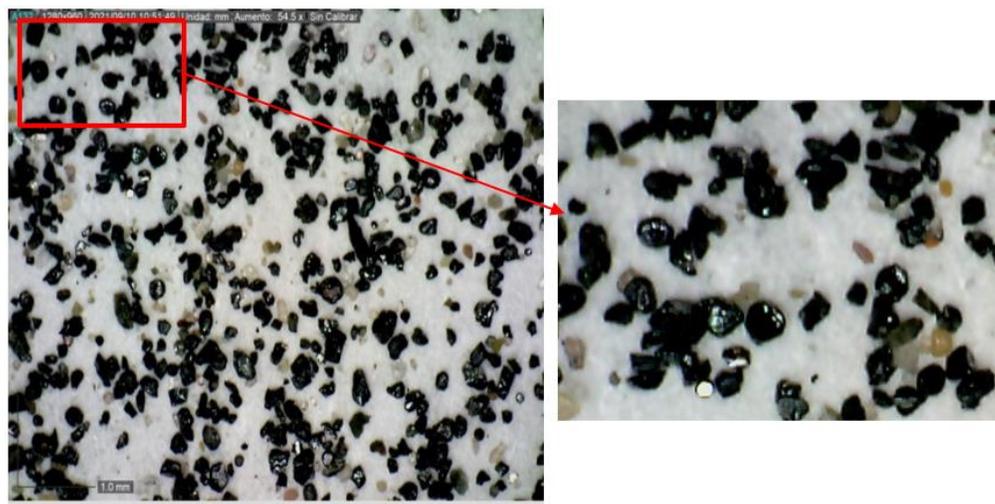


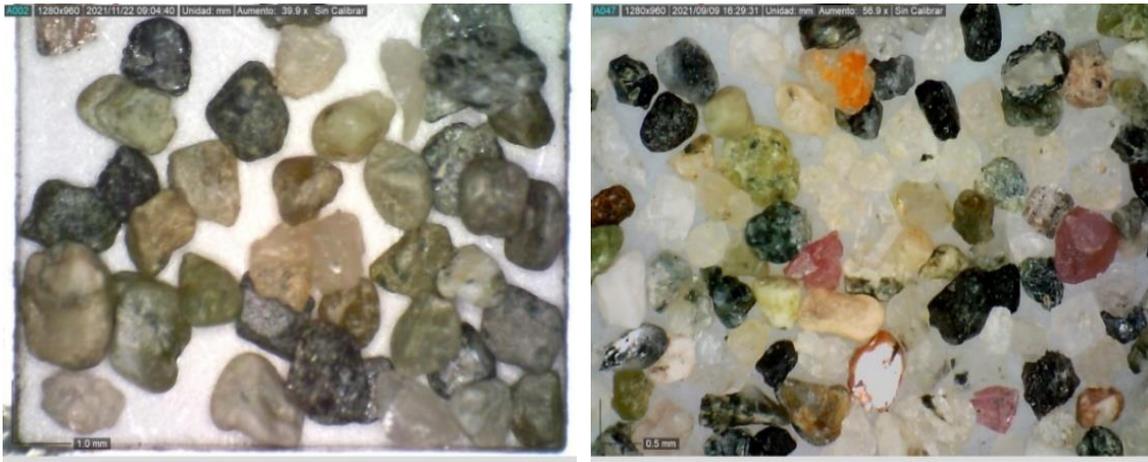
Figura 2-13: Imágenes del producto magnético fracción -70 mallas.



Tanto en la **Figura 2-12** como en la **Figura 2-13** predominan los minerales oscuros, óxidos de hierro y titanio, en los cuales el porcentaje de liberación aumenta en comparación con las partículas de las fracciones mayores a 425 μm (**Figura 2-11**). Se conservan las propiedades ópticas de los granos oscuros de la fracción -20+40 mallas (entre 850 y 425 μm) colores entre negro y café oscuro, con un brillo metálico, el hábito predominante en esta fracción de tamaño es subhedral.

En las partículas no magnéticas +20 mallas, mayores a 850 μm , y las -20-40 mallas, entre 850 y 425 μm de la **Figura 2-14** (a) y (b) respectivamente, predominan los granos claros, incoloros, grises, marrones y beige, asociados a silicatos, anfíboles y feldespatos, con formas anhedrales, natural de los fenómenos de transporte y meteorización que sufrieron estos minerales.

Figura 2-14: Imágenes producto no magnético fracciones +20 y -20+40 mallas.



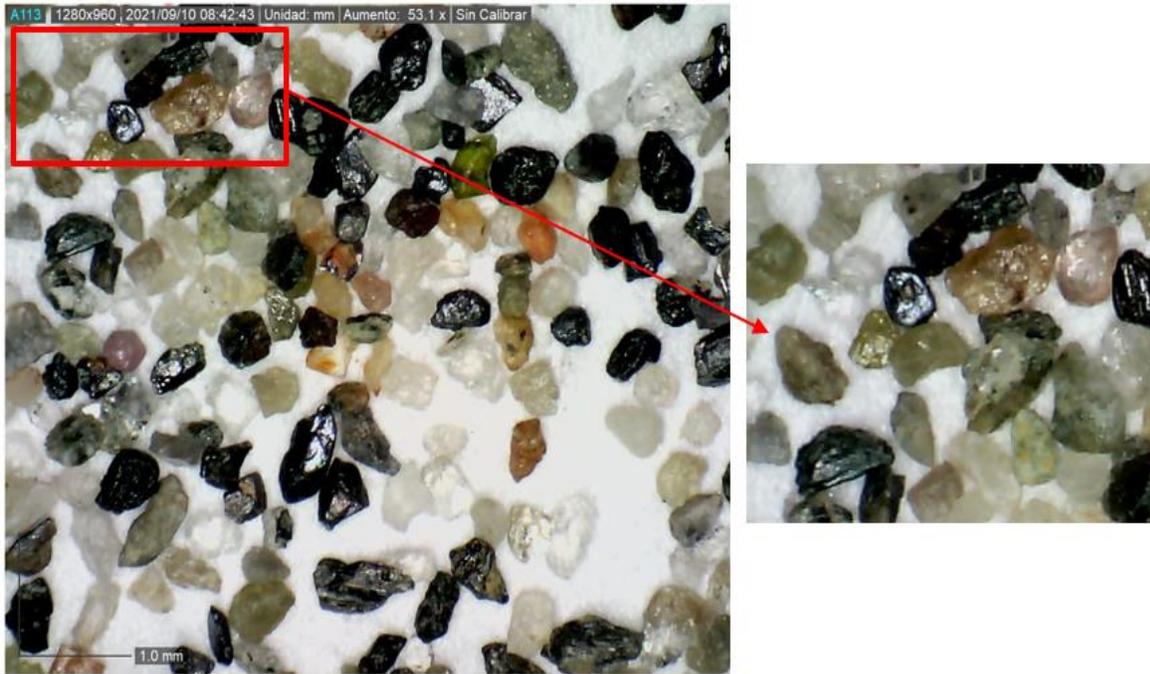
(a) Fracción no magnética +20 mallas (39.9X)

(b) Fracción no magnética-20+40 mallas (56.9X)

Las partículas entre 425 y 215 μm , -40-70 mallas, no magnéticas, de la **Figura 2-14** (b), en comparación con las partículas de la **Figura 2-14** (a), presentan mayor proporción de partículas incoloras y de brillo vítreo. Sin embargo, se aprecia que en el caso de la corriente de no magnéticos menores a 425 μm , hay mayor contaminación de partículas magnéticas y paramagnéticas (óxidos de hierro y titanio) que corresponden a los granos oscuros y de brillo metálico que aparecen en todas las fracciones de magnéticos, en mayor proporción

por debajo de los 425 μm , tal y como se reporta en los ensayos de separación con LST del capítulo 2.2.4.

Figura 2-15: Imagen producto no magnético fracción -40+70 mallas.



Los minerales no magnéticos de la fracción -70 mallas (menores a 212 μm), de la **Figura 2-16**, comparten la misma característica de los no magnéticos entre 425 y 212 μm (**Figura 2-15**), continúa siendo visible una proporción considerable de granos oscuros y de brillo metálico (óxidos de hierro y titanio) sugiriendo la presencia de minerales con un carácter más paramagnético que magnético. En el caso de los minerales claros presentes en la fracción de no magnéticos más finos -70 mallas (menores a 212 μm), predominan los cristales translúcidos con tonos beige, rosado e incoloros, posiblemente asociados a minerales como silicatos o rutilo. Las formas de estos cristales translúcidos son más euhedrales en comparación con las partículas de fracciones más gruesas, es decir, en estos cristales en particular es fácil identificar límites rectilíneos que corresponden a caras del cristal.

Se selecciona una imagen interesante correspondiente a los no magnéticos de la fracción fina menores a 425 μm (**Figura 2-17**), en la cual aumenta el aporte de partículas euhedrales, translúcidas con tonos beige, rosado e incoloros, asociados a minerales como rutilo y circones, los cuales presentan inclusiones o exsoluciones de otros minerales (puntos oscuros en los cristales).

Figura 2-16: Imagen microscopio no magnéticos -70 mallas.

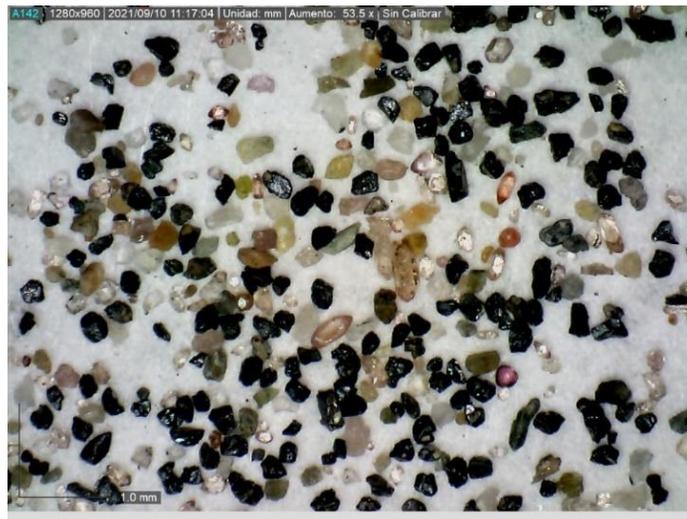


Figura 2-17: Imagen microscopio no magnéticos -40 mallas.



3. Ensayos de separación de minerales

En este capítulo se presentan los resultados de los procesos de separación de minerales realizados, siguiendo varias rutas y alternativas de beneficio. El proceso de beneficio propuesto se fue abordado de acuerdo con la respuesta de la muestra a las diferentes técnicas de separación.

3.1 Separación magnética de baja intensidad

Los ensayos de separación magnética se llevaron a cabo en un separador magnético de tambor inducido de alta intensidad MIH (13) 111-5, modelo laboratorio, marca Carpcó, Inc., serial No. 204-95 (**Figura 3-1**). Este separador expone a todos los materiales a un campo magnético más alto en las zonas de mayor gradiente magnético y utiliza la fuerza magnética y la gravedad para capturar materiales débilmente magnéticos. Un rodillo magnético giratorio utilizado para transportar materiales a través del área activa proporciona una fuerza centrífuga opuesta para la separación de materiales magnéticos y no magnéticos.

Las variables operativas en la separación a baja intensidad incluyen una velocidad de 80 RPM en el rodillo y 1300 gauss de intensidad. Se presentan en esta sección, inicialmente la separación de mineral de cabeza, seguido de la separación por dos fracciones, los gruesos, mayores a 425 μm (+40 mallas), y los finos menores a 425 μm (-40 mallas). El ajuste de la altura de la descarga de la tolva de alimentación al rodillo en todos los casos fue de 8mm, e ángulo de la tolva de alimentación respecto a la vertical (rampa) se fijó a 6° y la separación entre las corrientes de magnéticos, medios y no magnéticos se llevaron en todos los casos a 15, 5 y 10 cm respectivamente.

Figura 3-1: Equipo de separación magnética Carpco, Inc.



3.1.1 Separación magnética (SM) cabeza de baja intensidad (BI)

Se procesaron aproximadamente 20 kilogramos de material, y dada la capacidad del equipo usado se llevó a cabo por lotes de aproximadamente 1 kilogramo. Esta primera separación de baja intensidad se realizó a 1300G, 80RPM, y con caudales de alimentación entre 25 a 30 gramos por minuto (g/min). Para lograr una buena separación debió de realizarse una etapa de separación *Rougher* (de desbaste) y una *Scavenger* (repasso de no magnéticos) (ver **Figura 3-2**).

En la **Tabla 3-1** se presentan los valores de densidad de los diferentes productos de la separación magnética, muy útiles para determinar qué tan limpias quedan las corrientes de material magnético como resultado de la primera (P1) y segunda pasada (P2) por el separador magnético. Es evidente que, en la segunda pasada (P2), aparte de reportarse muy poco material hacia los magnéticos, la densidad de los sólidos refleja alto contenido de minerales livianos. Esto se debe probablemente al aumento de las fuerzas gravitacionales de las partículas gruesas, que vence la fuerza magnética.

Según la caracterización que se presentó previamente (separaciones magnéticas por tamaños del apartado 2.2.3 Densidad), se podría esperar un 27% de minerales

magnéticos, cuando realmente se obtuvo un total de 32%, reflejando una leve contaminación de minerales livianos en la corriente de magnéticos como consecuencia natural del procesamiento de minerales el cual nunca será 100% eficiente.

Figura 3-2: Flujograma del proceso de separación magnética (muestra cabeza).

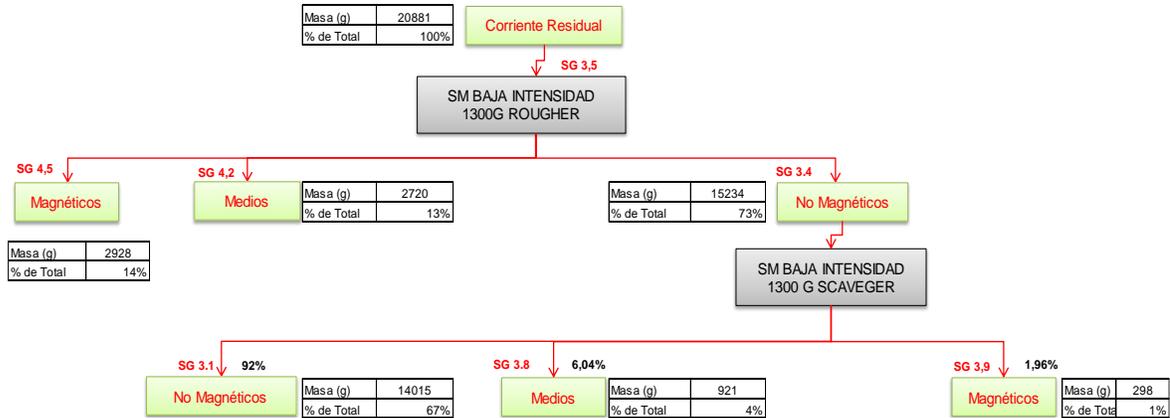


Tabla 3-1: Pícnometría productos de la SM BI (mineral de cabeza).

Muestra	Densidad (t/m ³)
Magnéticos P1	4.52
Medios P1	4.18
Magnéticos P2	3.97
Medios P2	3.89
No Magnéticos P1	3.42
No Magnéticos P2	3.08

3.1.2 Separación magnética por fracciones de baja intensidad (BI)

Una vez realizados los ensayos de separación magnética con mineral de cabeza, se llevó a cabo la separación magnética de muestras de mineral con tamaño de partícula mayor y menor a 40 mallas (425 μm). Esta malla de corte se seleccionó teniendo en cuenta que la fracción fina presenta mayor concentración de minerales pesados y mostró un mejor desempeño con relación a la separación magnética. Los resultados se presentan para dos

corrientes correspondientes a gruesos (mayores a $425\mu\text{m}$) y finos (menores a $425\mu\text{m}$). Esta primera separación, de baja intensidad, se realizó a 1300G, 80RPM, y con caudales de alimentación entre 20 a 25 gramos por minuto (g/min) en ambas fracciones de tamaño. Se realizaron igualmente separaciones *Rougher* y *Scavenger* para continuar con el procedimiento tal cual se estableció en la metodología experimental. Los resultados de la separación para las pasadas 1 y 2 (P1 y P2) de mineral fino se presentan en la **Figura 3-3**, y los resultados de la misma separación para el mineral grueso se muestran en la **Figura 3-4**.

La **Figura 3-5**, indica que se presenta una mayor concentración de minerales magnéticos en las fracciones finas que en las gruesas. La separación magnética de la etapa *scavenger* en el caso de la fracción gruesa, no presenta efectos significativos en la recuperación, mientras que, en el caso de la fracción fina, significa un aumento del 20% en la recuperación de magnéticos.

Figura 3-3: Resultados separación magnética de baja intensidad fracción -40 mallas

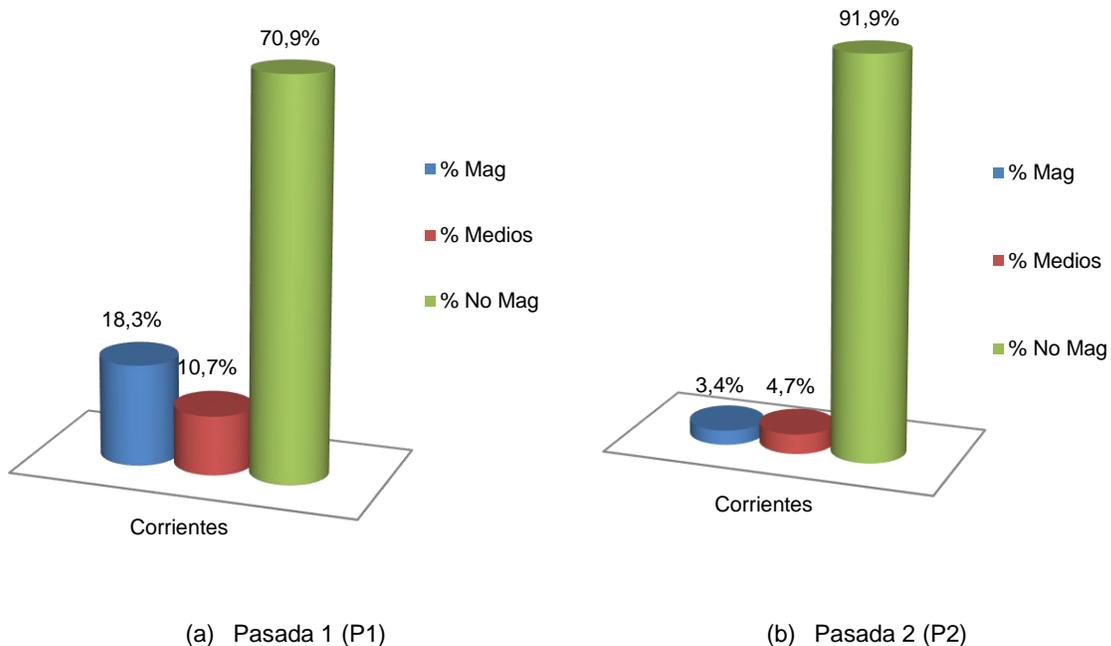


Figura 3-4: Resultados separación magnética de baja intensidad fracción +40 mallas

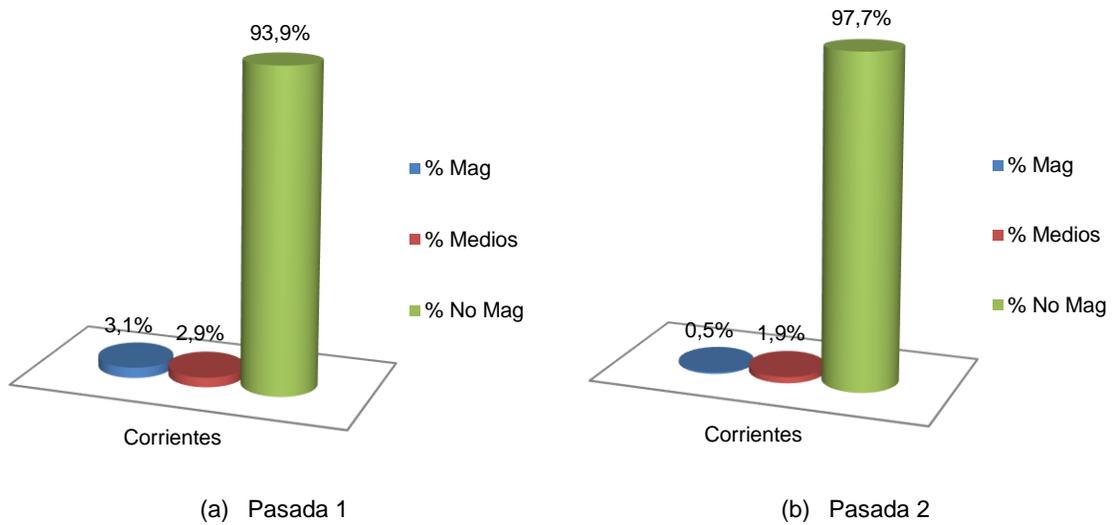
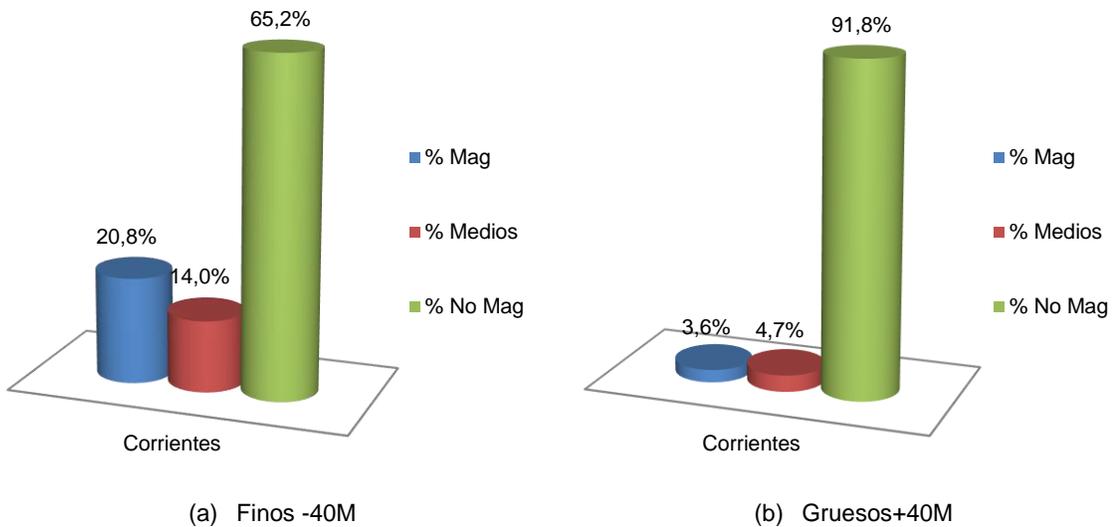


Figura 3-5: Resultados totales de la separación magnética de baja intensidad.



En la **Tabla 3-2** se presentan los resultados de las densidades calculadas para todas las corrientes en esta separación magnética de baja intensidad por fracciones. Estos resultados reflejan los problemas de separación con la fracción gruesa, para la cual se esperaba, según la caracterización, aproximadamente un 2% de minerales magnéticos y realmente se logró recolectar entre magnéticos y medios un 8.4% con una densidad de

3.58 t/m³, lo cual refleja un concentrado de minerales magnéticos contaminado de ganga. En la misma tabla se observa la uniformidad en densidades de las fracciones individuales de material magnético, medios y no magnético para cada rango de tamaños.

Tabla 3-2: Densidades medidas en las corrientes de la SM BI por fracciones.

Fracción	Muestra	Densidad (t/m ³)
-40	Cabeza	3.86
-40	Magnéticos P1	4.72
-40	Medios P1	4.55
-40	No Magnéticos P1	3.55
-40	Magnéticos P2	4.39
-40	Medios P2	4.18
-40	No Magnéticos Finales	3.49
+40	Cabeza	2.92
+40	Magnéticos P1	3.98
+40	Medios P1	3.39
+40	No Magnéticos P1	3.33
+40	Magnéticos P2	3.33
+40	Medios P2	3.25
+40	No Magnéticos Finales	3.28

3.2 Separación gravimétrica

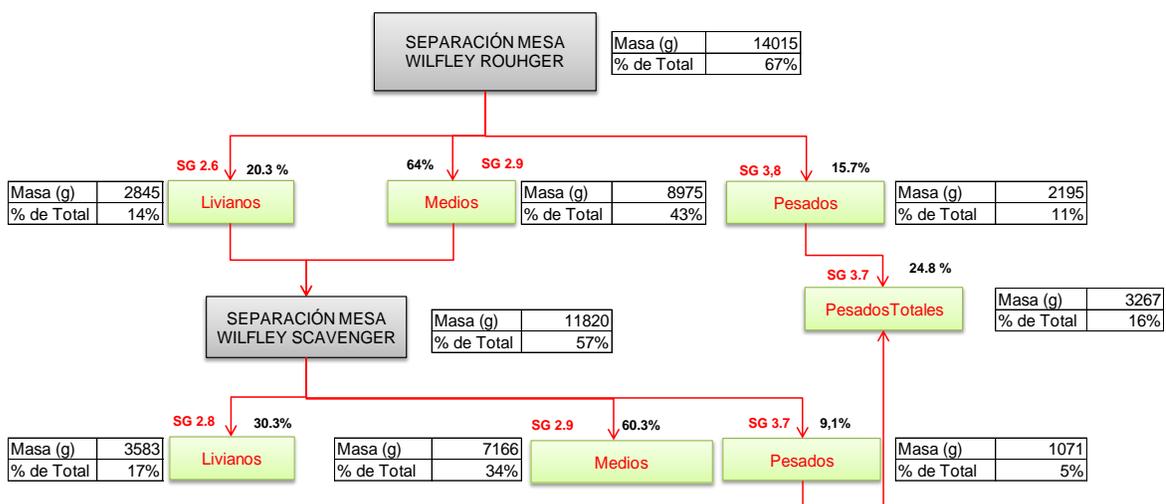
3.2.1 Separación de mineral de cabeza en mesa Wilfley

El producto no magnético de la separación magnética de baja intensidad de la muestra completa se sometió a separación en mesa Wilfley. La separación se hizo en dos etapas, *Rougher* y *Scavenger*, a fin de minimizar la presencia de partículas pesadas en los livianos y obtener productos lo más limpios posibles.

La mesa Wilfley empleada para los ensayos tiene dimensiones de 1.02 x 0.46 m de cubierta, 1 cm de altura máxima de rifle, operada a 1800 rpm (375 oscilaciones/min), motor de 1.5 HP, 9 l/min de agua de fluidización y 1° de ángulo frontal. Las separaciones *Rougher* y *Scavenger* se llevaron a cabo con flujos de alimentación de 30 y 40kg/h, mientras que el ángulo lateral fue de 6° y 7°, respectivamente.

La **Figura 3-6** representa el flujograma de la separación de los minerales no magnéticos del mineral de cabeza en la mesa Wilfley. En esta representación se pueden observar también los porcentajes de material en cada una de las corrientes de las etapas de la separación en la mesa y las gravedades específicas obtenidas por picnometría para cada una de estas corrientes. Los concentrados finales de la mesa en esta separación, es decir, los minerales más pesados, equivalen a un 24,8% de los no magnéticos, que corresponde a su vez a un 16% del total con una densidad de 3,7t/m³. Como se puede observar, ambas etapas de separación arrojaron cantidades relativas de medios muy similares, cercanas al 60% del total.

Figura 3-6: Flujograma de separación en mesa (mineral de cabeza).



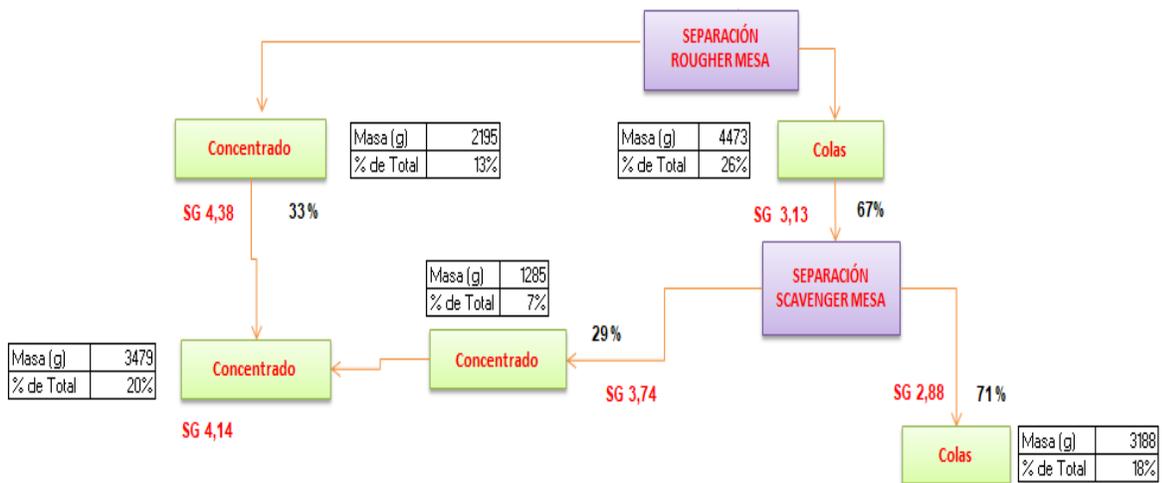
3.2.2 Separación en mesa por fracciones +40 y -40 mallas

Las fracciones de mineral con tamaños de partícula mayor y menor de 40 mallas también se sometieron a ensayos de separación en mesa. La separación se llevó a cabo en el mismo equipo anterior, manteniendo constantes las variables de 375 oscilaciones/min y 1° de ángulo frontal. Las demás variables tanto para los gruesos como los finos se pueden observar en la **Tabla 3-3**. Los resultados de las separaciones *Rougher* y *Scavenger* en cada fracción también se presentan en la **Figura 3-7** y **Figura 3-8**, en ambas figuras se pueden visualizar tanto los porcentajes de material en cada una de las corrientes y etapas de la separación en la mesa, como las gravedades específicas obtenidas por picnometría.

Tabla 3-3: Condiciones en separación en mesa de las fracciones +40 y -40 mallas.

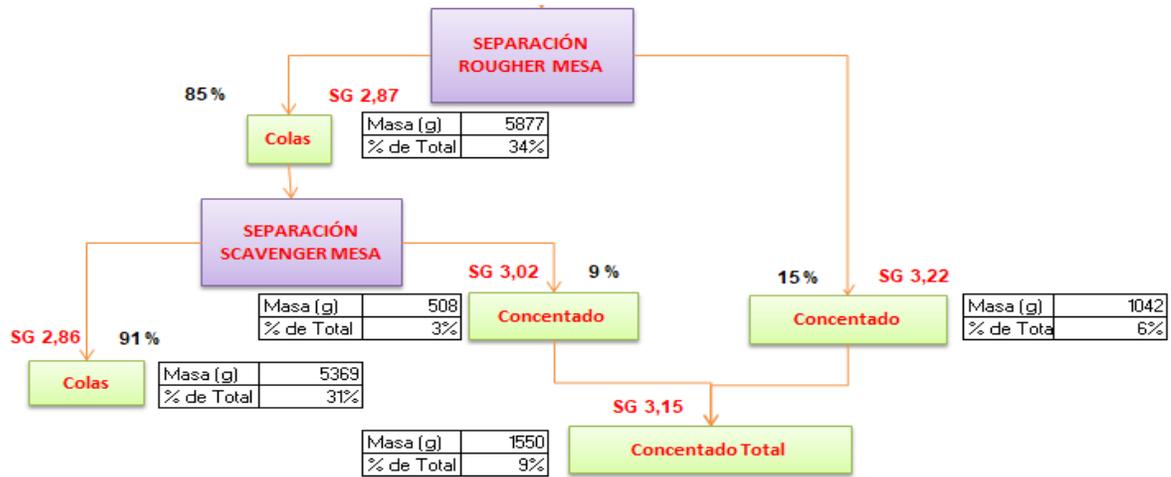
Fracción	Pasada	(kg/h)	Ángulo lateral	Agua (l/min)
-40	1	16.3	6°	9
-40	2	18.8	5°	9
+40	1	20.7	10°	11
+40	2	23.4	10°	12

Figura 3-7: Flujograma separación en mesa Wilfley fracción fina -40 mallas.



Según los resultados de la **Figura 3-7** y la **Figura 3-8**, se observa una marcada diferencia entre los resultados de densidad de las fracciones +40 mallas (mayores a 425 µm) y -40 mallas (menores a 425 µm).

La separación resultó ser más eficiente para el caso de la fracción de finos (-40M, menores a 425 µm), dados los efectos combinados de la granulometría, densidad y a que esta presenta mayor cantidad de minerales pesados respecto a los gruesos.

Figura 3-8: Flujograma separación en mesa Wilfley fracción gruesa +40 mallas.

3.3 Separación electrostática (SE)

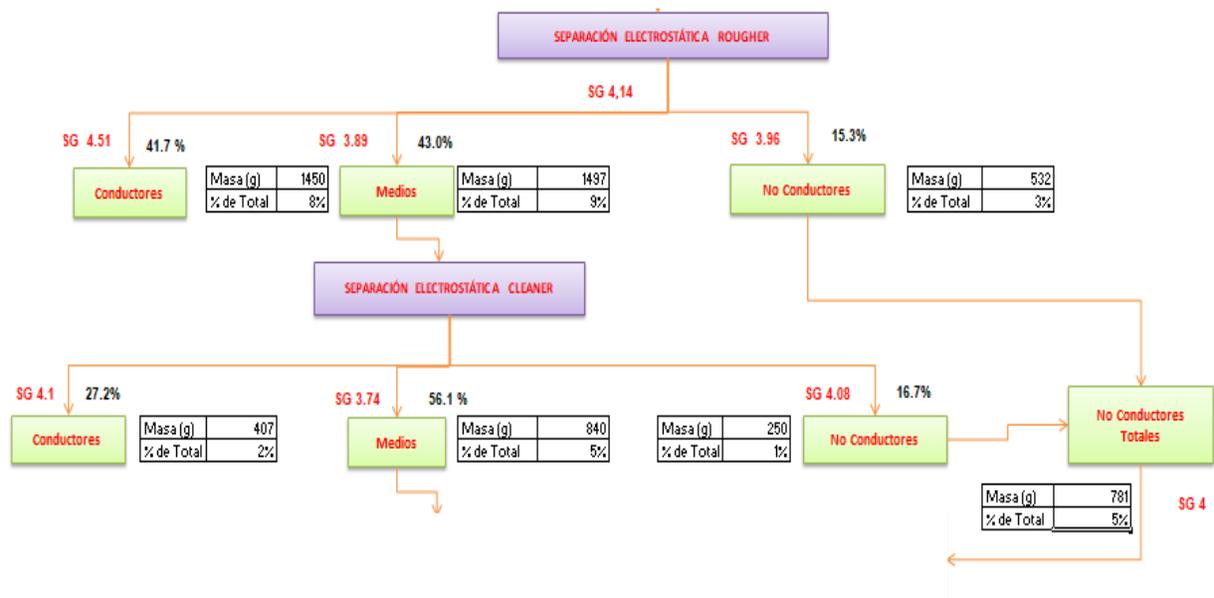
Esta separación se ejecutó únicamente para la fracción fina -40M (menores a 425 μm), debido a que, en el caso del proceso con el mineral de cabeza (que incluye todos los tamaños) y con los gruesos +40 mallas (mayores a 425 μm), no fue posible lograr productos aceptables como consecuencia del efecto de las partículas gruesas en el rodillo separador.

El equipo usado, un Carpcó modelo HT 111-15 (serial 282-95), tipo rodillo, cuenta con un electrodo diseñado para crear una densa descarga de alto voltaje, la carga se lleva a cabo por medio del principio de bombardeo de electrones (Carpco Inc., 1995). Estos equipos también se conocen como equipos de alta tensión, y funcionan por medio de las diferencias en la conductividad eléctrica superficial de las partículas. Los resultados de esta separación se pueden observar en la **Figura 3-9**, en este flujograma es posible visualizar tanto los porcentajes de material en cada una de las corrientes, así como las gravedades específicas obtenidas por picnometría.

Las variables usadas para estas separaciones fueron 80 RPM en la velocidad del tambor, 60 milímetros de altura de caída final (alimentación al rodillo desde la tolva de alimentación), 4 milímetros de luz entre el canal y el rodillo. Para el caso del primer

electrodo D.C., el voltaje de trabajo se ajustó a 30 kV (kilovoltios), 38 mA (miliamperios), 65 milímetros entre el electrodo dinámico y el rodillo y 65° de ángulo entre la horizontal y el electrodo dinámico. El segundo electrodo D.C., se realizó el ajuste de abertura entre el electrodo estático y el rodillo a 47 milímetros y 39° entre la horizontal y el electrodo estático.

Figura 3-9: Flujograma de separación electrostática (SE) de finos -40 mallas.



3.4 Separación magnética (SM) de alta intensidad (AI)

Realizada en el mismo equipo de separación magnética de baja intensidad, el separador magnético de tambor inducido de alta intensidad MIH (13) 111-5, modelo laboratorio, marca Carpcó, Inc., serial No. 204-95 (ver **Figura 3-1**). Para conocer el comportamiento y composición de las muestras, se realiza por separado el proceso de separación magnética de alta intensidad a los medios y no conductores de la separación electrostática previa. De la misma forma que en la separación magnética de BI, se realiza un proceso Rougher y un Scavenger, ambas a la máxima intensidad que permite el equipo 7000G, los caudales de alimentación en estas separaciones estuvieron entre 9 y 11 g/min y la velocidad del rodillo a 80 RPM.

En la **Figura 3-10** y **Figura 3-11** se presentan los flujogramas de las separaciones magnéticas de alta intensidad para el caso de los medios y no conductores de la separación electrostática (SE) respectivamente, de la fracción fina -40 mallas (menores a 425 μm), en estos flujogramas es posible visualizar tanto los porcentajes de material en cada una de las corrientes, así como las gravedades específicas obtenidas por picnometría.

Figura 3-10: Flujograma SM de AI sobre los medios de la SE.

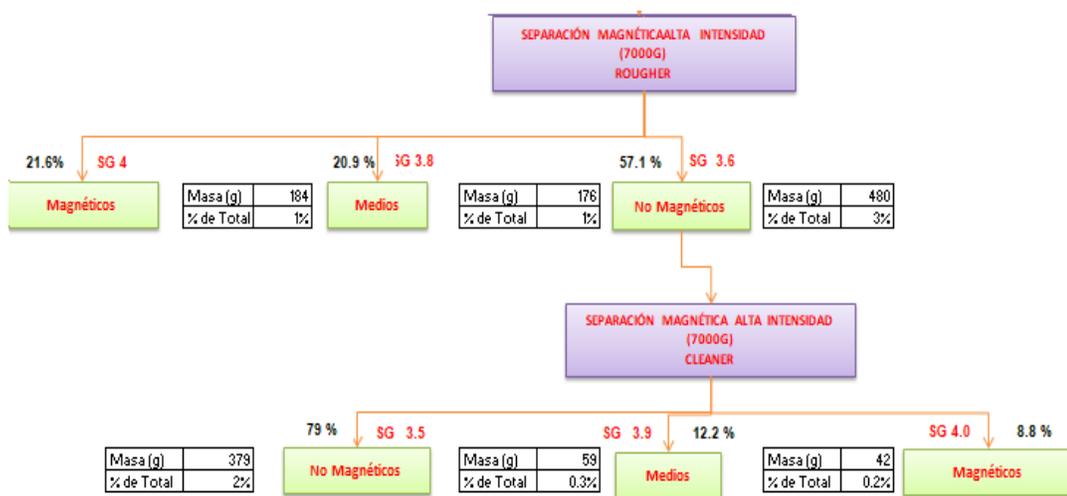
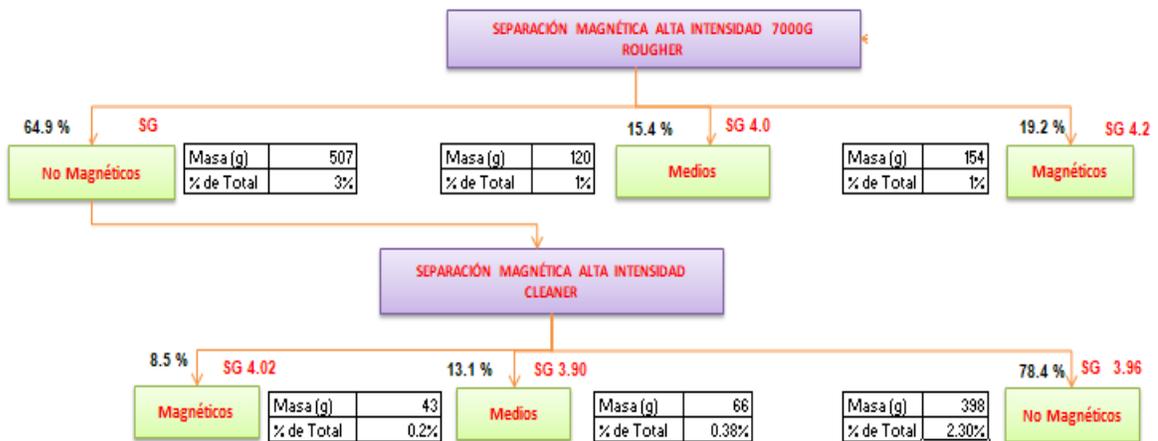


Figura 3-11: Flujograma SM de AI sobre los no conductores de la SE.



Los resultados de la separación magnética aplicada a los productos no conductores y medios de la separación electrostática mostrados en la **Figura 3-10** y la **Figura 3-11**, no presentan diferencias significativas, y en ambos casos de evidencia tan solo una recuperación marginal de material magnético adicional, asociado a minerales tipo silicatos y aluminosilicatos principalmente.

3.5 Análisis de eficiencia de separación en mesa

Con el fin de corroborar que tan eficiente fue la separación en mesa Wilfley (capítulo 3.2.2) con respecto a la separación de minerales por densidad, se realizó el proceso de separación con LST a las colas de la mesa de ambas fracciones +40 mallas y -40 mallas. Previo a la separación con el líquido denso, se separó la muestra por tamaños, que corresponden a los mismos tamaños de partícula en los que se llevó a cabo la separación inicial con LST (capítulo 2.2.4), es decir, las fracciones +20, -20+40, -40+70 y -70 mallas.

Los resultados (ver **Tabla 3-4**) de estos ensayos mostraron una menor eficiencia en la separación del mineral grueso (mayores a 40 mallas, 425 μm), respecto a los finos (-40 mallas). En términos generales, se detectó la presencia de minerales pesados en todas las fracciones de tamaños, particularmente la fracción -40+70 mallas reportaron un contenido de pesados en las colas de la mesa Wilfley del 28% respecto al total.

Tabla 3-4: Resultados de la separación con LST sobre colas de la mesa Wilfley.

Corriente	% Masa de la Fracción	Porcentaje de Pérdidas
+20 Flotados	35%	31%
+20 Hundidos	65%	
-20+40 Flotados	79%	
-20+40 Hundidos	21%	
-40+70 Flotados	72%	28%
-40+70 Hundidos	28%	
-70 Flotados	84%	
-70 Hundidos	16%	

Con los resultados de este ensayo, se realiza un cálculo del porcentaje de minerales pesados que quedaron contenidos en la corriente de colas de la separación gravimétrica en mesa Wilfley, como se reporta en la **Tabla 3-4**, denominado “porcentaje de pérdidas”.

A continuación (**Tabla 3-5**), se presentan las densidades, por fracciones de tamaño, calculadas para los diferentes productos de la separación de las colas de la mesa Wilfley con LST.

Tabla 3-5. Densidades de productos de las separaciones con LST (colas mesa).

Corriente	Densidad (t/m ³)	Densidad (t/m ³)	Densidad (t/m ³)
+20 Flotados	2,78	3,17	2,91
+20 Hundidos	3,38		
-20+40 Flotados	2,73	2,83	
-20+40 Hundidos	3,21		
-40+70 Flotados	2,73	2,87	2,86
-40+70 Hundidos	3,25		
-70 Flotados	2,84	2,40	
-70 Hundidos			

Este porcentaje (“porcentaje de pérdidas”) equivale a la masa que representan los hundidos respecto a la masa total de las fracciones +40 y -40 mallas. En el caso de la fracción gruesa, el 31% de la masa equivale a minerales de densidad superior a 2.9 t/m³, mientras que en el caso de la fracción -40 mallas, el 28% del material está asociado con minerales de densidad superior a 2.9 t/m³. En la **Tabla 3-4** también se reportan los porcentajes en masa de flotados y hundidos respecto a la masa de la fracción de tamaño en cuestión, es decir, para el caso puntual de la fracción +20 mallas, el 35% del material en esta fracción está conformado por minerales con densidades menores a 2.9 t/m³, mientras que el porcentaje restante de la masa (65%) fue reportada como hundidos, minerales con densidades mayores a 2.9 t/m³.

3.6 Caracterización de productos de ensayos de separación

En este apartado, se presentan los resultados de los análisis por Difracción de Rayos X (DRX) obtenidos para el caso de la separación magnética de baja intensidad, sus dos productos (magnéticos y no magnéticos,), sobre las cuatro fracciones de tamaño definidas en la caracterización, +20, -20+40, -40+70 y -70 mallas. La composición de las especies de interés (principalmente la monacita, pero también teniendo en cuenta la magnetita, ilmenita, rutilo, circón y ganga) en la cabeza o corriente de interés completa (corriente residual o colas de la espiral del proceso de beneficio de oro de Mineros Aluvial SAS BIC), se obtiene mediante una reconstrucción a partir de los aportes tanto en cada separación como en cada tamaño (**Tabla 3-14**). Como información adicional se presentan las estructuras identificadas en cada muestra con su respectiva fórmula química y densidad, a partir de estas densidades se pondera la densidad de la muestra. Finalmente se presenta la composición de las colas de la mesa Wilfley y los productos de separación magnética de alta intensidad.

Los análisis se realizaron en un equipo de difracción de rayos X marca Analítica modelo Empyrean en configuración Bragg Bretano θ - 2θ . Como fuente de los rayos X se hizo uso de un tubo de cobre Cu ($\lambda_{\text{Cu}}=1,5406 \text{ \AA}$). Los barridos se realizaron entre $3,0$ y $70^\circ 2\theta$, con un tamaño de paso de $0,0263^\circ 2\theta$ y un tiempo por paso de $100,725 \text{ s}$. Para la adquisición de los datos se contó con un detector de estado sólido de alta velocidad PIXcel 1D, en modalidad standing y con longitud angular activa de $3,347^\circ$ a 240 mm de radio. Los resultados fueron analizados en los programas FullProf suite y HighScore de Malvern-Panalytical.

A continuación, se presentan el difractograma y las especies minerales de los minerales magnéticos mayores a $825 \mu\text{m}$, **Figura 3-12** y **Tabla 3-6** respectivamente. Se verifica la presencia de cuarzo (no reportado) y moscovita, y el poco aporte de minerales magnéticos en esta fracción, un $8,2\%$ de óxidos de hierro y 3% de ilmenita paramagnética sobre un 100% que, como sumatoria equivale al $0,26\%$ del total de minerales en la corriente, estos minerales magnéticos en esta corriente equivalen a $0,03\%$ del total, lo anterior, según las

separaciones magnéticas previas a la separación con LST del capítulo 2.2.4. Se reporta también la presencia de monacita-La, como se había evidenciado con anterioridad.

Figura 3-12: Análisis de DRX para la fracción magnética de mineral +20 mallas.

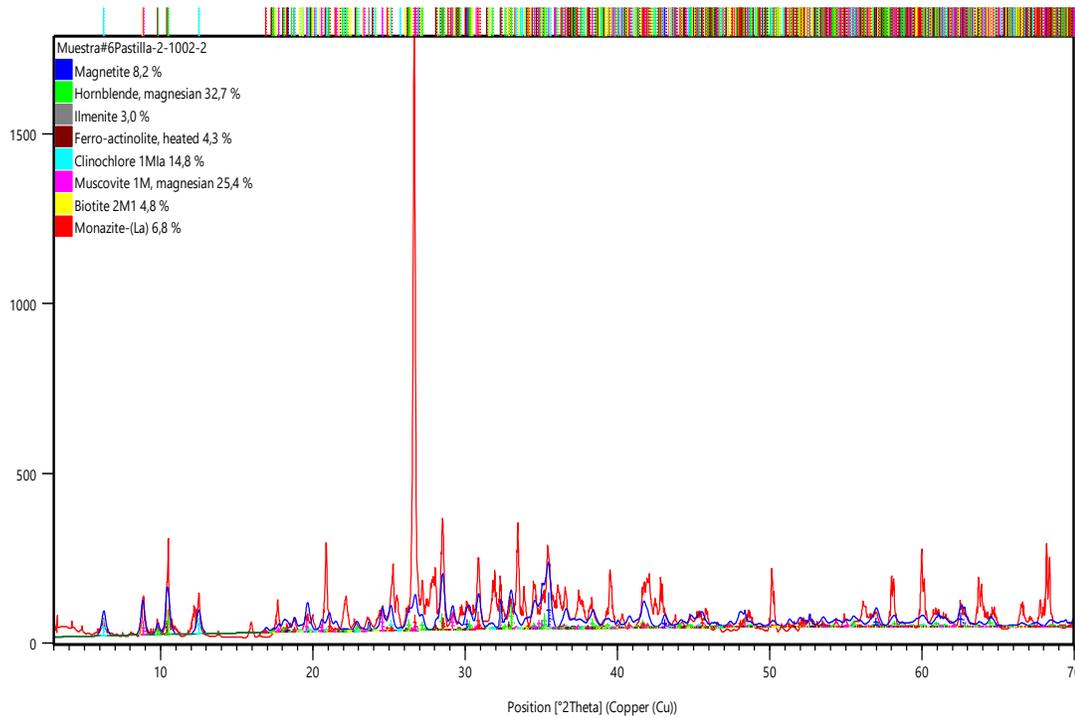


Tabla 3-6: Estructuras identificadas en DRX para la fracción magnética +20 mallas.

Mineral	Fórmula Química	M.M (g/mol)	Densidad (g/cm ³)	% Rietveld
Óxido de Fe	$O_{32,00}Fe_{23,18}$	1806,3	5,1	8,2%
Hornblenda	$Mg_{6,94}O_{47,60}F_{0,40}Si_{14,56}Al_{2,00}Fe_{2,70}H_{3,60}Ti_{0,12}Ca_{3,32}Na_{0,98}K_{0,04}$	1718,1	3,1	32,7%
Ilmenita	$O_{18,00}Ti_{6,00}Fe_{6,00}$	910,5	4,7	3%
Ferroactinolita	$Si_{15,96}Mn_{0,36}Mg_{1,48}Fe_{8,21}Ti_{0,01}Na_{0,04}H_{3,74}Al_{0,04}O_{47,98}F_{0,02}K_{0,05}Ca_{3,90}$	1894,93	3,4	4,3%
Clinoclora	$Al_{6,60}Mg_{5,00}Fe_{3,30}Si_{4,40}O_{36,00}$	1183,45	2,8	14,8%
Moscovita	$H_{4,00}O_{24,00}Mg_{0,56}Fe_{0,16}Al_{4,50}Si_{6,82}Ca_{0,02}Na_{0,04}K_{1,60}$	787,81	2,8	25,4%
Biotita	$Fe_{6,08}O_{48,00}Si_{11,12}Al_{6,32}Mg_{2,84}Mn_{0,28}Ti_{0,52}K_{3,76}Na_{0,04}$	1847,60	3,0	4,8%
Monacita	$O_{16,00}P_{4,00}La_{4,00}$	935,51	5,1	6,8%
Total			3,3	100%

Los minerales no magnéticos de la fracción gruesa, mayores a 850 µm, se presenta en la **Figura 3-13** y el difractograma en la **Tabla 3-7**, las estructuras minerales asociadas a la

muestra analizada. Los aspectos más relevantes en esta muestra incluyen la presencia de monacita Ce y La, cada una en un porcentaje según cálculo de Ritveld de 0,6%, es decir, un 1,2% en total, los demás minerales incluyen silicatos y aluminosilicatos.

Figura 3-13: Análisis de DRX para la fracción no magnética de mineral +20 mallas.

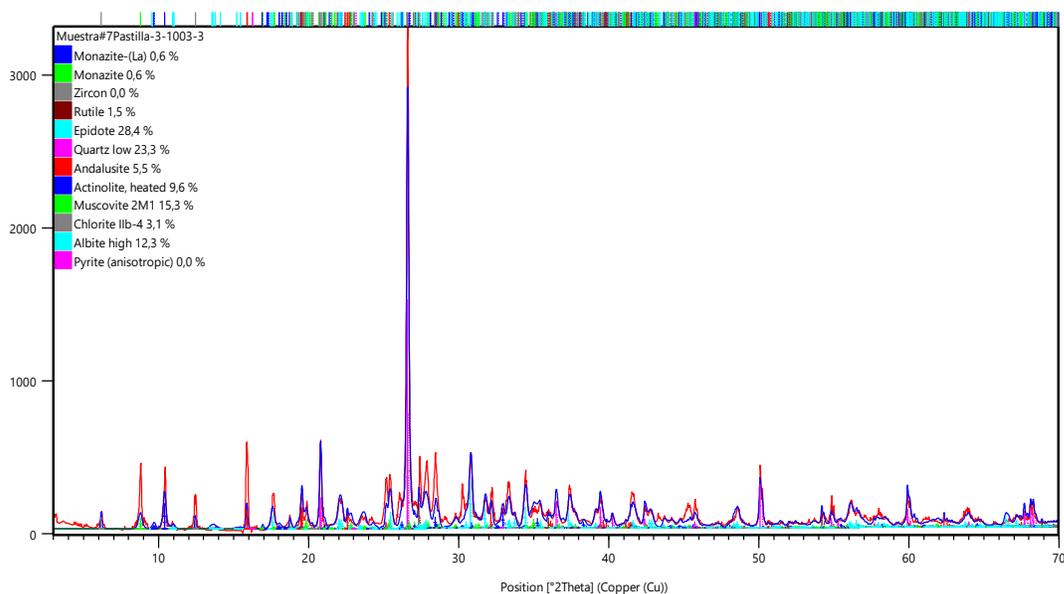


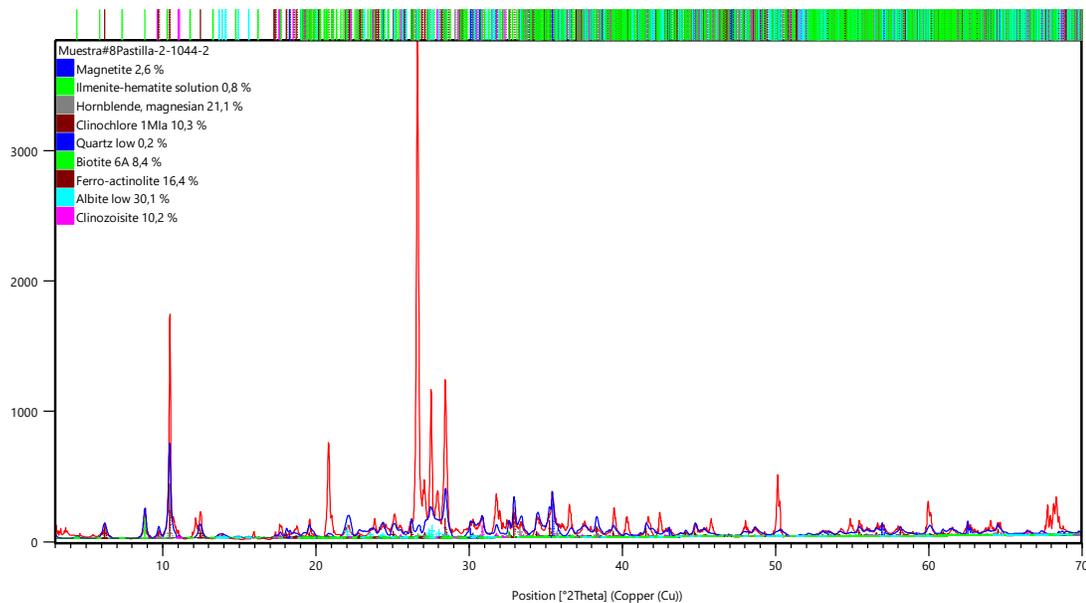
Tabla 3-7: Estructuras identificadas en DRX para los no magnéticos +20 mallas.

Mineral	Fórmula Química	M.M (g/mol)	Densidad (g/cm ³)	% Rietveld
Monacita, La	$O_{16,00}P_{4,00}La_{4,00}$	935,51	5,1	0,6%
Monacita, Ce	$O_{16,00}P_{4,00}Ce_{4,00}$	940,37	5,2	0,6%
Rutilo	$O_{4,00}Ti_{2,00}$	159,80	4,2	1,5%
Epidota	$O_{26,00}Ca_{4,00}Si_{6,00}Al_{4,34}Fe_{1,62}$	952,39	3,5	28,4%
Cuarzo	$O_{6,00}Si_{3,00}$	180,25	2,7	23,3%
Andalucita	$O_{20,00}Si_{4,00}Al_{8,00}$	648,18	3,2	5,5%
Actinolita	$Na_{0,22}Mn_{0,67}Mg_{3,96}Fe_{5,65}Al_{0,57}Ti_{0,01}Ca_{3,47}H_{3,79}Si_{15,58}O_{47,95}F_{0,05}K_{0,02}$	1819,08	3,3	9,6%
Moscovita	$Al_{11,48}O_{47,84}F_{0,16}Si_{12,04}Fe_{0,48}Mg_{0,28}Ti_{0,12}K_{3,76}Na_{0,16}$	1606,39	2,9	15,2%
Clinocloro	$Fe_{0,47}Al_{1,39}Si_{2,61}Mg_{5,53}O_{18,00}$	559,49	2,7	3,1%
Albita	$O_{16,00}Si_{6,00}Al_{2,00}Na_{2,00}$	524,45	2,6	12,2%
Total				100%

El porcentaje de minerales magnéticos tipo óxido de hierro y titanio, en esta fracción en comparación con la fracción +20, no presenta incrementos significativos, este porcentaje es del 3,4% del 100% de fases minerales en la muestra. Los minerales que más aportan en esta muestra incluyen la hornblenda, clinocloro, ferroactinolita, albita y clinozoisita, minerales con densidades entre 2,9 y 3,4 g/cm³.

Los resultados de esta caracterización mineralógica con DRX y cuantificación de fases indican deficiencias en la separación magnética en las fracciones gruesas (partículas mayores a 425 µm), donde el aporte de minerales magnéticos debería de ser el principal componente másico, y en vez de esto, predominan los silicatos y aluminosilicatos. Adicionalmente aparece rutilo en bajas concentraciones reportado en las corrientes de magnéticos de la fracción entre 850 y 425µm, pudiendo significar granos de fases poliminerales. En la **Figura 3-14** y la **Tabla 3-8**, se presentan los resultados del análisis de DRX correspondientes a las partículas magnéticas entre 850 y 425µm.

Figura 3-14: Análisis de DRX para la fracción magnética de mineral -20+40 mallas.

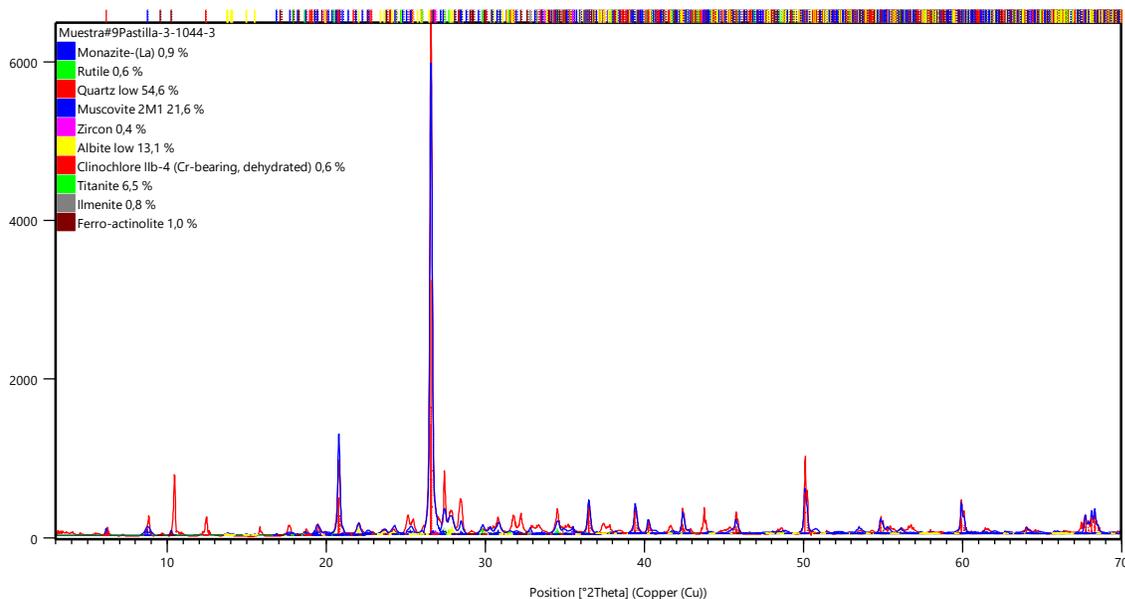


El porcentaje de minerales magnéticos tipo óxido de hierro y titanio, en esta fracción en comparación con la fracción +20, no presenta incrementos significativos. Este porcentaje es del 3,4% del 100% de fases minerales en la muestra. Los minerales que más aportan en esta muestra incluyen la hornblenda, clinocloro, ferroactinolita, albita y clinozoisita, minerales con densidades entre 2,9 y 3,4 g/cm³.

Tabla 3-8: Estructuras identificadas en DRX para los magnéticos -20+40 mallas.

Mineral	Fórmula Química	M.M (g/mol)	Densidad (g/cm ³)	% Rietveld
Óxido de Fe	O _{32,00} Fe _{23,44}	1821,04	5,1	2,6%
Ilmenita/hematita	O _{18,00} Fe _{8,40} Ti _{3,60}	929,54	4,9	0,8%
Hornblenda	Mg _{6,94} O _{47,60} F _{0,40} Si _{14,56} Al _{2,00} Fe _{2,70} H _{3,60} Ti _{0,12} Ca _{3,32} Na _{0,98} K _{0,04}	1718,1	3,1	21,1%
Clinocloro	Al _{6,60} Mg _{5,00} Fe _{3,30} Si _{4,40} O _{36,00}	1183,45	2,8	10,3%
Cuarzo	O _{6,00} Si _{3,00}	180,25	2,7	0,2%
Biotita	Si _{18,00} O _{66,00} Al _{6,00} K _{6,00} Mg _{18,00} F _{6,00}	2509,5	2,9	8,4%
Ferroactinolita	Si _{15,95} Mn _{0,39} Mg _{1,69} Fe _{7,96} Ti _{0,00} Na _{0,03} H _{3,76} Al _{0,04} O _{48,00} K _{0,04} Ca _{3,94}	1888,45	3,4	16,4%
Albita	O _{16,00} Si _{6,00} Al _{2,00} Na _{2,00}	524,45	2,6	30,1%
Clinozoisita	Ca _{4,00} O _{26,00} Al _{5,44} Cr _{0,56} Si _{6,00}	920,71	3,3	10,1%
Total			3,03	100%

El difractograma de los minerales no magnéticos entre 850 y 425µm, así como las principales estructuras y porcentajes de aportes se pueden visualizar a continuación en la **Figura 3-15** y la **Tabla 3-9**, respectivamente.

Figura 3-15: Análisis de DRX para la fracción no magnética de mineral -20+40 mallas.

A partir de este análisis, se resalta la presencia de monacita en un 0,9% respecto al 100% de esta muestra, la cual según los ensayos de separación con LST corresponde a 0,47% del total de la corriente analizada en este proyecto de investigación. Un mineral interesante reportado en esta muestra es la titanita, un silicato de titanio y calcio, con un 6,5%.

Tabla 3-9: Estructuras identificadas en DRX para los no magnéticos -20+40 mallas.

Mineral	Fórmula Química	M.M (g/mol)	Densidad (g/cm ³)	% Rietveld
Monacita, La	$O_{16,00}P_{4,00}La_{4,00}$	935,5	5,1	0,9%
Rutilo	$O_{4,00}Ti_{2,00}$	159,8	4,4	0,6%
Cuarzo	$O_{6,00}Si_{3,00}$	180,25	2,7	54,6%
Moscovita	$O_{46,98}F_{1,02}K_{3,44}Al_{11,62}Si_{11,58}$	1544,3	2,7	21,6%
Circón	$O_{16,00}Si_{4,00}Zr_{4,00}$	733,2	4,7	0,4%
Albita	$O_{16,00}Si_{6,00}Al_{2,00}Na_{2,00}$	524,4	2,6	13,1%
Clinocloro	$Al_{2,00}Mg_{5,00}Si_{3,00}O_{15,00}$	499,7	2,4	0,6%
Titanita	$Ce_{0,02}Ti_{2,99}Al_{0,38}Zr_{0,18}Nb_{0,16}Ta_{0,00}Fe_{0,27}Sn_{0,01}Si_{4,00}Ca_{3,94}La_{0,00}Mn_{0,02}$ $Na_{0,02}K_{0,00}O_{19,78}F_{0,22}Sb_{0,00}$	797,7	3,6	6,4%
Ilmenita	$O_{18,00}Ti_{6,00}Fe_{6,00}$	910,5	4,7	0,8%
Ferroactinolita	$Si_{15,95}Mn_{0,39}Mg_{1,69}Fe_{7,96}Ti_{0,00}Na_{0,03}H_{3,76}Al_{0,04}O_{48,00}K_{0,04}Ca_{3,94}$	1888,4	3,4	1%
Total				100%

Continuando con la presentación de los resultados de DRX, para los magnéticos entre 425 y 212 μm de la **Figura 3-16** y **Tabla 3-10**, se destacan como hallazgos el incremento en la proporción de magnetita e ilmenita como es de esperarse, en total estos dos minerales, representan el 50,6% de la muestra.

El resto de los minerales acompañantes en los magnéticos entre 425 y 212 μm , (**Figura 3-16** y **Tabla 3-10**) coinciden con los de las muestras que ya han sido reportadas hasta el momento en este apartado (capítulo 3.6), independientemente de la corriente, magnéticos o no magnéticos, estos minerales incluyen silicatos y aluminosilicatos como: hornblenda, ferroactinolita, biotita, clorita, clinzoisita, albita y cuarzo. Estos resultados confirman, en el caso de los minerales magnéticos la contaminación por fuerzas de arrastre, el cual es más agudo y perceptible a medida que las partículas son más gruesas, es decir, es más notable este efecto en el caso de los magnéticos +20 mallas (**Tabla 3-6**) y los magnéticos

-20+40 mallas (**Tabla 3-8**). El difractograma y las estructuras cuantificadas de los minerales no magnéticos entre 425 y 212 μm se visualizan en la **Figura 3-17** y la **Tabla 3-11** respectivamente.

Figura 3-16: Análisis de DRX para la fracción magnética de mineral -40+70 mallas.

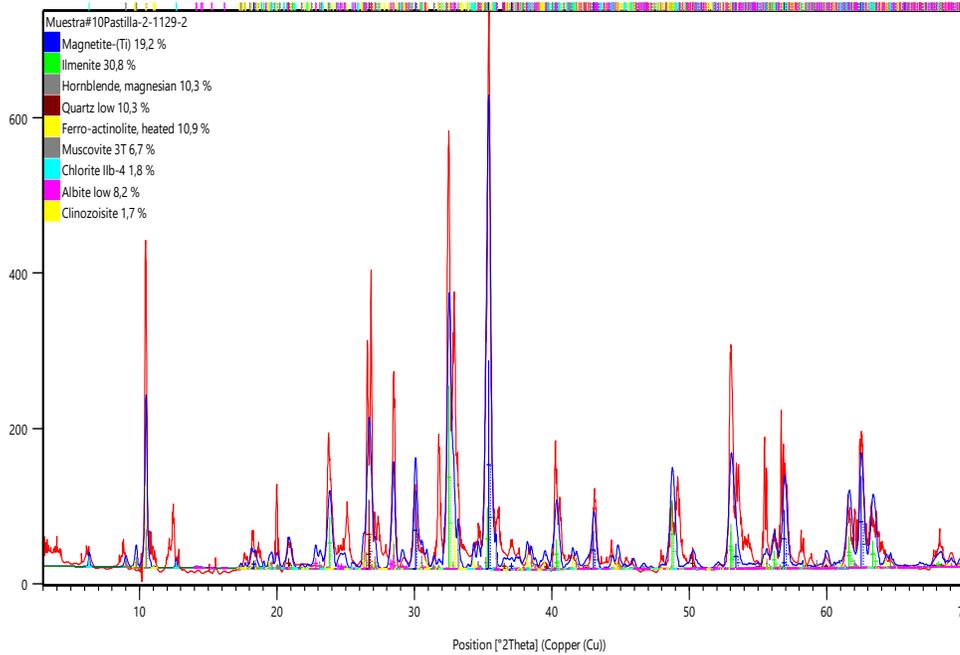


Tabla 3-10: Estructuras identificadas en DRX para los magnéticos -40+70 mallas.

Mineral	Fórmula Química	M.M (g/mol)	Densidad (g/cm ³)	% Rietveld
Magnetita	$\text{O}_{32,00}\text{Ti}_{5,36}\text{Fe}_{16,32}$	1680,15	4,7	19,3%
Ilmenita	$\text{O}_{18,00}\text{Ti}_{6,00}\text{Fe}_{6,00}$	910,47	4,8	30,8%
Hornblenda	$\text{Mg}_{6,94}\text{O}_{47,60}\text{F}_{0,40}\text{Si}_{14,56}\text{Al}_{2,00}\text{Fe}_{2,70}\text{H}_{3,60}\text{Ti}_{0,12}\text{Ca}_{3,32}\text{Na}_{0,98}\text{K}_{0,04}$	1718,06	3,2	10,3%
Cuarzo	$\text{O}_{6,00}\text{Si}_{3,00}$	180,25	2,7	10,3%
Ferroactinolita	$\text{Si}_{15,96}\text{Mn}_{0,36}\text{Mg}_{1,48}\text{Fe}_{8,21}\text{Ti}_{0,01}\text{Na}_{0,04}\text{H}_{3,74}\text{Al}_{0,04}\text{O}_{47,98}\text{F}_{0,02}\text{K}_{0,05}\text{Ca}_{3,90}$	1894,93	3,4	10,9%
Moscovita	$\text{O}_{36,00}\text{Si}_{9,00}\text{Al}_{8,73}\text{K}_{3,00}\text{Fe}_{0,27}$	1196,67	2,7	6,7%
Clorita	$\text{Fe}_{0,47}\text{Al}_{1,39}\text{Si}_{2,61}\text{Mg}_{5,53}\text{O}_{18,00}$	559,49	2,8	1,8%
Albita	$\text{O}_{16,00}\text{Si}_{6,00}\text{Al}_{2,00}\text{Na}_{2,00}$	524,45	2,6	8,2%
Clinozoisita	$\text{Ca}_{4,00}\text{O}_{26,00}\text{Al}_{5,02}\text{Cr}_{0,98}\text{Si}_{6,00}$	931,22	3,4	1,7%
Total			3,9	100%

Figura 3-17: Análisis de DRX para la fracción no magnética de mineral -40+70 mallas.

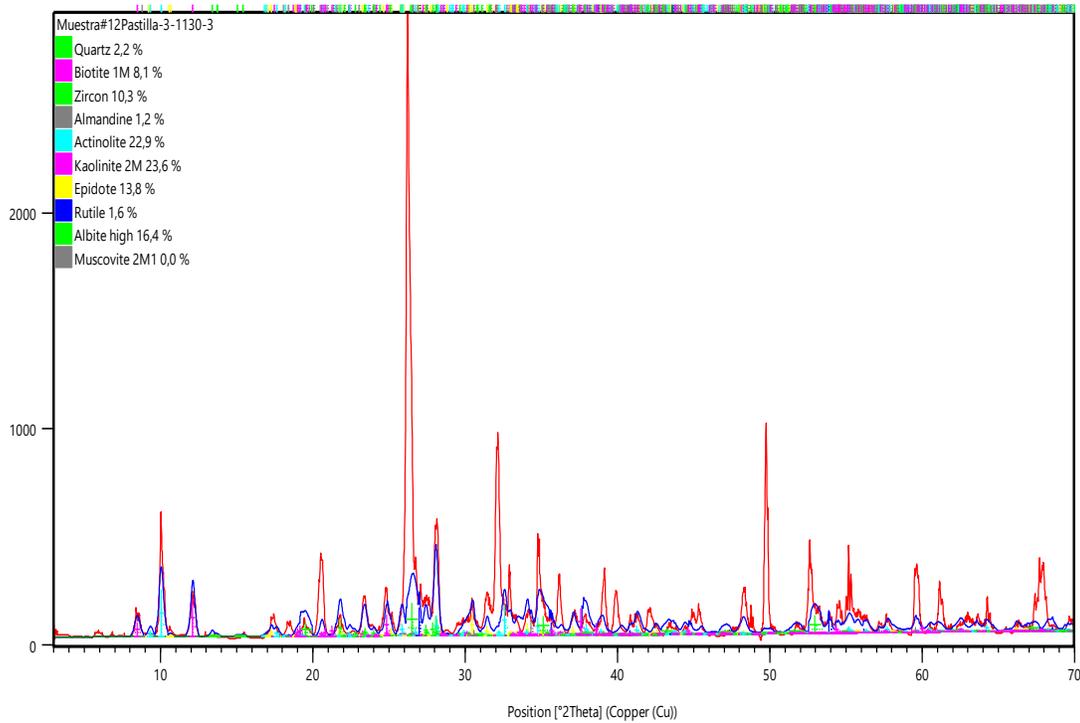


Tabla 3-11: Estructuras identificadas en DRX para los no magnéticos -40+70 mallas.

Mineral	Fórmula Química	M.M (g/mol)	Densidad (g/cm ³)	% Rietveld
Cuarzo	O _{6,00} Si _{3,00}	180,25	2,7	2,2%
Biotita	H _{4,00} Si _{6,00} Al _{2,00} K _{2,00} Fe _{2,00} Mg _{4,00} O _{24,00}	897,60	3,1	8,1%
Circón	O _{16,00} Si _{4,00} Zr _{4,00}	733,21	4,6	10,3%
Almandino	Si _{24,00} Al _{16,00} Mn _{0,07} Ca _{1,03} Mg _{2,16} Fe _{20,71} O _{96,00}	3896,21	4,2	1,2%
Actinolita	Ca _{3,63} Mn _{0,18} Mg _{3,91} Fe _{6,22} Al _{0,05} Ti _{0,00} H _{3,72} Na _{0,04} Si _{15,98} O _{47,96} F _{0,04}	1820,50	3,3	22,9%
Caolinita	O _{36,00} Si _{8,00} Al _{8,00}	1016,51	2,5	23,6%
Epidota	O _{26,00} Ca _{4,00} Fe _{2,00} Al _{4,00} Si _{6,00}	964,44	3,5	13,8%
Rutilo	O _{4,00} Ti _{2,00}	159,80	4,4	1,6%
Albita	O _{16,00} Si _{6,00} Al _{2,00} Na _{2,00}	524,45	2,6	16,3%
Total				100%

Los resultados que se presentan en la **Figura 3-17** y la **Tabla 3-11**, correspondientes a mineral no magnético, muestran una presencia notable de circón, en un 10,3% en esta

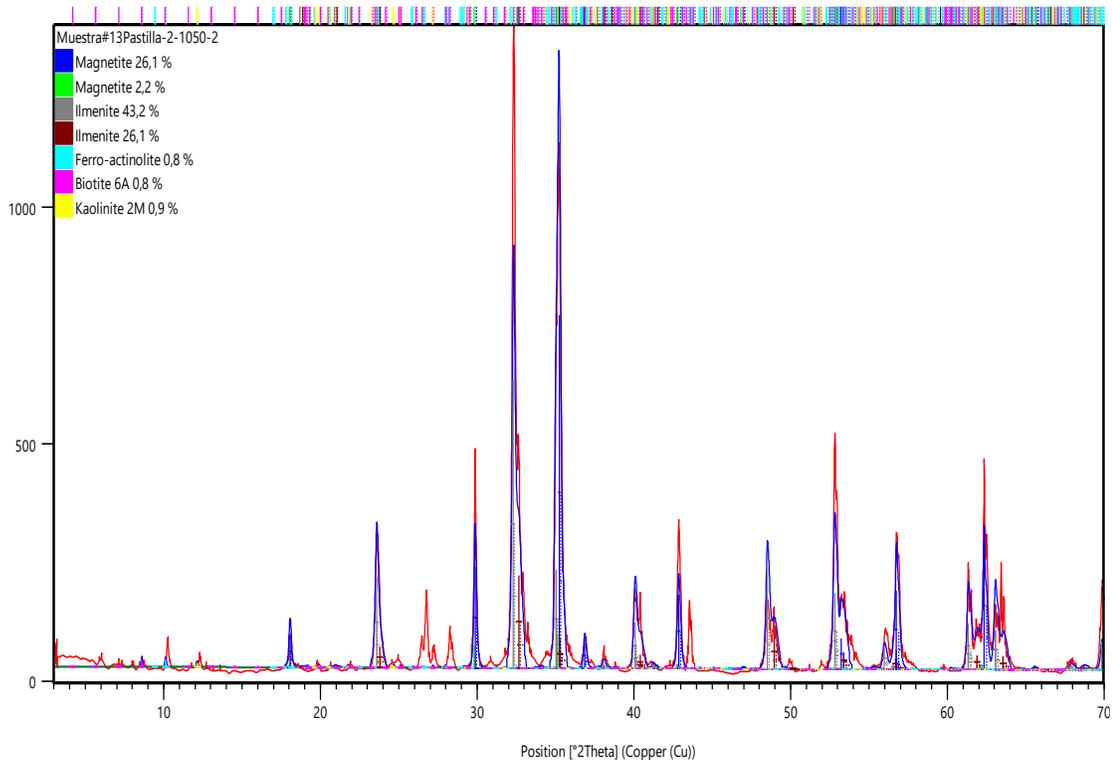
muestra, que a su vez equivale al 0,5% del total de la corriente evaluada en este proyecto de investigación. Este resultado evidencia la potencialidad de esta corriente como una posible fuente de circón en la fracción no magnética de este rango de tamaños. Se reportan como minerales acompañantes la actinolita, caolinita y epidota en esta fracción de mineral. Como se observa en la **Tabla 3-11**, se siguen presentando los mismos silicatos y aluminosilicatos de todas las muestras presentadas hasta el momento, en este caso puntual, el cuarzo, biotita y almandino como componentes mineralógicos menores.

A continuación, en **Tabla 3-12** y **Figura 3-18**, se presentan los resultados de los análisis de DRX en el caso de minerales magnéticos en la fracción más fina -70 mallas, menores a 212 μm . Las principales especies minerales corresponden, como era de esperarse, a magnetita e ilmenita.

Según los resultados de la separación magnética, el porcentaje de minerales magnéticos y paramagnéticos en esta muestra (magnéticos en la fracción fina -70 mallas) equivale al 97,6%, lo cual es coherente con la composición mineralógica reportada en este análisis. Los demás minerales no magnéticos presentes en esta fracción alcanzan el 2,4% y corresponden a ferroactinolita, la biotita y la caolinita. Comparando este resultado con el análisis de las fracciones gruesas se puede concluir la hipótesis de posible arrastre de partículas no magnéticas por efecto de las fuerzas gravitacionales en el separador.

Tabla 3-12: Estructuras identificadas en DRX para los magnéticos -70 mallas.

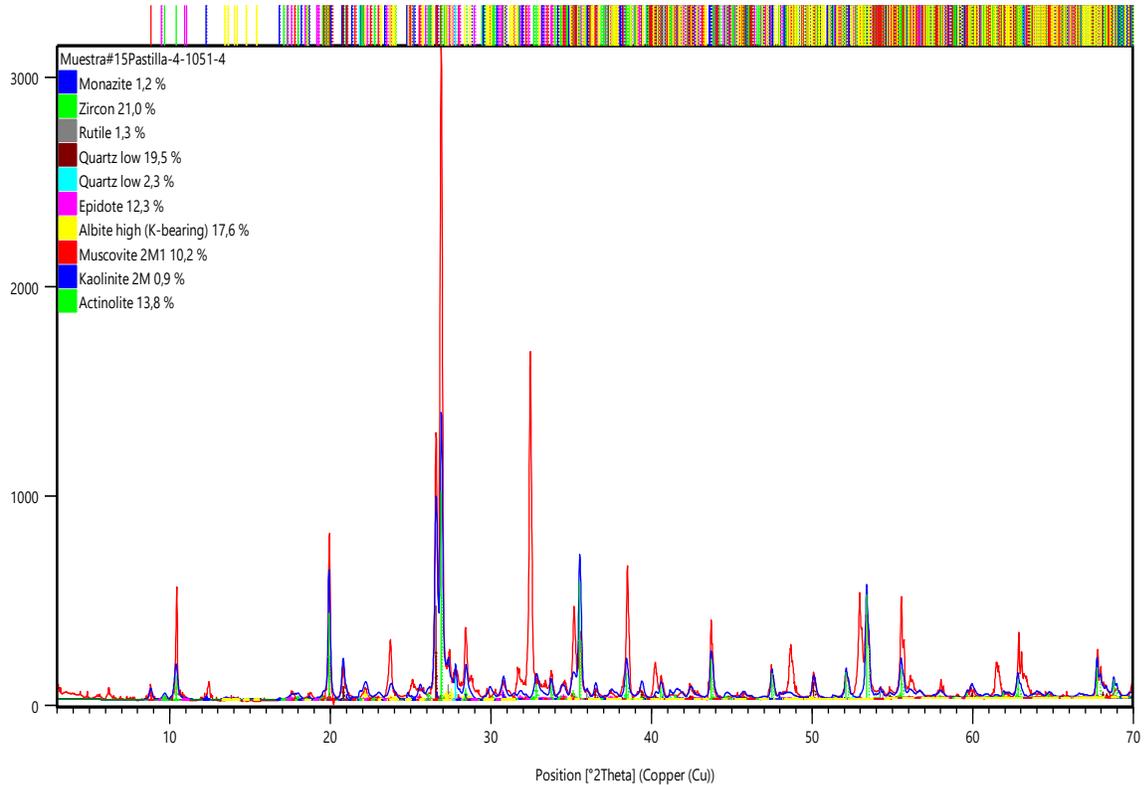
Mineral	Fórmula Química	M.M (g/mol)	Densidad (g/cm ³)	% Rietveld
Magnetita	$\text{O}_{32,00}\text{Fe}_{23,54}$	1826,4	5,1	26,1%
Magnetita	$\text{O}_{32,00}\text{Fe}_{24,00}$	1852,31	5,2	2,2%
Ilmenita	$\text{O}_{18,00}\text{Ti}_{6,00}\text{Fe}_{6,00}$	910,47	4,7	43,2%
Ilmenita	$\text{O}_{18,00}\text{Ti}_{6,00}\text{Fe}_{6,00}$	910,47	4,9	26,1%
Ferroactinolita	$\text{Si}_{15,95}\text{Mn}_{0,39}\text{Mg}_{1,69}\text{Fe}_{7,96}\text{Ti}_{0,00}\text{Na}_{0,03}\text{H}_{3,76}\text{Al}_{0,04}\text{O}_{48,00}\text{K}_{0,04}\text{Ca}_{3,94}$	1888,45	3,4	0,8%
Biotita	$\text{Si}_{18,00}\text{O}_{66,00}\text{Al}_{6,00}\text{K}_{6,00}\text{Mg}_{18,00}\text{F}_{6,00}$	2509,36	2,9	0,8%
Caolinita	$\text{O}_{36,00}\text{Si}_{8,00}\text{Al}_{8,00}$	1016,51	2,6	0,8%
Total			4,8	100%

Figura 3-18: Análisis de DRX para la fracción magnética de mineral -70 mallas.

Los resultados del análisis DRX y los porcentajes de las especies obtenidas mediante cuantificación Ritveld del último producto de la separación magnética, correspondiente a minerales no magnéticos de la fracción fina, menores a 212 μm , se presentan a continuación en la **Figura 3-19** y la **Tabla 3-13**.

Los resultados reflejan la presencia de monacita, aunque en muy bajas proporciones, en esta fracción fina. El principal mineral pesado en esta corriente corresponde a circón (21%), seguido del rutilo que comparte una concentración muy similar a la de la monacita.

De esta manera se concluye la evidente potencialidad de esta fracción como posible fuente de subproductos minerales importantes del proceso de beneficio aluvial. El resto de los minerales en esta muestra tipo aluminosilicatos y silicatos, a su vez hacen presencia en la mayoría de las fracciones y en todos los productos del esquema de separación ensayado para esta corriente del proceso aluvial.

Figura 3-19: Análisis de DRX para la fracción no magnética de mineral -70 mallas.**Tabla 3-13:** Estructuras identificadas en DRX para los no magnéticos -70 mallas.

Mineral	Fórmula Química	M.M (g/mol)	Densidad (g/cm ³)	% Rietveld
Monacita,	$O_{16,00}P_{4,00}La_{4,00}$	935,51	5,1	1,2%
Circón	$O_{16,00}Si_{4,00}Zr_{4,00}$	733,21	4,7	21%
Rutilo	$O_{4,00}Ti_{2,00}$	159,80	4,2	1,3%
Cuarzo	$O_{6,00}Si_{3,00}$	180,25	2,7	19,5%
Cuarzo	$O_{6,00}Si_{3,00}$	180,25	3,0	2,3%
Epidota	$O_{26,00}Al_{4,00}Fe_{2,00}Ca_{4,00}Si_{6,00}$	964,44	3,5	12,3%
Albita	$O_{16,00}Si_{6,00}Al_{2,00}Na_{2,00}$	524,45	2,6	17,6%
Moscovita	$O_{46,98}F_{1,02}K_{3,44}Al_{11,62}Si_{11,58}$	1544,30	2,7	10,2%
Actinolita	$Al_{2,00}Na_{1,56}Si_{6,00}K_{0,44}O_{16,00}$	531,53	2,6	0,9%
Caolinita	$O_{36,00}Si_{8,00}Al_{8,00}$	1016,51	2,6	13,7%
Total			3,2	100%

La **Tabla 3-14**, resume los resultados de un ejercicio de reconstrucción del mineral de cabeza, es decir la composición de la corriente residual o colas de la espiral del proceso de beneficio de oro de la empresa Mineros Aluvial SAS BIC. Esta reconstrucción composicional permite en cierta forma verificar la naturaleza mineralógica de la corriente del proceso evaluada en este proyecto, y es fundamental para el modelamiento posterior mediante el software de simulación del proceso de beneficio, tal como se explica en el siguiente capítulo de la tesis.

Tabla 3-14: Composición en cabeza reconstruida con información de los DRX.

Corriente		Cabeza Reconstruida						
Fracción	% Retenido	Magnetita	Ilmenita	Rutilo	Circón	Monacita	Ganga	Total
+20	7%	0,29%	0,11%	1,45%	0,00%	1,40%	96,76%	100%
-20+40	27%	0,16%	0,80%	0,56%	0,38%	0,85%	97,26%	100%
+40	34%	0,17%	0,65%	0,74%	0,30%	0,94%	97,20%	100%
-40+70	39%	1,72%	9,51%	1,22%	7,86%	0,00%	79,69%	100%
-70	27%	13,98%	59,49%	0,75%	4,41%	0,24%	21,14%	100%
-40	66%	5,85%	24,78%	0,93%	7,88%	0,26%	60,30%	100%
Total	100%	4,51%	19,99%	0,93%	4,36%	0,39%	69,82%	100%

Como un ejercicio adicional partiendo de las densidades ponderadas realizadas a cada producto analizado por medio del DRX, se comparan estas densidades con las que se obtuvieron por medio de picnometría, existiendo una muy buena aproximación a la composición real de las muestras, como se presenta en la **Tabla 3-15**.

Los resultados mostrados en la **Tabla 3-16** corresponden a los porcentajes de minerales obtenidos por medio de DRX para las colas de la mesa Wilfley y los productos de la separación magnética de alta intensidad, como productos claves para determinar los hallazgos más significativos respecto a la ruta de beneficio propuesta en este trabajo de investigación.

Los difractogramas de las muestras producto de la separación magnética final (separación magnética de alta intensidad), magnéticos y no magnéticos se presentan a continuación

en la **Figura 3-20** y **Figura 3-21** respectivamente. Como principal especie mineral de tierras raras se identifica la monacita, con una mayor concentración con respecto a la muestra de cabeza inicial, pasando de un 0,39% en la cabeza a 6,1% en el concentrado final. En la misma tabla se observa el efecto de recuperación de ilmenita, rutilo y circón, en concentraciones que pueden ser atractivas para un potencial proceso de beneficio.

Tabla 3-15: Comparativo densidades ponderadas del Ritveld y de picnometría

Muestra	Densidad Ritveld (g/cm ³)	Densidad picnometría (g/cm ³)
+20M Magnéticos	3.3	3.0
+ 20M No Magnéticos	3.1	2.9
-20+40M Magnéticos	3.0	3.0
-20+40M No Magnéticos	2.8	2.9
-40+70M Magnéticos	3.9	4.2
-40+70M Medios	4.1	4.2
-40+70M No Magnéticos	3.2	3.2
-70M Magnéticos	4.8	4.8
-70M Medios	4.5	4.5
-70M No Magnéticos	3.2	3.9

Tabla 3-16: Resultados DRX para las algunas corrientes de interés.

Corriente	Monacita	Magnetita	Ilmenita	Rutilo	Circón	Ganga
Colas Mesa Wilfley - 40M	0%	0%	0%	1.9%	0%	98.1%
Magnéticos SM AI - 40M	6.1%	0%	50.6%	10.1%	0%	33.2%
No Magnéticos SM AI - 40M	0%	0%	0%	2.0%	64.9%	33.1%

Figura 3-20: Análisis de DRX para la fracción magnética de la SM Al fracción -40 mallas.

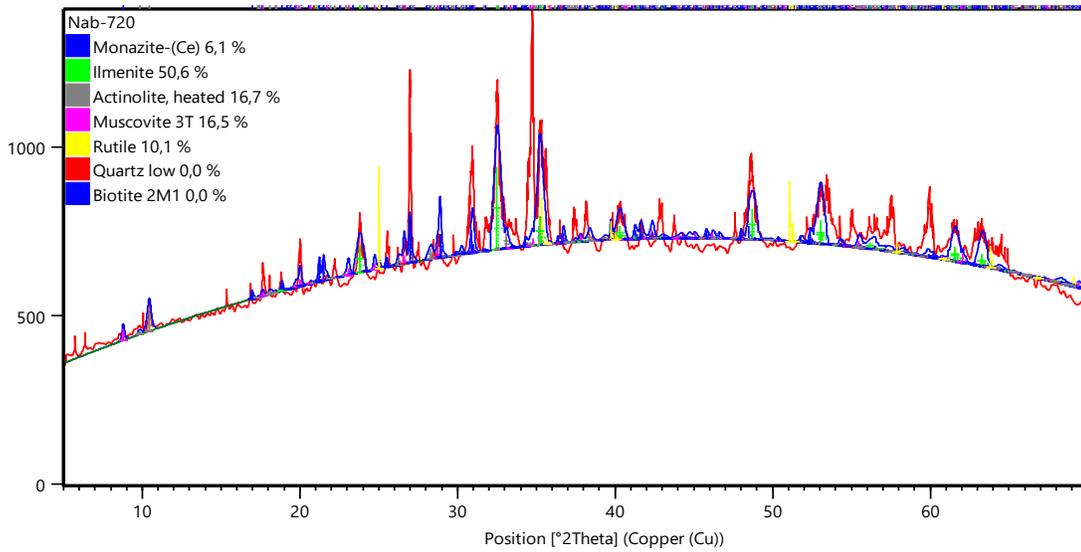
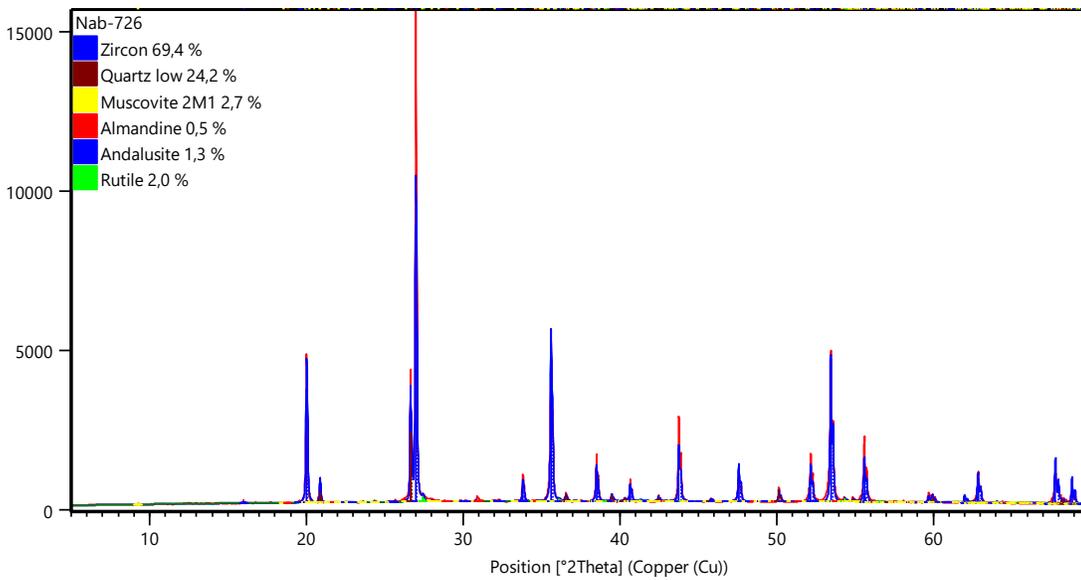


Figura 3-21: Análisis de DRX para la fracción no magnética SM Al fracción -40 mallas.



4. Posible ruta de beneficio

Una contribución importante de este trabajo de investigación lo constituye la propuesta de una posible ruta de beneficio de los minerales de interés detectados en la corriente del proceso de beneficio sometida a estudio. El modelamiento de la ruta de beneficio se realizó con base en los resultados de los ensayos de separación magnética, electrostática y gravimétrica presentados en los capítulos anteriores, y mediante la utilización de un software especializado de modelamiento de operaciones de beneficio de minerales.

A continuación (ver **Figura 4-1**), se presenta el flujograma del proceso realizado por medio del software LIMN®. El modelo desarrollado para realizar el balance es la *Wizard size by species (2D)*, en el cual las especies declaradas son monacita, magnetita, ilmenita, rutilo, circón y la ganga (**Tabla 4-2**). Las fracciones de tamaño declaradas en el modelo corresponden a +20, -20+40, -40+70, y -70 mallas en correspondencia con la experimentación preliminar de laboratorio llevada a cabo (**Tabla 4-1**). Las operaciones unitarias contempladas en este balance son clasificación, separación magnética de baja intensidad (SM BI), concentración en mesa Wilfley, separación electrostática y finalmente la separación magnética de alta intensidad (SM AI).

En la **Figura 4-1** se presenta el flujograma del proceso de beneficio resultante del modelamiento de los datos de separación en el software LIMN®. Como se puede observar, el modelo corresponde a las operaciones unitarias de beneficio definidas, cada una con sus correspondientes parámetros operativos y que corresponden a las condiciones operativas de la operación de minería aluvial, como se explica a continuación. Con el fin de dar mayor claridad, se explican por separado cada una de las operaciones unitarias que componen la ruta de beneficio propuesta.

Figura 4-1: Flujograma del proceso de beneficio de minerales de tierras raras modelado por medio del software LIMN®.

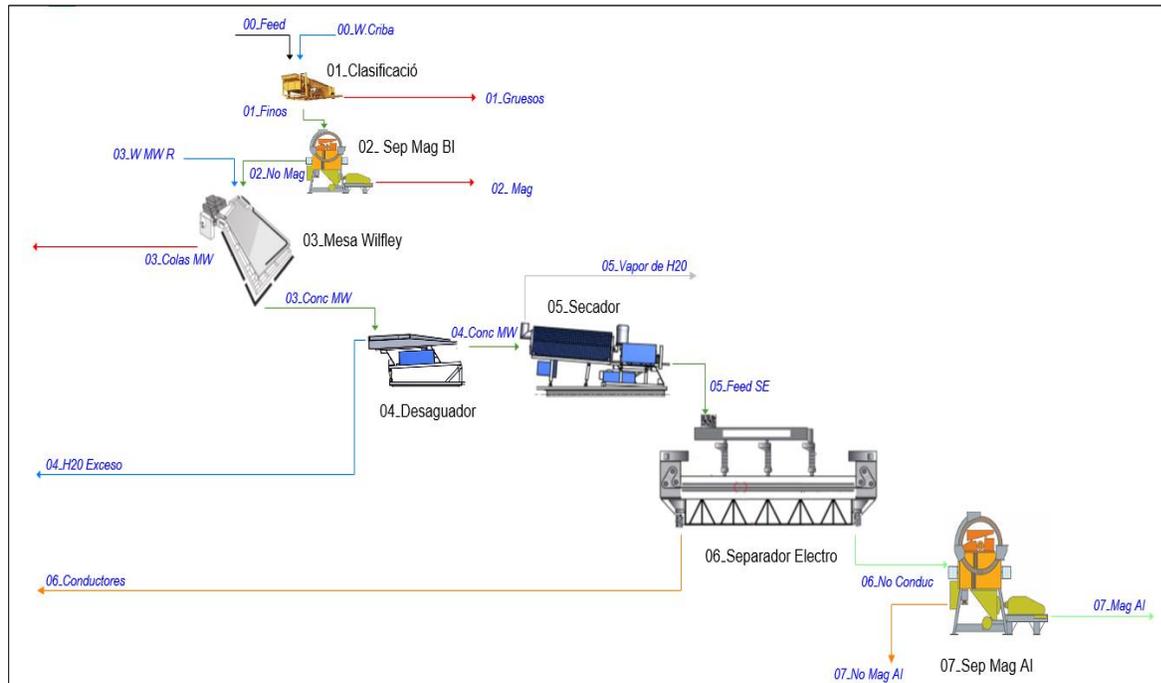


Tabla 4-1: Rangos de tamaño definidos en entorno de LIMN®.

Property 1 Definition			
		Name :	Size (mm)
Size (mm) Ranges			
Lower	Upper	Mean	Text
0,850	3,000	1,597	+0,85
0,425	0,850	0,601	+0,425
0,212	0,425	0,300	+0,212
0,010	0,212	0,046	-0,212

Para determinar los parámetros de modelo de cada unidad se aplican los resultados de las separaciones magnéticas de baja y alta intensidad, gravimétricas y electrostáticas sumado a los resultados de los análisis de DRX con el método de cuantificación Ritveld reportados en el capítulo anterior (ver capítulo 3.6), los cuales se aplican en la definición de las concentraciones de las especies en la alimentación (**Tabla 4-3**) y en la separación magnética de baja intensidad. Los porcentajes o distribución por tamaños corresponden a los mismos valores de la caracterización y separación con LST (ver **Tabla 2-5**).

Tabla 4-2: Especies definidas en el entorno de LIMN®.

Property 2 Definition							
Name :		Species					
Species Specific Data							
SG			Text	Flow Units	Flow Scale (1=tonnes)	Assay Units	Assay Scale (100=%)
Lower	Upper	Mean					
5,00	5,30	5,15	Monacita	(tph)	1,00	(%)	100
5,10	5,50	5,30	Magnetita	(tph)	1,00	(%)	100
4,20	4,70	4,45	Ilmenita	(tph)	1,00	(%)	100
4,10	4,20	4,15	Rutilo	(tph)	1,00	(%)	100
4,50	4,60	4,55	Circón	(tph)	1,00	(%)	100
2,67	3,50	3,085	Ganga	(tph)	1,00	(%)	100

Tabla 4-3: Concentraciones para las especies en la alimentación (balance LIMN®)

00_Feed		Species	Monacita	Magnetita	Ilmenita	Rutilo	Circón	Ganga	Size (mm) Distribution
Solids t/h	10,00	SG	5,15	5,30	4,45	4,15	4,55	3,085	
Water t/h	183,8	Total Flow	(tph)	(tph)	(tph)	(tph)	(tph)	(tph)	
% Solids	5,16		0,039	0,451	1,999	0,093	0,436	6,982	
Pulp SG	1,0	Mean Assay	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	
Volume m3/h	186,7		0,39	4,505	19,992	0,933	4,36	69,821	
		Size (mm)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	
		+0,85	1,60	1,396	0,287	0,105	1,448	0,00	96,76
		+0,425	0,60	0,845	0,158	0,80	0,564	0,376	97,26
		+0,212	0,30	0,00	1,716	9,505	1,221	7,862	79,69
		-0,212	0,05	0,236	13,976	59,487	0,751	4,414	21,14
									27,00
									39,00
									27,00

A continuación, se especifica por cada operación unitaria, por separado, los parámetros de separación que se definieron. Se toma como flujo másico en la alimentación, la sumatoria de los aportes de esta corriente en las 5 unidades de producción que posee la empresa Mineros Aluvial SAS BIC (10t/h).

4.1 Etapa de clasificación por tamaños

En la modelación del proceso de clasificación (**Figura 4-2**), con corte a malla 40, 425 μm , se asigna un grado de separación alfa (α) alto, así como una baja recuperación de agua al oversize (R_f) para garantizar un proceso de separación eficiente. Adicionalmente a cada especie debe de asignársele un d_{50} SG, para la separación de cada especie en cada tamaño. Bajo estas condiciones el modelamiento arroja una eficiencia de finos del 99,7% y una eficiencia de gruesos del 99,8%, eficiencias que resultan de un proceso muy ideal.

A modo de resumen en este proceso se obtiene de un total de 10 t/h en el alimento, 6,6t/h de finos, que equivalen al 66% del alimento y 3,4 t/h de gruesos, 34% de material

Tabla 4-5: Productos de la etapa de clasificación (modelación en LIMN®).

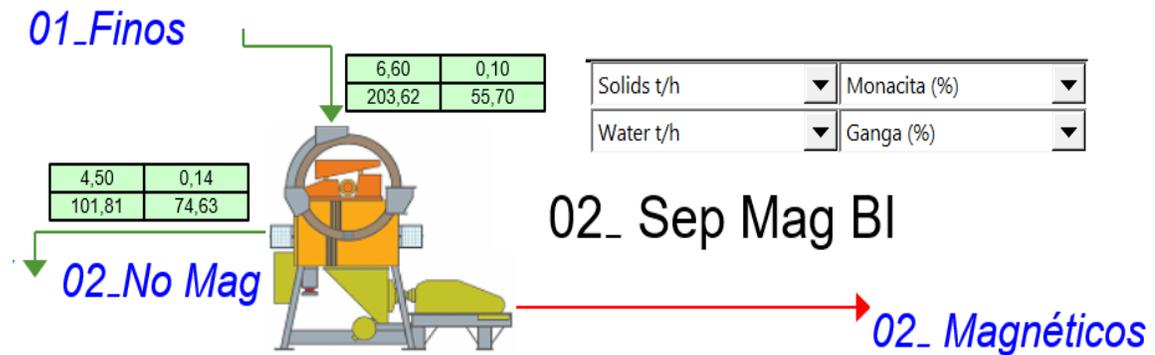
01_Finos		Species	Monacita	Magnetita	Ilmenita	Rutilo	Circón	Ganga	
Solids t/h	6,597	Total Flow	(tph)	(tph)	(tph)	(tph)	(tph)	(tph)	
Water t/h	203,615	Mean Assay	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	
% Solids	3,138		0,097	6,754	29,947	1,043	6,459	55,70	
Pulp SG	1,023	Size (mm)	(tph)	(tph)	(tph)	(tph)	(tph)	(tph)	Water t/h
Volume m3/h	205,446	+0,85	1,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	203,615
		+0,425	0,60	0,00	0,002	0,001	0,001	0,001	0,003
		+0,212	0,30	0,00	0,067	0,37	0,048	0,306	3,101
		-0,212	0,05	0,006	0,377	1,605	0,02	0,119	0,57

01_Gruesos		Species	Monacita	Magnetita	Ilmenita	Rutilo	Circón	Ganga	
Solids t/h	3,403	Total Flow	(tph)	(tph)	(tph)	(tph)	(tph)	(tph)	
Water t/h	0,183	Mean Assay	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	
% Solids	94,885		0,958	0,145	0,691	0,718	0,29	97,197	
Pulp SG	2,81	Size (mm)	(tph)	(tph)	(tph)	(tph)	(tph)	(tph)	Water t/h
Volume m3/h	1,276	+0,85	1,60	0,01	0,002	0,001	0,01	0,00	0,677
		+0,425	0,60	0,023	0,003	0,021	0,014	0,009	2,623
		+0,212	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,007
		-0,212	0,05	0,00	0,00	0,001	0,00	0,00	0,001

4.2 Separación magnética de baja intensidad

A continuación, se presenta el flujograma de la etapa de separación magnética de BI por medio de la **Figura 4-3**, que junto con la **Tabla 4-6**, permite visualizar los flujos máscicos y porcentajes de los productos de esta separación magnética.

Figura 4-3: Flujograma para la separación magnética de baja intensidad



A fin de determinar los factores de partición de esta etapa de separación, se combinan los resultados de la separación magnética por fracciones junto con los porcentajes de

cuantificación Ritveld del análisis DRX. De esta etapa se tienen 6,6 t/h de finos, menores a 425 μm , alimentados a la separación magnética, un 32% de magnéticos (2,1 t/h) y un 68% de no magnéticos (4,5 t/h). Toda la monacita alimentada pasa a la corriente de no magnéticos, que ahora más concentrada, corresponde a un 0,14% de los no magnéticos.

Tabla 4-6: Productos de separación magnética a baja intensidad (en LIMN®).

02_Mag		Species	Monacita	Magnetita	Ilmenita	Rutilo	Circón	Ganga	
Solids t/h	2,098	Total Flow	(tph)	(tph)	(tph)	(tph)	(tph)	(tph)	
Water t/h	101,808		0,00	0,444	1,337	0,00	0,00	0,317	
% Solids	2,019	Mean Assay	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	
Pulp SG	1,016		0,00	21,156	63,746	0,00	0,00	15,098	
Volume m ³ /h	102,294	Size (mm)	(tph)	(tph)	(tph)	(tph)	(tph)	(tph)	Water t/h
		+0,85	1,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	101,808
		+0,425	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,001
		+0,212	0,30	0,00	0,067	0,149	0,00	0,00	0,31
		-0,212	0,05	0,00	0,377	1,189	0,00	0,00	0,006
02_No Mag		Species	Monacita	Magnetita	Ilmenita	Rutilo	Circón	Ganga	
Solids t/h	4,499	Total Flow	(tph)	(tph)	(tph)	(tph)	(tph)	(tph)	
Water t/h	101,808		0,006	0,002	0,638	0,069	0,426	3,358	
% Solids	4,232	Mean Assay	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	
Pulp SG	1,031		0,142	0,038	14,186	1,53	9,47	74,634	
Volume m ³ /h	103,151	Size (mm)	(tph)	(tph)	(tph)	(tph)	(tph)	(tph)	Water t/h
		+0,85	1,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	101,808
		+0,425	0,60	0,00	0,002	0,001	0,001	0,002	0,002
		+0,212	0,30	0,00	0,00	0,222	0,048	0,306	2,791
		-0,212	0,05	0,006	0,00	0,416	0,02	0,119	0,564

4.3 Concentración gravimétrica (mesa Wilfley)

Esta etapa de separación se representa en la **Figura 4-4**, mientras que en la **Tabla 4-7** es posible visualizar los flujos y concentraciones de las diferentes especies en los rangos de tamaño definidos para el desarrollo de este modelo.

En el modelamiento de este balance se ajustan los parámetros de separación de la unidad de concentración gravimétrica en mesa Wilfley para que las concentraciones en los productos coincidan con los resultados de la caracterización, en este caso, con los datos reportados en la **Tabla 3-16**, donde se especifica que en las colas de la mesa el único mineral pesado presente es el rutilo, también se reporta magnetita en las colas de la mesa, dado la presencia de una fracción que no se separó en la modelación de la etapa anterior (concentración magnética de baja intensidad). De un total de 4,5 t/h alimentadas a la concentración en la mesa Wilfley, un 66% es reportado en las colas (2,97 t/h) en el cual no

aparece monacita, y un 34% del flujo másico alimentado al concentrado (1,53 t/h) con un porcentaje de monacita del 0,42% y un 25,51% de ganga (ver **Figura 4-4**)

Figura 4-4: Flujograma separación en mesa Wilfley.

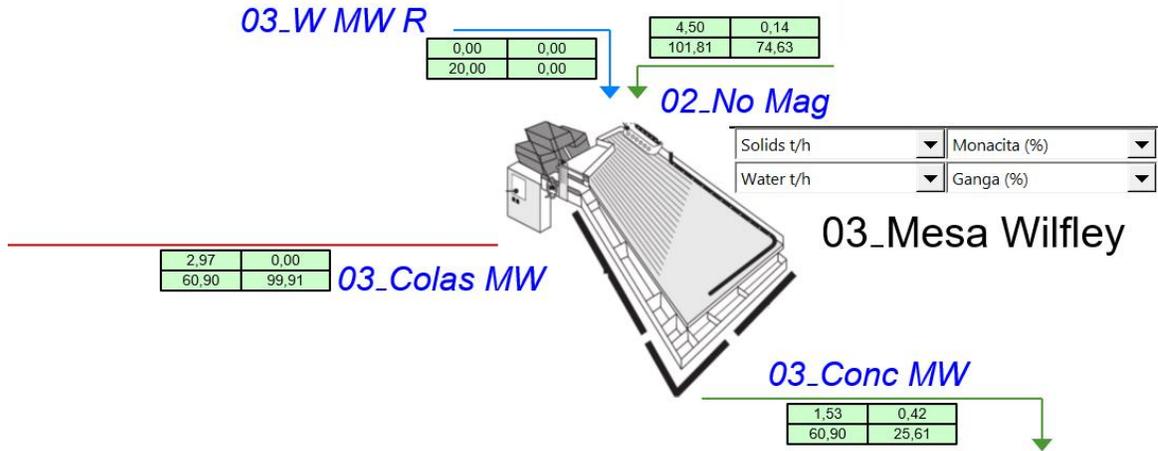


Tabla 4-7: Productos de separación gravimétrica en mesa Wilfley (LIMN ®).

Unit: '03_Mesa Wilfley' - Product Stream 1 (Connected to Stream: '03_Conc MW')								
Concentrado		Species						Water t/h
Size (mm)		Monacita	Magnetita	Ilmenita	Rutilo	Circón	Ganga	
+0,85	1,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	60,904
+0,425	0,60	0,00	0,00	0,001	0,00	0,001	0,00	
+0,212	0,30	0,00	0,00	0,222	0,048	0,306	0,112	
-0,212	0,05	0,006	0,00	0,416	0,02	0,119	0,001	
Sólidos (t/h)		0,006	0,00	0,638	0,068	0,426	0,112	1,251
		0,51%	0,00%	51,03%	5,42%	34,06%	8,97%	

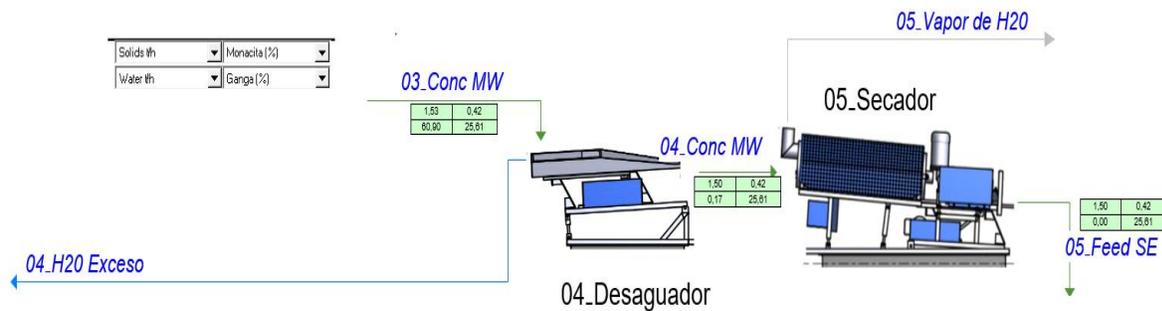
Unit: '03_Mesa Wilfley' - Product Stream 2 (Connected to Stream: '03_Colas MW')								
Colas		Species						Water t/h
Size (mm)		Monacita	Magnetita	Ilmenita	Rutilo	Circón	Ganga	
+0,85	1,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	60,904
+0,425	0,60	0,00	0,002	0,00	0,001	0,00	0,002	
+0,212	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,88	
-0,212	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,564	
Sólidos (t/h)		0,00	0,002	0,00	0,001	0,00	3,246	3,248
		0,00%	0,05%	0,00%	0,03%	0,00%	99,91%	

4.4 Desaguado y secado

Previo a la separación electrostática, a la cual debe de garantizársele un alimento libre de humedad, se modelan las operaciones de desaguado y secado tal y como se presentan a

continuación (ver **Figura 4-6**). En este par de operaciones unitarias se retiran casi 70 t/h de agua, en el proceso de desaguado se presenta una leve pérdida de masa 0,03 t/h asociada a la ganga en la corriente (finos y livianos).

Figura 4-5: Flujograma etapas de desaguado y secado.



4.5 Separación electrostática

A continuación, se describe el flujograma correspondiente a la separación electrostática (**Figura 4-6**), y junto con la **Tabla 4-8**, se presentan los flujos máxicos y concentraciones para los tamaños y especies declarados en esta modelación metalúrgica.

En esta separación, se toman los minerales conductores y medios de los ensayos de separación del capítulo 3.3 como únicamente conductores. En esta etapa de concentración toda la monacita queda reportada hacia los no conductores, considerando, como en las etapas anteriores de concentración procesos muy ideales, propios de las etapas de diseño de procesos.

Los minerales conductores (1,07 t/h), corriente donde se reporta la mayor parte de la ilmenita y todo rutilo alimentado, representa el 65% del total de material alimentado a esta etapa. En los no conductores (0,43 t/h) el mineral en mayor proporción es el circón, con un 87%, seguido de la ganga con un 11,4% y finalmente la monacita que queda concentrada en un 1,44%.

Figura 4-6: Flujograma separación electrostática

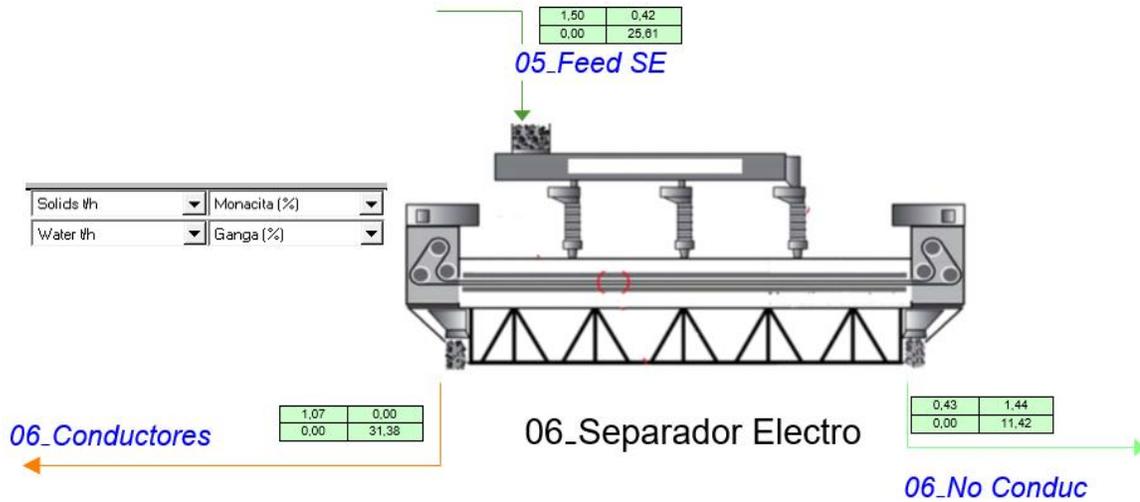


Tabla 4-8: Productos de la separación electrostática (modelación en LIMN ®).

06_Conductores		Species	Monacita	Magnetita	Ilmenita	Rutilo	Circón	Ganga	
Solids t/h	1,066	Total Flow	(tph)	(tph)	(tph)	(tph)	(tph)	(tph)	
Water t/h	0,00		0,00	0,00	0,624	0,066	0,042	0,335	
% Solids	100,00	Mean Assay	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	
Pulp SG	3,895		0,00	0,00	58,476	6,233	3,909	31,382	
Volume m3/h	0,274	Size (mm)	(tph)	(tph)	(tph)	(tph)	(tph)	(tph)	Water t/h
		+0,85	1,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		+0,425	0,60	0,00	0,00	0,001	0,00	0,00	0,00
		+0,212	0,30	0,00	0,00	0,217	0,047	0,03	0,246
		-0,212	0,05	0,00	0,00	0,406	0,02	0,012	0,089

06_No Conduc		Species	Monacita	Magnetita	Ilmenita	Rutilo	Circón	Ganga	
Solids t/h	0,433	Total Flow	(tph)	(tph)	(tph)	(tph)	(tph)	(tph)	
Water t/h	0,00		0,006	0,00	0,002	0,00	0,376	0,049	
% Solids	100,00	Mean Assay	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	
Pulp SG	4,322		1,441	0,00	0,433	0,00	86,709	11,417	
Volume m3/h	0,10	Size (mm)	(tph)	(tph)	(tph)	(tph)	(tph)	(tph)	Water t/h
		+0,85	1,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		+0,425	0,60	0,00	0,00	0,00	0,001	0,00	0,00
		+0,212	0,30	0,00	0,001	0,00	0,27	0,027	0,027
		-0,212	0,05	0,006	0,00	0,001	0,00	0,105	0,022

4.6 Separación magnética de alta intensidad

Finalmente, se presenta la separación magnética de alta intensidad, representada en la Figura 4-7 junto con los flujos máxicos y concentraciones por especies y tamaño de partícula Tabla 4-9.

Figura 4-7: Flujograma separación magnética de alta intensidad.

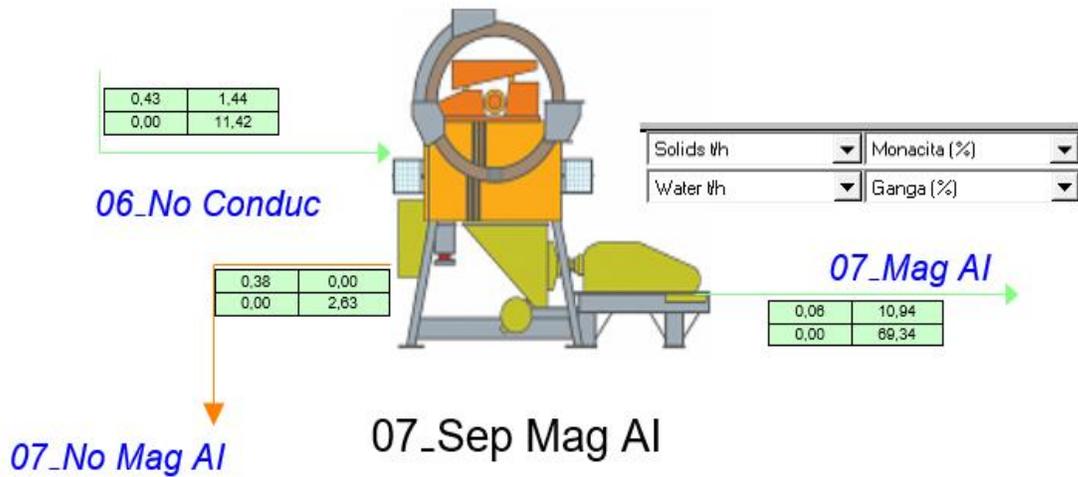


Tabla 4-9: Productos de la separación magnética de alta intensidad (LIMN ®)

07_Mag AI		Species	Monacita	Magnetita	Ilmenita	Rutilo	Circón	Ganga	
Solids t/h	0,057	Total Flow	(tph)	(tph)	(tph)	(tph)	(tph)	(tph)	
Water t/h	0,00		0,006	0,00	0,00	0,00	0,011	0,04	
% Solids	100,00	Mean Assay	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	
Pulp SG	3,456		10,943	0,00	0,00	0,00	19,716	69,34	
Volume m3/h	0,017	Size (mm)	(tph)	(tph)	(tph)	(tph)	(tph)	(tph)	Water t/h
		+0,85	1,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		+0,425	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		+0,212	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,008	0,022
		-0,212	0,05	0,006	0,00	0,00	0,00	0,003	0,018

07_No Mag AI		Species	Monacita	Magnetita	Ilmenita	Rutilo	Circón	Ganga	
Solids t/h	0,376	Total Flow	(tph)	(tph)	(tph)	(tph)	(tph)	(tph)	
Water t/h	0,00		0,00	0,00	0,002	0,00	0,365	0,01	
% Solids	100,00	Mean Assay	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	
Pulp SG	4,493		0,00	0,00	0,498	0,00	96,872	2,63	
Volume m3/h	0,084	Size (mm)	(tph)	(tph)	(tph)	(tph)	(tph)	(tph)	Water t/h
		+0,85	1,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		+0,425	0,60	0,00	0,00	0,00	0,001	0,00	0,00
		+0,212	0,30	0,00	0,00	0,001	0,00	0,262	0,005
		-0,212	0,05	0,00	0,00	0,001	0,00	0,102	0,004

Se presentan a continuación, en la **Tabla 4-10**, el resumen de las corrientes del balance seguido de los tenores e índices metalúrgicos relevantes para análisis en este trabajo tenores (**Tabla 4-11** y **Tabla 4-12**). En la **Tabla 4-11**, RC hace referencia a la razón de concentración, mientras que en la **Tabla 4-12**, % R Global se refiere al porcentaje de

recuperación global y %R a el porcentaje de recuperación para la etapa y mineral en cuestión.

Tabla 4-10: Resumen de corrientes del balance por minerales especies (LIMN ®)

Stream	Solids t/h	Water t/h	% Solids	Pulp SG	Volume m3/h	Monacita (%)	Magnetita (%)	Ilmenita (%)	Rutilo (%)	Circón (%)	Ganga (%)
00_Feed	10,00	183,798	5,16	1,038	186,722	0,39	4,505	19,992	0,933	4,36	69,821
00_W.Criba	0,00	20,00	0,00	1,00	20,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
01_Finos	6,597	203,615	3,138	1,023	205,446	0,097	6,754	29,947	1,043	6,459	55,70
01_Gruesos	3,403	0,183	94,885	2,81	1,276	0,958	0,145	0,691	0,718	0,29	97,197
02_Mag	2,098	101,808	2,019	1,016	102,294	0,00	21,156	63,746	0,00	0,00	15,098
02_No Mag	4,499	101,808	4,232	1,031	103,151	0,142	0,038	14,186	1,53	9,47	74,634
03_Colas MW	2,969	60,904	4,648	1,032	61,866	0,00	0,058	0,00	0,033	0,002	99,906
03_Conc MW	1,531	60,904	2,451	1,019	61,285	0,417	0,00	41,704	4,432	27,835	25,613
03_W MW R	0,00	20,00	0,00	1,00	20,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
04_Conc MW	1,50	0,167	90,00	3,082	0,541	0,417	0,00	41,704	4,432	27,835	25,613
04_H2O Exceso	0,031	60,737	0,05	1,00	60,745	0,417	0,00	41,704	4,432	27,835	25,613
05_Feed SE	1,50	0,00	100,00	4,01	0,374	0,417	0,00	41,704	4,432	27,835	25,613
05_Vapor de H2O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
06_Conductores	1,066	0,00	100,00	3,895	0,274	0,00	0,00	58,476	6,233	3,909	31,382
06_No Conduc	0,433	0,00	100,00	4,322	0,10	1,441	0,00	0,433	0,00	86,709	11,417
07_Mag AI	0,057	0,00	100,00	3,456	0,017	10,943	0,00	0,00	0,00	19,716	69,34
07_No Mag AI	0,376	0,00	100,00	4,493	0,084	0,00	0,00	0,498	0,00	96,872	2,63

Tabla 4-11: Razones de concentraciones por etapas en el balance (LIMN ®)

Etapa	RC
Clasificación	2
SM BI	3
Mesa Wilfley	1
Sep Electrostática	3
SM AI	8

Al correr el balance se obtiene que, la mayor concentración de minerales de tierras raras está asociada a la corriente de gruesos, con una participación del 84% del total del mineral en la cabeza, pero con una pureza del 1%, es decir, en la corriente de gruesos del proceso de clasificación con corte a 0.425mm, el 1% del total equivale a minerales asociados a tierras raras. Respecto al producto de finos de la clasificación, la participación de minerales de tierras raras (monacita), equivale al 16% del total alimentado a este proceso de separación, este mineral queda concentrado en la corriente de magnéticos de la separación magnética de alta intensidad.

La recuperación global de monacita en los magnéticos de la separación magnética de alta intensidad, según el balance es del 16%, a partir de una alimentación de 10t/h en la cabeza que equivale a de 0.006 t/h, que corresponde al 10,9% del total de los magnéticos de la SM AI (separación magnética de alta intensidad), comparado con los resultados del análisis DRX en esta corriente de la **Tabla 3-16**, es mayor en casi al doble. Esta diferencia puede estar asociada a varios fenómenos como lo son las asociaciones mineralógicas reportadas en los resultados del análisis SEM, errores en la modelación en LIMN®, imprecisión de las concentraciones en el alimento, o simplemente con errores de muestreo (representatividad de las muestras).

Tabla 4-12: Índices metalúrgicos calculados a partir del balance de minerales (LIMN®).

Mineral	Corriente	Tenor (g/t)	% R Global	% R
Monacita	Gruesos	9581	84%	83,64%
Monacita	Magnéticos SM AI	109435	16%	100,00%
Magnetita	Magnéticos SM BI	211564	99%	99,61%
Ilmenita	Magnéticos SM BI	637457	67%	67,69%
Ilmenita	Conductores	584755	31%	99,70%
Rutilo	Conductore	62333	71%	100,00%
Circón	No Magnéticos SM AI	968722	84%	97,00%
Ganga	Colas mesa Wilfley	999062	42%	89,67%
Ganga	Gruesos	1028836	47%	52,63%
Ganga	Magnéticos SM AI	693404	0,6%	80,00%

Respecto al circón, que termina siendo el producto más concentrado en los minerales no magnéticos de la separación magnética de alta intensidad, según el balance de LIMN® y los resultados de la caracterización con DRX, alcanza una recuperación global del 84%, con una concentración del 97% en el producto final de no magnéticos SM AI.

Según lo anterior, la combinación de los procesos implementados resulta ser apropiada para la separación de los minerales de tierras raras, e incluso para la concentración de circones, ya que es claro como en los productos finales de la separación magnética de alta intensidad, los circones son separados de los minerales paramagnéticos y de tierras raras. Para integrar esta ruta de beneficio de minerales de tierras raras al proceso actual de beneficio de oro de la empresa Mineros Aluvial SAS BIC, debe dividirse entre una parte a bordo de draga y otra en una planta en tierra. El proceso a bordo de draga incluye la

clasificación y la separación magnética de baja intensidad, los no magnéticos de la separación magnética de baja intensidad deberán de ser transportados hacia una planta en tierra para continuar con el proceso de separación electrostática y magnética de alta intensidad.

5. Estudio de calidad

Un aspecto fundamental de la potencialidad de recuperación de minerales de tierras raras, circones, y demás minerales identificados como de interés en este trabajo, corresponde a la detección y evaluación de parámetros limitantes de su calidad como posibles concentrados de minerales comercializables. Aunque esta condición puede ser inicialmente limitante, también permite identificar necesidades y/o alternativas de procesamiento y transformación, que a futuro se puedan investigar a fin de aumentar el valor agregado de estos minerales para su posible comercialización. Este análisis, el primero realizado en este tipo de minerales explotados por la empresa Mineros Aluvial SAS BIC, partió inicialmente de una revisión de información sobre los concentrados de minerales que normalmente se comercializan en el mercado internacional, información que no es fácilmente accesible y que tampoco se encuentra estandarizada. Los métodos y análisis empleados en este estudio han sido, por lo tanto, diseñados y adaptados para dar una respuesta inicial al interrogante de la potencialidad de aprovechamiento de los minerales de interés, según se explicó en los capítulos anteriores de esta tesis.

El punto de partida para este análisis de calidad lo constituye la presencia de minerales de interés en las fracciones y productos de las separaciones realizadas en las etapas exploratorias de esta investigación (caracterización). Una vez identificados estos minerales y las principales fracciones que los contenían, se llevó a cabo un análisis y mapeo composicional de muestras seleccionadas de los minerales mediante SEM/EDS, cuyos resultados se presentan en este capítulo. El equipo utilizado para el análisis es un Microscopio Electrónico de Barrido SEM/EDS marca Zeiss EVO MA10, operado a una potencia de 10 a 25 kV, y con un recubrimiento en las muestras de 5nm de oro. A continuación, se presentan los resultados más relevantes con relación a la composición química de los minerales potencialmente recuperables en la corriente del proceso aluvial estudiada.

El análisis SEM/EDS de una partícula mineral con contenido de elementos de tierras raras se observa en la **Figura 5-1** y en la **Tabla 5-1**. Adicionalmente, la **Figura 5-2** muestra el mapeo composicional realizado en el área seleccionada para el análisis.

El grano de la **Figura 5-1** presenta una textura irregular, deformada por fenómenos de meteorización física y química (vértices redondeados y bordes irregulares), los aportes elementales de la **Tabla 5-1**, hacen alusión a un grano de dos o más fases, claramente la fase del fosfato de tierras raras y otra fase de aluminosilicatos. El mapeo composicional evidencia una partícula de silicato, con presencia superficial de minerales de tierras raras, específicamente monacita-Ce con presencia de Th.

Figura 5-1: SEM/EDS de una partícula de mineral con asociación de tierras raras

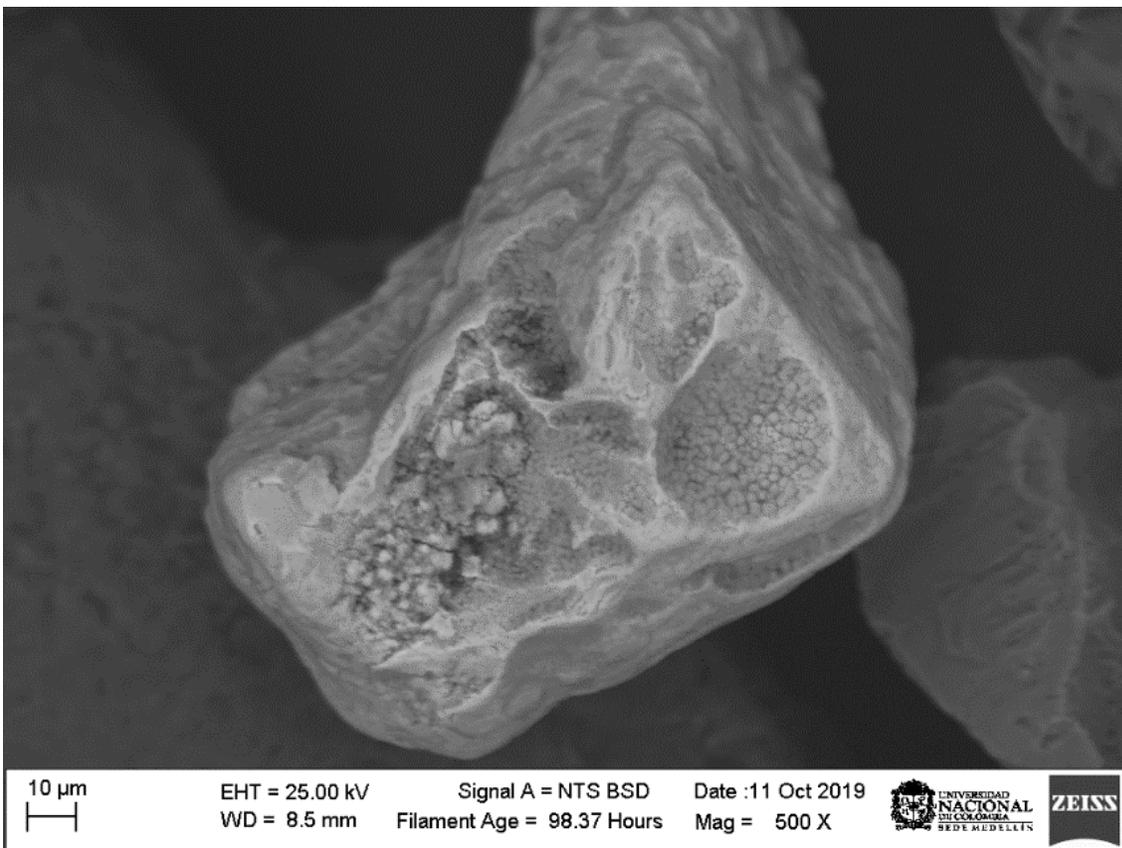
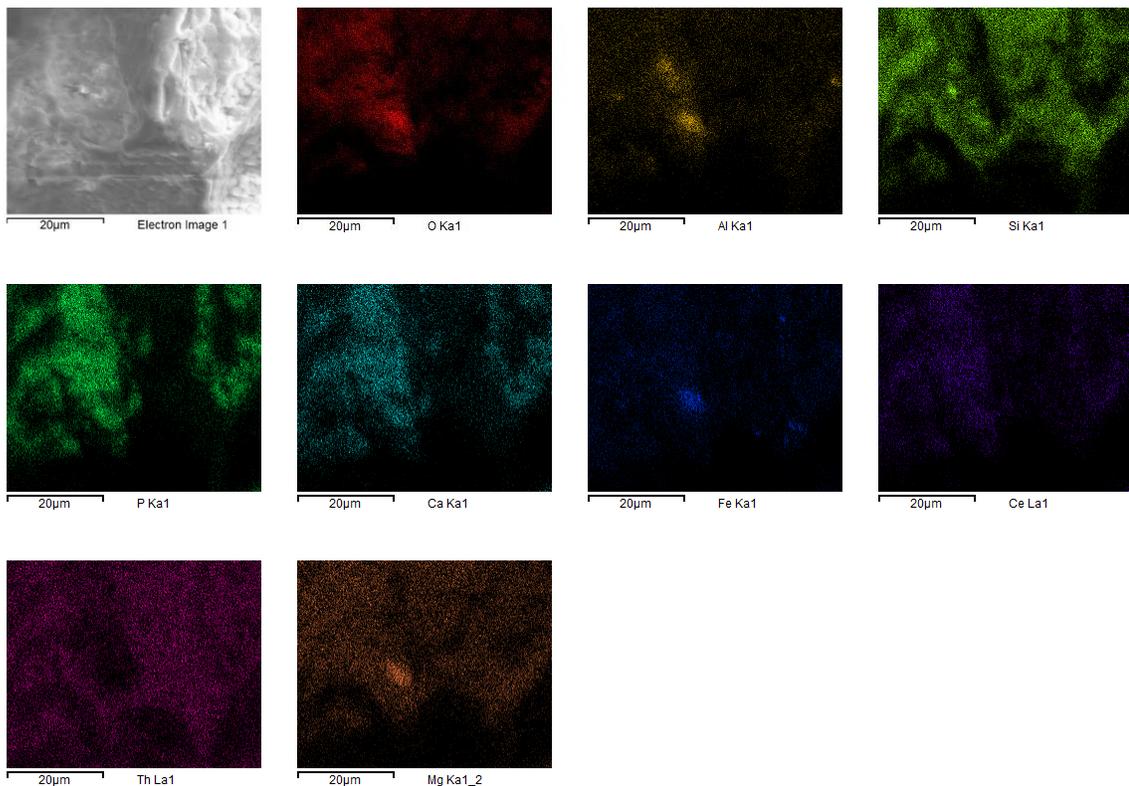


Tabla 5-1: Aportes elementales SEM/EDS mineral de elementos de tierras raras.

Elemento	% Peso	% Atómico
O K	39,8	79,28
Mg K	0,25	0,33
Al K	1,15	1,36
Si K	6,96	7,9
P K	2,55	2,62
Ca K	1,38	1,1
Fe K	1,54	0,88
Ce L	1,86	0,42
Th M	44,52	6,11
Total	100,01	100

Figura 5-2: Mapeo composicional SEM/EDS de mineral con presencia de EER.

La presencia de los demás elementos como el magnesio, hierro y calcio con una participación menor pueden hacer parte de soluciones sólidas. En el mapeo composicional

de la **Figura 5-2**, se notan claramente las asociaciones entre la sílice, el aluminio, el oxígeno, por una parte, y a su vez el torio, con el oxígeno y silicio también presentan coincidencias, pudiendo representar a una tercera fase mineralógica tipo torita. A continuación, se reporta otra partícula analizada que presenta contenidos de minerales de tierras raras (**Figura 5-3**).

La composición elemental de la partícula de la **Figura 5-3** se visualiza en la **Tabla 5-2**, en la cual se presentan elementos correspondientes a varios minerales, fosfatos de tierras raras (Ce, Nd), óxidos de hierro y titanio, aluminosilicatos (incluyendo torita), es decir, coinciden respecto a la partícula de la **Figura 5-1**, varias fases minerales en un mismo grano, esta información coincide con los hallazgos de la tesis de caracterización de estos minerales realizada por Clara Lamus, donde, para el caso de la monacita expresa que este mineral “se observa incluido dentro de los granos como pequeñas moticas”, las cuales podrían representar diferencias composicionales a través del grano o exsolución con otra u otras fases minerales, algunas veces con micro fisuras internas y exsoluciones de torita y xenotima” (Lamus, 2005).

Figura 5-3: Partícula de asociación compleja de óxidos analizada mediante SEM/EDS.

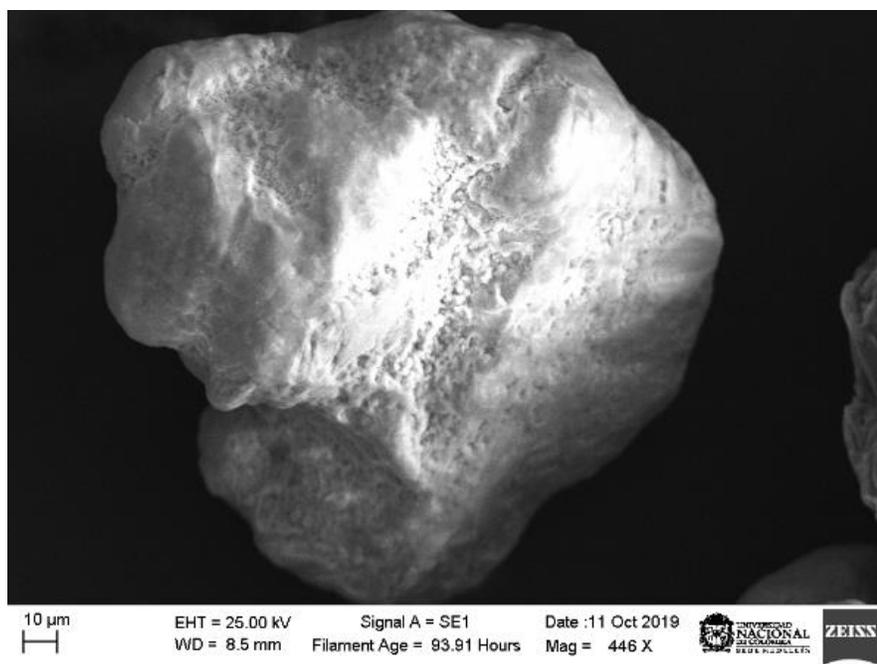
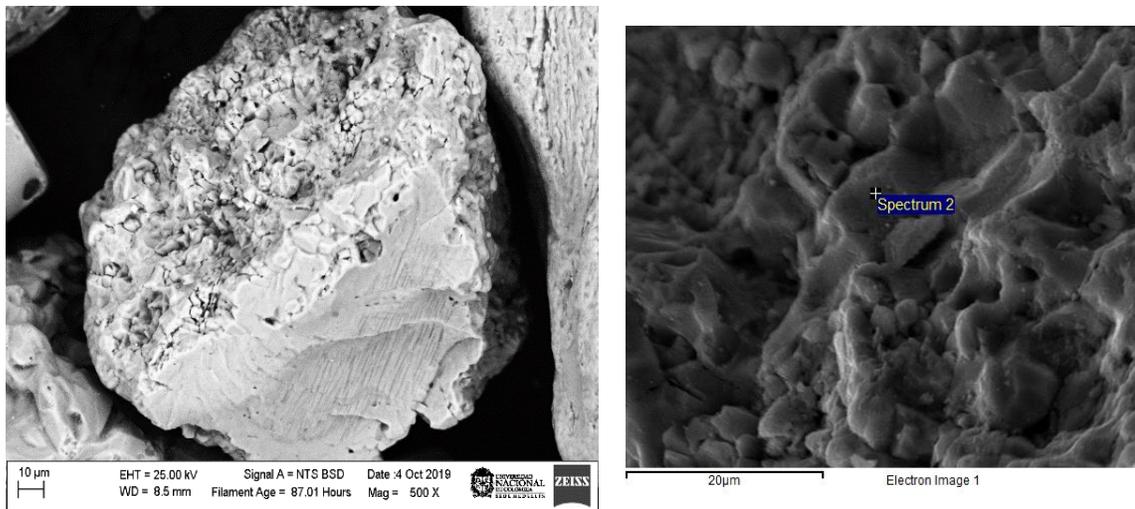


Tabla 5-2: Aportes elementales en SEM/EDS punto de partícula de la **Figura 5-3**.

Elemento	% Peso	% Atómico
C K	12.19	25.66
O K	35.49	56.08
Al K	0.79	0.74
Si K	3.35	3.02
P K	5.29	4.32
Ca K	3.82	2.41
Ti K	3.28	1.73
Fe K	4.37	1.98
Ce L	6.31	1.14
Nd L	2.80	0.49
Th M	22.29	2.43
Total	100.00	100.00

Se considera interesante hacer referencia a otros minerales de las arenas negras de interés económico, minerales tipo óxidos de hierro y titanio (**Figura 5-4**) que fueron reportados como magnéticos en la fracción finos (menores a 212 μm).

Figura 5-4: Imagen de análisis SEM/EDS de la fracción magnética de minerales finos.

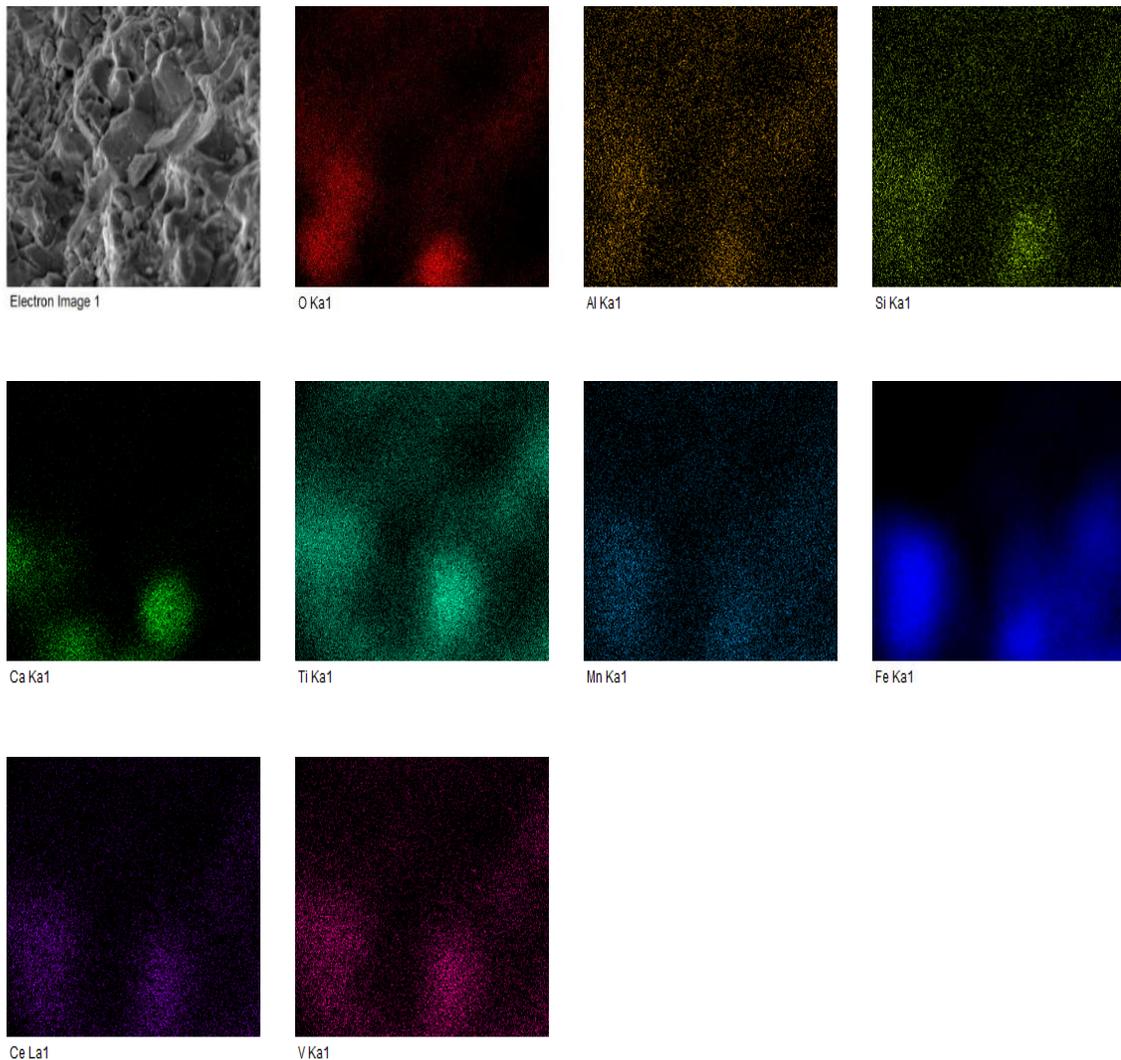
Tomando como base la distribución molar de la ilmenita FeTiO_3 , la cual por cada mol de hierro y titanio presenta tres de oxígeno. Según la **Tabla 5-3**, hay suficiente hierro, titanio y oxígeno para compartir esta proporción. Tanto el hierro como el oxígeno presente en mayores proporciones pueden estar representando la detección de otro tipo de minerales como óxidos de hierro, incluso carbonatos, tipo siderita. Los demás elementos presentes, aluminio, silicio, vanadio, manganeso y cerio en proporciones atómicas inferiores al 1%, podrían significar un intercambio del titanio en la ilmenita o del hierro en el carbonato (trazas).

Tabla 5-3: Análisis elemental SEM/EDS de la fracción fina de mineral magnético (P1).

Elemento	% Peso	% Atómico
C K	2,72	5,95
O K	25,63	42,08
Al K	0,48	0,47
Si K	0,54	0,5
Ti K	11,97	6,56
V K	0,43	0,22
Mn K	0,32	0,15
Fe K	93,57	44,01
Ce L	0,23	0,04
Total	135,89	100,0

Se analiza otro punto de la partícula (ver **Figura 5-6** y **Tabla 5-4**) para tener más información respecto a las especies minerales y asociaciones emitidas luego del bombardeo de rayos x propios de la técnica.

En este caso el elemento predominante es el hierro, todos los demás elementos se encuentran con el mismo patrón de distribución, lo que significa que hablamos de una misma partícula de óxido de hierro y titanio, en la cual la mayor parte del titanio pudo ser sustituido por el hierro; persiste la presencia de vanadio, silicio, aluminio y cerio como trazas y el carbón como parte de la composición de un carbonato, el cual también abarca toda el área de análisis.

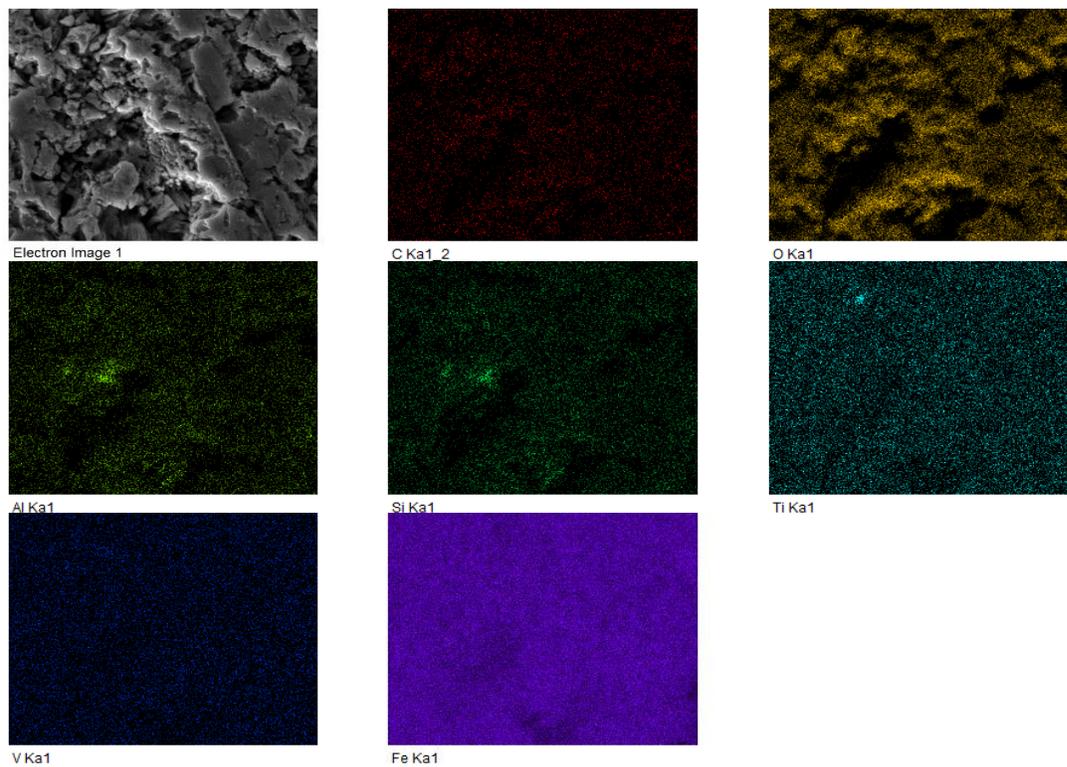
Figura 5-5: Mapeo composicional SEM/EDS de fracción magnética de finos.

Sin embargo, el mapeo composicional de la **Figura 5-5**, indica que el carbón está asociado al hierro, cerio y vanadio; bajo este escenario, estos dos últimos elementos se encuentran posiblemente como trazas sustituyendo parte del hierro del carbonato.

Mientras que el titanio, silicio y aluminio abarcan toda el área del mapeo, y, adicionalmente, teniendo en cuenta que el único elemento en porcentaje atómico mayor a 1% entre el silicio, el aluminio, el titanio y el vanadio es el titanio, es posible que estén asociados a la presencia superficial de aluminosilicatos.

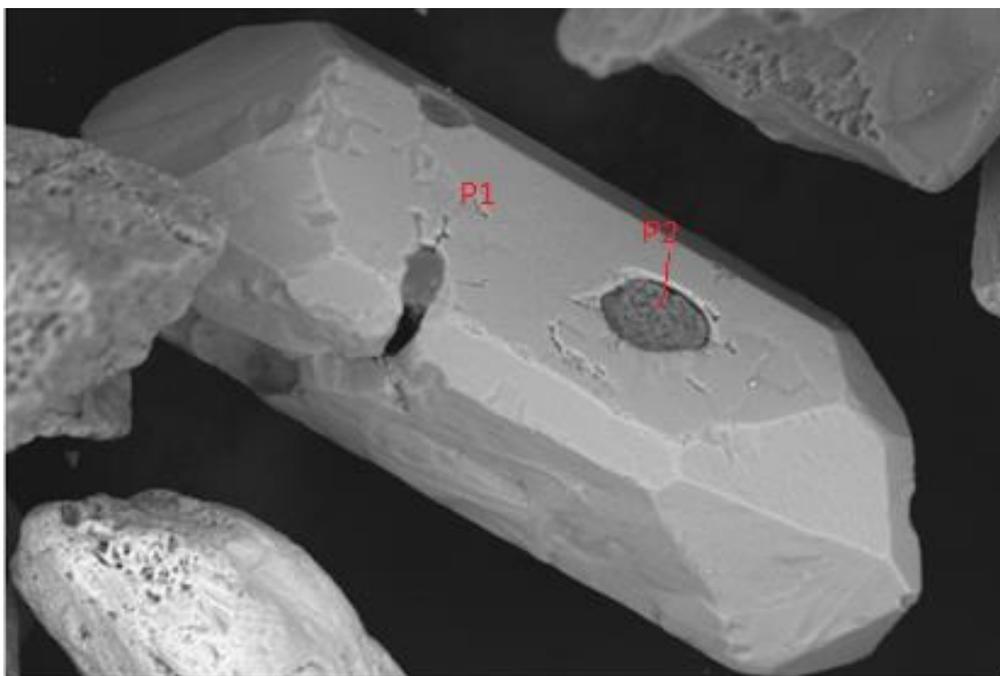
Tabla 5-4: Análisis elemental SEM/EDS de fracción fina de mineral magnético (P2)

Elemento	% Peso	% Atómico
C K	2,53	2,93
O K	19,27	16,76
Al K	0,42	0,22
Si K	0,46	0,23
Ti K	13,67	3,97
V K	1,23	0,34
Fe K	303,03	75,5
Ce L	0,63	0,06
Total	341,24	100,0

Figura 5-6: Mapeo composicional SEM/EDS mineral magnético (finos P2).

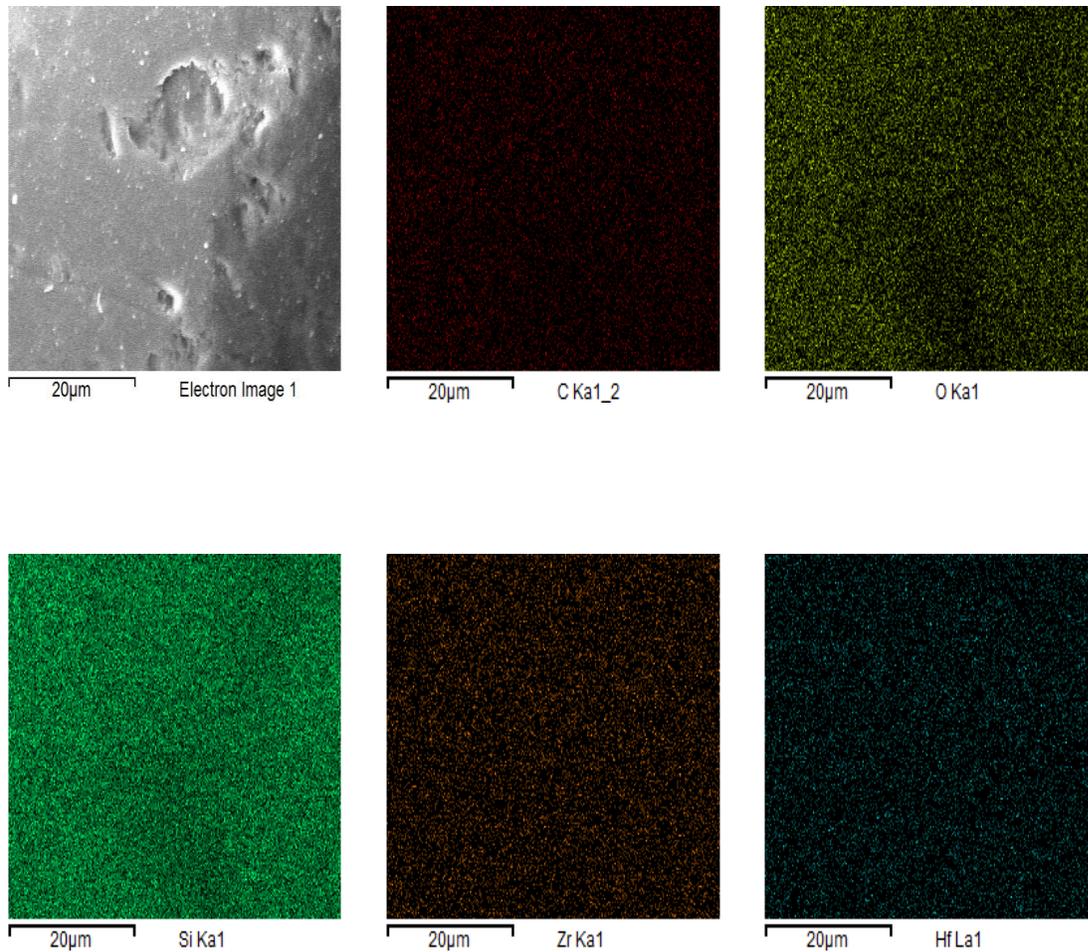
A continuación, se presentan los resultados de la caracterización para un cristal de circón (**Figura 5-7**) en la corriente de minerales no magnéticos de la fracción de finos (menores a 212 μm).

Figura 5-7: Imagen de análisis SEM/EDS de una partícula de circón.

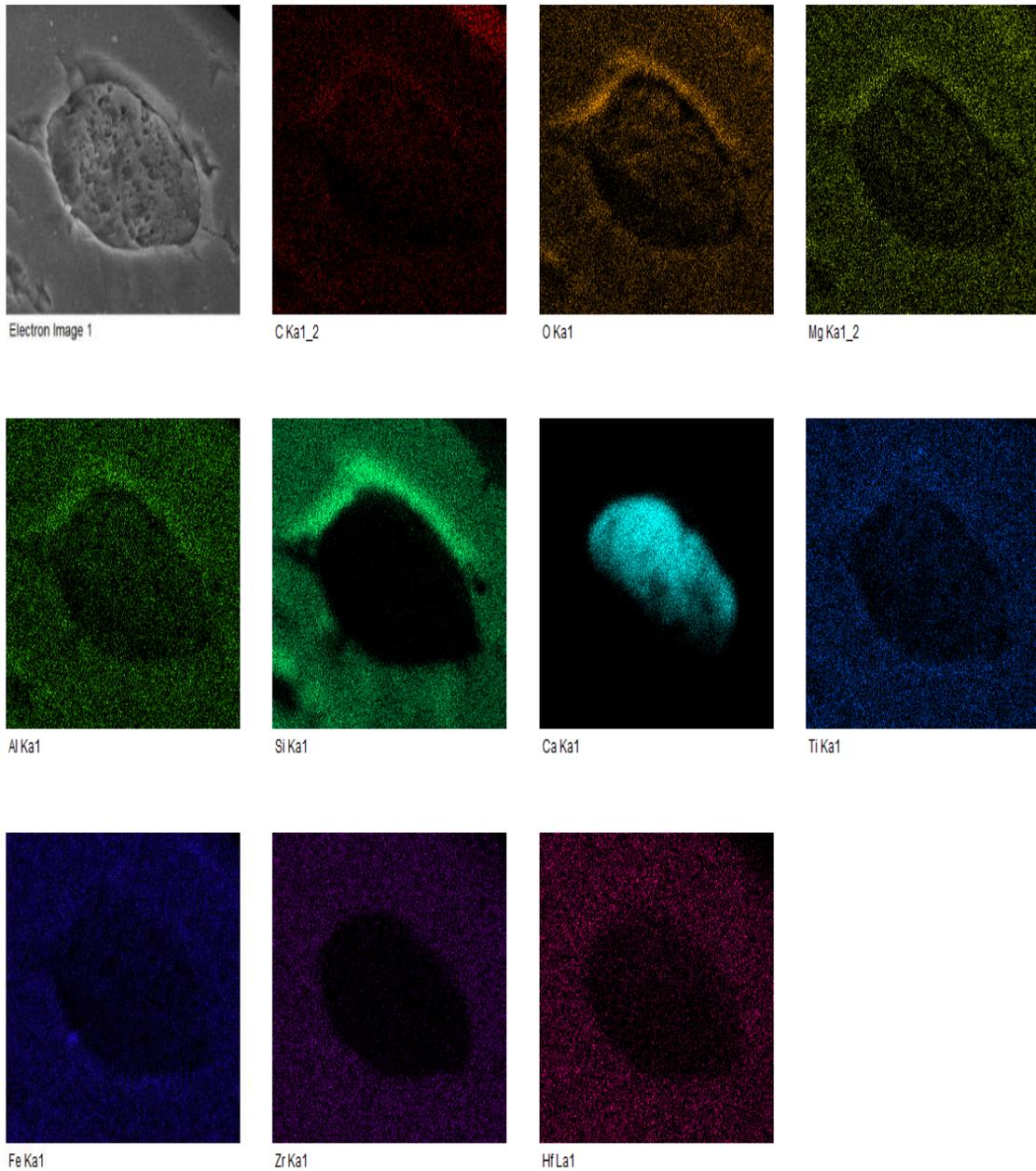


La información de la **Tabla 5-5** revela que las proporciones de silicio, circonio y oxígeno se ajustan a las proporciones atómicas del elemento circón, el cual contiene trazas de hafnio en algunos casos. El mapeo composicional (**Figura 5-8**) sugiere la presencia de carbón como parte de un silicato más complejo o como parte de carbonatos adosado a la superficie, adicionalmente todos los elementos presentes en esta medición se encuentran homogéneamente distribuidos por el área del mapeo, variando únicamente su concentración. Como aspecto relevante, está relacionado con las pequeñas concentraciones de hafnio Hf y hierro en la **Figura 5-8** y la **Tabla 5-5**.

Se analiza otro punto de la partícula (denominado P2), para comprender mucho mejor la composición y la naturaleza de los elementos presentes. El mapeo composicional de la **Figura 5-9**, revela que el calcio en el grano de circón sólo está concentrado en una zona de inclusión, donde no se presentan tampoco el circonio, hierro hafnio y silicio, mientras que en toda la superficie escaneada persiste el oxígeno, carbón, magnesio y aluminio.

Figura 5-8: Mapeo composicional SEM/EDS no magnético (finos P2).**Tabla 5-5:** Análisis elemental SEM/EDS de fracción fina no magnético (finos P1).

Elemento	% Peso	% Atómico
C K	4.01	8.89
O K	39.99	66.65
Si K	12.54	11.91
Fe K	0.14	0.07
Zr L	42.07	12.30
Hf L	1.26	0.19
Total	100.00	100

Figura 5-9: Mapeo composicional SEM/EDS no magnético (finos P2).

Es posible que, en este último caso (**Tabla 5-6**) el análisis corresponda más a un grano multifásico de silicato de circonio pero que también contiene otros compuestos tipo fosfatos y óxidos de hierro/titanio como posibles exsoluciones, hecho que también fue demostrado en un trabajo anterior de tesis (Lamus, 2005).

Tabla 5-6: Análisis elemental SEM/EDS fracción fina no magnético (finos P2).

Elemento	% Peso	% Atómico
C K	4,29	5,73
O K	68,46	68,73
Na K	0,36	0,25
Mg K	1,48	0,98
Al K	1,27	0,76
Si K	4,05	2,31
P K	11,75	6,09
Ca K	34,18	13,7
Ti K	1,05	0,35
Fe K	2,79	0,8
Zr L	1,7	0,3
Total	131,38	100

Adicionalmente se cuenta con análisis elementales mediante FRX realizados sobre los concentrados finales de la separación magnética de alta intensidad (**Tabla 5-7**). Se destaca en la corriente de magnéticos una mayor concentración de minerales de tierras raras, tanto pesados (ítricos) como livianos, estos últimos en mayor proporción de los cuales se citan de mayor a menor concentración, el cerio seguido del lantano, neodimio, praseodimio y finalmente samario.

La proporción de cerio en los magnéticos es 14 veces mayor que en el caso de los no magnéticos, sin embargo, una concentración de 614 ppm de cerio en los no magnéticos puede estar asociado tanto a la ineficiencia del proceso de separación como a la mineralogía o naturaleza de los minerales, donde es clara la presencia de exsoluciones y o intercrecimientos entre fases minerales, incluso de silicatos y aluminosilicatos con minerales de tierras raras.

Otro de los aspectos relevantes de la **Tabla 5-7**, revela la presencia de xenotima, con aportes de itrio e iterbio en concentraciones casi 37 veces por debajo de las concentraciones de cerio en los minerales magnéticos, y en los minerales no magnéticos tres veces inferior a la concentración de cerio.

Tabla 5-7: Análisis elemental productos de la SM AI (finos -40M).

Analito	Magnéticos SM AI	No Magnéticos SM AI
Unidad	(ppm)	(ppm)
Ce (cerio)	8490	614
Cr (cromo)	2180	152
Dy (disproso)	408	64,8
Er (Erbio)	239	107
Eu (Europio)	24,7	2,44
Gd (Gadolinio)	529	40,7
Hf (Hafnio)	558	8500
La (lantano)	4210	304
Mn (Manganeso)	17200	233
Nb (niobio)	146	59,3
Nd (neodimio)	3820	268
Pr (praseodimio)	1020	72,4
Sc (escandio)	68,7	90,4
Sm (samario)	699	48,1
Sr (estroncio)	191	39,2
Th (torio)	1770	453
Ti (titanio)	102000	10900
U (uranio)	170	266
V (vanadio)	435	62
Y (Itrio)	2260	678
Yb (Iterbio)	227	220
Zr (circonio)	22000	334000

Como ya se mencionó, la información sobre calidad de concentrados de este tipo de minerales no se encuentra estandarizada, y es necesario acudir a ciertas características de los concentrados normalmente comercializados. La **Tabla 5-8**, estándar chino para los concentrados de monacita, establece los contenidos de minerales máximos contaminantes para su comercialización. Comparando estos valores con los resultados de este estudio, aunque no se haya logrado obtener un concentrado de monacita (mínimo 50% de óxidos de tierras raras) es posible que, si se lograra separar el circón, los demás silicatos y los

minerales de titanio en los concentrados mediante procesos de liberación previos a todas las etapas de separación ya presentadas, se podría lograr un concentrado comercializable, dado que la presencia de óxido de torio, de calcio, uranio y titanio se presenta en concentraciones por debajo del límite máximo según la **Tabla 5-8**. Esa posibilidad se podría abordar en un estudio posterior que incluya una investigación sistemática de liberación-concentración de minerales, la cual está fuera del alcance de esta tesis.

Es importante tener en cuenta, sin embargo, que el concentrado de minerales magnéticos de la SM Al final no logra cumplir con los estándares chinos de la **Tabla 5-8**, y aun no es completamente claro si, los elementos de tierras raras están presentes como elementos sustitutos en óxidos, silicatos y carbonatos, como minerales independientes o como una combinación de ambos. Hasta el momento, según la evidencia de este estudio, los minerales corresponden a fases separadas con variadas composiciones y asociaciones que deben ser corroboradas con análisis petrográficos y mineralógicos más profundos.

Tabla 5-8: Estándar Chino para los concentrados de monacita.

Grade [↵]	Brand [↵]	Chemical component, % [↵]									
		REO*, ≥ [↵]	ThO2 [↵]	P2O5, ≥ [↵]	U3O8 [↵]	CaO [↵]	TiO2 [↵]	ZrO2 [↵]	SiO2 [↵]	Fe2O3 [↵]	H2O [↵]
REO-0260 [↵]	0260 [↵]	60 [↵]	4-8 [↵]	24 [↵]	0.5 [↵]	1 [↵]	1.5 [↵]	1.5 [↵]	2.5 [↵]	1.5 [↵]	0.5 [↵]
REO-0255 [↵]	0255 [↵]	55 [↵]	4-8 [↵]	23 [↵]	0.5 [↵]	2.5 [↵]	2 [↵]	2 [↵]	3 [↵]	2.5 [↵]	0.5 [↵]
REO-0250 [↵]	0250 [↵]	50 [↵]	4-8 [↵]	21 [↵]	0.5 [↵]	3 [↵]	3 [↵]	3 [↵]	4 [↵]	3 [↵]	0.5 [↵]
* Excluding Y2O3, w(Y2O3/REO) ≤5% [↵]											
Total radioactivity less than 4X10 ⁶ Bq/kg [↵]											

Source: Chinese Standard, XB/T 104-2015 Monazite Concentrate [↵]

Como observación final, respecto a la calidad de los concentrados, existe una cantidad importante de circón que puede ser susceptible de ser recuperado y puede ser un subproducto potencial de la corriente del proceso aluvial de este estudio.

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

En este trabajo se estableció una ruta de beneficio adecuada para la concentración de minerales de tierras raras en las fracciones finas de la corriente de colas de la concentración de oro aluvial (colas espiral) del proceso de beneficio actual de Mineros Aluvial SAS BIC. Como minerales de interés potencial en esta corriente del proceso se identificaron magnetita, ilmenita, rutilo, monacita-Ce, monacita-Nd y circón. Esta ruta de beneficio, que podría ser complementaria al proceso actual, incluye una separación magnética inicial de baja intensidad, con la aplicación de un campo magnético inferior a 1300G. Luego, el producto de minerales no magnéticos debe ser sometido a una concentración gravimétrica en mesa Wilfley para concentrar los minerales pesados y eliminar el cuarzo y silicatos presentes en la corriente. Posteriormente, los concentrados producto de la separación gravimétrica, se deben someter a una separación electrostática para eliminar en lo posible, la ilmenita y el rutilo y evitar que se conviertan en contaminantes de la etapa final de separación magnética de alta intensidad (superior a 7000 G), donde se obtiene un producto final de magnéticos con contenidos de minerales de tierras raras y otro producto de no magnéticos donde predominan como especie principal los circones.

Por medio de los resultados del balance realizado mediante modelamiento en LIMN®, es posible concluir que el producto de minerales magnéticos finales de la separación magnética de alta intensidad en la fracción de finos, con mayor concentración de minerales de tierras raras (monacita), representa una recuperación global del 16%, que, a su vez corresponde a un 10,94% del producto de minerales magnéticos de la separación magnética de alta intensidad (SM AI). Este porcentaje de recuperación global bajo se debe a la poca cantidad presente de este mineral en la fracción fina (menor a 0,425mm) de la corriente de estudio, y posiblemente en el caso de ambas fracciones, gruesas y finas, a

que se encuentra asociado a otros minerales como silicatos, carbonatos y óxidos de hierro, con depósitos posiblemente superficiales de monacita-Nd y monacita-Ce, y proporciones de torio como trazas.

Es probable que, debido a la baja concentración de minerales de tierras raras en la fracción de finos, no sea posible considerar actualmente este producto como un concentrado de minerales de tierras raras. Según los resultados de este trabajo de investigación, a partir de 10 toneladas por hora de material procesado, sólo se generarían 6 kilos por hora de minerales de tierras raras. Sin embargo, es importante hacer un análisis económico al respecto ya que para su separación no se ha tenido que realizar ninguna inversión adicional para la extracción de este material, estos costos del arranque han sido cubiertos por la explotación de oro. Desde este punto de vista, aún con estas bajas cantidades de mineral de interés, el beneficio de minerales de tierras raras puede representar una oportunidad de negocio según los precios de estos minerales, dada la actual situación, donde los mercados de estos minerales de tierras raras cada vez representan mayor demanda a nivel mundial.

Los análisis de SEM/EDS brindan una idea de la posible asociación mineralógica entre los minerales de tierras raras y los minerales de titanio. Una posible causa es la falta de liberación (partículas adosadas) de estos minerales. Según lo anterior, y con base en estándares internacionales, como se especificó en la **Tabla 5-8**, es necesario ahondar en el estudio de la composición de los minerales de tierras raras y su relación con los procesos de beneficio. Los resultados de este estudio sugieren la posibilidad de emplear procesos de conminución para lograr la liberación de los minerales de interés y una etapa posterior de concentración orientada a eliminar los elementos contaminantes (Fe, Ca, Si, entre otros). De igual forma en las fracciones finas, por medio de los resultados del SEM/EDS se evidenció la presencia de tierras raras como mineral asociado o adyacente a otras especies minerales.

Otro hallazgo adicional en los análisis de SEM/EDS, es la presencia de hafnio en los circones, el cual puede afectar su comercialización, este es considerado como una impureza para los circones. Aunque desde otro punto de vista, la presencia de este mismo elemento en los circones puede ser positiva, porque si hay hafnio, es posible que torio y

uranio también, y en estos momentos, dado el potencial energético de este mineral, podría convertirse en un subproducto, aspecto que requiere un análisis detallado, por las implicaciones ambientales y políticas que conlleva.

6.2 Recomendaciones

Dada la procedencia de esta corriente (colas de la concentración final de oro aluvial), y con base en los resultados del análisis de calidad, una de las posibles explicaciones para el hecho de encontrar la monacita más concentrada en la fracción gruesa se debe posiblemente a que las partículas de monacita finas se reporten en el concentrado de la espiral, mientras las partículas más gruesas al no estar liberadas sean arrastradas hacia las colas junto con los minerales más livianos. Se recomienda, por lo tanto, replantear la fuente de tratamiento para la obtención de minerales de tierras raras, tomando el alimento a la espiral, en vez de las colas. En este caso, el tratamiento deberá incluir un proceso adicional para retornar al sistema de beneficio actual de la operación aluvial el oro que acompaña esta corriente.

Se recomienda analizar los costos e implicaciones en términos de utilidad que puede presentar el aprovechamiento de los minerales de tierras raras asociados a la fracción de gruesos, ya que representan más del 80% de los minerales de tierras raras en la corriente de estudio.

Dado el potencial de minerales de titanio y circón en esta corriente estudiada, se recomienda analizar el potencial de estos minerales como subproductos. En el caso del circón, con la ruta de beneficio planteada, se logra una recuperación superior al 85%, se debe trabajar en la optimización de la separación gravimétrica para evitar la ganga liviana diluyendo el tenor de este mineral en el producto de no magnéticos de la separación magnética de alta intensidad.

Se sugiere analizar la pertinencia de una etapa de molienda previa que permita procesar todo el mineral con la misma ruta de beneficio planteada en este proyecto de investigación, y adicionalmente, realizar ensayos de optimización de la separación electrostática para evitar el paso de ilmenita a la separación magnética de alta intensidad, aunque este último punto debería dejar de ser tan crítico en la medida en que las partículas presenten un

tamaño de partícula más fino y homogéneo que garantice la mayor liberación de las especies presentes en la corriente a procesar.

Bibliografía

- ASTM C 1444 - 00. (2000). Standard test method for measuring the angle of repose of free-flowing mold. *ASTM International*, 1, 15–16.
- Bradley S. Van Gosen, Philip L. Verplanck, Robert R. Seal II, K. R. L., & Gambogi, and J. (2013). Rare-Earth Elements Chapter O of Critical Mineral Resources of the United States — Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply Professional Paper 1802 – O U . S . Department of the Interior. *USGS - U.S. Geological Survey*, 01–031. <https://doi.org/https://doi.org/10.3133/pp1802O>
- Bustamante, O. M., Gaviria, A. C., & Restrepo, O. J. (2008). *CONCENTRACIÓN DE MINERALES* (Vol. 17, Issue 34, pp. 39–46). IM CIMEX.
- Carpco Inc. (1995). *OPERATING MANUAL FOR LABORATORY ELECTROSTATIC SEPARATOR HT(15, 25, 36) 111-15*. SEPOR.
- D2320-98, A. D. (1998). *Standard Test Method for Density of Solid Pitch (Pycnometer Method)*. 98(Reapproved 2003), 1–3.
- Díaz, M. (1992). *Primer Estimado Producción Arenas Negras para Mineros Nacionales-Confidencial*.
- Dushyantha, N., Batapola, N., Ilankoon, I. M. S. K., Rohitha, S., Premasiri, R., Abeyasinghe, B., Ratnayake, N., & Dissanayake, K. (2020). The story of rare earth elements (REEs): Occurrences, global distribution, genesis, geology, mineralogy and global production. *Ore Geology Reviews*, 122, 103521. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103521>
- Echeverri L., F., & Parra B., J. J. (2019). Los lantánidos: ni tierras ni raras. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 43, 291–296.
- Elsner, H. (2010). *Assessment Manual: Heavy Minerals of Economic Importance. (Ilmenite and Leucoxene, Rutile, Zircon, Monazite and Xenotime, Kyanite, Sillimanite and Andalusite, Staurolite, Garnet, Chromite, Magnetite, Cassiterite, Columbite-Tantalite, Wolframite and Scheeli*.
- Elsner, H. (2013). *Zircon – insufficient supply in the future?* DERA Deutsche Rohstoffagentur.

- Evans, A. (1993). Ore Geology and Industrial Minerals. In B. Company (Ed.), *Blackwell Science* (Third, Vol. 39, Issue 5).
- Frimmel, H. E., & James, C. S. (2021). *Placer Deposits and Processes* (D. Alderton & S. A. B. T.-E. of G. (Second E. Elias (eds.); pp. 877–898). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102908-4.00004-7>
- Galsin, J. S. (2019). Chapter 18 - Magnetism. In J. S. B. T.-S. S. P. Galsin (Ed.), *Solid State Physics: An Introduction to Theory* (pp. 383–405). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817103-5.00018-9>
- Gambogi, J. (2021). Rare Earths. In *Mineral Commodity Summaries*. U.S. Geological Survey.
- Garzanti, E., & Andò, S. (2019). Heavy Minerals for Junior Woodchucks. In *Minerals* (Vol. 9, Issue 3). <https://doi.org/10.3390/min9030148>
- Gonçalves, C., & Braga, P. (2019). Heavy Mineral Sands in Brazil: Deposits, Characteristics, and Extraction Potential of Selected Areas. *Minerals*, 9(3), 176. <https://doi.org/10.3390/min9030176>
- Gupta, A., & Yan, D. S. (2006a). Chapter 15 - Gravity Separation. In A Gupta & D. S. B. T.-M. P. D. and O. Yan (Eds.), *Mineral Processing Design and Operations (Second Edition)* (pp. 494–554). Elsevier Science. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-51636-7.X5000-1>
- Gupta, A., & Yan, D. S. (2006b). Chapter 2 - Particle Size Estimation and Distributions (A Gupta & D. S. B. T.-M. P. D. and O. Yan (eds.); pp. 32–62). Elsevier Science. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-044451636-7/50003-6>
- Gupta, A., & Yan, D. S. (2016). Chapter 16 - Gravity Separation. In Ashok Gupta & D. B. T.-M. P. D. and O. (Second E. Yan (Eds.), *Mineral Processing Design and Operations (Edition)* (pp. 563–628). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63589-1.00016-2>
- Gupta, Ashok, & Yan, D. (2016). Chapter 17 - Magnetic and Electrostatic Separation. In Ashok Gupta & D. B. T.-M. P. D. and O. (Second E. Yan (Eds.), *Mineral Processing Design and Operations (Second Edition)* (2nd ed., pp. 629–687). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63589-1.00017-4>
- Haldar, S. K. (2018a). Chapter 12 - Elements of Mining (S. K. B. T.-M. E. (Second E. Haldar (ed.); pp. 229–258). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814022-2.00012-5>

- Haldar, S. K. (2018b). *Chapter 13 - Mineral Processing* (S. K. B. T.-M. E. (Second E. Haldar (ed.); pp. 259–290). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814022-2.00013-7>
- Haldar, S. K. (2018c). Chapter 13 - Mineral Processing. In S. K. B. T.-M. E. (Second E. Haldar (Ed.), *Mineral Exploration Principles and Applications* (pp. 259–290). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814022-2.00013-7>
- Haldar, S. K. (2018d). Economic Mineral Deposits and Host Rocks. In *Mineral Exploration* (2nd ed., pp. 25–45). Joe Hayton. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814022-2.00002-2>
- Hikichi, Y., & Nomura, T. (1987). Melting Temperatures of Monazite and Xenotime. *Journal of the American Ceramic Society*, 70(10), C-252-C-253. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1987.tb04890.x>
- Hoshino, M., Sanematsu, K., & Watanabe, Y. (2016). Chapter 279 - REE Mineralogy and Resources. In B. Jean-Claude & P. B. T.-H. on the P. and C. of R. E. Vitalij K. (Eds.), *Including Actinides* (Vol. 49, pp. 129–291). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/bs.hpcrc.2016.03.006>
- IUPAC. (2005). *NOMENCLATURE OF INORGANIC CHEMISTRY*. http://old.iupac.org/publications/books/rbook/Red_Book_2005.pdf
- Jones, G. (2009). Mineral Sands: An Overview of the Industry. In *Iluka*. <http://cdn.ceo.ca.s3-us-west-2.amazonaws.com/1d8eduo-mineral-sands---an-overview-of-the-industry-by-greg-jones-manager-development-geology.pdf>
- Jordens, A., Cheng, Y. P., & Waters, K. E. (2013). A review of the beneficiation of rare earth element bearing minerals. *Minerals Engineering*, 41, 97–114. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2012.10.017>
- Jordens, A., Marion, C., Langlois, R., Grammatikopoulos, T., Rowson, N. A., & Waters, K. E. (2016). Beneficiation of the Nechalacho rare earth deposit. Part 1: Gravity and magnetic separation. *Minerals Engineering*, 99, 111–122. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.04.006>
- Jordens, A., Marion, C., Langlois, R., Grammatikopoulos, T., Sheridan, R. S., Teng, C., Demers, H., Gauvin, R., Rowson, N. A., & Waters, K. E. (2016). Beneficiation of the Nechalacho rare earth deposit. Part 2: Characterisation of products from gravity and magnetic separation. *Minerals Engineering*, 99, 96–110. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.04.007>

- Kim, K., & Jeong, S. (2019). Separation of Monazite from Placer Deposit by Magnetic Separation. In *Minerals* (Vol. 9, Issue 3). <https://doi.org/10.3390/min9030149>
- Komar, P. D. (2018). *Placer Deposits BT - Encyclopedia of Coastal Science* (C. W. Finkl & C. Makowski (eds.); pp. 1–3). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48657-4_246-2
- Komar, P. D. (2019). *Placer Deposits* (pp. 1–3). https://doi.org/10.1007/978-3-319-48657-4_246-2
- Lamus, C. (2005). *Mineralogía aplicada al uso y aprovechamiento de las arenas negras*. Universidad Nacional de Colombia.
- Laurence, R. (2005). *INTRODUCTION TO ORE-FORMING PROCESSES*. Blackwell Publishing.
- Macdonald, E. H. (1983). *Alluvial Mining: The geology, technology and economics of placers*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-5361-6>
- Mange, M. A., & Maurer, H. F. W. (1992). *Heavy Minerals in Colour*. CHAPMAN & HALL.
- Manser, R. J., Barley, R. W., & Wills, B. A. (1991). The shaking table concentrator — The influence of operating conditions and table parameters on mineral separation — The development of a mathematical model for normal operating conditions. *Minerals Engineering*, 4(3), 369–381. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0892-6875\(91\)90142-I](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0892-6875(91)90142-I)
- Mazo, Z. J. (2011). UNA MIRADA AL ESTUDIO Y LAS APLICACIONES TECNOLÓGICAS Y BIOMÉDICAS DE LA MAGNETITA. In *Revista EIA* (pp. 207–223). scieloco.
- Noval, V. E., Ochoa Puentes, C., & Carriazo, J. G. (2017). Magnetita (Fe₃O₄): Una estructura inorgánica con múltiples aplicaciones en catálisis heterogénea. In *Revista Colombiana de Química* (Vol. 46, pp. 42–59). scieloco.
- O.Burt, R. (1984). *Gravity Concentration Technology*. Elsevier Science B.V.
- Oberteuffer, J. (1974). Magnetic separation: A review of principles, devices, and applications. *IEEE Transactions on Magnetics*, 10(2), 223–238. <https://doi.org/10.1109/TMAG.1974.1058315>
- Pellant, C. (2000). *ROCKS AND MINERALS*.
- Rey, C. M. (2011). Magnetic separation. In K. H. J. Buschow, R. W. Cahn, M. C. Flemings, B. Ileschner, E. J. Kramer, S. Mahajan, & P. B. T.-E. of M. S. and T. Veyssi ere (Eds.), *100 Years of Superconductivity* (pp. 797–809). Elsevier.

- <https://doi.org/10.1201/b22268-58>
- Sivamohan, R., & Forssberg, E. (1985). Principles of tabling. *International Journal of Mineral Processing*, 15(4), 281–295. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0301-7516\(85\)90046-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0301-7516(85)90046-8)
- Slatt, R. M. (2006). Chapter 6 Fluvial deposits and reservoirs. In R. M. B. T.-H. of P. E. and P. Slatt (Ed.), *Stratigraphic Reservoir Characterization for Petroleum Geologists, Geophysicists, and Engineers* (Vol. 6, pp. 203–248). Elsevier. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1567-8032\(06\)80041-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1567-8032(06)80041-8)
- Standing, C. (2016). Mineral sands. *Applied Earth Science*, 125(3), 105–106. <https://doi.org/10.1080/03717453.2016.1201897>
- Svoboda, J. (2005). *Magnetic Separation* (K. H. J. Buschow, R. W. Cahn, M. C. Flemings, B. Ilshner, E. J. Kramer, S. Mahajan, & P. B. T.-E. of M. S. and T. Veysseyère (eds.); pp. 1–7). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B0-08-043152-6/02031-3>
- Transmin Metallurgical Consultants. (1995). *LIMN The Flowsheet Processor* (pp. 1–95). Transmin Metallurgical Consultants.
- Trujillo, D. (2015). *Desarrollo de un proceso de recuperación de dióxido de titanio a partir de la ilmenita presente en las arenas ferrotitaníferas de la zona de Mompiche* [Quito : EPN, 2015.]. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/10597>
- Van Gosen, B. ., Bleiwas, D. ., Bedinger, G. ., Ellefsen, K. ., & Shah, A. . (2016). Coastal deposits of heavy mineral sands; global significance and us resources. *Mining Engineering*, 68(10), 36–43. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84991435202&partnerID=40&md5=db1bbb926d500419d5139a0b303a679e>
- Van Gosen, B. S., & Sengupta, D. (2016, July 12). *PLACER-TYPE RARE EARTH ELEMENT DEPOSITS*. <https://doi.org/10.1130/abs/2016am-279551>
- Wills, B. A., & Finch, J. A. (2016a). Chapter 10 - Gravity Concentration. In B. A. Wills & J. A. B. T.-W. M. P. T. (Eighth E. Finch (Eds.), *Will's Mineral Processing Technology* (pp. 223–244). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-097053-0.00010-8>
- Wills, B. A., & Finch, J. A. (2016b). *Chapter 13 - Magnetic and Electrical Separation* (B. A. Wills & J. A. B. T.-W. M. P. T. (Eighth E. Finch (eds.); pp. 381–407). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-097053-0.00013-3>
- Wills, B. A., & Finch, J. A. (2016c). *Chapter 4 - Particle Size Analysis* (B. A. Wills & J. A. B. T.-W. M. P. T. (Eighth E. Finch (eds.); pp. 91–107). Butterworth-Heinemann.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-097053-0.00004-2>

Zhou, B., Li, Z., & Chen, C. (2017). Global potential of rare earth resources and rare earth demand from clean technologies. In *Minerals* (Vol. 7, Issue 11). MDPI AG.

<https://doi.org/10.3390/min7110203>