



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA EN METALURGIA

**CARACTERIZACIÓN Y CONCENTRACIÓN DE
MINERALES DENSOS CONTENIDOS EN ARENAS DE
PLAYAS**

Catherine Ivette Díaz Riquelme

Copiapó, Chile 2022



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA EN METALURGIA

**CARACTERIZACIÓN Y CONCENTRACIÓN DE
MINERALES DENSOS CONTENIDOS EN ARENAS DE
PLAYAS**

Trabajo de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título de
Ingeniería civil en Metalurgia

Profesor Guía: Dr. Luis Valderrama Campusano
Comisión: Dr. Osvaldo Pávez Miqueles
Dra. Ana Rivera Varas

Catherine Ivette Díaz Riquelme

Copiapó, Chile 2022

CARACTERIZACIÓN Y CONCENTRACIÓN DE MINERALES DENSOS CONTENIDOS EN ARENAS DE PLAYAS

Este documento de Trabajo de Titulación fue aprobado por:

Nombre de la comisión	Calificación	Firma
Dr. Luis Valderrama Campusano Departamento de Ingeniería en Metalurgia Universidad de Atacama Copiapó-Chile	6.9	
Dr. Osvaldo Pavez Miqueles Departamento de Ingeniería en Metalurgia Universidad de Atacama Copiapó-Chile	5.9	
Dra. Ana Rivera Varas Departamento de Ingeniería en Metalurgia Universidad de Atacama Copiapó-Chile	6.7	

Dra. Ana Rivera Varas
Directora Departamento de Ingeniería en Metalurgia

Dedicatoria

Le dedico el resultado de este trabajo a toda mi familia. Principalmente, a mis padres que son mis pilares fundamentales que me han demostrado que con dedicación y esfuerzo pueden lograrse todo lo que uno se propone. También a mis hermanos por su apoyo incondicional.

A mis amigas con las cuales comencé esta etapa, aunque la vida nos llevó por camino distintos siempre estuvieron conmigo en los momentos más difíciles, alentándome a continuar y no rendirme.

Además, quisiera agradecer a mi profesor guía Don Luis Valderrama por darme esta oportunidad ya que me permitió crecer como persona y desarrollar nuevas habilidades.

Índice de contenidos

CAPÍTULO I. Marco introductorio	10
1.1 Aspectos generales.	10
1.2 Planteamiento del problema.	11
1.3 Objetivos.	11
1.3.1 Objetivos generales.	11
1.3.2 Objetivos específicos.	11
CAPÍTULO II. Marco teórico.	12
2.1 Arena de playas.	12
2.1.1 Playa Las Salinas.	13
2.2 Minerales Densos.	13
2.2.1 Titanio.	14
2.2.2 Zircón.	15
2.2.3 Tierras raras.	16
2.3 Concentración de minerales.	20
2.3.1 Concentración magnética.	21
2.3.2 Concentración electrostática.	24
2.3.3 Concentración gravitacional.	25
CAPÍTULO III. Metodología experimental.	27
3.1 Preparación de Muestras.	27
3.2 Análisis Granulométrico.	28
3.3 Análisis Químico.	29
3.4 Preparación Metalográfica.	29
3.5 Peso Específico.	30
3.5.1 Picnometría.	30
3.6. Diagramas de Flujos.	31
CAPÍTULO IV Resultados.	36
4.1 Primera etapa.	36
4.1.1 Análisis granulométrico.	36
4.1.2 Análisis químico.	37
4.1.3 Peso específico.	37
4.1.3.1 Peso específico cabeza.	37
4.1.3.2 Peso específico separación magnética de baja intensidad.	38

4.1.3.3	Peso específico separación por medios densos.	38
4.1.3.4	Peso específico separación gravimétrica.	39
4.1.3.5	Peso específico separación electrostática.	40
4.1.3.6	Peso específico separación magnética de alta intensidad.	40
4.1.4	Procesos de concentración.	41
4.1.4.1	Concentración magnética de baja intensidad en seco.	41
4.1.4.2	Separación por medios densos.	42
4.1.4.3	Concentración gravimétrica.	44
4.1.4.4	Concentración electrostática.	45
4.1.4.5	Concentración magnética de alta intensidad en húmedo.	46
4.1.5	Análisis mineralógico.	48
4.1.5.1	Microscopía electrónica de barrido.	48
4.1.5.1.1	Análisis SEM muestra del Float.	48
4.1.5.1.2	Análisis SEM muestra del Sink.	49
4.1.5.1.3	Análisis SEM de la muestra magnético conductor.	51
4.1.5.1.4	Análisis SEM de la muestra no magnético conductor.	52
4.1.5.1.5	Análisis SEM de la muestra magnético no conductor.	53
4.1.5.1.6	Análisis SEM del no magnético no conductor.	55
4.1.5.2	Macro	56
4.1.5.3	Difracción de rayos x	59
4.2	Segunda etapa.	60
4.2.1	Análisis granulométrico.	60
4.2.1.1	Molienda	61
4.2.2	Peso específico.	62
4.2.2.1	Concentración gravimétrica	62
4.2.3	Procesos de concentración.	63
4.2.3.1	Concentración gravimétrica.	63
4.2.3.2	Concentración Magnética de baja intensidad en húmedo	66
4.2.2.3	Separación por medios densos.	68
4.2.2.4	Concentración Electrostática	69
4.2.2.5	Concentración magnética de alta intensidad en húmedo.	71
4.2.4	Análisis mineralógico.	74
4.2.4.1	Fluorescencia de rayos x.	74
4.2.4.1.1	Concentración gravimétrica.	74

4.2.4.1.2 Concentración magnética de baja intensidad en húmedo.....	74
4.2.4.1.3 Separación por medios densos.	74
4.2.4.1.4 Concentración electrostática.....	74
4.2.4.1.5 Concentración magnética de alta intensidad en húmedo.....	74
4.2.4.2 Análisis Modal	75
CAPÍTULO V Conclusiones.....	86
ANEXO 1 Análisis granulométricos.....	90
ANEXO 2 Peso específico	91
ANEXO 3 Análisis químicos de todas las muestras.	96
ANEXO 4 Fluorescencia de rayos x.	103
ANEXO 5 Análisis modal.....	110

Índice de figuras

Figura N°2. 1 Sector Puerto Viejo desembocadura del valle Copiapó. (Griem, 2010) ...	13
Figura N° 3. 1 Series de tamices en el ro-tap, modelo AS 200.....	28
Figura N° 3. 2 Muestras pulverizadas y almacenadas.	29
Figura N° 3. 3 Eliminación de burbuja en el ultrasonido, modelo CD-4820.....	31
Figura N° 3. 4 Diagrama de concentración de la arena de playa las Salinas.	32
Figura N° 3. 5 Diagrama de concentración de las arenas de playas las Salinas.	34
Figura N° 4. 1 Gráfico de los análisis granulométricos de la cabeza inicial de las arenas de playa las Salinas.	36
Figura N° 4. 2 Distribución de los elementos por tamaño contenidos en arenas de playa.	37
Figura N° 4. 3 Comparación de las densidades de la separación magnética de baja intensidad.	38
Figura N° 4. 4 Comparación de las densidades de la separación por medios densos.	39
Figura N° 4. 5 Comparación de las densidades de la separación gravimétrica.....	39
Figura N° 4. 6 Comparación de las densidades de la separación electrostática.....	40
Figura N° 4. 7 Comparación de las densidades de la separación magnética de alta intensidad.	41
Figura N° 4. 8 Leyes y recuperaciones del concentrado magnético.	41
Figura N° 4. 9 Leyes y recuperaciones del relave no magnético.	42
Figura N° 4. 10 Grafico de la leyes y recuperaciones del hundido.....	43
Figura N° 4. 11 leyes y recuperaciones de lo flotado.	43
Figura N° 4. 12 Leyes y recuperaciones del concentrado.....	44
Figura N° 4. 13 Leyes y recuperaciones del relave.....	44
Figura N° 4. 14 Leyes y recuperaciones del conductor.	45
Figura N° 4. 15 Leyes y recuperaciones del no conductor.	45
Figura N° 4. 16 Leyes y recuperaciones del no conductor no magnético.....	46
Figura N° 4. 17 Leyes y recuperaciones del no conductor magnético.....	46
Figura N° 4. 18 Leyes y recuperaciones del conductor no magnético.....	47
Figura N° 4. 19 Leyes y recuperaciones del conductor magnético.....	47
Figura N° 4. 20 Muestra del Float.....	48
Figura N° 4. 21 Imágenes emitidas por el haz de electrones en la muestra.....	49
Figura N° 4. 22 Muestra Sink.	50

Figura N° 4. 23 Imágenes emitidas por el haz de electrones en la muestra.	50
Figura N° 4. 24 Muestra analizada en el equipo SEM del magnético conductor.	51
Figura N° 4. 26 Muestra analizada en el equipo SEM del no magnético conductor.	52
Figura N° 4. 27 Imágenes emitidas por el haz de electrones en la muestra.	53
Figura N° 4. 28 Muestra analizada en el equipo SEM del magnético no conductor.	54
Figura N° 4. 30 Imágenes emitidas por el haz de electrones en la muestra.	55
Figura N° 4. 31 Muestra analizada en el equipo SEM del no magnético no conductor. .	55
Figura N° 4. 32 Muestra cabeza inicial de las arenas de playa las Salinas.	56
Figura N° 4. 33 Muestra del no magnético.	56
Figura N° 4. 34 Muestra del magnético.	56
Figura N° 4. 37 Muestra de concentrado	57
Figura N° 4. 35 Muestra de flotado.	57
Figura N° 4. 36 Muestra del sink.	57
Figura N° 4. 38 Muestra del relave.	57
Figura N° 4. 40 Magnetita no conductor.	57
Figura N° 4. 39 Muestra del no conductor.	57
Figura N° 4. 41 Muestra del conductor.	58
Figura N° 4. 42 Magnetita del conductor.	58
Figura N° 4. 43 No conductor magnético.	58
Figura N° 4. 44 No conductor no magnético.	58
Figura N° 4. 45 Conductor magnético.	58
Figura N° 4. 46 Conductor no magnético.	58
Figura N° 4. 47 Difracción de rayos x a la muestra del float.	59
Figura N° 4. 48 Difracción de rayos x a la muestra del sink	60
Figura N° 4. 49 Gráfico de los análisis granulométricos de la concentración gravimétrica de las arenas de playa las Salinas.	61
Figura N° 4. 50 Gráfico de los análisis granulométricos de proceso de molienda	62
Figura N° 4. 51 Gráfico resumen de las densidades de la concentración gravimétrica. ..	63
Figura N° 4. 52 Leyes y recuperaciones del concentrado mesa.	64
Figura N° 4. 53 Leyes y recuperaciones del mixto mesa.	64
Figura N° 4. 54 Leyes y recuperaciones de la muestra de relave mesa	65
Figura N° 4. 55 Leyes y recuperaciones de la muestra de las lamas mesa	66
Figura N° 4. 56 Leyes y recuperaciones de la muestra de concentrado magnético	67

Figura N° 4. 57 Leyes y recuperaciones de la muestra de relave no magnético.....	67
Figura N° 4. 58 Leyes y recuperaciones de la muestra de sink.	68
Figura N° 4. 59 Leyes y recuperaciones de la muestra del float.....	69
Figura N° 4. 60 Leyes y recuperaciones de la muestra del no conductor.	70
Figura N° 4. 61 Leyes y recuperaciones de la muestra del conductor.	70
Figura N° 4. 62 Leyes y recuperación de la muestra no conductor magnético.....	71
Figura N° 4. 63 Leyes y recuperaciones de la muestra no conductor no magnético	72
Figura N° 4. 64 Leyes y recuperaciones de la muestra conductor magnético.	73
Figura N° 4. 65 Leyes y recuperaciones de la muestra conductor no magnético	73
Figura N° 4. 66 Composición mineralógica.....	75
Figura N° 4. 67 Ocurrencia de titanio	76
Figura N° 4. 68 ocurrencia del zircón	77
Figura N° 4. 69 Espectrometría de rayos x a los (Fe,Ti) óxidos.....	78
Figura N° 4. 70 Gráfico de tamaño de partículas respecto el porcentaje de masa.....	78
Figura N° 4. 71 Grafico acumulativo del tamaño de partícula respecto al porcentaje de masa.....	79
Figura N° 4. 72 Análisis de liberación de (Fe,Ti) óxidos por perímetro.	80
Figura N° 4. 73 Análisis de liberación de ilmenita por perímetro.	81
Figura N° 4. 74 Análisis de liberación de titanomagnetita por perímetro.	82
Figura N° 4. 75 Análisis de liberación de titanita por perímetro.	83
Figura N° 4. 76 Análisis de liberación de zircón por perímetro.	84
Figura N° 4. 77 Análisis de liberación de rutilo/anatasa por perímetro.....	85

Índice de tablas

Tabla 2. 1	Minerales comunes en las arenas, sus propiedades físicas y químicas.	12
Tabla 2. 2	Usos de cada elemento del grupo de las tierras raras.	18
Tabla 2. 3	Principales minerales de mena de REE.	19
Tabla 2. 4	Intensidad magnética requerida en la separación magnética.	22
Tabla 2. 5	Tipos de separadores magnéticos.	23
Tabla 2. 6	Tipos de medios densos.	25
Tabla 2. 7	Tipos de jigs.	26
Tabla 2. 8	Tipos de escurrimientos en la separación por corrientes longitudinales.	26
Tabla 4. 1	Análisis químico realizado a la cabeza inicial de las arenas.	37
Tabla 4. 2	Tabla resumen del peso específico de cabeza.	38

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo caracterizar y concentrar los minerales densos contenidos en las arenas de playa las Salinas de la Región de Atacama mediante diferentes procesos metalúrgicos. Una vez homogenizada la muestra de alrededor de 230 kilos del sector, esta se caracterizó granulométrica, química y mineralógicamente. El análisis granulométrico indicó un d_{50} de 237 μm , un d_{80} de 347 μm y un peso específico de 2,8 kg/L. El análisis mineralógico mostró que los principales constituyentes son cuarzo, calcita, silicatos, magnetita, hematita, ilmenita, rutilo, zirconita, monacita. El análisis químico de la alimentación indicó que tiene una ley de hierro del 8,6%, TiO_2 del 2%. Las muestras fueron sometidas a dos etapas de concentración; la primera etapa consistió en una concentración magnética de baja intensidad en seco, obteniéndose dos productos: un magnético con una ley de Fe 31,14% y de TiO_2 de 6,14%, con recuperaciones de 49% y 41,8% respectivamente y un no magnético con una ley de Fe de 5,1% y de TiO_2 de 1,3% con recuperaciones de 51% y 58,2% respectivamente. Una fracción del material no magnético fue concentrada mediante separación de medios densos utilizando el bromoformo de densidad de 2,9 kg/ L. La otra fracción del no magnético fue concentrada a través de la mesa Wilfley obteniéndose un concentrado que posee una ley de Fe de 14,9% y de TiO_2 de 2,3% con recuperaciones de 67,2% y 12% respectivamente, y el relave con una ley de Fe de 3,9% y de TiO_2 de 9,2%. El concentrado de la mesa fue tratado por separación electrostática de alta tensión, y los productos obtenidos, conductor el cual posee una ley de Fe de 45,8% y de TiO_2 de 4% con recuperaciones de 87,6% y 62,8% respectivamente y el no conductor con una ley de Fe de 9,7% y de TiO_2 de 3,5%. Los productos de la separación electrostática fueron sometidos a una separación magnética de alta intensidad. La segunda etapa concentración la arena fue sometida a separación gravimétrica en la mesa Wilfley obteniéndose un concentrado con una ley de Fe de 35,8% y de TiO_2 de 8,6% con recuperaciones de 79,5% y 70,6% respectivamente. Se observó que en el concentrado los elementos de interés se encontraban no liberados para lo cual fue sometido a molienda obteniéndose un d_{80} de 128 μm y un d_{50} de 95 μm . Este concentrado molido fue sometido a concentración magnética de baja intensidad en húmedo, obteniendo un concentrado magnético con una ley de Fe de 56,6% y de TiO_2 de 8,1% con recuperaciones de 39,3% y 23,4% respectivamente. El relave no magnético fue sometido a separación de medios densos. Otra fracción del material no magnético fue concentrado mediante separador electrostático de alta tensión donde se obtuvieron dos productos, conductor con una ley de Fe de 47,2% y de TiO_2 de 12,7% con recuperaciones de 6,4% y 5,7% respectivamente y el no conductor con una ley de Fe de 28,1% y de TiO_2 de 8,6% con recuperaciones de 93,6% y 94,3% respectivamente. Ambos productos fueron sometidos a separación magnética de alta intensidad. El concentrado magnético obtenido con una ley de Fe 49,5% y de TiO_2 13% con una recuperación del 3,7% y 2,9% respectivamente y no magnético con una ley de Fe 17,1% y TiO_2 del 5,6%. Del material no conductor se obtuvieron dos productos el magnético con una ley de Fe 28,6% y TiO_2 del 8,6% con recuperaciones del 94,8% y 93,5% respectivamente y un no magnético con leyes de Fe del 14,6% y TiO_2 de 5,6%. Ambas etapas son viables para el tratamiento de las arenas de playa Las Salinas.

Abstract

The present work aims to characterize and concentrate the dense minerals contained in the beach sands of the Salinas of the Atacama Region through different metallurgical processes. Once the sample of around 230 kilos from the sector was homogenized, it was characterized granulometrically, chemically, and mineralogically. The particle size analysis indicated a d50 of 237 μm , a d80 of 347 μm and a specific gravity of 2,8 kg/L. Mineralogical analysis showed that the main constituents are quartz, calcite, silicates, magnetite, hematite, ilmenite, rutile, zirconite and monazite. Chemical analysis of the feed indicated that it has an iron grade of 8,6% and TiO_2 of 2%. The samples were subjected to two stages of concentration; the first stage consisted of a dry low-intensity magnetic concentration, obtaining two products: a magnetic with a grade of Fe 31,1% and TiO_2 of 6,1%, with recoveries of 49% and 41,8%, respectively and a non-magnetic with a grade of Fe of 5,1% and TiO_2 of 1,3% with recoveries of 51% and 58,2 %, respectively. A fraction of the non-magnetic material was concentrated by dense media separation of using a bromoform density of 2,9 kg/L. The other non-magnetic fraction of the was concentrated through the Wilfley table, obtaining a concentrate with a Fe grade of 14,9% and TiO_2 of 2,3% with recoveries of 67,2% and 12%, respectively. Besides tailings with a Fe grade of 3,9% and TiO_2 of 9,2%. The table concentrate was treated by electrostatic separation of high obtaining a conductive with a Fe grade of 45,8% and TiO_2 of 4% with recoveries of 87,6% and 62,8% respectively. Besides a non-conductive with a Fe grade of 9,7% and TiO_2 of 3,5%. The products of electrostatic separation were subjected to high-intensity magnetic separation. In the second stage concentration the sand was subjected to gravimetric separation through the Wilfley table, obtaining a concentrate with a grade of Fe of 35,8% and TiO_2 of 8,6% with recoveries of 79,5% and 70,6%, respectively. It was observed that in the concentrate the elements of interest were not released, for which it was subjected to grinding, obtaining a d80 of 128 μm and a d50 of 95 μm . This ground concentrate was subjected to wet low-intensity magnetic concentration, obtaining a magnetic concentrate with a Fe grade of 56,6% and TiO_2 of 8,1% with recoveries of 39,3% and 23,4%, respectively. The non-magnetic tailings were subjected to separation of dense media. Another fraction of the non-magnetic material was concentrated by means of a high voltage electrostatic separator where two products were obtained: a conductive with a Fe grade of 47,2% and TiO_2 of 12,7% with recoveries of 6,4% and 5,7%, respectively, and non-conductive with a Fe grade of 28,1% and TiO_2 of 8,6% with recoveries of 93,6% and 94,3%, respectively. Both products were subjected to high-intensity magnetic separation. The magnetic concentrate obtained with a grade of Fe 49,5% and TiO_2 of 13% with a recovery of 3,7% and 2,9%, respectively. Besides a non-magnetic with a grade of Fe 17,1% and TiO_2 of 5,6%. Furthermore, two products were obtained from the non-conductive material: magnetic with a Fe grade of 28,6% and TiO_2 of 8,6% with recoveries of 94,8% and 93,5%, respectively. Besides a non-magnetic with Fe grades of 14,6% and TiO_2 of 5,6%. Both stages are viable for the treatment of Las Salinas beach sands.

CAPÍTULO I. Marco introductorio

1.1 Aspectos generales.

La prospección es un método excepcional para la búsqueda de minerales de interés económico, como los minerales densos de elevada resistencia fisicoquímica. Entre ellos son de interés los metales preciosos (oro, plata y platinoides), gemas (diamante, rubíes, zafiros, esmeraldas, aguamarinas, etc.), metales de base como el estaño (casiteritas), minerales tecnológicos como el titanio (ilmenitas y rutilos), wólfram (volframita y scheelita), zirconio (zircón) y las tierras raras (monacitas).

En esta prospección podemos encontrar las arenas de playa que son sedimentos que provienen de la descomposición y de la erosión de las rocas a lo largo de miles de años; el movimiento de las corrientes marítimas se ha encargado de reunir en algunas de las playas los minerales más pesados como la ilmenita, rutilo, monacita y el zircón.

El crecimiento en la demanda de estos minerales contenidos en arenas se debe a su amplia utilidad en distintos campos de la industria. Por ejemplo, el titanio debido a sus propiedades mecánicas es requerido en la industria aeronáutica y aeroespacial; el zircón su aplicación más importante se encuentra en la industria de la cerámica en la producción de opacificantes, utilizado en esmaltes superficiales y pigmentos. Por último, tenemos las tierras raras que son considerados elementos estratégicos por sus diversas aplicaciones, las cuales se relacionan a las tecnologías modernas como la óptica, iluminación, pantallas LED, imanes permanentes y baterías portátiles.

En base a las características de estos minerales densos se puede estimar que proceso se debe aplicar para su concentración, se puede, observar el caso de la ilmenita que es un mineral débilmente magnético, entonces podemos concentrarla a través de un separador magnético. Para el caso de los otros minerales podemos utilizar separadores electrostáticos, separadores gravimétricos y también se puede aplicar el método de separación por medios densos.

Debido a la creciente demanda de estos elementos en las diversas industrias se ha buscado plantear un procedimiento que permita concentrar estos minerales densos presentes en las arenas de playas.

1.2 Planteamiento del problema.

Considerando la creciente demanda de los minerales que se encuentran en las arenas de playa y su importancia para la industria, se hace necesario realizar una caracterización y posterior concentración de los minerales densos contenidos en las arenas de playa las Salinas.

1.3 Objetivos.

1.3.1 Objetivos generales.

Desarrollar un procedimiento para caracterizar y concentrar los minerales densos contenidos en las arenas de playa las Salinas.

1.3.2 Objetivos específicos.

- Caracterizar la arena de playa las Salinas de forma: química, granulométrica y mineralógicamente.
- Concentrar magnéticamente las arenas de playa.
- Separar por medios densos la fracción no magnética de las arenas.
- Concentrar gravimétricamente las arenas de playa.
- Concentrar electrostáticamente las arenas de playa.
- Realizar análisis químico a cada fracción producida en los procesos de concentración.
- Analizar los resultados obtenidos.

CAPÍTULO II. Marco teórico.

2.1 Arena de playas.

Las arenas de playa están conformadas por sedimentos que provienen de la descomposición y de la erosión de las rocas a lo largo de miles de años. El enigma, sin embargo, es saber cómo estos sedimentos llegaron a la playa. Se estima que estos fueron transportados por los vientos y depositados en la playa; como también pudieron ser ocasionados por las ondas y corrientes marítimas, sin embargo, este movimiento se encargó de reunir en algunas de las playas los minerales más pesados como ilmenita y rutilo usados para la producción de pigmentos; el zirconio que abastece la industria siderúrgica y la monacita, empleada en la confección de catalizadores (Girardi, 2017). En la tabla 2.1 se pueden apreciar algunos de los minerales presentes en las arenas de playa.

Tabla 2. 1 Minerales comunes en las arenas, sus propiedades físicas y químicas.

Mineral	Valioso	Susceptibilidad magnética	Conductividad eléctrica	Densidad kg/L	Fórmula química
Ilmenita	Si	Alto	Alto	4.5-5.0	FeTiO ₃
Rutilo	Si	Bajo	Alto	4.2-4.3	TiO ₂
Zircón	Si	Bajo	Bajo	4.7	ZrSiO ₄
Leucóxeno	Si	Semi	Alto	3.5-4.1	Fe.TiO ₃ .TiO ₂
Monacita	No	Semi	Bajo	4.9-5.3	(Ce, La, Th, Nd, Y)PO ₄
Estaurolita	No	Semi	Bajo	3.6-3.8	Fe ₂ Al ₉ Si ₄ O ₂₂ .(O H) ₂
Cianita	No	Bajo	Bajo	3.6-3.7	Al ₂ SiO ₅
Granate	No	Semi	Bajo	3.4-4.2	(Fe,Mn,Ca) ₃ .Al ₂ (SiO ₄) ₃
Cuarzo	No	Bajo	Bajo	2.7	SiO ₂

(Jones, 2015)

Para el tratamiento de las arenas de playas, la industria plantea utilizar la separación magnética de alta intensidad, la cual se utiliza para concentrar minerales paramagnéticos. En algunas operaciones de planta, se emplea la separación magnética en seco, particularmente para recuperar minerales que contienen titanio, como la ilmenita y

el leucoxeno, a partir de concentrados de minerales pesados (Premaratne & Rowson, 2003).

Cuando nos fijamos en las arenas se puede observar una mezcla de minerales. Su color nos permite identificar si hay una mayor presencia de minerales pesados o de livianos, es decir, las arenas más oscuras entre un tono rojizo y negro tiende a indicar una mayor presencia de elementos pesados. En el caso de las arenas más claras representan elementos más leves.

El valor económico de los depósitos de arena de playa depende no solo de la aptitud del mineral para la separación, sino también del proceso que está controlado por las características mineralógicas del depósito (Premaratne & Rowson, 2003).

2.1.1 Playa Las Salinas.

Se encuentra ubicada en la región de Atacama más específicamente en el sector de Puerto Viejo. Esta playa se sitúa en la desembocadura del río Copiapó y es considerada una joya ecológica, debido a la influencia de agua salada y la acumulación de agua formando un ecosistema especializado a un ambiente salobre. (Griem, 2010)



Figura N°2. 1 Sector Puerto Viejo desembocadura del valle Copiapó. (Griem, 2010)

2.2 Minerales Densos.

En la naturaleza la concentración de los minerales pesados se produce por la pérdida de la energía de la corriente que transporta (rio, mar, viento), lo que permite el depósito de minerales pesados en los sitios más propicios (Valderrama, et al., 2013).

Se entiende como minerales densos a aquellos granos de minerales que se encuentran normalmente en rocas ígneas y metamórficas, cuya densidad es superior a 2,85 kg/L, mayor que la del cuarzo (2,7 kg/L) y la de los feldespatos (2,56 kg/L a 2,76 kg/L) (Valderrama, et al., 2013).

2.2.1 Titanio.

El titanio es un elemento abundante en la corteza terrestre, siendo excedido sólo por otros ocho elementos (O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K y Mg). Existen numerosos minerales de titanio, sin embargo, sólo unos pocos están en volúmenes y concentraciones explotables económicamente. Es poco reactivo a temperatura ambiente, pero cuando es calentado forma compuestos estables, duros y refractarios. El titanio es resistente a la mayoría de los ácidos orgánicos, al ácido clorhídrico y sulfúrico diluidos, a los gases y soluciones que contengan cloro. Debido a sus propiedades como la densidad, elevada tenacidad, elevado punto de fusión, gran resistencia a la corrosión, elevada resistencia mecánica, estabilidad térmica, elevada blancura, es utilizado en diversas aplicaciones, desde la fabricación de turbinas para aviones supersónicos hasta prótesis dentarias. Por estas razones el titanio se considera un metal de gran importancia estratégica (Valderrama, Poblete, & Contreras, 2017).

Se encuentran en meteoritos, rocas lunares y en la corteza terrestre combinado generalmente con oxígeno y hierro. Dentro de los principales minerales económicamente importantes que contiene titanio son la ilmenita (FeTiO_3), el rutilo (TiO_2), la anatasa (TiO_2) y la brookita (TiO_2), a pesar de tener la misma fórmula química estos difieren en su estructura cristalina. También se encuentra el leucoxeno el cual es un producto de la oxidación de la ilmenita y está compuesto de rutilo finamente cristalino (Premaratne & Rowson, 2003).

La producción de titanio es obtenida a partir de depósitos primarios o secundarios. En los depósitos primarios, el rutilo se encuentra en concentraciones económicamente escaso, en el caso de los depósitos secundarios lo ubicamos en forma de placeres, localizados en áreas de playas o próxima a las mismas. En estos placeres el cuarzo es el mineral predominante, además puede contener los minerales de ilmenita, rutilo y otros minerales de interés económico como circonita y monacita. En ambos tipos de depósito,

la ilmenita es siempre más común que el rutilo, siendo estas las reservas a nivel mundial mucho más grandes que las del rutilo.

Su principal uso del titanio es en la fabricación de pigmentos, donde se usa en la forma de dióxido de titanio finamente pulverizado. También es ampliamente usado en la industria del papel, del caucho y plásticos. La elevada resistencia mecánica, baja densidad y excelente resistencia a la corrosión son las principales propiedades que hacen que el titanio y sus aleaciones sean materiales atractivos en diversas industrias como aeronáutica y aeroespacial. Su uso es también bastante difundido en intercambiadores de calor, en cañerías, en la construcción de barcos y submarinos. Un uso de especial y creciente interés se encuentra en la cirugía de huesos, debido tanto a su bajo peso como a su fuerza y especialmente a su completa resistencia a los fluidos corporales. (Arrazola, et al., 2013)

A lo largo de toda la costa de Chile existen enormes volúmenes de arenas de playa y de dunas que contienen arenas negras, entre las cuales están siempre presentes minerales de titanio, preponderantemente en forma de ilmenita, aunque se encuentran también cantidades de rutilo. En parte la ilmenita está íntimamente ligada a la magnetita, lo que impide obtener concentrados de alta ley de TiO_2 por separación gravitacional y magnética.

2.2.2 Zircón.

El zircón es el mineral más antiguo conocido en la tierra y uno de los más abundantes en la corteza terrestre. Pertenece al grupo de los nesosilicatos, es un mineral denso (4.6-4.8 kg/L), duro (7.5 en la escala de Mohs) y además de fácil fractura. Es un constituyente de las arenas de playa como el rutilo (TiO_2). Estos minerales se separan entre sí por métodos magnéticos o electrostáticos (Gilchrist, 1989).

Se extrae en Camboya, Nigeria, Sri Lanka, Myanmar, Tanzania, Australia, Sudáfrica, Estados Unidos y Francia. La variedad del zircón conocida como Kaduna, de Nigeria, muestra un color amarillo intenso. Mientras, el zircón Ratanak Kiri, de Camboya, es famoso en el mundo por sus extraordinarios ejemplares azules. Las arenas de playa de Australia proveen más de la mitad de las necesidades mundiales de Zr. Su importancia va en aumento debido a su alta demanda y el aumento de los precios en los últimos años; además se han descubierto provincias de zircón con una ley mayor (Jones, 2015).

La aplicación más importante del zircón se encuentra en la industria de la cerámica en la producción de opacificantes, utilizado en esmaltes superficiales y pigmentos. Antes de la década de 1980, las aplicaciones refractarias eran el uso más común del zircón, en la fabricación de ladrillos refractarios y también fue utilizado en la industria de los aceros y vidrios. Debido a los suministros limitados y los altos precios del zircón a fines de la década de 1980 obligaron a las siderúrgicas a cambiar a materiales refractarios alternativos (Jones, 2015). Las arenas y los finos de zircón se usan ampliamente para fabricar ladrillos refractarios con la adición de magnesia o alúmina en las industrias del vidrio debido a su alta resistencia al ataque por arrastre de lotes y al ataque de sulfato en regeneradores u hornos de tanque. La alúmina de zircón es el refractario más buscado para la fundición de vidrio. Además, estos refractarios se encuentran en aplicaciones de las industrias del cemento debido a sus propiedades térmicas y termomecánicas.

Por sí solo el zircón es un mineral con potencial para la fundición de refractario en las industrias del hierro y el acero por su resistencia superior a la abrasión, la erosión, la estabilidad de alto volumen y el desconchado térmico (Routray, Padhi, & Bera, 2014).

Debido a su alto punto de fusión de 2420 °C, el Zircón se utiliza como arena de fundición en moldes. Particularmente en aplicaciones de temperatura altas donde se mantiene la calidad de la superficie del casting (Jones, 2015).

También se utiliza para la producción de circonio, metal de circonio y productos químicos de circonio. Estos son aplicaciones de alto valor y en crecimiento para las cuales el consumo total del zircón se está volviendo significativo.

2.2.3 Tierras raras.

Las tierras raras se encuentran conformados por 17 elementos químicos de la tabla periódica, 15 de ellos pertenecen al grupo de los lantánidos, además del itrio y el escandio. Estos elementos son poco comunes de encontrarse en concentraciones suficientes para que la extracción sea económicamente viable. En caso del cerio (Ce), lantano (La) y neodimio (Nd) son más abundantes que el plomo (Pb) en la corteza y todas las tierras raras con excepción del prometio (Pm) que es el elemento más escaso del grupo, son más abundantes que cualquiera de metales preciosos (Au, Ag, Rh, Pd y Pt) o el mercurio (Hg).

El prometio (Pm) se produce artificialmente como subproducto de las reacciones de fusión de uranio (COCHILCO, 2016).

Las REE aparecen juntos en la naturaleza ya que tienen propiedades físico químicas similares: todos son iones trivalentes con excepción del Ce^{+4} y el Eu^{+2} que tienen radios iónicos similares. Esta similitud permite la sustitución de las REE ente sí en varias redes cristalinas, por esto se presentan múltiples elementos de este grupo en un mismo mineral. Este conjunto de elementos químicos tiene propiedades magnéticas, ópticas, conductivas, específicas que los hacen únicos, y por lo mismo tan requeridos por la industria.

Las principales potencias mundiales consideran estos elementos como estratégicos por sus diversas aplicaciones, las cuales se relacionan a las tecnologías modernas como la óptica, iluminación, pantallas LED, imanes permanentes y baterías portátiles. También se utilizan como catalizador en los procesos de refinamiento de petróleo, en la fabricación de cerámicas y en la industria militar. Los óxidos de tierras raras (REOs) más demandados son el neodimio, praseodimio y disprosio para la confección de imanes permanentes usados en los generadores de turbinas eólicas (COCHILCO, 2016). En la tabla 2.2 se presentan los principales usos de los elementos de tierras raras.

Tabla 2. 2 Usos de cada elemento del grupo de las tierras raras.

Elemento	Aplicaciones
Escandio	Aleaciones metálicas para la industria aeroespacial, para equipos deportivos y equipos de defensa.
Itrio	Cerámicas, aleaciones metálicas, láseres, eficiencia de combustibles, comunicación por microondas para industria de satélites, televisión de color, monitores de ordenador, sensores de temperatura.
lantano	Baterías, catalizadores en refinación de petróleo, baterías de vehículos eléctricos, cámaras digitales de alta tecnología, cámaras de video, baterías de portátiles, películas de rayos X, láseres.
Cerio	Catalizadores, aleaciones de metales, pulido (de vidrio, espejos, placas frontales de televisión, cristales ópticos, microprocesadores de silicio, lentes), baterías.
Praseodimio	Mejora resistencia a la corrosión de imanes, pigmento, reflectores, lentes para señales de aeropuertos, filtros fotográficos
Neodimio	Imanes de alta potencia para ordenadores portátiles, motores de vehículos híbridos, generadores de turbinas de viento; láseres; catalizadores para fracturamiento hidráulico, pulido de vidrios.
Prometio	Fuente de radiación beta, catalizadores para fracturamiento hidráulico.
Samario	Imanes de alta temperatura, barras de control de reactores.
Europio	LCDs, luces fluorescentes, aditivos para el vidrio.
Gadolinio	Agente de contrastes para formación de imágenes por resonancia magnética, aditivo para vidrios
Terbio	Baterías, fósforos para tubos de TV y lámparas fluorescentes.
Disprosio	Imanes de alta potencia, láseres, baterías.
Holmio	Imanes más poderosos conocidos.
Erbio	Láseres, colorante de vidrio.
Tulio	Imanes de alta potencia
Yterbio	Tecnología de fibra óptica, paneles solares, aleaciones metálicas (acero inoxidable), láseres, fuente de radiación para unidades de rayos X portátiles
Lutecio	Fósforo de rayos X.

(COCHILCO, 2016)

Los elementos de tierras raras no se presentan en la naturaleza como elementos nativos, como ocurre en otros metales, en cambio, se presentan como componentes, menores o mayores, de ciertos minerales.

El itrio ocurre típicamente en yacimientos con concentraciones económicas junto con los lantánidos mientras que el escandio, pese a ser químicamente similar a los lantánidos y frecuentemente presentarse en los depósitos de tierras raras, sus concentraciones económicas se generan en condiciones geológicas diferentes a los yacimientos de itrio y lantánidos (COCHILCO, 2016).

Tabla 2. 3 Principales minerales de mena de REE.

Grupo	Mineral	Fórmula química
Carbonatos	Bastnasita	(Ce, La) (CO ₃)F
	Parisita	Ca (Ce,La) ₂ (CO ₃) ₃ F ₂
	Cebaita	Ba ₃ (Ce,Nd) ₂ (CO ₃) ₅ F ₂
	Huanghoita	Ba (Ce, La, Nb) (CO ₃) ₂ F
Fosfatos	Monacita	(Ce, La, Nd, Th) PO ₄
	Xenotima	YPO ₄
	Apatito	Ca ₅ (Po ₄) ₃ (F,Cl,OH)
Silicatos	Cerita	(Ce,Ca) ₉ (Mg,Fe)(SiO ₄) ₃ (HSiO ₄) ₄ (OH) ₃
	Gadolinita	(Ce, La, Nd, Y) ₂ FeBe ₂ [O SiO ₄] ₂
	Allanita	(Ca,Ln) ₂ (Al,Fe) ₃ (SiO ₄) ₃ (OH)
Óxidos	Euxenita	(Ln,Ca,U,Th)(Nb,Ta,Ti) ₂ O ₆
	Loparita	(Na,Ce,Ca,Sr,Th)(Ti,Nb,Fe)O ₃

(COCHILCO, 2016)

China posee el 85% de la producción global de REOs. Este país tiene una marcada ventaja en el mercado gracias a su contexto geológico, ya que cuenta con los mayores yacimientos conocidos en el mundo y, también, gracias a su fuerte desarrollo de tecnologías de procesamiento de REE y como el desarrollo de productos, esto permite que en el país se lleven a cabo todas las etapas de la cadena de valor.

Las mayores reservas de tierras raras de acuerdo con el servicio geológico de estados unidos se encuentran China, el 83% de las reservas se encuentran en Bayan Obo,

Mongolia Interior, seguido de las provincias de Sishuan y Shandong (Maouniuping y Xishang) con un 10% y los depósitos de arcillas del sur de China con un 3%.

El procesamiento de ETR o en inglés rare earth elements (REE) (Elementos de tierras raras), por lo general consume altas cantidades de agua, energía y diferentes reactivos químicos, ya que al extraerlas se realizan en diversos pasos, los cuales requieren una constante adicción de reactivos, a su vez los procesos pueden provocar emisiones de metales pesados, elementos radioactivos afectando el medio ambiente. La gran demanda de estos elementos creada por la necesidad del desarrollo tecnológico y el requerimiento de productos de tierras raras de alta pureza. (Pavez, 2020)

Los metales pesados y elementos radioactivos asociados con los relaves ETR representan la mayor amenaza para la salud humana y el medio ambiente cuando no se controlan. Sin embargo, la adopción de nuevas tecnologías y procesos de gestión muestran potencial para reducir el riesgo de contaminación ambiental (EPA, 2012). Para cada mineral que contenga tierras raras tiene un proceso diferente, sin embargo, en general consta de una etapa de concentración, continuando con la formación de óxidos de tierras raras, la cuales pueden ser comercializados como óxidos o finalmente pasar a la etapa de procesamiento en la que se pueden obtener metales de alta pureza de ETR (COCHILCO, 2016).

2.3 Concentración de minerales.

La concentración de minerales es la operación en la cual se eleva en porcentaje la concentración de una mena o mineral determinado, mediante el uso de equipos de separación, produciéndose así la segregación de dos o más especies mineralógicas y generar una corriente enriquecida en un mineral de interés. Se pueden implementar dos métodos de separación. (Bustamante, Gaviria, & Restrepo, 2007)

- Métodos que emplean diferentes propiedades físicas o volumétricas de los minerales.

Estos métodos se caracterizan por ser fuertemente dependientes del tamaño de partícula y las propiedades diferenciales que generan la separación, las cuales son:

- Diferencia de velocidad de sedimentación, a través de la diferencia de densidad de los sólidos (Concentración gravimétrica).

- Diferencias de movimiento en un campo magnético de intensidad variable, a través de la diferencia de la susceptibilidad magnética de los minerales (Concentración magnética).
- Quedarse adherido o saltar de una placa metálica, por diferencias en la conductividad eléctrica cuando las partículas estén dentro de un campo eléctrico (Concentración eléctrica).
- Métodos que utilizan propiedades físico- químicas de superficie, como
 - La adsorción o no de agua en la superficie del sólido, por lo tanto, los que adsorban agua se humectarán (hidrofílicos) y otros que no se humectan (hidrofóbicos).
 - Adsorción selectiva de un tensoactivo de tal manera que se produzca una aglomeración selectiva de un mineral o varios minerales y mantener dispersos a los demás minerales acompañantes; lo cual es muy útil cuando se procesan minerales de tamaños de grano ultrafinos (entre 10.0 y 1.0 μm) y coloidales (< 1.0 μm).

Para el tratamiento de las arenas de playas las Salinas se enfocó en los métodos que emplean diferentes propiedades físicas o volumétricas de los minerales. En los cuales encontramos la concentración magnética, electrostática y gravimétrica.

2.3.1 Concentración magnética.

Los separadores magnéticos aprovechan la diferencia de las propiedades magnéticas de los minerales. De este modo, se emplean para separar los minerales y obtener diferentes productos clasificados según su importancia comercial y de uso industrial. Todos los materiales se alteran al someterse a un campo magnético, aunque la mayor parte de las sustancias, el efecto es demasiado débil para detectarlo. (Pávez, 2005)

Todos los materiales se pueden clasificar atendiendo a sus propiedades magnéticas. Así tenemos:

Los minerales “paramagnéticos” se pueden concentrar en los separadores magnéticos de alta intensidad. Dentro de este grupo podemos encontrar a la ilmenita (FeTiO_3), rutilo (TiO_2), wolframita ($(\text{Fe},\text{Mn})\text{WO}_4$), monacita, siderita (FeCO_3), pirrotina

(FeS), cromita(FeCr_2O_4), hematita (Fe_2O_3) y minerales de manganeso. En la tabla 2.4 se presenta un listado de minerales y la intensidad magnética requerida para su separación.

Tabla 2. 4 Intensidad magnética requerida en la separación magnética.

Intensidad magnética requerida para la separación (T).	Mineral
0,05 – 0,50	Fuertemente magnéticos Magnetita, franklinita, leucita, silice, pirrotita
0,50-1,00	Moderadamente magnéticos Ilmenita, biotita, granate, wolframita
1,00- 1,80	Débilmente magnéticos Hematita, columbita, limonita, pirolusita, rodocrosita, siderita, magnanita
1,80-2,30	Pobrementemente magnéticos Rutilo, rodonita, dolomita, tantalita, cerusita, epidota, monacita, fergusonita, zircón, cerargirita, argentita, pirita, esfalerita, molibdenita, bornita, wilemita, tetraedrita, scheelita.

(Pávez, 2005)

Los minerales “diamagnéticos” que serán repelidos a lo largo de las líneas de fuerza magnética hasta aquellos puntos donde el campo magnético presenta su menor intensidad de campo. Estas sustancias no pueden ser concentradas magnéticamente.

Los minerales “ferromagnéticos” se pueden considerar como una categoría especial de los materiales paramagnéticos. Presentan muy altas susceptibilidades magnéticas dentro de un campo de fuerzas magnéticas, y conservan cierto magnetismo (magnetismo remanente) una vez que han sido puestos fuera del alcance del campo magnético. Este tipo de sustancias pueden concentrarse con el uso de separadores magnéticos de baja intensidad. El principal mineral ferromagnético que se concentra magnéticamente es la magnetita (Fe_3O_4), aunque la hematita (Fe_2O_3) y la siderita (FeCO_3) se les puede someter a procesos de tostación para convertirlos en magnetita y a partir de ahí obtener una buena separación.

En los separadores magnéticos pueden ser del tipo electroimanes o imanes permanentes. Los electroimanes utilizan vueltas de alambre de cobre o de aluminio alrededor de un núcleo de hierro dotado de energía con corriente directa. Los imanes permanentes no requieren de energía exterior, las aleaciones especiales de estos imanes continúan produciendo un campo magnético a un nivel constante en forma indefinida después de su carga inicial, a menos que sean expuestas a influencias desmagnetizadoras.

En la industria del procesamiento de minerales los imanes se emplean para retirar cualquier elemento metálico que pueda causar un daño a los equipos como en los chancadores, molinos, etc. Otra forma de emplearse es el de unidades separadoras y concentradoras de minerales según sus características de susceptibilidad magnética. En la tabla 2.5 nos muestra los tipos de separadores magnéticos existentes. (Pávez, 2005)

Tabla 2. 5 Tipos de separadores magnéticos.

Separador Magnético de Baja Intensidad	Separadores magnéticos de tambor
	Separadores magnéticos de banda cruzada (tipo Wetherill)
	Separadores de disco
Separador Magnético de Alta Intensidad	Separador magnético de tierras raras (tipo rodillo)
	Separador magnético de rodillo inducido
	Separador magnético de banda transversal
	Separador magnético WHIMS Jones
Separadores Magnéticos de Alto Gradiente	Separador magnético HGMS tipo carrusel de Metso Minerals
	Separador magnético HGMF cíclico de Metso Minerals
	Separador magnético SLon VPHGMS de Outotec
Separadores Magnéticos Superconductores	Separador magnético superconductor HGMS Cryofilter de Carpcó
	Separador magnético superconductor de gradiente abierto (OGMS)

2.3.2 Concentración electroestática.

La separación electroestática es aplicada como un proceso de concentración a solo a un pequeño número de minerales y está basada en que las partículas reciben una carga superficial al entrar a un campo electroestático, las partículas de este mineral serán repelidas por uno de los electrodos y atraídas hacia el otro, dependiendo del signo de la carga de las partículas. Generalmente la separación electroestática es combinada con la separación gravitacional y magnética para tratar minerales no sulfuros.

Gran parte de las aplicaciones de la separación electroestática ha sido en el procesamiento de arenas de playa y depósitos aluviales conteniendo minerales de titanio, como antecedente tenemos los depósitos tipo placer de Australia y EEUU en donde realizan la separación del rutilo y la ilmenita del zircón, también obtienen la monacita procesando los depósitos aluviales y la arenas de playa; la separación de la casiterita, la columbita y la ilmenita de la ganga en Malasia, Tailandia y Nigeria; la obtención de hematita especular limpia de fosforo y con bajo contenido de sílice en Canadá. (Pávez, 2005)

Como se mencionó anteriormente, las partículas pueden adquirir carga eléctrica por: contacto ente partículas no similares, bombardeos de iones y por inducción. Para la electrificación por contacto es un tipo de separación electroestática en la cual dos especies minerales no conductoras se ponen en contacto para favorecer que adquieran cargas eléctricas opuestas sobre su superficie. Una vez conseguido se hace pasar por un campo eléctrico donde estas podrán ser separadas.

Luego tenemos la electrificación por bombardeo iónico donde las partículas, conductoras y no conductoras, son cargadas debido al alto campo eléctrico producido por el electrodo de corona ionizado que genera un flujo de iones. La separación electrostática de cargado por corona, llamada separación por corona se puede aplicar para la separación de partículas con diferentes conductividades debido al fuerte campo eléctrico aplicado. (Pávez, 2005)

En los separadores de alta tensión la alimentación se realiza en el rotor (tambor rotatorio) conectado a tierra y entra al campo de un electrodo ionizado cargado. Las partículas alimentadas aceptan una carga por bombardeo de iones. Las partículas

conductoras pierden su carga en el rotor conectado a tierra y son lanzadas desde la superficie del rotor por la fuerza centrífuga, lejos de la superficie del rotor. Las partículas no conductoras no son capaces de disipar su carga rápidamente en el rotor, y de ese modo, son atraídas a la superficie del rotor. (Pávez, 2005)

Por último, tenemos la electrificación por inducción conductiva en presencia de un campo eléctrico se deposita una partícula sobre un conductor con puesta a tierra, en la partícula se desarrollará rápidamente una carga superficial por inducción. Tanto una partícula conductora como dieléctrica adquirirán una polarización superficial. Sin embargo, las partículas conductoras se convertirán en una superficie equipotencial (adquiriendo la polaridad y el potencial del tambor) casi instantáneamente por medio de su contacto con él. Mientras que una partícula no conductora la cara más alejada del tambor necesitará más tiempo para adquirir esa misma polaridad y potencial. Y por ello, este tipo de partícula dieléctrica permanecerá polarizada.

2.3.3 Concentración gravitacional.

La concentración gravitacional se define como la separación de dos o más especies de diferente peso específico, causada por el movimiento relativo en un medio acuoso, debido a la respuesta de los sólidos a las fuerzas gravitacionales, de arrastre y empuje.

Es uno de los métodos más sencillo y más económicos; el uso de este separador esta recomendado siempre que sea practicable porque permite la recuperación de mineral útil en un orden de tamaños tan gruesos como sea posible, reduciendo los costos inherentes a la reducción de tamaño y disminuyendo las perdidas asociadas a estas operaciones.

Los métodos de separación por gravedad se agrupan en tres categorías principales:

- Separación por medios densos: Las partículas se sumergen en un fluido de densidad intermedia, permitiendo que algunas floten y otras se hundan.

Tabla 2. 6 Tipos de medios densos.

Medios densos	Líquidos orgánicos
	Suspensión de sólidos
	Recuperación del medio denso

- Separación por corrientes verticales: En el aprovechan las diferencias entre las velocidades de sedimentación de las partículas pesadas y livianas, como es el caso del jig.

Tabla 2. 7 Tipos de jigs.

Jigs	Pistón
	Diafragma
	Pulsadores

- Separación en corrientes longitudinales: Al igual que las corrientes verticales aprovechan la velocidad de sedimentación de las partículas, como es el caso de mesas concentradoras y los separadores en espiral.

Tabla 2. 8 Tipos de escurrimientos en la separación por corrientes longitudinales.

Escurrecimiento Laminar	Mesas vibratorias
	Espirales
	Vanners
Escurrecimiento en Canaletas	Canaletas simples
	Canaletas estranguladas
	Concentrador de cono Reitchert

CAPÍTULO III. Metodología experimental.

En este capítulo se darán a conocer las metodologías utilizadas para el tratamiento de las arenas de playas de las Salinas.

3.1 Preparación de Muestras.

Para dar comienzo al desarrollo experimental, es necesario secar la muestras cuyo peso es alrededor de 232 kg de arena de playa las salinas en el horno y luego se realiza una limpieza de la muestra harneando a través de la malla 18 (1 mm) quedando una muestra aproximada de 230 kg, la cual tuvo que ser homogenizada para esto se necesitó trabajar en un área extensa ya que se debe depositar en su totalidad la muestra en el suelo, cabe mencionar que la superficie se debe encontrar totalmente limpia. Se comienza a distribuir el material en cuatro zonas a través de paladas de forma secuencial, para que quede distribuido homogéneamente en las cuatro zonas, al terminar estas vuelven a ser distribuidas a una zona a través de paladas. Esto se realiza a lo menos tres veces permitiendo así que el material tenga una mejor homogenización.

Terminada la homogenización se comienza el corte a través de cono y cuarteo, donde la muestra queda dividida en 4 secciones, en el cual se debe escoger las secciones más representativas; las secciones escogidas deben ser opuestas para obtener la muestra y un testigo.

Con la muestra obtenida se volvió a realizar lo mencionado anteriormente con el fin de obtener una muestra de alrededor de 61 kg. En primera instancia esta muestra debe ser homogenizada y cortada usando el cortador de rifle, el cual es considerado uno de los métodos más precisos y sencillos de utilizar; la muestra debe pasar al menos 4 veces por el cortador. Para que posteriormente cortar y obtener muestras de alrededor de 30 kg, 15 kg, 7 kg, 3 kg, 1 kg, 500 g y 250 g aproximadamente.

Se estima que se necesitaran aproximadamente 2 muestras para análisis granulométrico, 3 muestras con sus respectivos testigos para análisis químico y 3 muestras con sus testigos para la medición de peso específico. Todas las muestras deben ser de alrededor de 250 g aproximadamente.

3.2 Análisis Granulométrico.

Para el análisis granulométrico se deben preparar la serie de tamices establecidas, la cual se compone de 8 tamices los que corresponden para estos análisis granulométricos son las mallas 20, 30, 40, 50, 70, 100, 140, 200 ASTM. Los que deben ser limpiados antes de vaciar la muestra; utilizando las 2 muestras que se prepararon para este análisis , se ordena la serie de tamices desde la malla con mayor abertura hasta la menor, en el caso de que la serie de tamices sea mayor a la capacidad del ro-tap se debe realizar en dos partes, es por ello que se debe preparar el primer set de tamices considerando las mallas 20, 30, 40, 50 ASTM y el fondo, se vierte el material sobre la primera malla, se tapa el set de tamices para posteriormente ser llevado al ro-tap. La muestra debe ser tamizada por lo menos 8 minutos para material grueso. Al finalizar el tiempo de tamizaje se retira el set y las mallas deben ser separadas con sumo cuidado para evitar perder material y/o no generar que las partículas finas pasen a la siguiente malla, el fondo del set anterior corresponderá a la alimentación del segundo set de tamices los que corresponden a las mallas 70, 100, 140, 200 ASTM, en este caso deben ser tamizadas por 15 minutos para material fino y finalmente pesar el material retenido en cada una de las mallas. Se debe repetir el procedimiento en cada una de las muestras a analizar.



Figura N° 3. 1 Series de tamices en el ro-tap, modelo AS 200.

3.3 Análisis Químico.

Con el objetivo de estimar la composición del mineral a estudiar, en cada etapa del proceso se prepara una muestra para su análisis químico, considerando mineral de cabeza, concentrado magnético y no magnético, float y sink, concentrado y relave, conductor y no conductor. Antes de dirigirse al análisis químico las respectivas muestras deben ser pulverizadas a lo menos 25 s. Luego de esto son almacenadas en sobres para enviarse a su respectivo análisis.



Figura N° 3. 2 Muestras pulverizadas y almacenadas.

3.4 Preparación Metalográfica.

Con el fin de facilitar posteriores análisis, los polvos de ambas muestras (float, sink) obtenidos por pulverización serán montados en resina metalográfica conductora con base de grafito conductotherm 3.000, utilizando una fuerza de 900 daN a una temperatura de 170 °C durante 360 s y un tiempo de enfriamiento 180 °C según lo recomendado por fabricante.

Las briquetas obtenidas serán desbastadas utilizando una serie de lijas al agua de SiC (P800, P1000, P1200, P1500, P2000 y P2500). Posteriormente, las muestras serán pulidas en una pulidora marca Presi modelo Le cube, con un paño de algodón mediante el uso de abrasivo de suspensión de alúmina con granulometrías de 1 y 0,3 μm .

La caracterización microestructural de los polvos y pastillas se llevará a cabo mediante pruebas combinadas de MEB y EDS.

3.5 Peso Específico.

Para determinar la densidad del mineral, se pueden aplicar dos metodologías que son el Matraz de Le Chatelier y Picnometría, en cada caso se debe realizar 3 réplicas para ponderar una densidad del material con el fin de poder considerarla dentro de las condiciones operacionales de la investigación.

En este caso se aplicó el método del picnómetro para determinar la densidad de las siguientes muestras: cabeza inicial, concentrado magnético y no magnético, float y sink, concentrado y relave, conductor y no conductor, conductor magnético y conductor no magnético, no conductor magnético y no conductor no magnético.

3.5.1 Picnometría.

Es un instrumento utilizado para determinar con precisión la densidad de líquidos. La característica principal es mantener un volumen fijo al colocar diferentes líquidos en su interior. Esto nos permite comparar las densidades de dos líquidos pesando el picnómetro con cada líquido por separado y comparando sus masas. Para determinar la densidad se debe tener en consideración el peso del picnómetro seco, vacío y tapado (W_1), el peso del picnómetro más el mineral (W_2), el peso del picnómetro con el mineral más el agua destilada (W_3) y el picnómetro con agua destilada (W_4).

Finalmente, para el cálculo de la densidad será utilizada la siguiente ecuación:

$$\delta = \frac{(W_2 - W_1)}{(W_4 - W_1) - (W_3 - W_2)}, \quad \frac{\text{kg}}{\text{L}} \quad (2)$$

Para determinar el peso específico es necesario verificar que los picnómetros se encuentren limpios y secos, además que la muestra del mineral se encuentre pesada. En primera instancia se debe pesar el picnómetro seco, vacío y tapado (W_1), luego de esto con la ayuda de un embudo se agrega el mineral y este debe ser pesado obteniendo W_2 con la piseta se agrega el agua hasta $\frac{3}{4}$ de la capacidad del picnómetro para facilitar la remoción de las burbujas a través del ultrasonido con un tiempo de 490 s; al retirar el picnómetro del ultrasonido se debe agregar agua destilada hasta llenarlo, se debe secar el exterior con papel secante y luego se lleva a la balanza digital obteniendo W_3 . Ya para finalizar se vacía todo el contenido y se lava el picnómetro y se vuelve a llenar completamente de líquido, se seca exteriormente y se pesa obteniendo W_4 . Los datos

obtenidos deben ser aplicados en la ecuación 2, obteniendo así el peso específico del mineral. Este procedimiento se realizará para cada una de las muestras que requieren medición de su peso específico.

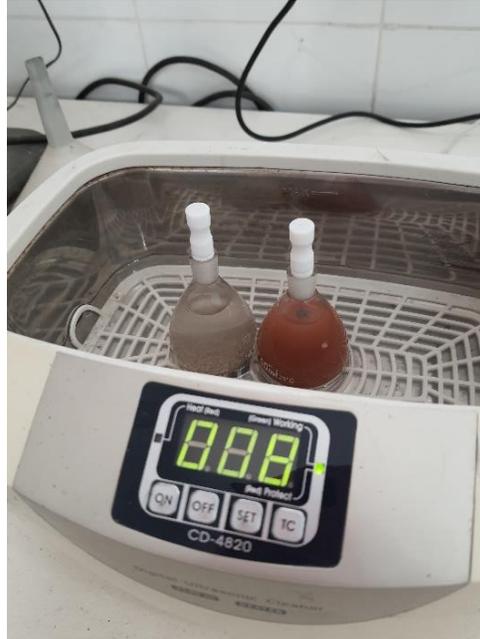


Figura N° 3. 3 Eliminación de burbuja en el ultrasonido, modelo CD-4820.

3.6. Diagramas de Flujos.

Para la concentración de las arenas de playa se utilizarán dos diagramas de flujos.

En la figura 3.4 se observa el diagrama de la primera etapa de concentración de las arenas de playa Las Salinas

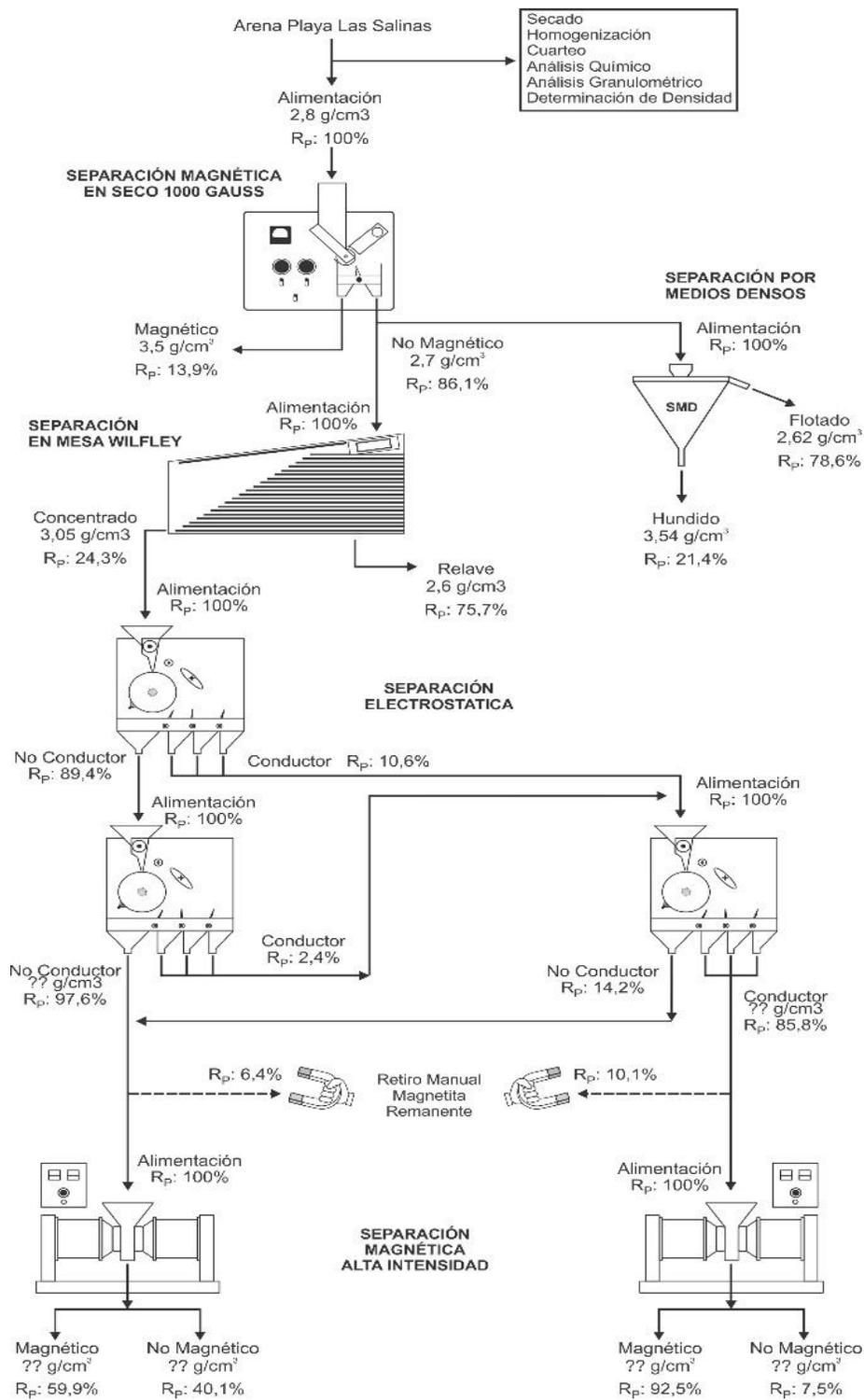


Figura N° 3. 4 Diagrama de concentración de la arena de playa las Salinas.

La primera etapa de concentración comienza con una separación magnética de baja intensidad en seco donde se utilizó una intensidad de campo de 0,06 T con una velocidad de rodillo de 100 rpm. Las partículas comienzan a separarse obteniéndose dos productos el magnético y no magnético. Al finalizar la separación la fracción no magnética es ingresada nuevamente al separador magnético cambiando la intensidad del campo a 1,2 T para así retirar en su totalidad la fracción magnética restante. Una fracción del no magnético es sometida a separación de medios densos, en el cual se debe utilizar una solución intermedia de bromoformo ($D=2,89$ kg/L); donde se deben obtener dos productos que es lo flotado (Float), la cual posee una menor densidad que el medio denso y la fracción de mayor densidad se hunde (Sink). La otra fracción del no magnético se debe concentrar en la mesa Wilfley bajo los siguientes parámetros: flujo de alimentación de 0,2 kg/min, agua de lavado de 6,5 L/min, longitud de 11 mm y un ángulo de inclinación de 6° , obteniéndose dos productos el concentrado y relave. El concentrado pasa por una concentración electrostática de alta tensión, los parámetros que se deben aplicar es una carga de 35 kV y una velocidad de tambor de 40 rpm, obteniéndose un conductor y un no conductor. Ambos productos se les debe realizar una separación magnética manual con un imán de 0,1T para retirar la magnetita remanente. Lo que queda de las muestras del conductor y no conductor son sometidas a una separación magnética de alta intensidad en húmedo donde se utilizan bolas de hierro de diámetro de $\frac{1}{2}$ " con un voltaje de 120 V, amperímetro de 1,9 A que generaran un campo de 0,6 T. A partir del conductor se obtuvieron el magnético y el no magnético. En el caso del no conductor también se obtuvo un magnético y no magnético.

En la figura 3.5 se presenta el diagrama de la segunda etapa de concentración de las arenas de playa Las Salinas

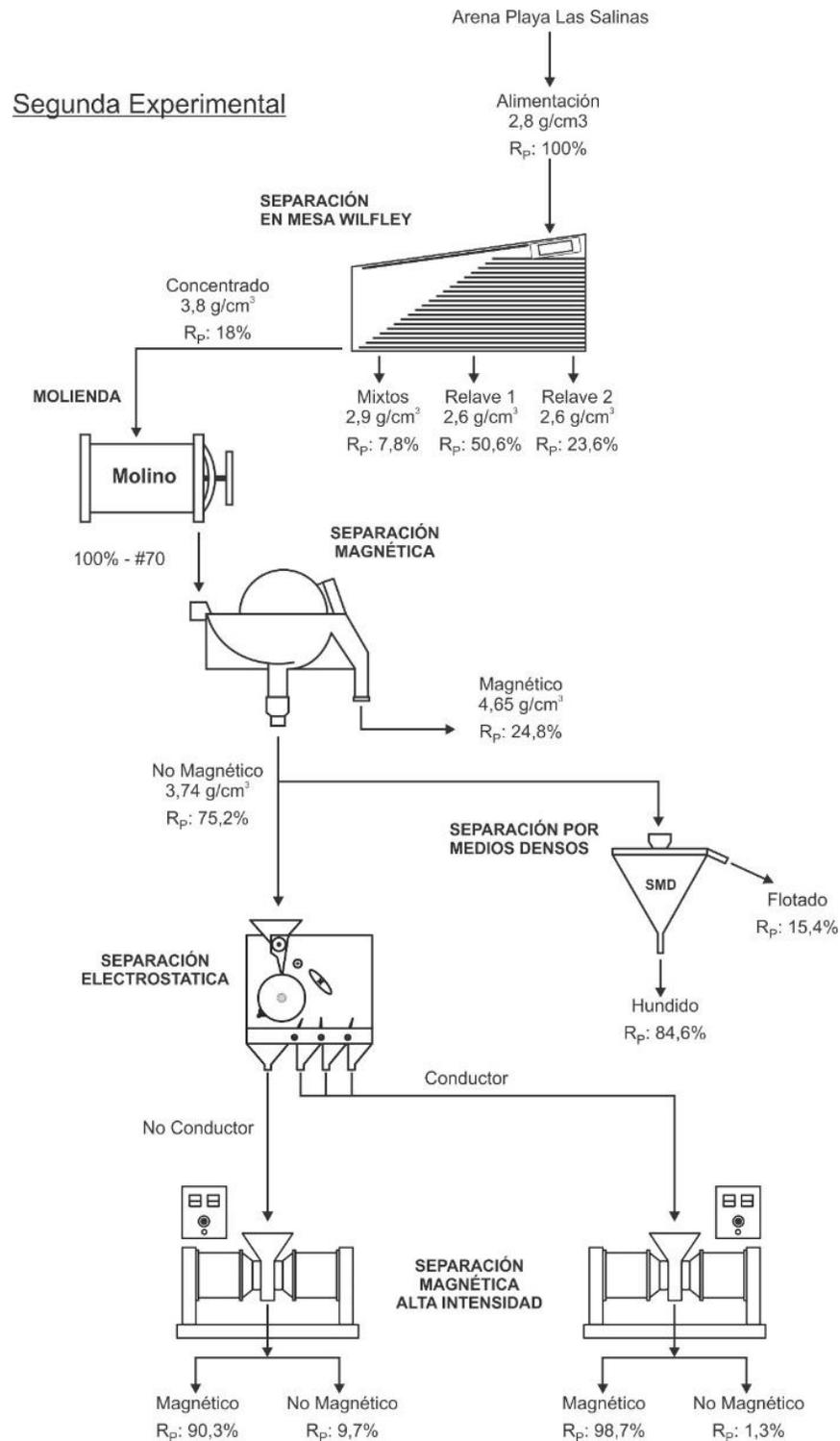


Figura N° 3.5 Diagrama de concentración de las arenas de playas las Salinas.

En comparación a la primera etapa de concentración, esta comienza con una concentración gravimétrica a través de la mesa Wilfley bajo los mismos parámetros de antes, solo se varía el ángulo de inclinación de la mesa a 8° , donde se obtuvieron como productos el concentrado, mixto, relave y lamas. Debido a que la granulometría de las arenas es gruesa, se consideró pasar el concentrado por una etapa de molienda con 30 bolas de $1\frac{1}{4}$ " y 75 bolas de 1" para obtener 100% $-#272\ \mu\text{m}$. El concentrado molido pasa por separación magnética de baja intensidad en húmedo, el cual trabaja bajo los siguientes parámetros: intensidad magnética de 0,075 T, velocidad del tambor de 25 rpm, flujo de alimentación de 1,2 L/min, flujo de agua de lavado de 1,0 L/min y 30% de sólidos, en el cual se obtienen como producto el concentrado magnético y el relave no magnético. Una fracción del no magnético es sometida a separación de medios densos bajo las mismas condiciones de la primera etapa. La otra fracción del no magnético se concentra en el electrostático de alta tensión donde utiliza una carga de 35 kV y una velocidad de tambor de 40 rpm, obteniéndose un conductor y un no conductor. Ambos productos son sometidos a una separación magnética de alta intensidad en húmedo donde se utilizan bolas de hierro de diámetro de $1\frac{1}{4}$ ". con un voltaje de 165 V, amperímetro de 2,2 A que generaran un campo de 0,6 T. A partir del conductor se obtuvieron el magnético y el no magnético. En el caso del no conductor también se obtuvo un magnético y no magnético.

CAPÍTULO IV Resultados.

4.1 Primera etapa.

4.1.1 Análisis granulométrico.

En la figura 4.1 se observan los resultados de los análisis granulométricos realizado a las arenas de playa las Salinas en ella se observa que bajo la malla 200 tenemos un promedio de 0,2% esto nos indica que en si las arenas no presentan partículas finas, lo cual es beneficioso para realizar la concentración magnética. Además, el 80% pasante de las partículas en las pruebas realizadas tiene como promedio un tamaño de 348 μm .

Se determino el tamaño intermedio de las partículas es decir el d50 para la muestra G1 se tiene un tamaño de 237 μm y para la muestra G2 de 238 μm . Se tiene como promedio un tamaño 238 μm para el 50% pasante.

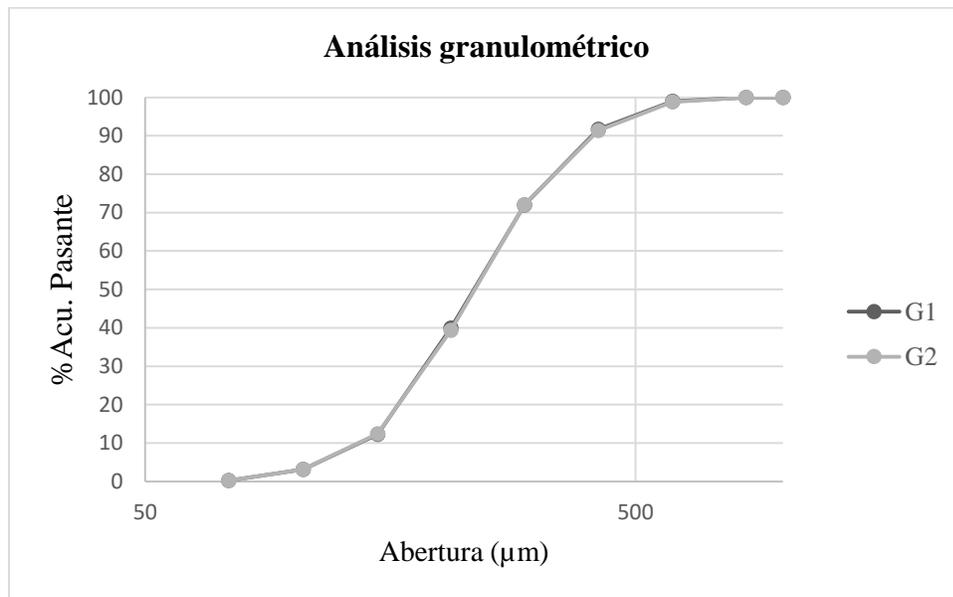


Figura N° 4. 1 Gráfico de los análisis granulométricos de la cabeza inicial de las arenas de playa las Salinas.

La figura 4.2 muestra el gráfico con la distribución de Fe, P, SiO₂, TiO₂, K₂O y CaO de acuerdo con su granulometría, se aprecia una alta presencia de estos elementos en la fracción gruesa (149 μm). Para la sílice 94,4%, y los óxidos alcalinos como K₂O y CaO se encuentran sobre el 94%, mientras que para el fosforo alcanza al 77,9%, TiO₂ 57,9% y para el Fe 46,8%. Además, se observa una alta concentración en el tamaño 105 μm .

Finalmente, se puede indicar que la granulometría de la arena de playa es bastante gruesa por lo cual le falta liberación de estos minerales, lo que se requiere moler para comprobar esta hipótesis.

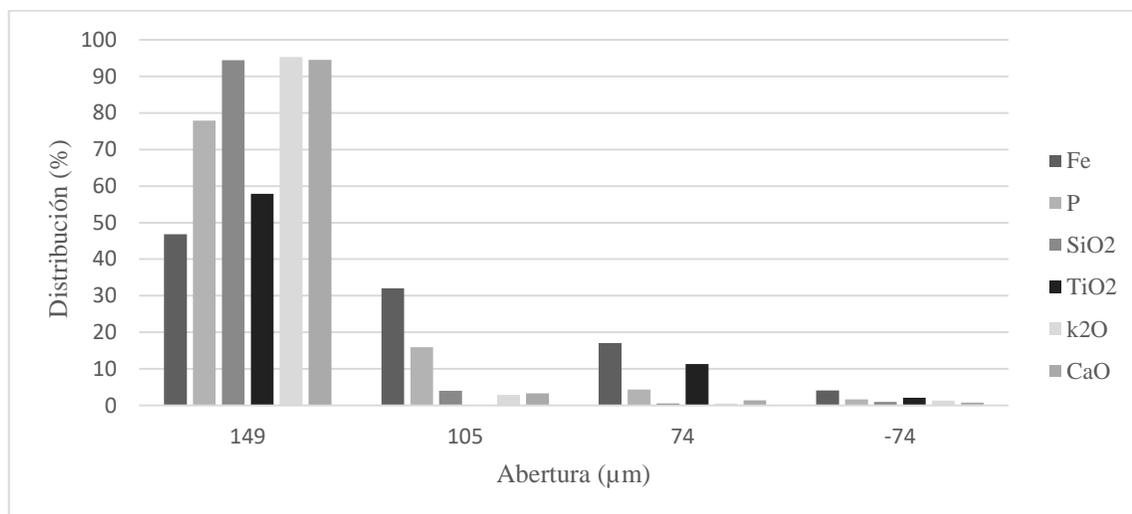


Figura N° 4. 2 Distribución de los elementos por tamaño contenidos en arenas de playa.

4.1.2 Análisis químico.

En la tabla 4.1 se presenta las leyes obtenidas a través del análisis químico realizado a la muestra de cabeza de las arenas.

Tabla 4. 1 Análisis químico realizado a la cabeza inicial de las arenas.

%Fe	%P	%SiO ₂	%TiO ₂	%K ₂ O	%CaO
8,6	0,1	62,3	2,0	1,8	8,2

4.1.3 Peso específico.

4.1.3.1 Peso específico cabeza

En la tabla 4.2 se observan los cálculos de las densidades realizadas a una muestra de cabeza de las arenas de playa. De ella se obtuvo que la densidad promedio es de 2,8 kg/L.

Tabla 4. 2 Tabla resumen del peso específico de cabeza.

W1	W2	W3	W4	Densidad real (kg/ L)
39,9021	49,3352	95,8525	89,7563	2,8269
39,8699	49,2757	95,7957	89,7425	2,8055
39,8904	49,2953	95,7584	89,7319	2,7838
Densidad promedio				2,8054

4.1.3.2 Peso específico separación magnética de baja intensidad.

En la figura 4.3 nos muestra un gráfico comparativo de densidades obtenidas de los productos de la separación magnética de baja intensidad. En ella se observa que la fracción magnética tiene una densidad de 3,4 kg/L y la fracción no magnética es de 2,7 kg/L. La diferencia de densidades entre estas dos muestras se debe a que una de ella en gran parte la conforma la magnetita. En cambio, la muestra de menor densidad la constituyen minerales como el cuarzo, calcita y minerales pertenecientes a los silicatos.

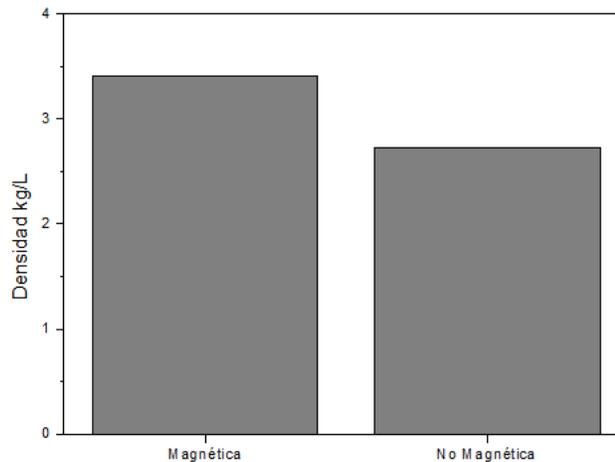


Figura N° 4. 3 Comparación de las densidades de la separación magnética de baja intensidad.

4.1.3.3 Peso específico separación por medios densos.

En la figura 4.4 nos muestra el gráfico comparativo de las densidades de los productos obtenidos a través de la separación por medios densos. Como se mencionó anteriormente la muestra está sometida a un líquido de inmersión de densidad 2,89 kg/L,

en ella las partículas que flotan (float) tiene una densidad de 2,6 kg/L y las hundidas (sink) tiene una densidad de 3,2 kg/L.

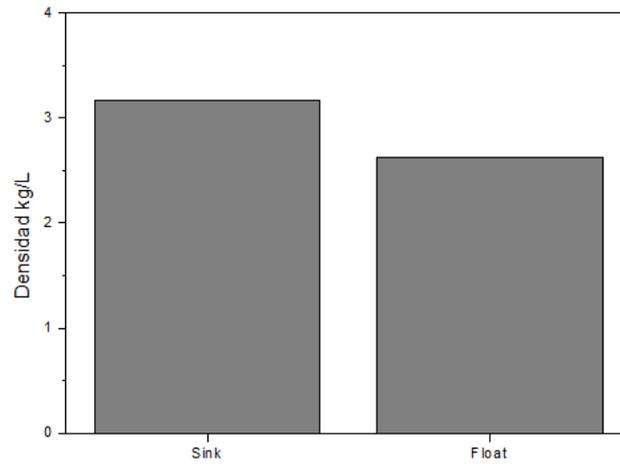


Figura N° 4. 4 Comparación de las densidades de la separación por medios densos.

4.1.3.4 Peso específico separación gravimétrica.

En la figura 4.5 nos muestra el gráfico comparativo de las densidades de los productos obtenidos mediante la separación gravimétrica. De ella se obtuvo que la densidad del concentrado es de 3,0 kg/L comparada con el relave que tiene una densidad de 2,6 kg/L.

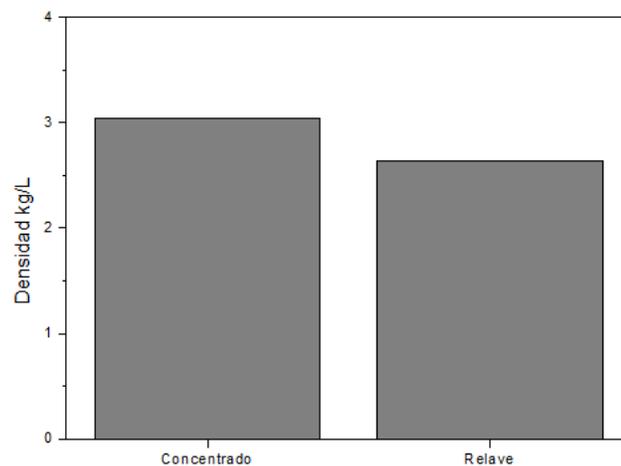


Figura N° 4. 5 Comparación de las densidades de la separación gravimétrica.

4.1.3.5 Peso específico separación electrostática.

En la figura 4.6 nos muestra un gráfico comparativo de las densidades de los productos obtenidos mediante la separación electrostática. De ella se obtuvo que la densidad del conductor es de 4,2 kg/L comparada con el no conductor la cual tiene una densidad de 3,0 kg/L.

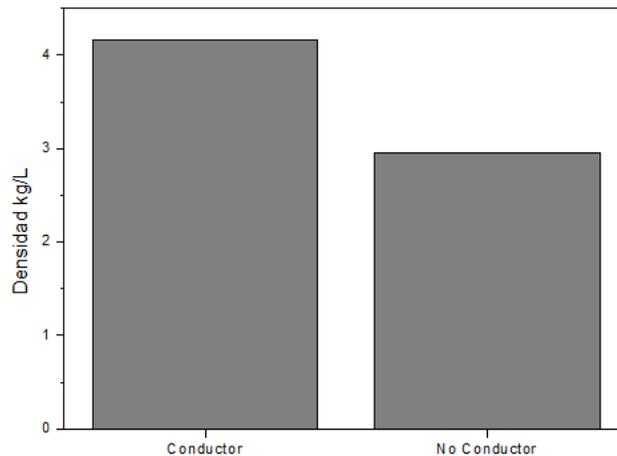


Figura N° 4. 6 Comparación de las densidades de la separación electrostática.

4.1.3.6 Peso específico separación magnética de alta intensidad.

En la figura 4.7 nos presenta un gráfico comparativo de las densidades de los productos de la concentración magnética de alta intensidad. En ella se observa que la muestra del conductor magnético posee la mayor densidad con 4,2 kg/L lo que indicaría la presencia de los minerales de ilmenita, hematita. En el caso del conductor no magnético este posee una densidad de 3,7 kg/L.

Para el caso de las muestras no conductoras nos muestra que estas poseen las menores densidades; la magnética tiene una densidad de 3,1 kg/L esta muestra podría indicar la presencia de rutilo. En el caso del no magnético que tiene una densidad de 2,8 kg/L.

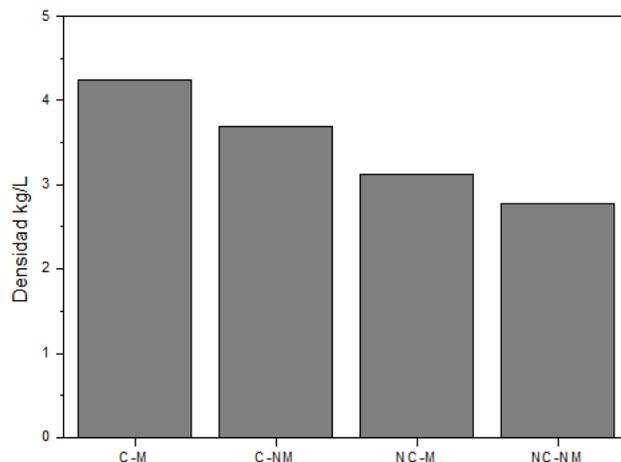


Figura N° 4. 7 Comparación de las densidades de la separación magnética de alta intensidad.

4.1.4 Procesos de concentración.

4.1.4.1 Concentración magnética de baja intensidad en seco.

En la figura 4.8 presenta el gráfico con las leyes y recuperaciones obtenidas a través del análisis químico realizado a la muestra de concentrado. En ella observa una ley de 31,1% de hierro con una recuperación del 49%, esto podría indicar que la ilmenita que es paramagnética se concentrara junto a la magnética. Para el caso del TiO₂ se tiene una ley de 6,1% y una recuperación del 41,8%

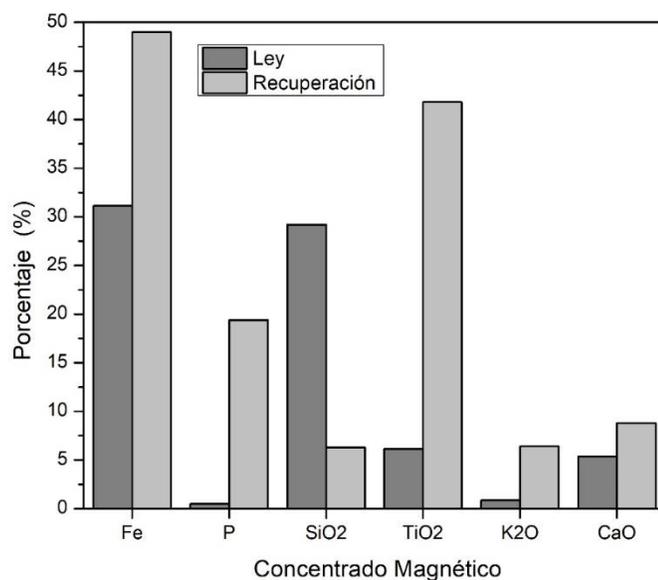


Figura N° 4. 8 Leyes y recuperaciones del concentrado magnético.

En la figura 4.9 se presenta un gráfico con las leyes y recuperaciones obtenidas a través del análisis químico realizado a la muestra de relave. En ella se observa que el hierro posee una ley de 5,1% con una recuperación del 51%. Para el caso del TiO_2 se tiene una ley de 1,3% y una recuperación del 58,2%.

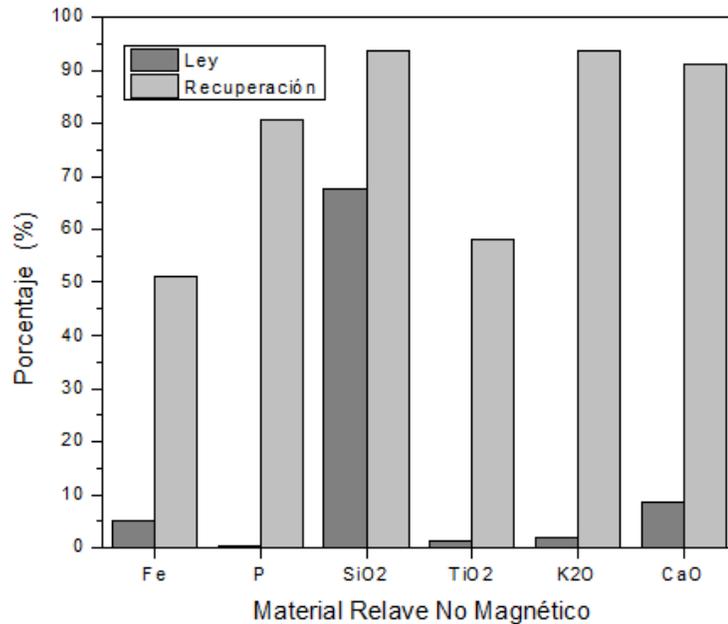


Figura N° 4. 9 Leyes y recuperaciones del relave no magnético.

4.1.4.2 Separación por medios densos.

En la figura 4.10 nos muestra un gráfico con las leyes y recuperaciones obtenidas a través del análisis químico realizado a la muestra del hundido (Sink). En ella se observa que el hierro tiene una ley de 20,7% y una recuperación del 85,1%. Para el caso del TiO_2 tenemos una ley de 5,9% con una recuperación del 48,2%.

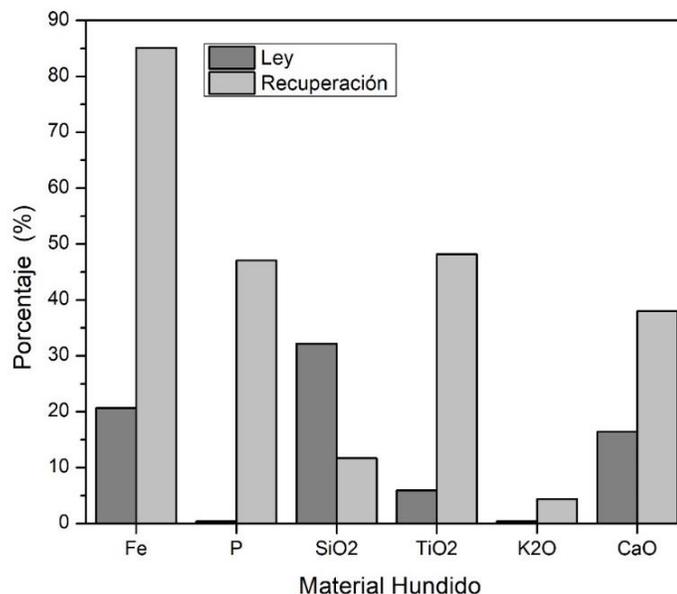


Figura N° 4. 10 Grafico de la leyes y recuperaciones del hundido.

En la figura 4.11 nos muestra un gráfico con las leyes y recuperaciones obtenidas a través del análisis químico realizado a la muestra de lo flotado (Float). En ella se observa una ley de hierro de 1,0% y una recuperación del 14,9%. Para el caso del TiO₂ tenemos una ley de 1,7% con una recuperación del 51,8%. Si comparamos las leyes de lo flotado y lo hundida se indica que gran parte de los minerales densos como la hematita, ilmenita, el rutilo o anatasa se encuentran en la muestra de lo hundido.

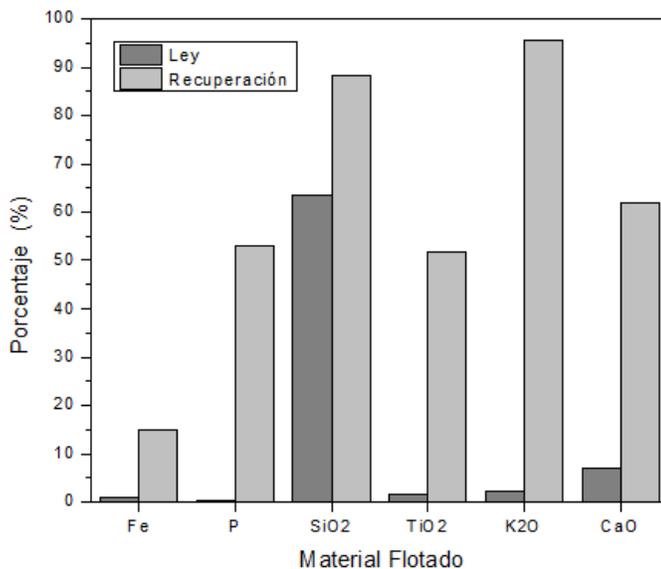


Figura N° 4. 11 leyes y recuperaciones de lo flotado.

4.1.4.3 Concentración gravimétrica.

En la figura 4.12 nos muestra un gráfico con las leyes y recuperaciones obtenidas a través del análisis químico realizado a la muestra del concentrado de la mesa Wilfley. En ella se observa que el hierro tiene una ley de 14,7% con una recuperación del 67,2%. Para el caso del TiO_2 se tiene una ley del 3,9% con una recuperación del 12%.

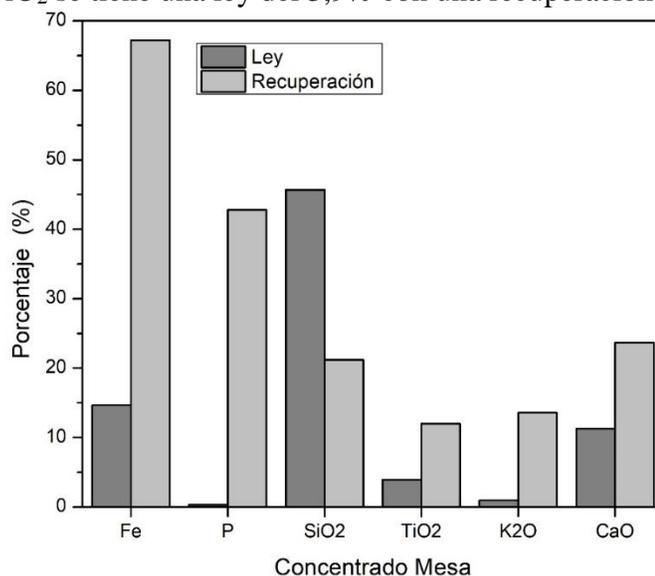


Figura N° 4. 12 Leyes y recuperaciones del concentrado.

En la figura 4.13 nos muestra un gráfico con las leyes y recuperaciones obtenidas a través del análisis químico realizado a la muestra del relave de la mesa Wilfley. En ella se observa que la ley de hierro es de 2,3% con una recuperación del 32,8%. Para el caso del TiO_2 se tiene una ley de 9,2% con una recuperación del 88%.

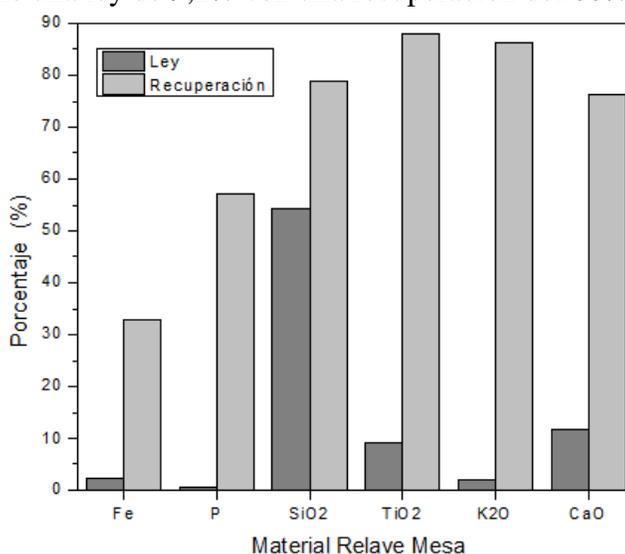


Figura N° 4. 13 Leyes y recuperaciones del relave.

4.1.4.4 Concentración electroestática.

En la figura 4.14 se muestra un gráfico con las leyes y recuperaciones obtenidas a través del análisis químico realizado a la muestra del conductor. En ella se observa que el hierro tiene una ley del 45,8% con una recuperación del 87,6%. Para el caso del TiO_2 se tiene una ley de 4% con una recuperación del 61,8%.

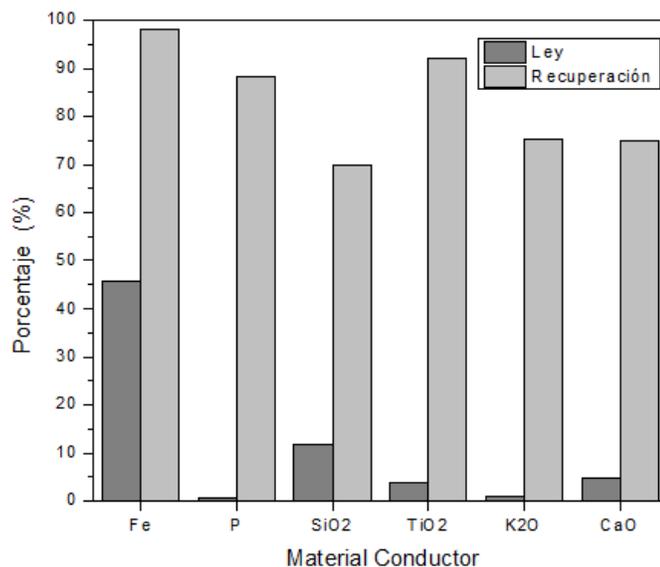


Figura N° 4. 14 Leyes y recuperaciones del conductor.

En la figura 4.15 se muestra un gráfico con las leyes y recuperaciones obtenidas a través del análisis químico realizado a la muestra del no conductor. En ella se observa que el hierro tiene una ley del 9,7% con una recuperación del 12,4%. Para el caso del TiO_2 se tiene una ley de 3,5% con una recuperación del 37,2%.

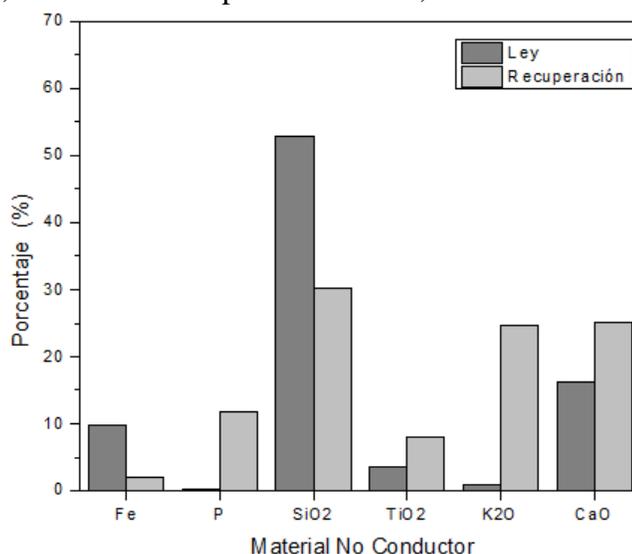


Figura N° 4. 15 Leyes y recuperaciones del no conductor.

4.1.4.5 Concentración magnética de alta intensidad en húmedo.

En la figura 4.16 nos muestra un gráfico con las leyes y recuperaciones obtenidas a través del análisis químico realizado a la muestra del no conductor no magnético. En ella se observa una ley de hierro de 3,1% con una recuperación del 1,8%. Para el caso del TiO_2 tenemos una ley de 2,6% con una recuperación del 6,8%

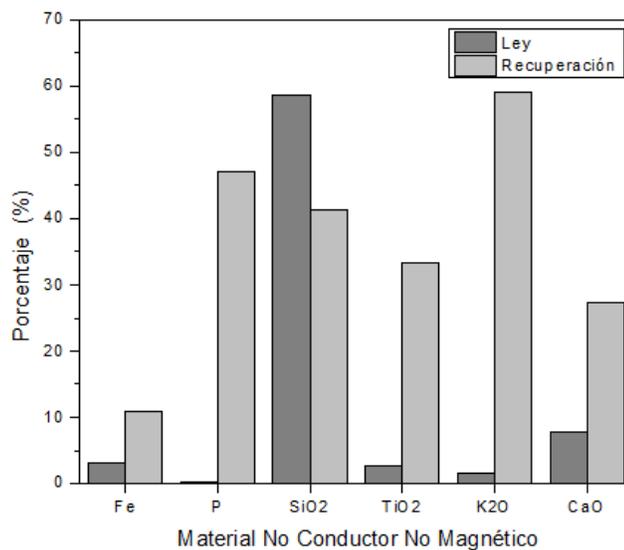


Figura N° 4. 16 Leyes y recuperaciones del no conductor no magnético.

En la figura 4.17 nos muestra un gráfico con las leyes y recuperaciones obtenidas a través del análisis químico realizado a la muestra del no conductor magnético. En ella se observa que el hierro tiene una ley de 16,5% con una recuperación del 98,2%. Para el caso del TiO_2 se tiene una ley de 3,5% con una recuperación 93,2%.

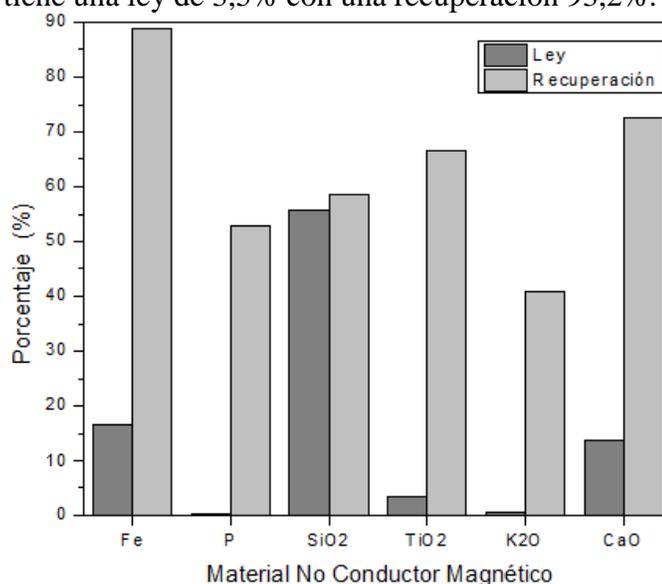


Figura N° 4. 17 Leyes y recuperaciones del no conductor magnético.

En la figura 4.18 nos muestra un gráfico con las leyes y recuperaciones obtenidas a través del análisis químico realizado a la muestra del conductor no magnético. En ella se observa que para el hierro tenemos una ley de 41,7% con una recuperación del 7,1%. Para el caso del TiO_2 tenemos una ley de 8,1% con una recuperación del 5,4%.

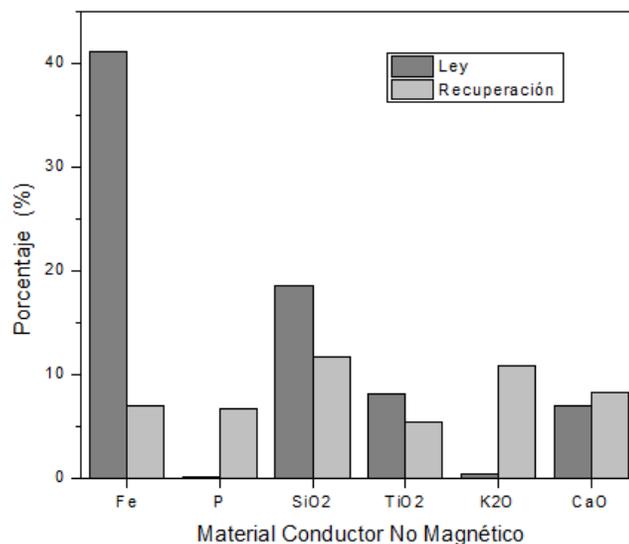


Figura N° 4. 18 Leyes y recuperaciones del conductor no magnético.

En la figura 4.19 se muestra un gráfico con las leyes y recuperaciones obtenidas a través del análisis químico realizado a la muestra del conductor magnético. En ella se observa que el hierro tiene una ley de 43,9% con una recuperación del 92,6%. Para el caso del TiO_2 tiene una ley de 11,6% con una recuperación del 94,6%

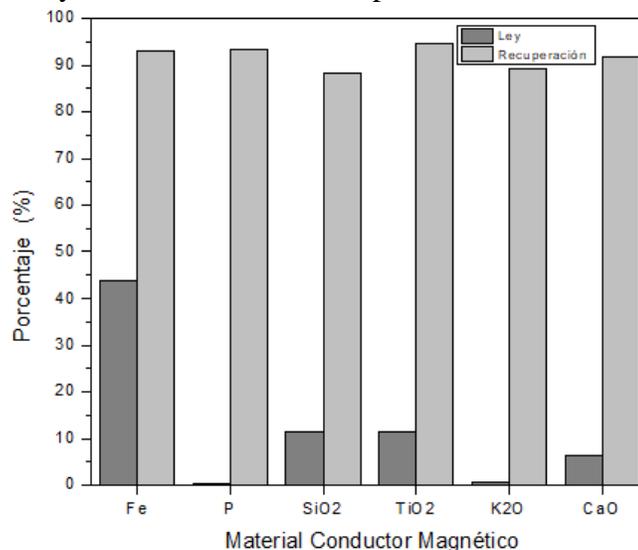


Figura N° 4. 19 Leyes y recuperaciones del conductor magnético.

4.1.5 Análisis mineralógico.

4.1.5.1 Microscopía electrónica de barrido.

Se realizaron análisis de las siguientes muestras al sink, float, magnético conductor, magnético no conductor, no magnético conductor y no magnético no conductor.

4.1.5.1.1 Análisis SEM muestra del Float.

En la figura 4.20 se observa una porción de la muestra analizada y la figura 4.21 se logra visualizar los elementos presentes en la porción de la muestra de lo flotado.

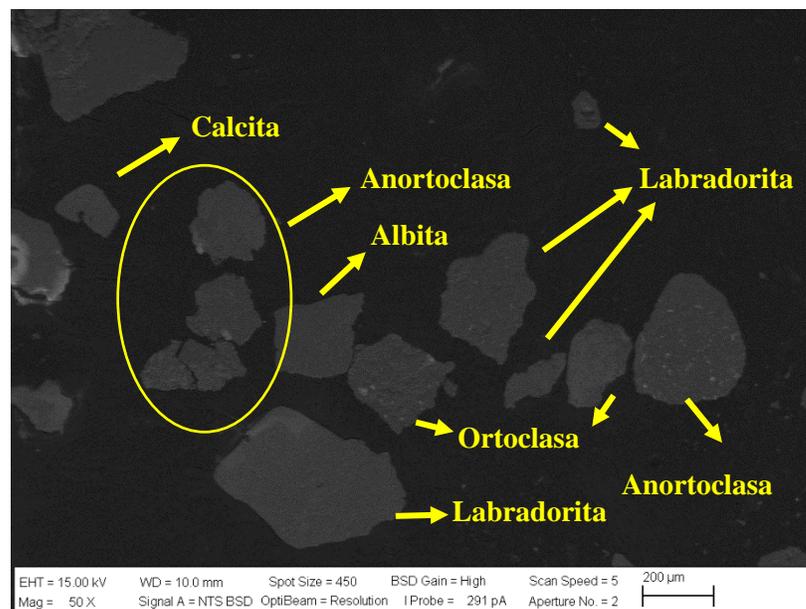
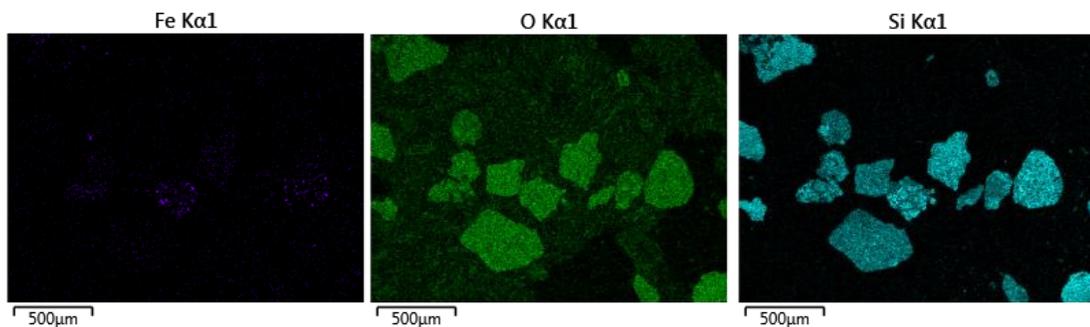


Figura N° 4. 20 Muestra del Float.



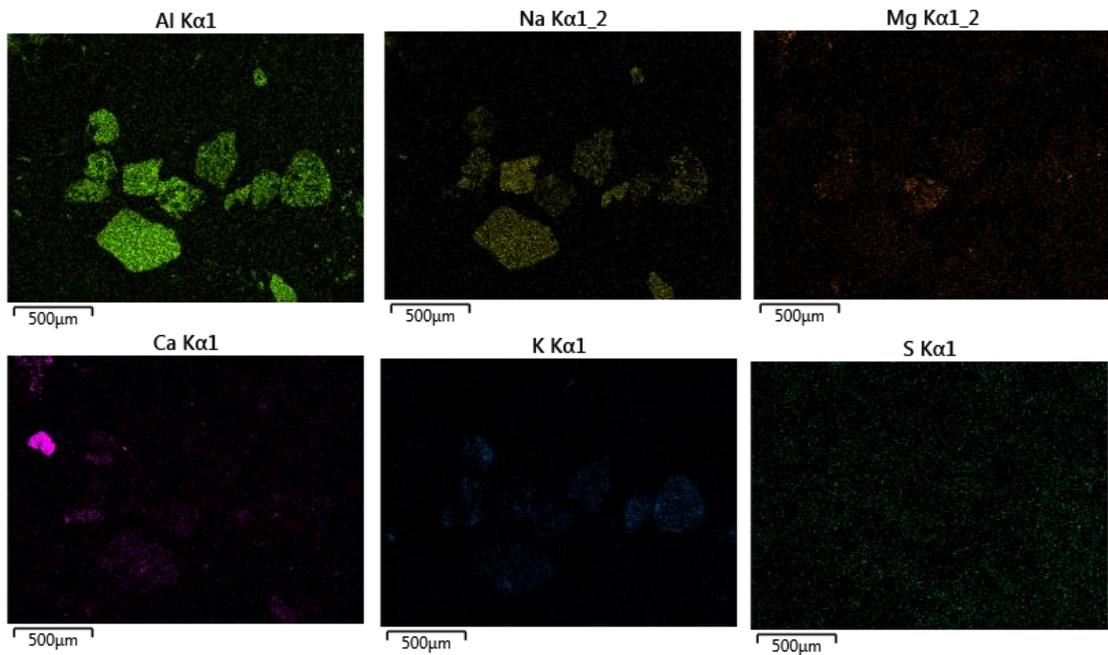


Figura N° 4. 21 Imágenes emitidas por el haz de electrones en la muestra.

A partir de las imágenes entregadas por el equipo, se observa que la muestra de lo flotado existe un alto contenido silicio por lo que podemos mencionar la presencia de silicatos en forma de anortoclasa, albita, labradorita y ortoclasa. Además de la presencia de carbonatos en forma de calcita.

4.1.5.1.2 Análisis SEM muestra del Sink.

En la figura 4.22 se observa una porción de la muestra analizada y la figura 4.23 se logra visualizar los elementos presentes en la porción de la muestra del hundido.

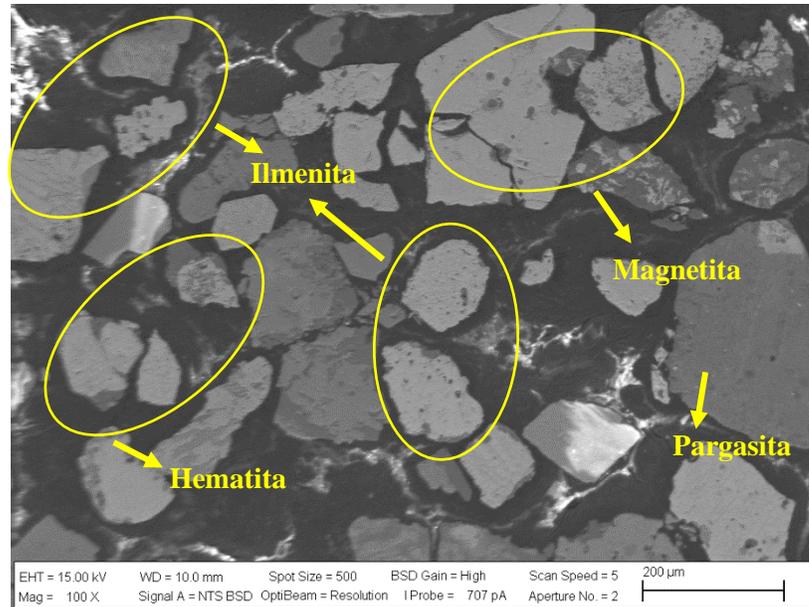


Figura N° 4. 22 Muestra Sink.

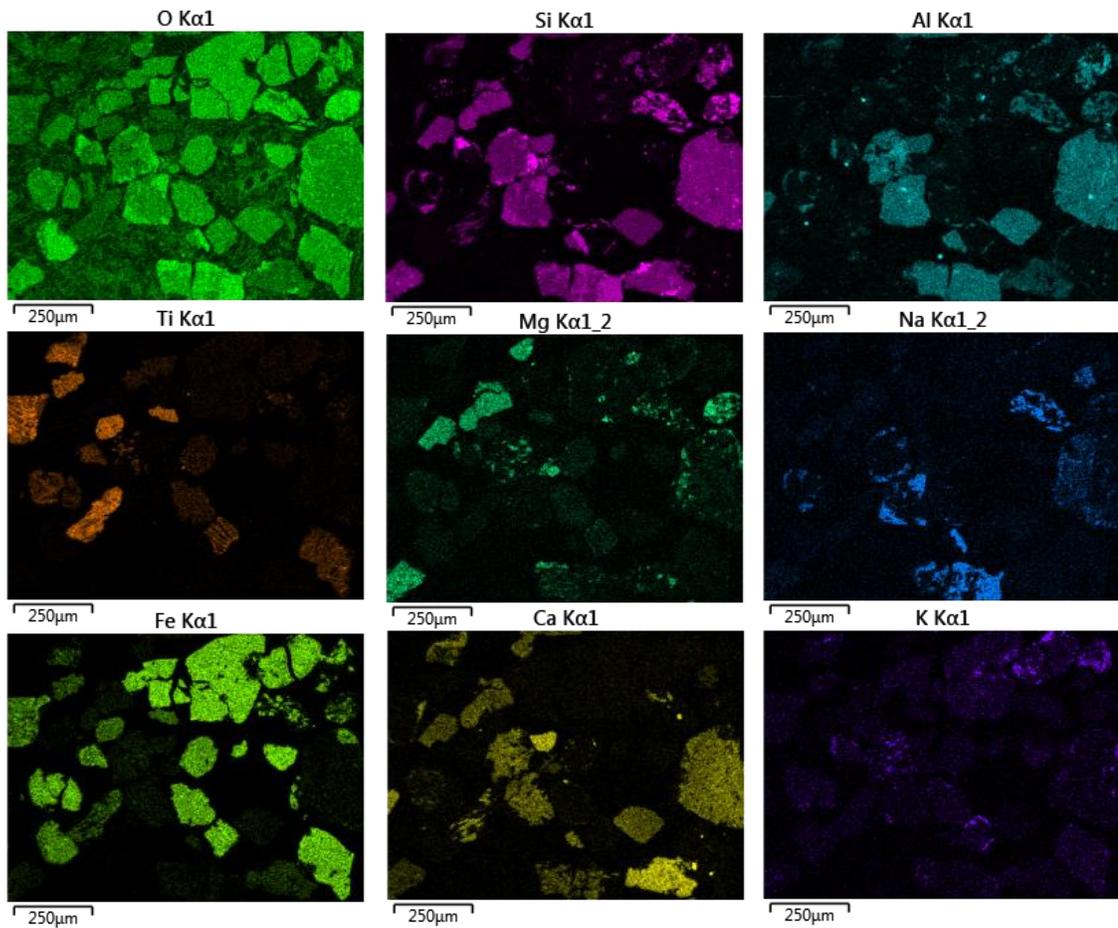


Figura N° 4. 23 Imágenes emitidas por el haz de electrones en la muestra.

A partir de las imágenes entregadas por el equipo, se observa que la muestra de lo hundido existe un alto contenido de hierro y oxígeno, los pueden estar relacionados con los minerales de magnetita o hematita. Ante la presencia de titanio y hierro podemos estimar la presencia de ilmenita.

Por otro lado, tenemos la presencia del silicio por lo que podemos mencionar la presencia de silicatos en forma de Pargasita que pertenece a la clase de los inosilicatos.

4.1.5.1.3 Análisis SEM de la muestra magnético conductor.

En la figura 4.24 se observa una porción de la muestra analizada y la figura 4.25 se logra visualizar los elementos presentes en la porción de la muestra del magnético conductor.

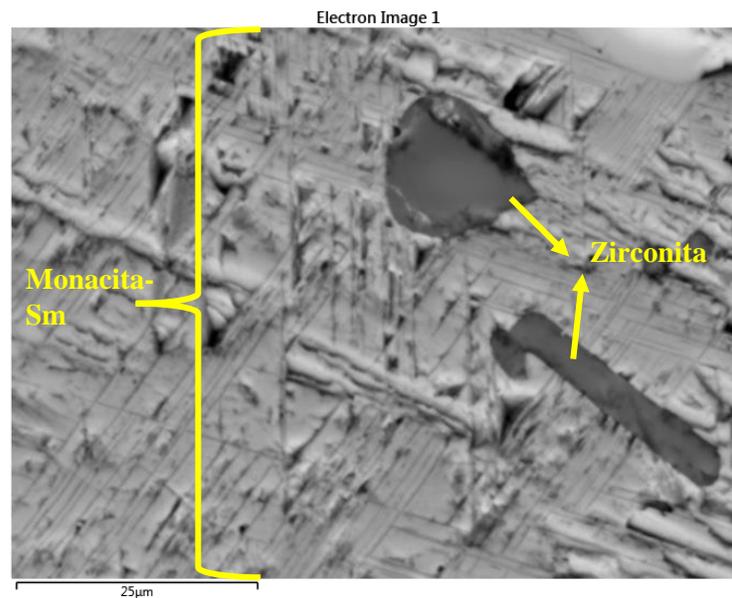
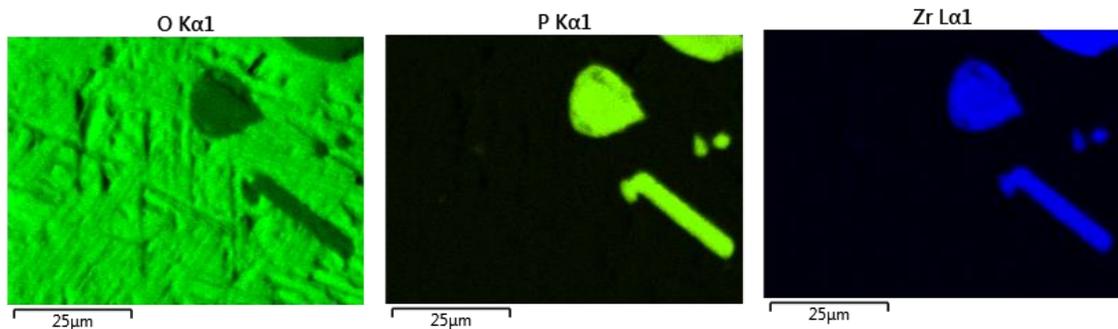


Figura N° 4. 24 Muestra analizada en el equipo SEM del magnético conductor.



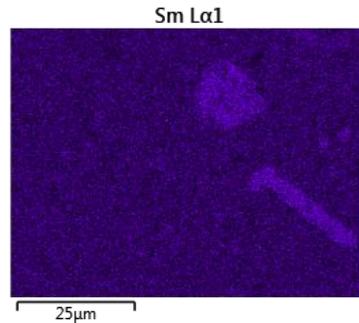


Figura N° 4. 25 Imágenes emitidas por el haz de electrones en la muestra.

Según las imágenes entregadas por el equipo, se observa que la muestra del magnético conductor existe un alto contenido de samario y oxígeno lo cual nos puede indicar la presencia de monacita, también cabe mencionar la presencia de zircón y oxígeno en lo cual puede estar relacionado con la zirconita.

4.1.5.1.4 Análisis SEM de la muestra no magnético conductor.

En la figura 4.26 se muestra una sección analizada de la muestra y en la figura 4.27 se logra visualizar los elementos presentes en esa sección de la muestra de no magnético conductor.

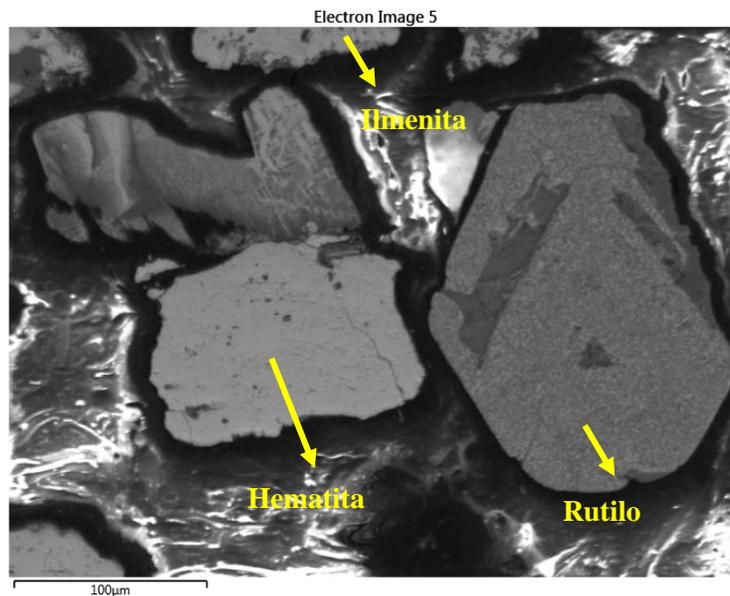


Figura N° 4. 26 Muestra analizada en el equipo SEM del no magnético conductor.

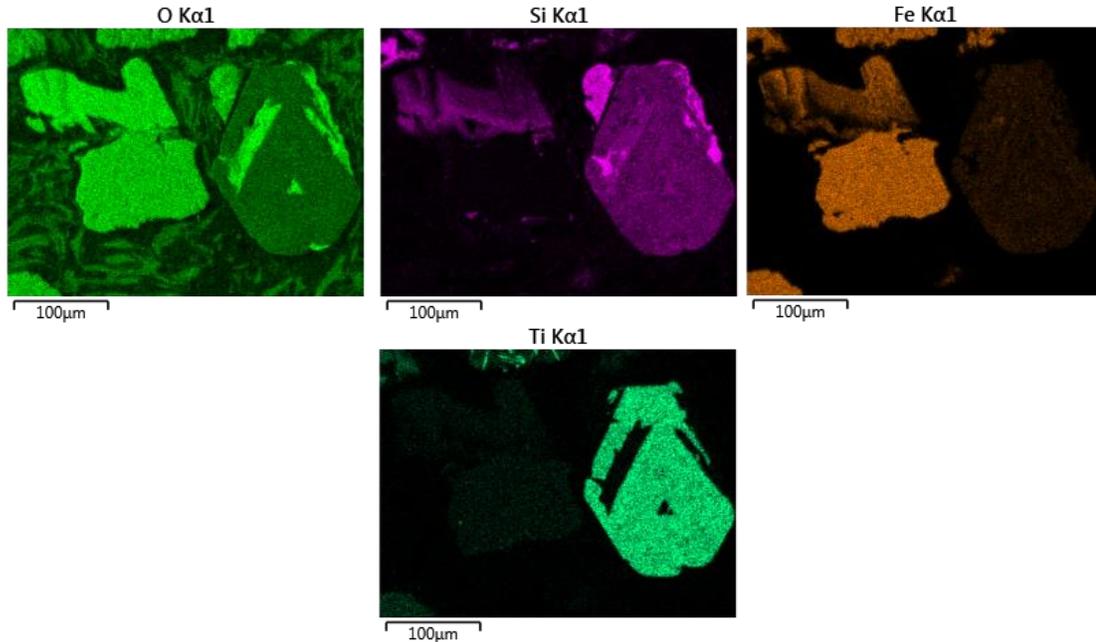


Figura N° 4. 27 Imágenes emitidas por el haz de electrones en la muestra.

A partir de las imágenes entregadas por el equipo, se observa que la muestra de no magnético conductor existe la presencia de oxígeno, fierro y titanio, los cuales están relacionado con la ilmenita, pero también se observa que una de las partículas solo hay presencia de hierro y oxígeno los cuales nos hacen referencia a la presencia de hematita.

4.1.5.1.5 Análisis SEM de la muestra magnético no conductor.

En la figura 4.28 se observa una porción de la muestra analizada y la figura 4.29 se logra visualizar los elementos presentes en la porción de la muestra de magnético no conductor.

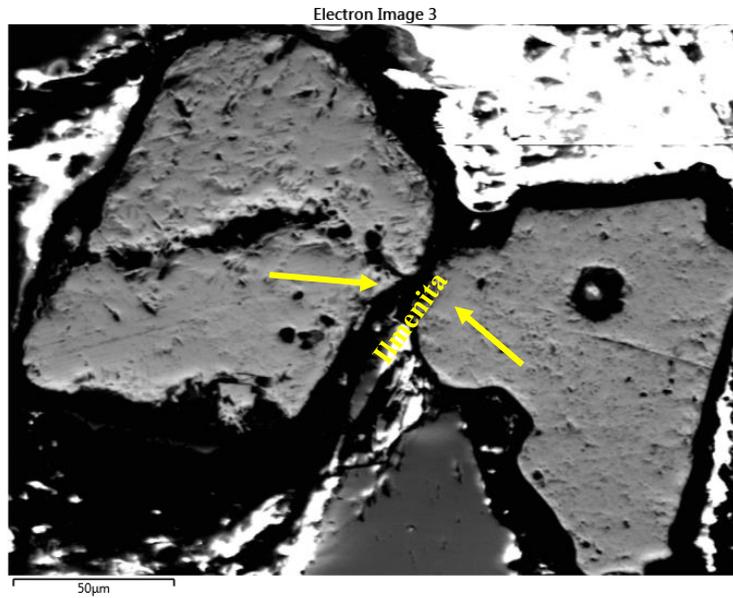


Figura N° 4. 28 Muestra analizada en el equipo SEM del magnético no conductor.

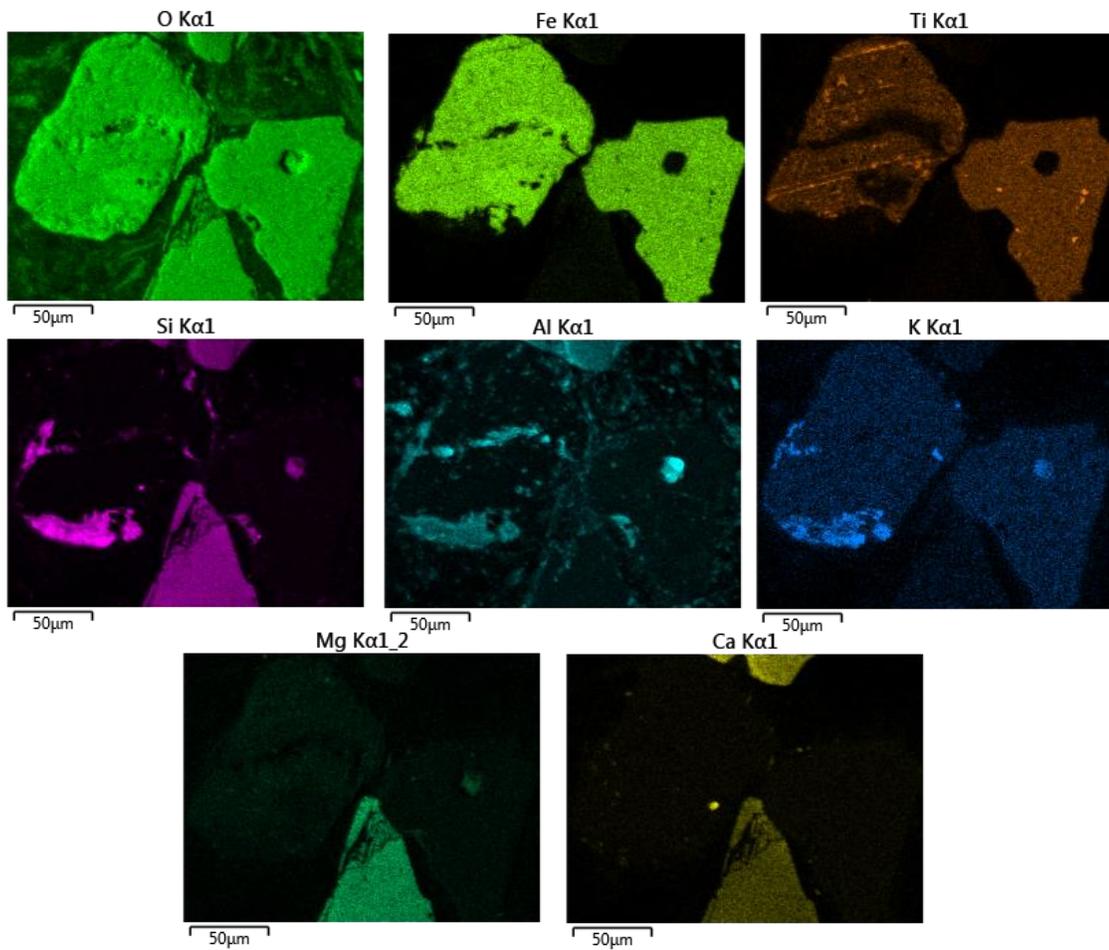


Figura N° 4. 29 Imágenes emitidas por el haz de electrones en la muestra.

A partir de las imágenes entregadas por el equipo, se observa que la muestra de magnético no conductor existe un alto contenido de hierro, oxígeno y titanio, los cuales están relacionado con la ilmenita, como también se podría mencionar la presencia de algunos minerales pertenecientes a los silicatos.

4.1.5.1.6 Análisis SEM del no magnético no conductor.

En la figura 4.30 se observa una porción de la muestra analizada y la figura 4.31 se logra visualizar los elementos presentes en la porción de la muestra de no magnético no conductor.

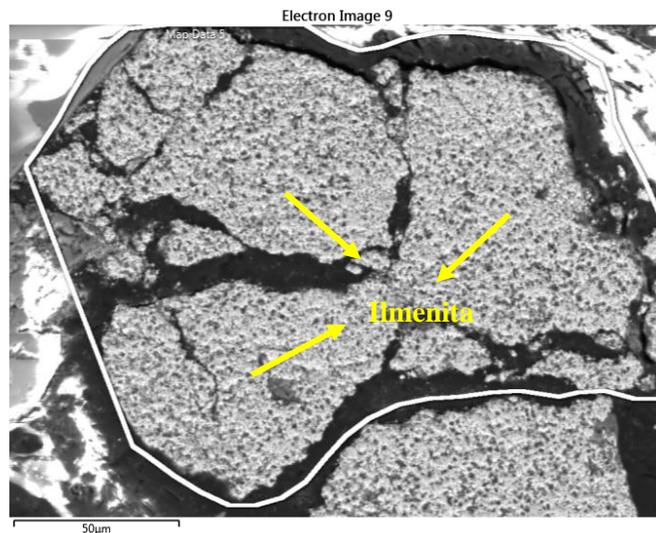


Figura N° 4. 31 Muestra analizada en el equipo SEM del no magnético no conductor.

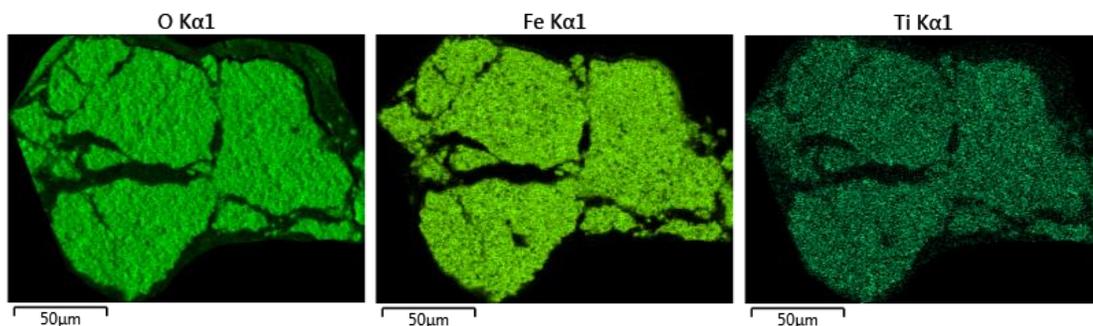


Figura N° 4. 30 Imágenes emitidas por el haz de electrones en la muestra

A partir de las imágenes entregadas por el equipo, se observa que la muestra de magnético no conductor existe un alto contenido de hierro, oxígeno y titanio, los cuales están relacionado con la ilmenita, magnetita o como también se podría mencionar la presencia de rutilo o anatasa.

4.1.5.2 Macro

A través de le microscopio Olympus B41M-LED se realizaron análisis de las muestras de arenas para observar a nivel macroscópico su análisis. En total fueron estudiadas 15 muestras.



Figura N° 4. 32 Muestra cabeza inicial de las arenas de playa las Salinas.



Figura N° 4. 33 Muestra del no magnético.



Figura N° 4. 34 Muestra del magnético.



Figura N° 4. 35 Muestra de flotado

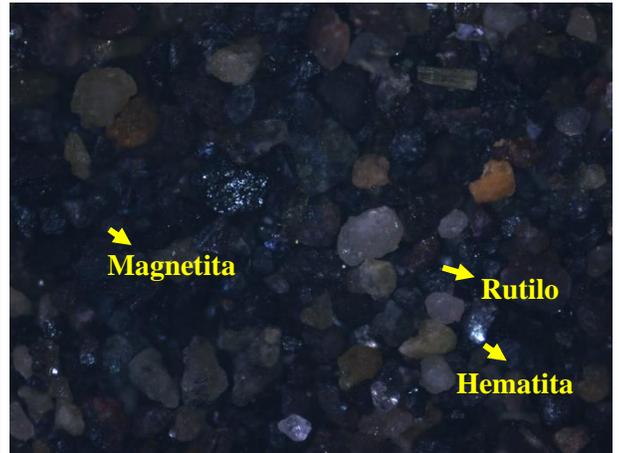


Figura N° 4. 36 Muestra de sink.

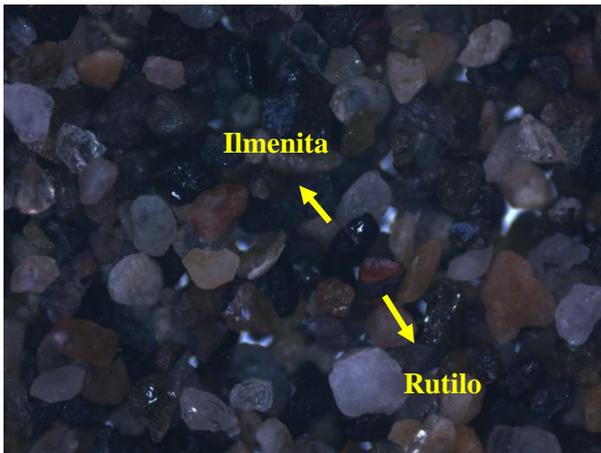


Figura N° 4. 37 Muestra del concentrado.



Figura N° 4. 38 Muestra del relave.



Figura N° 4. 40 Muestra del no conductor.



Figura N° 4. 39 Magnetita no conductor.



Figura N° 4. 41 Muestra del conductor.

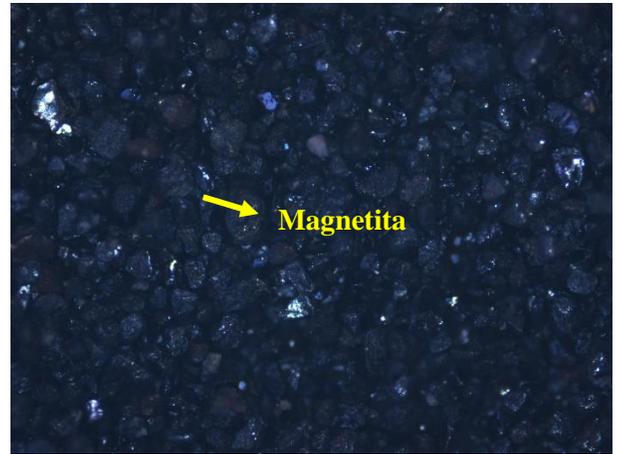


Figura N° 4. 42 Magnetita del conductor.



Figura N° 4. 43 No conductor magnético.

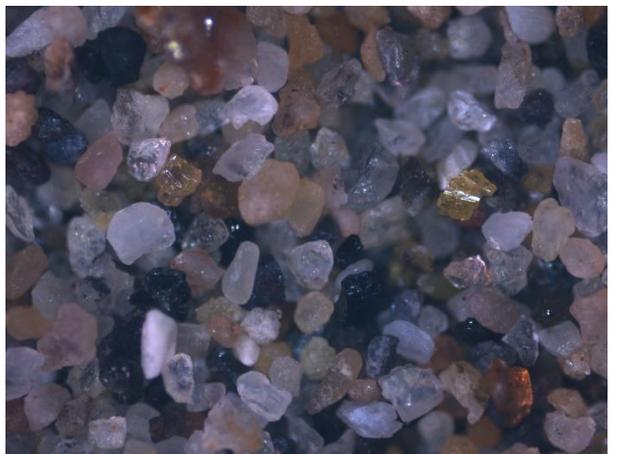


Figura N° 4. 44 No conductor no magnético.

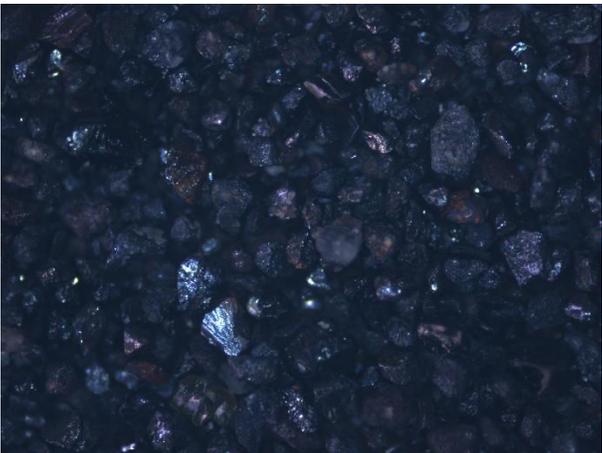


Figura N° 4. 45 Conductor magnético.



Figura N° 4. 46 Conductor no magnético.

4.1.5.3 Difracción de rayos x

Se realizó un estudio de caracterización a las muestras de float y sink para determinar las fases cristalinas presentes en las muestras. En la figura 4.47 nos muestra la difracción de rayos x realizada a la muestra del float. En ella encontramos los siguientes minerales: Cuarzo (SiO_2), Calcita (CaCO_3), Labradorita ($(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_8$), tienen un peso específico de 2,7 kg/L, Anortoclasa ($(\text{Na}, \text{K})\text{AlSi}_3\text{O}_8$) con un peso específico de 2,6kg/L, Ortoclasa (KAlSi_3O_8) con un peso específico de 2,56 kg/L y por último la Albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) con un peso específico de 2,61 kg/L. Los últimos 4 minerales mencionados pertenecen al grupo de los silicatos. En cambio, en la figura 4.48 nos muestra la difracción de rayos x realizada a la muestra del sink. En ella encontramos los siguientes minerales: Hematita (Fe_2O_3) con un peso específico de 5,27 kg/L, Pargasita ($\text{NaCa}_2(\text{Mg}_4\text{Al})(\text{Si}_6\text{Al}_2)\text{O}_{22}(\text{OH})_2$) con un peso específico de 3,04 kg/L, Ankerita ($\text{CaFe}^{2+}(\text{CO}_3)_2$) con un peso específico de 3 kg/L, Augita ($(\text{Ca}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_6$) con un peso específico de 3,4 kg/L, Epidota ($\text{Ca}_2\text{Fe}^{3+}\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{SiO}_4)\text{O}(\text{OH})$) con un peso específico de 3,3 kg/L, Giniita ($\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_4(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_2 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$) con un peso específico de 3,41kg/L, Phillipsita ($\text{Ca}_3(\text{Si}_{10}\text{Al}_6)\text{O}_{32} \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) y Illita ($(\text{K}, \text{H}_3\text{O})(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}$)

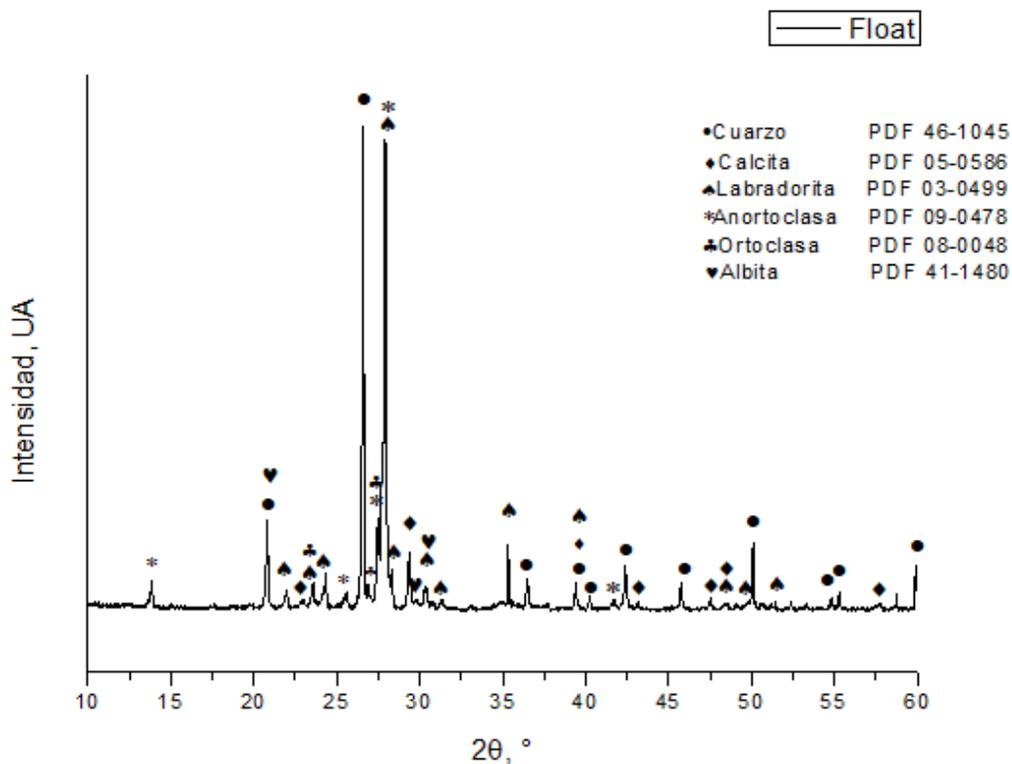


Figura N° 4. 47 Difracción de rayos x a la muestra del float

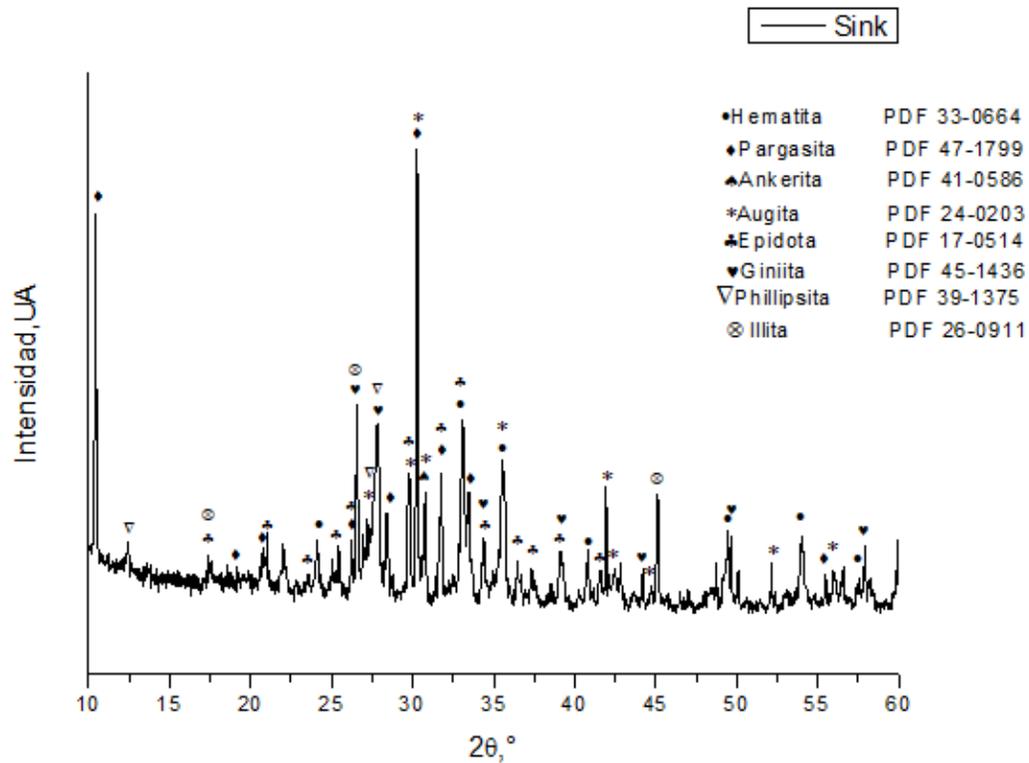


Figura N° 4. 48 Difracción de rayos x a la muestra del sink

4.2 Segunda etapa.

4.2.1 Análisis granulométrico.

En la figura 4.49 se observan los resultados de los análisis granulométricos realizado a los productos de la concentración gravimétrica de las arenas de playa las Salinas en ella se observa que bajo la malla 200 el concentrado tiene un pasante de 0,73%.

Se determino el tamaño intermedio de las partículas es decir el d50 para las cuatro muestras para le concentrado tenemos un tamaño de 143 μm, el mixto 189 μm, el relave 249 μm y la lamas 340μm. Estos valores nos indicarían que la mayor cantidad de partículas finas se encuentra en la muestra de las lamas. La muestra que presenta una mejor distribución de tamaño de las partículas es la del concentrado.

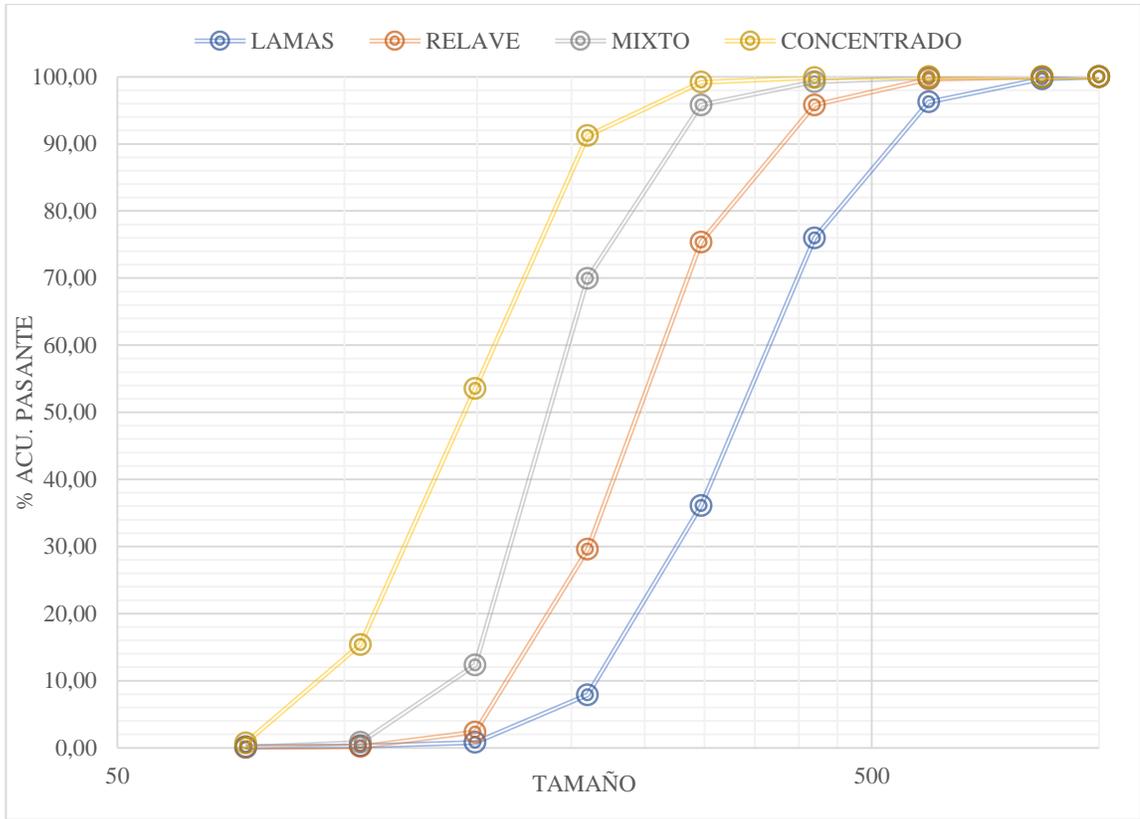


Figura N° 4. 49 Gráfico de los análisis granulométricos de la concentración gravimétrica de las arenas de playa las Salinas.

4.2.1.1 Molienda

En la figura 4.50 se presentan los resultados de los análisis granulométricos realizado al concentrado, concentrado molido y cabeza inicial.

Se realizó el proceso de molienda con el objetivo de obtener 100% bajo la malla 212 μm (100%-#212), como se observa en la figura 4.50 el objetivo de la molienda se cumplió, además se logró que pasante en la malla 100 sea del 98,5% ya que en la cabeza inicial se encontraba retenido el 87,7% de las arenas.

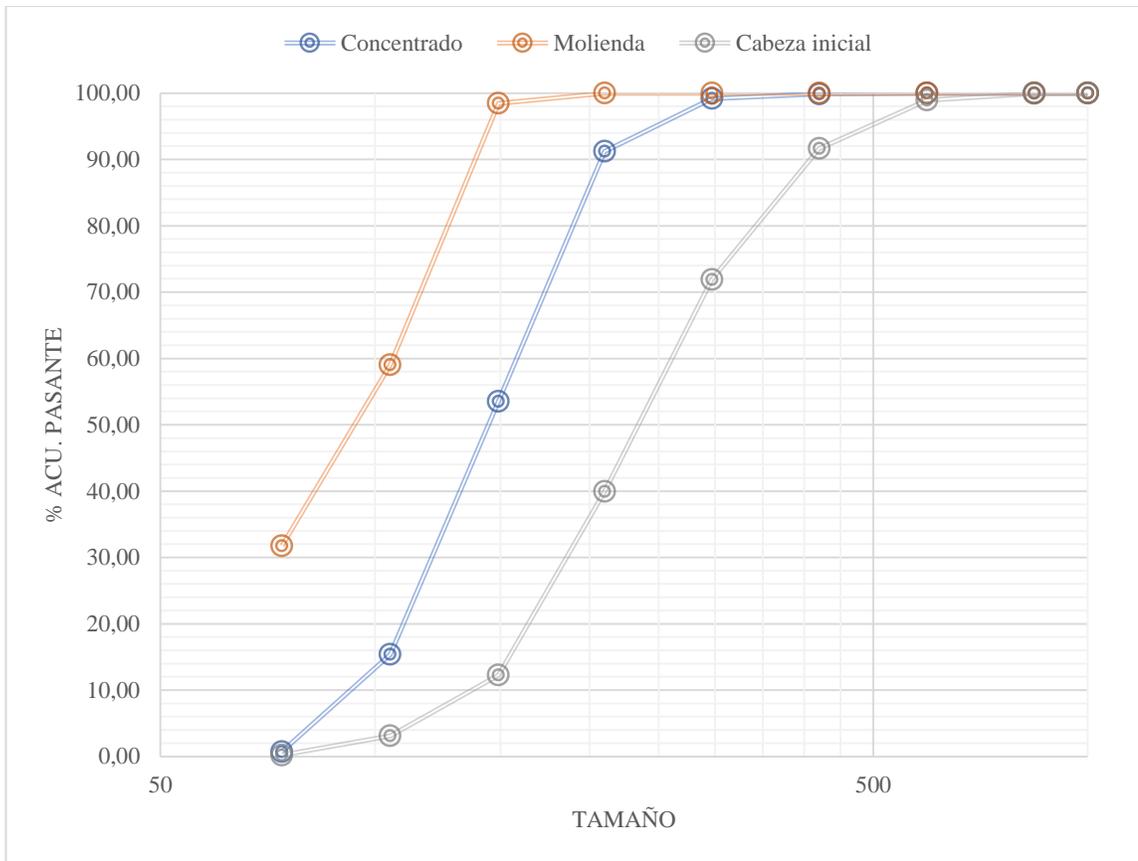


Figura N° 4. 50 Gráfico de los análisis granulométricos de proceso de molienda

4.2.2 Peso específico

4.2.2.1 Concentración gravimétrica

En la figura 4.51 se muestra el gráfico comparativo de las densidades de los productos obtenidos en la concentración gravimétrica realizado en la mesa Wilfley. En ella se observa que el concentrado tiene una densidad promedio de 3,8 kg/L, en cambio respecto la diferencia entre las densidades de las lamas y el relave es mínima.

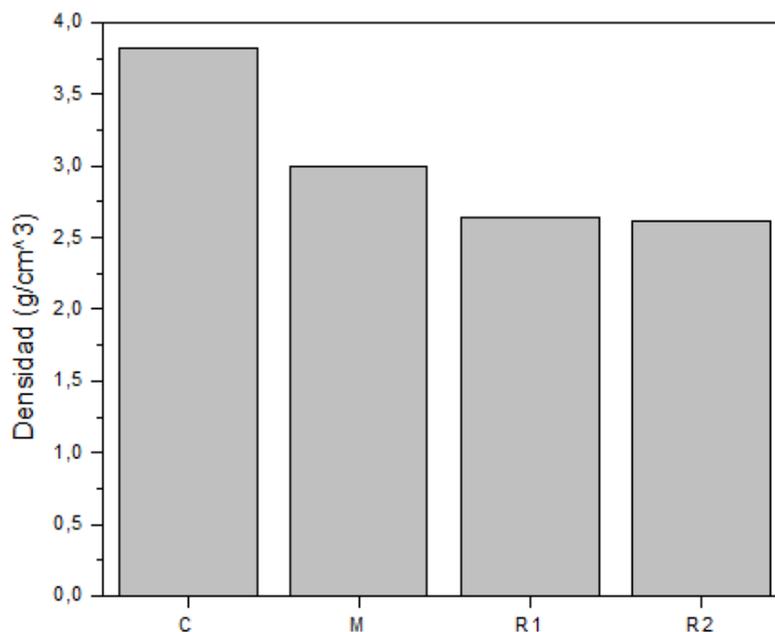


Figura N° 4. 51 Gráfico resumen de las densidades de la concentración gravimétrica.

4.2.3 Procesos de concentración.

4.2.3.1 Concentración gravimétrica.

En la figura 4.52 nos muestra un gráfico con las leyes y recuperaciones metalúrgicas obtenidas a través del análisis químico realizado a la muestra del concentrado de la mesa Wilfley. En ella se observa que el hierro tiene una ley de 35,8% con una recuperación metalúrgica del 79,5%. Para el caso del TiO_2 se tiene una ley del 8,6% con una recuperación metalúrgica del 70,6%. Ya que este proceso se basa en la separación por densidades podemos estimar debido a la ley de hierro y óxido de titanio que gran parte de los minerales densos se encuentran en el concentrado estos pueden ser la magnetita, hematita, ilmenita, rutilo o anatasa. En cambio, En la figura 4.53 nos muestra un gráfico con las leyes y recuperaciones metalúrgicas obtenidas a través del análisis químico realizado a la muestra del mixto de la mesa Wilfley. En ella se observa que el hierro tiene una ley de 7,2% con una recuperación metalúrgica del 7,0%. Para el caso del TiO_2 se tiene una ley del 2,74% con una recuperación metalúrgica del 9,8%. En esta muestra también encontramos minerales densos, pero en menos proporción lo que nos indicaría que gran parte del mineral se encuentra ocluido.

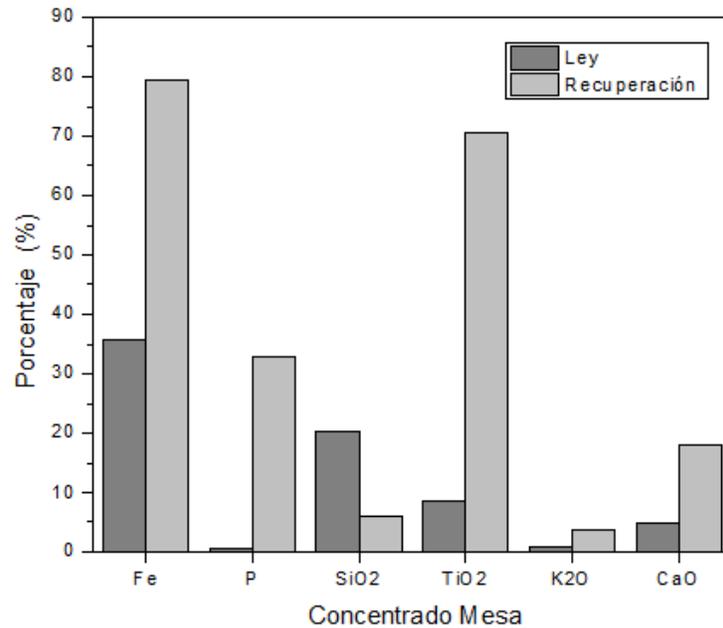


Figura N° 4. 52 Leyes y recuperaciones del concentrado mesa

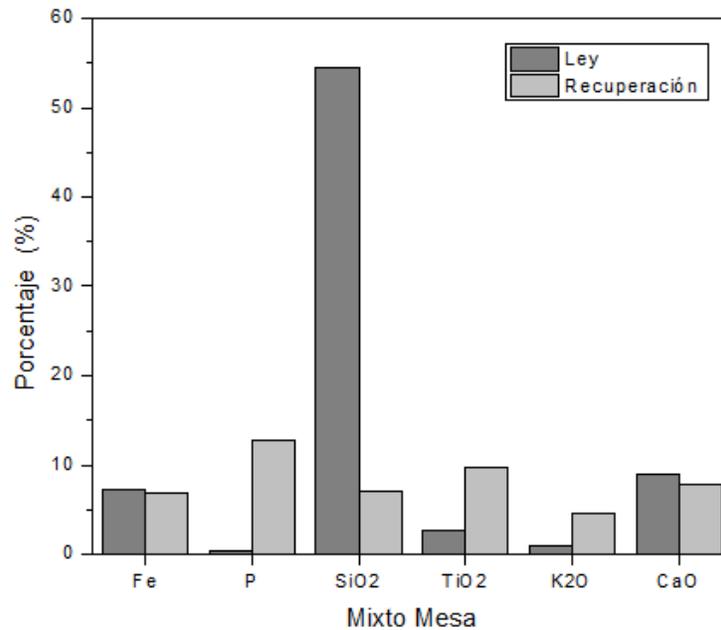


Figura N° 4. 53 Leyes y recuperaciones del mixto mesa

En la figura 4.54 nos muestra un gráfico con las leyes y recuperaciones metalúrgicas obtenidas a través del análisis químico realizado a la muestra del relave de la mesa Wilfley. En ella se observa que el hierro tiene una ley de 1,4% con una recuperación metalúrgica del 8,6%. Para el caso del TiO_2 se tiene una ley del 0,6% con

una recuperación metalúrgica del 14,3%. En este punto se observa que las leyes de SiO_2 y K_2O aumentan gradualmente esto debido a en el relave se concentran más minerales de silicatos, feldespatos, calcita.

En la figura 4.55 nos muestra un gráfico con las leyes y recuperaciones metalúrgicas obtenidas a través del análisis químico realizado a la muestra de las lamas de la mesa Wilfley. En ella se observa que el hierro tiene una ley de 1,7% con una recuperación metalúrgica del 4,9%. Para el caso del TiO_2 se tiene una ley del 0,5% con una recuperación metalúrgica del 5,4%. Al igual que el relave contiene minerales pertenecientes a los silicatos, feldespatos, también contiene calcita. En si tanto el relave como las lamas no poseen tantas las diferencias, la que se puede destacar son las granulométricas ya que la de las lamas es más fina que la del relave.

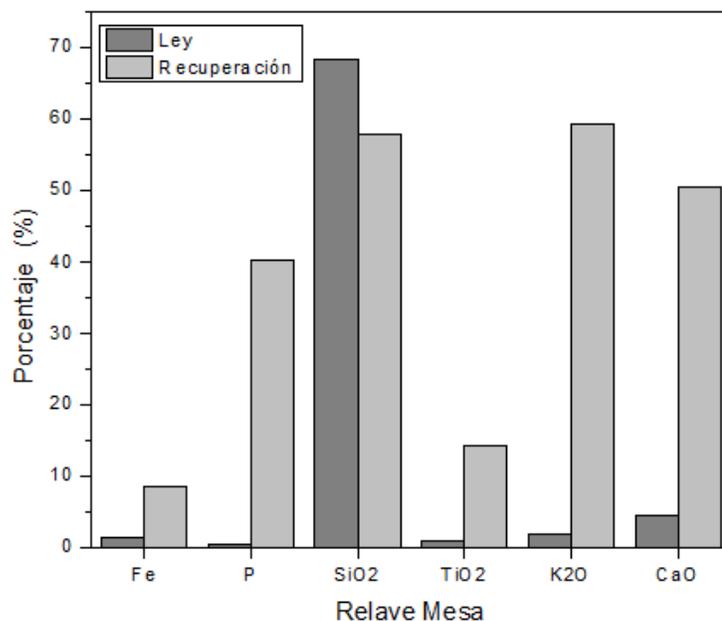


Figura N° 4. 54 Leyes y recuperaciones de la muestra de relave mesa

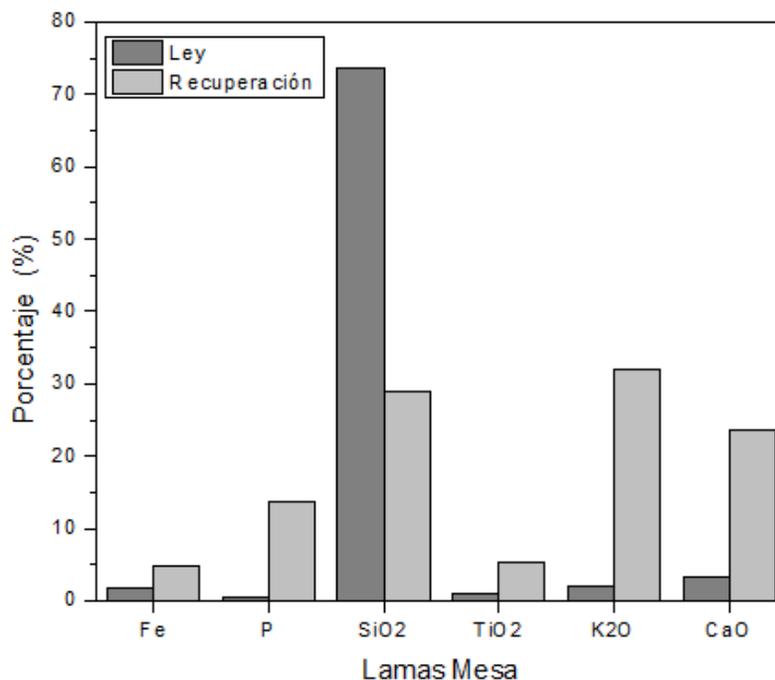


Figura N° 4. 55 Leyes y recuperaciones de la muestra de las lamas mesa

4.2.3.2 Concentración Magnética de baja intensidad en húmedo

En la figura 4.56 nos muestra un gráfico con las leyes y recuperaciones metalúrgicas obtenidas a través del análisis químico realizado a la muestra de concentrado magnético. En ella se observa que el hierro tiene una ley de 56,6% con una recuperación metalúrgica del 39,3%. Para el caso del TiO₂ se tiene una ley del 8,1% con una recuperación metalúrgica del 23,4%. El mineral que podemos encontrar es la magnetita.

En la figura 4.57 nos muestra un gráfico con las leyes y recuperaciones metalúrgicas obtenidas a través del análisis químico realizado a la muestra de relave no magnético. En ella se observa que el hierro tiene una ley de 28,9 % con una recuperación metalúrgica del 60,3%. Para el caso del TiO₂ se tiene una ley del 8,8% con una recuperación metalúrgica del 76,6%.

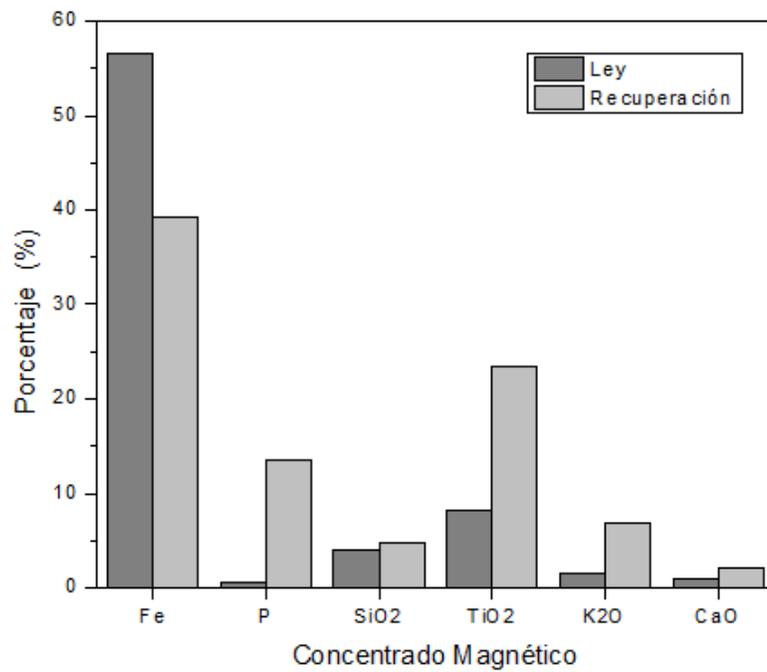


Figura N° 4. 56 Leyes y recuperaciones de la muestra de concentrado magnético

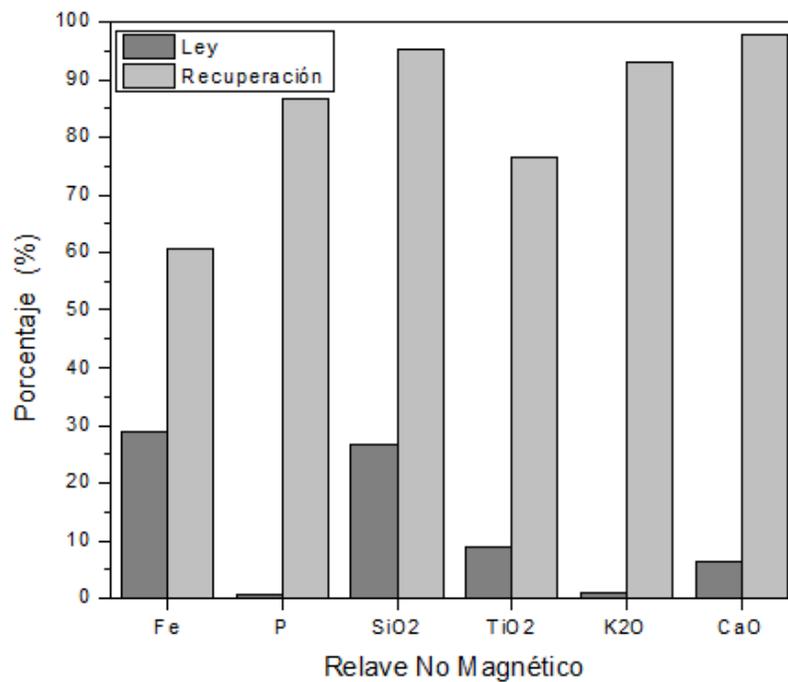


Figura N° 4. 57 Leyes y recuperaciones de la muestra de relave no magnético

4.2.2.3 Separación por medios densos.

En la figura 4.58 nos muestra un gráfico con las leyes y recuperaciones metalúrgicas obtenidas a través del análisis químico realizado a la muestra de sink (hundido). En ella se observa que el hierro tiene una ley de 32,71% con una recuperación metalúrgica del 95,8%. Para el caso del TiO_2 se tiene una ley del 9,8% con una recuperación metalúrgica del 94,6%.

En la figura 4.59 nos muestra un gráfico con las leyes y recuperaciones metalúrgicas obtenidas a través del análisis químico realizado a la muestra de float. En ella se observa que el hierro tiene una ley de 7,9% con una recuperación metalúrgica del 4,2%. Para el caso del TiO_2 se tiene una ley del 3,1% con una recuperación metalúrgica del 5,4%.

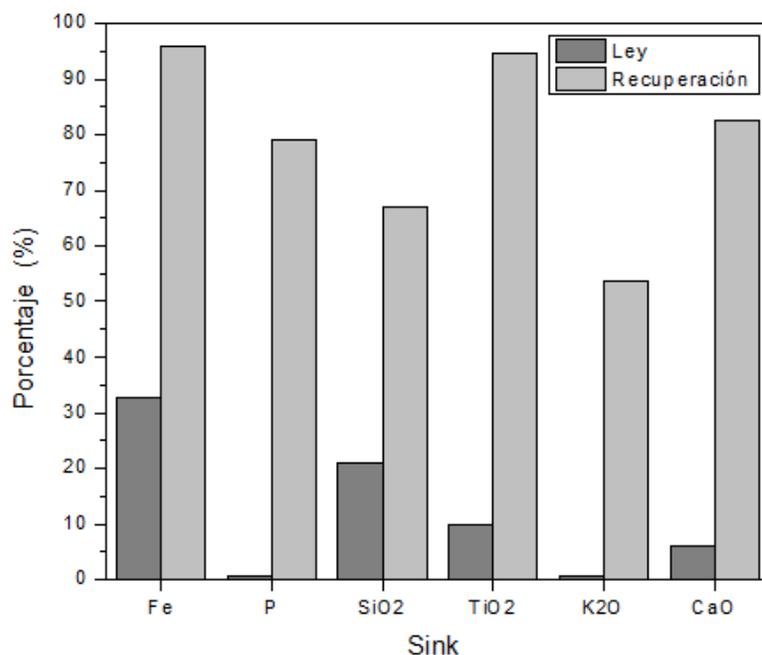


Figura N° 4. 58 Leyes y recuperaciones de la muestra de sink.

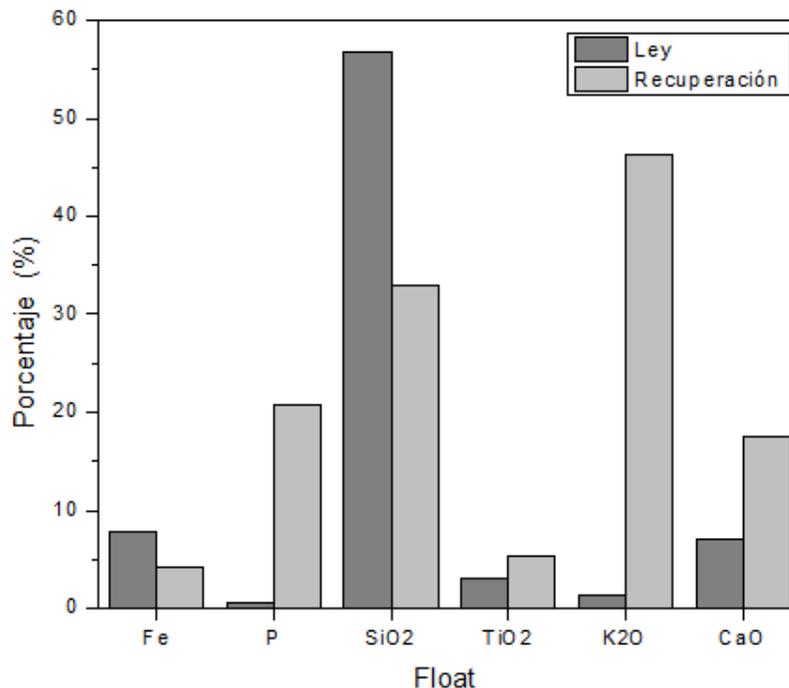


Figura N° 4. 59 Leyes y recuperaciones de la muestra del float

4.2.2.4 Concentración Electroestática

En la figura 4.60 nos muestra un gráfico con las leyes y recuperaciones metalúrgicas obtenidas a través del análisis químico realizado a la muestra de no conductor. En ella se observa que el hierro tiene una ley de 28,1% con una recuperación metalúrgica del 93,6%. Para el caso del TiO₂ se tiene una ley del 8,6% con una recuperación metalúrgica del 94,3%.

En la figura 4.61 nos muestra un gráfico con las leyes y recuperaciones metalúrgicas obtenidas a través del análisis químico realizado a la muestra de no conductor. En ella se observa que el hierro tiene una ley de 47,2% con una recuperación metalúrgica del 6,4%. Para el caso del TiO₂ se tiene una ley del 12,7% con una recuperación metalúrgica del 5,7%.

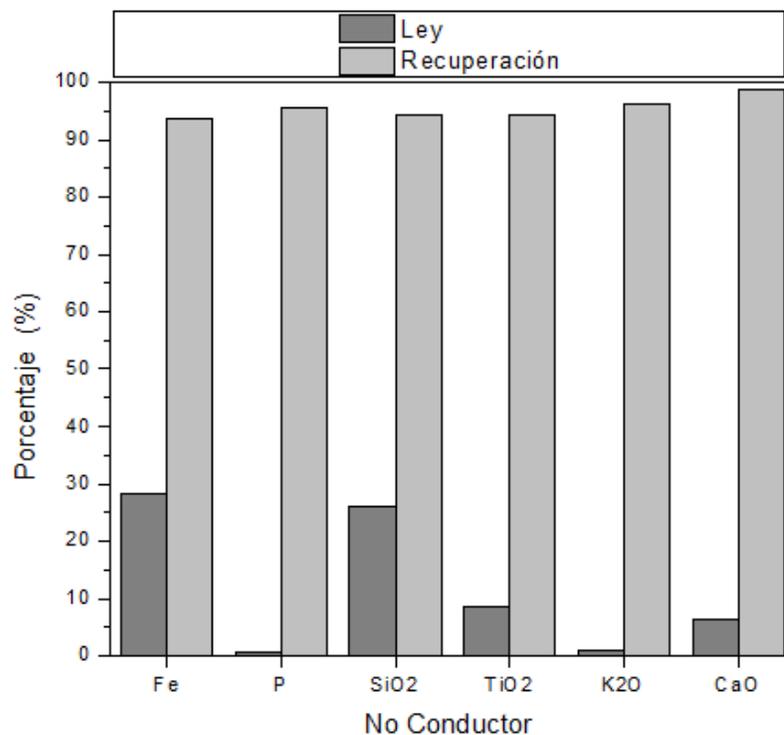


Figura N° 4. 60 Leyes y recuperaciones de la muestra del no conductor.

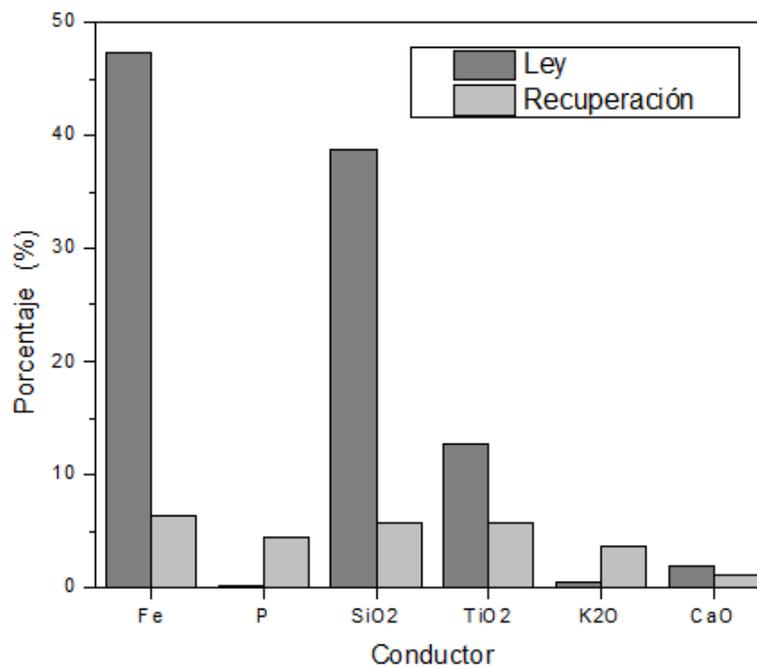


Figura N° 4. 61 Leyes y recuperaciones de la muestra del conductor.

4.2.2.5 Concentración magnética de alta intensidad en húmedo.

En la figura 4.62 nos muestra un gráfico con las leyes y recuperaciones metalúrgicas obtenidas a través del análisis químico realizado a la muestra de no conductor magnético. En ella se observa que el hierro tiene una ley de 28,6% con una recuperación metalúrgica del 94,8%. Para el caso del TiO_2 se tiene una ley del 8,6% con una recuperación metalúrgica del 93,5%. En cambio, en la figura 4.63 nos muestra un gráfico con las leyes y recuperaciones metalúrgicas obtenidas a través del análisis químico realizado a la muestra de no conductor no magnético. En ella se observa que el hierro tiene una ley de 14,6% con una recuperación metalúrgica del 5,2%. Para el caso del TiO_2 se tiene una ley del 5,6% con una recuperación metalúrgica del 93,5%.

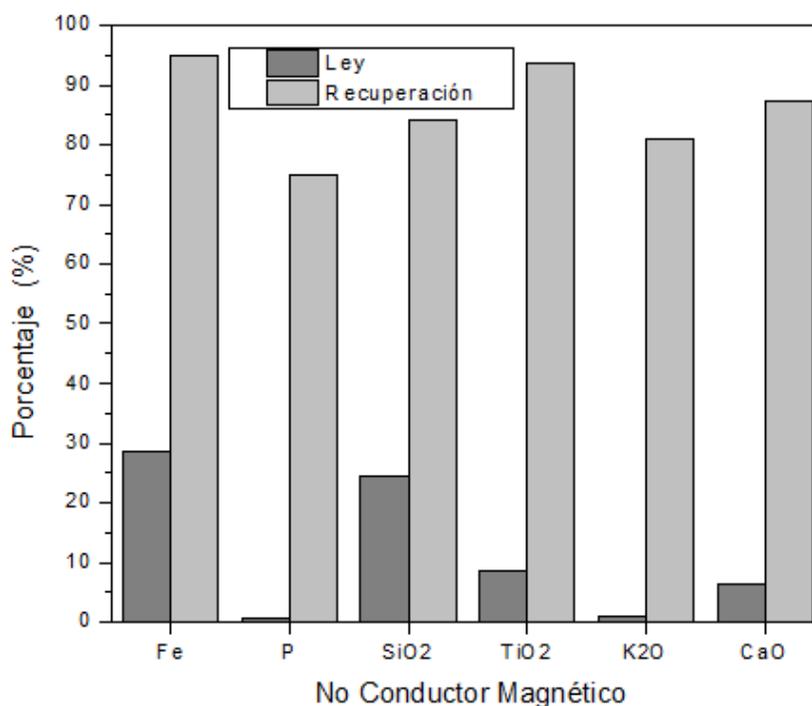


Figura N° 4. 62 Leyes y recuperación de la muestra no conductor magnético.

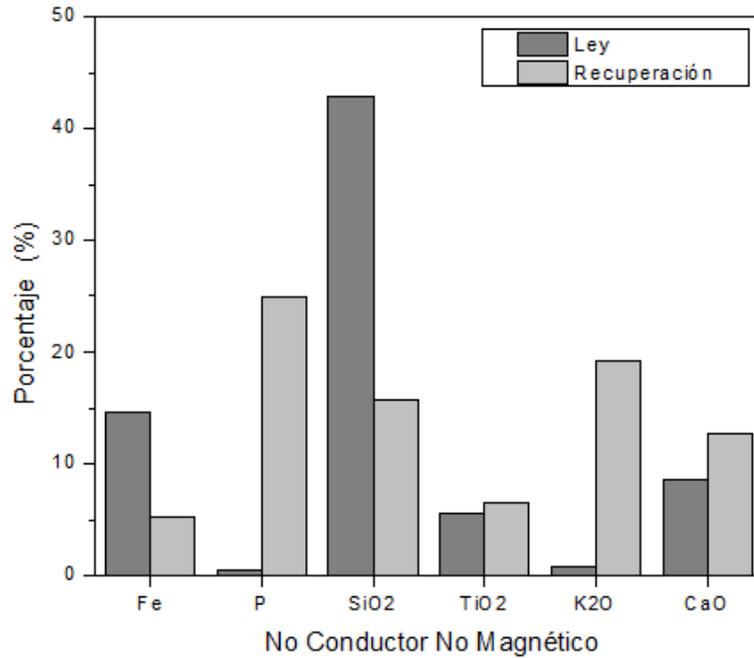


Figura N° 4. 63 Leyes y recuperaciones de la muestra no conductor no magnético

En la figura 4.64 nos muestra un gráfico con las leyes y recuperaciones metalúrgicas obtenidas a través del análisis químico realizado a la muestra de conductor magnético. En ella se observa que el hierro tiene una ley de 49,5% con una recuperación metalúrgica del 3,7%. Para el caso del TiO₂ se tiene una ley del 13% con una recuperación metalúrgica del 2,96%. En cambio, la figura 4.65 nos muestra un gráfico con las leyes y recuperaciones metalúrgicas obtenidas a través del análisis químico realizado a la muestra de conductor no magnético. En ella se observa que el hierro tiene una ley de 17,1% con una recuperación metalúrgica del 96,3%. Para el caso del TiO₂ se tiene una ley del 5,6% con una recuperación metalúrgica del 97,0%.

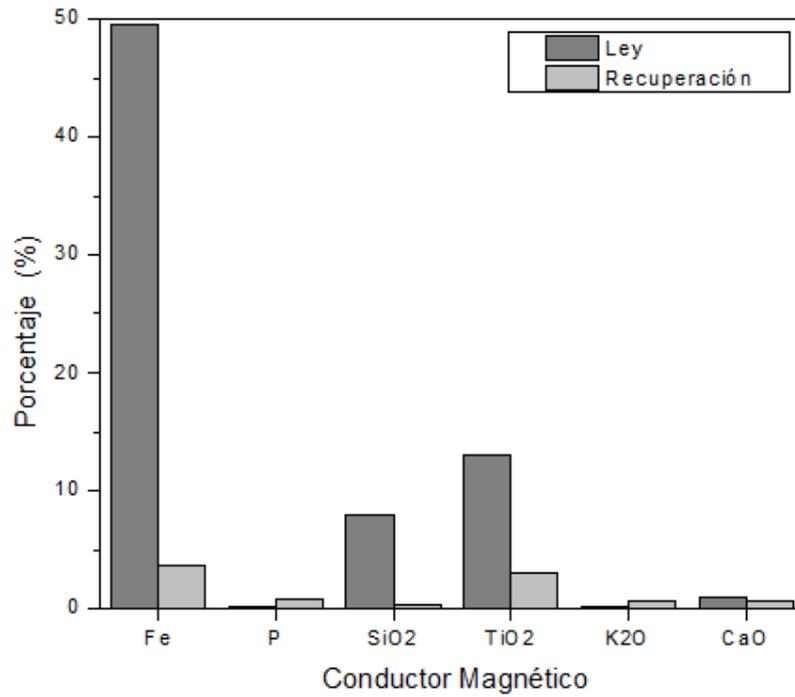


Figura N° 4. 64 Leyes y recuperaciones de la muestra conductor magnético.

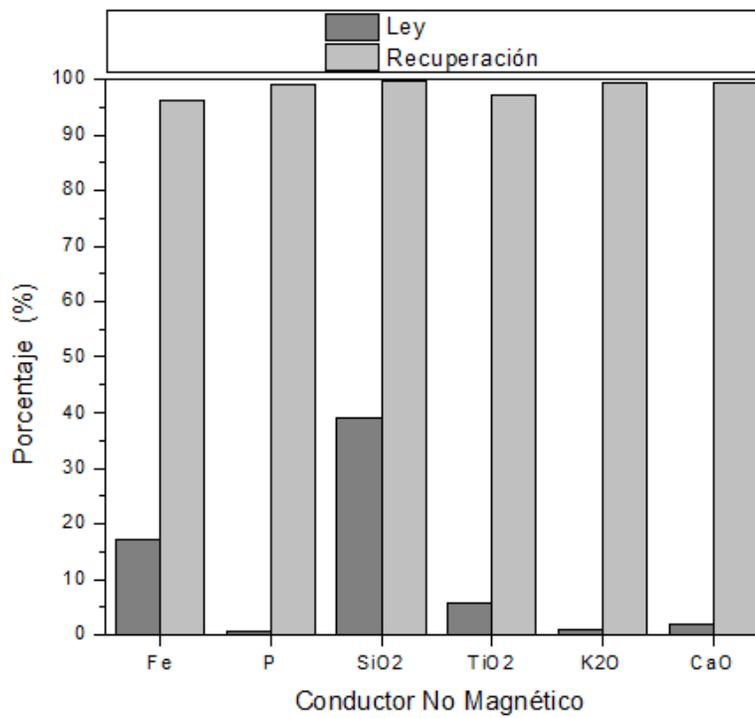


Figura N° 4. 65 Leyes y recuperaciones de la muestra conductor no magnético

4.2.4 Análisis mineralógico.

4.2.4.1 Fluorescencia de rayos x.

Se realizó fluorescencia de rayos x a través del equipo S1 TITAN BRUKER a las diversas muestras que se obtuvieron en la etapa de concentración. Los datos obtenidos se encuentran en el anexo 4.

4.2.4.1.1 Concentración gravimétrica.

Donde presentamos mayor concentración del P_2O_5 es en la muestra del mixto con 0,527%; en cambio para la muestra de concentrado se observa mayor cantidad de zircón titanio, hierro e itrio con un 0,18%, 6,6%, 30,3% y 0,01% respectivamente. En si esto nos indica que los elementos más pesados se encuentran en la muestra del concentrado lo que concuerda con el objetivo de la separación gravimétrica

4.2.4.1.2 Concentración magnética de baja intensidad en húmedo.

La mayor concentración de hierro y titanio se encuentra en el concentrado magnético esto implicaría que la ilmenita al ser paramagnética se concentró junto a la magnetita. Para el hierro y el titanio tenemos una concentración de 45,3% y de 7,1% respectivamente.

4.2.4.1.3 Separación por medios densos.

En este caso solo se sabe las concentraciones de lo hundido. Para el P_2O_5 se tiene un 0,2%, Zr se tiene 0,2%, Ti se tiene 7,9%, Fe se tiene 29,0% y para Y se tiene 0,01% en concentración.

4.2.4.1.4 Concentración electrostática.

En este caso también solo se realizó un análisis a la muestra del no conductor donde se obtuvieron concentraciones de P_2O_5 de 0,2%, Zr de 0,2%, Ti de 6,5%, Fe de 25,1% e Y de 0,01%.

4.2.4.1.5 Concentración magnética de alta intensidad en húmedo.

En el caso del no conductor magnético tenemos mayor concentración de P_2O_5 , Ti y Fe con 0,2%, 6,5% y 25,0% respectivamente esto se realiza comparando con la muestra del no conductor no magnético que tiene mayor concentración de Zr con un 0,7% e Y con un 0,02%.

En el caso de las muestras del conductor solo se realizó el análisis a la muestra conductora magnética en la cual se obtuvieron concentraciones de P₂O₅ de 0,2%, Zr de 0,04%, Ti de 11,6%, Fe 39,5% e Y con 0,003%.

4.2.4.2 Análisis Modal

El análisis modal es un proceso mediante el cual se obtiene el volumen porcentual, grado de liberación y los entrelazamientos de los minerales presentes en las muestras.

En la figura 4.66 nos muestra un gráfico con la composición mineralógica de las muestras de cabeza, concentrado mesa, concentrado magnético, conductor magnético, no conductor, no conductor no magnético. En ella se observa que en las muestras la mayor presencia es de hematita- magnetita; siendo la muestra de concentrado magnético donde alcanza la mayor presencia con un 64,2%.

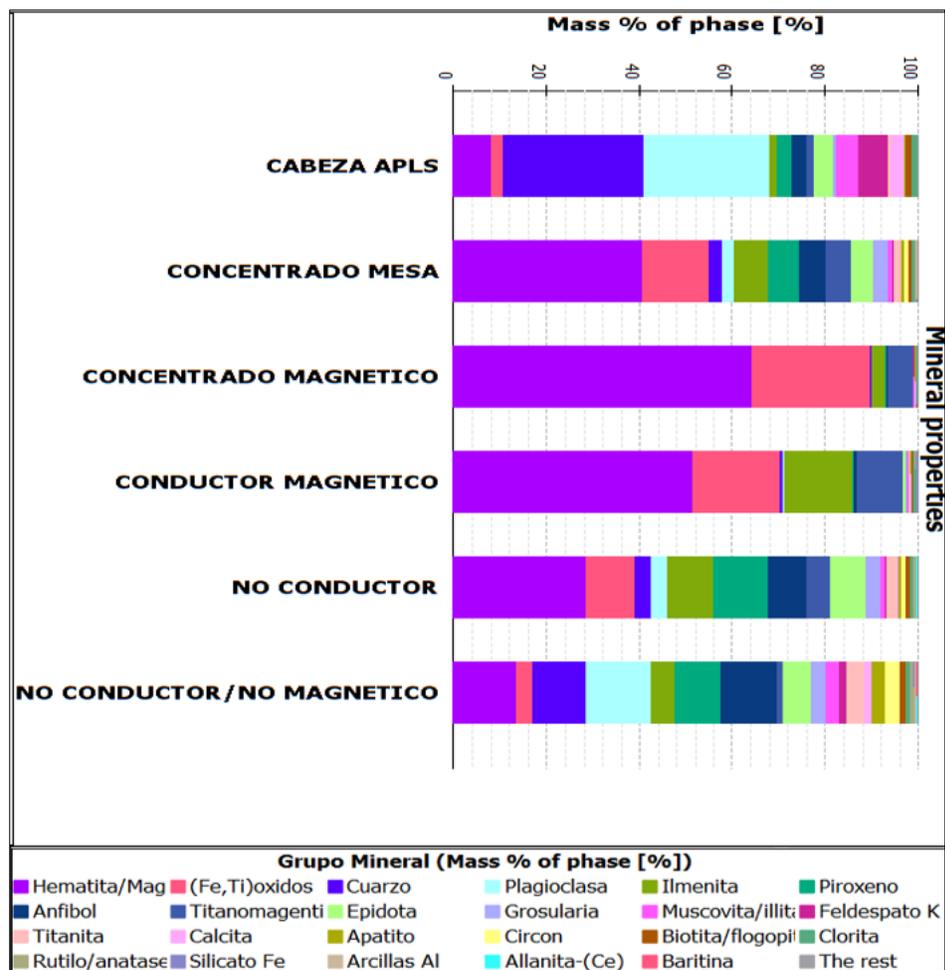


Figura N° 4. 66 Composición mineralógica

En la figura 4.67 nos muestra un gráfico la ocurrencia de los minerales de titanio en las muestras de cabeza, concentrado mesa, concentrado magnético, conductor magnético, no conductor, no conductor no magnético. En ella se observa que el las muestras tiene alto contenido de ilmenita y (Fe,Ti) óxidos; siendo las muestras no conductor y conductor magnético las que contienen mayor presencia de ilmenita con 48,0% y 47,8% respectivamente. Para el caso de (Fe,Ti) óxidos las muestras con el más alto contenido es el concentrado magnético con 61,9%.

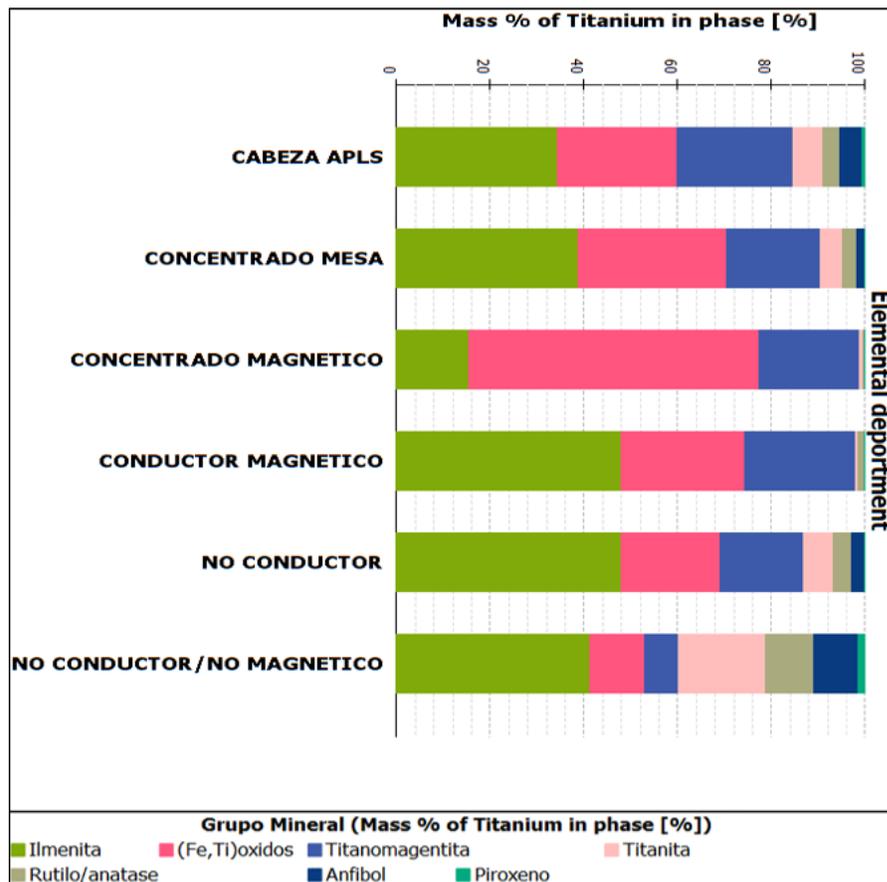


Figura N° 4. 67 Ocurrencia de titanio

En la figura 4.68 nos muestra un gráfico la ocurrencia de los minerales de zircón en las muestras de cabeza, concentrado mesa, concentrado magnético, conductor magnético, no conductor, no conductor no magnético. En ella se observa que en todas las muestras hay presencia de zircón, pero en pequeñas cantidades, como también lo indica la figura 4.66.

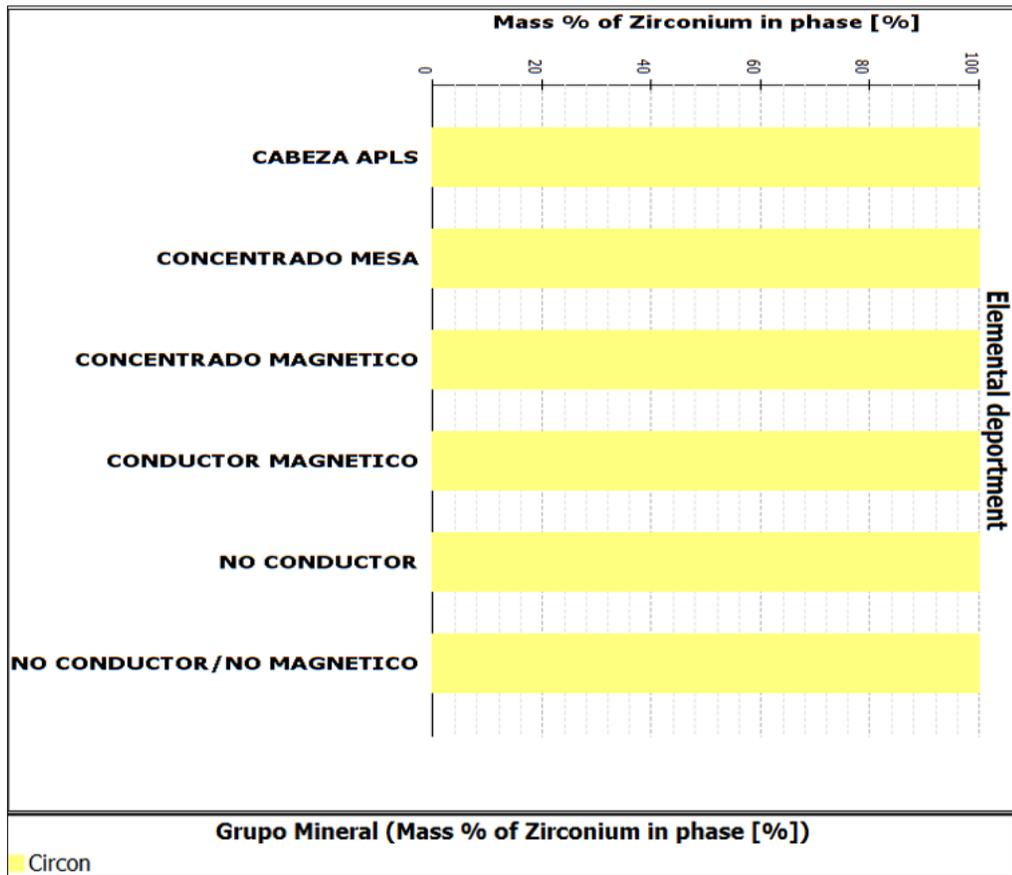


Figura N° 4. 68 ocurrencia del zircón

En la figura 4.69 nos muestra un gráfico donde se observan la espectrometría de los (Fe,Ti) óxidos presentes en las muestras en ella se observan los picos donde lo que se observan que el punto más alto son del Fe, también se hay puntos intermedios que indica la presencia de titanio y oxígeno.

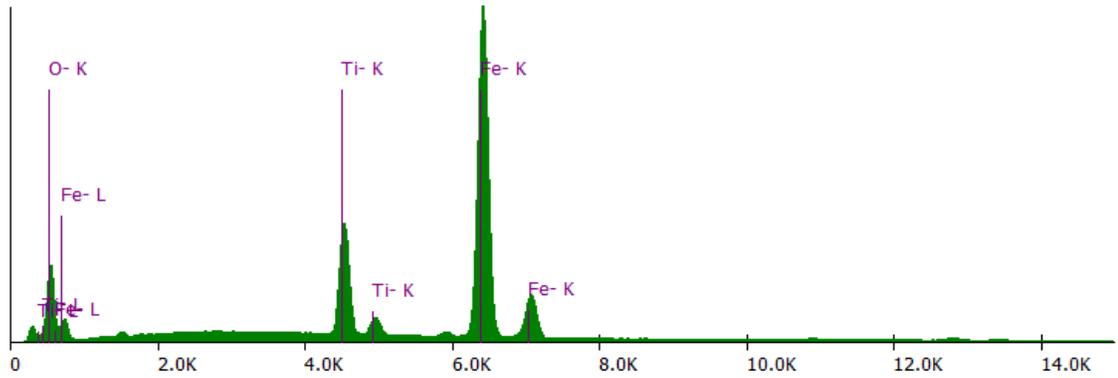


Figura N° 4. 69 Espectrometría de rayos x a los (Fe,Ti) óxidos

En la figura 4.70 nos muestra un gráfico con el tamaño de partículas respecto al porcentaje de masa. Se analizaron muestras de cabeza, concentrado mesa, concentrado magnético, conductor magnético, no conductor y no conductor no magnético.

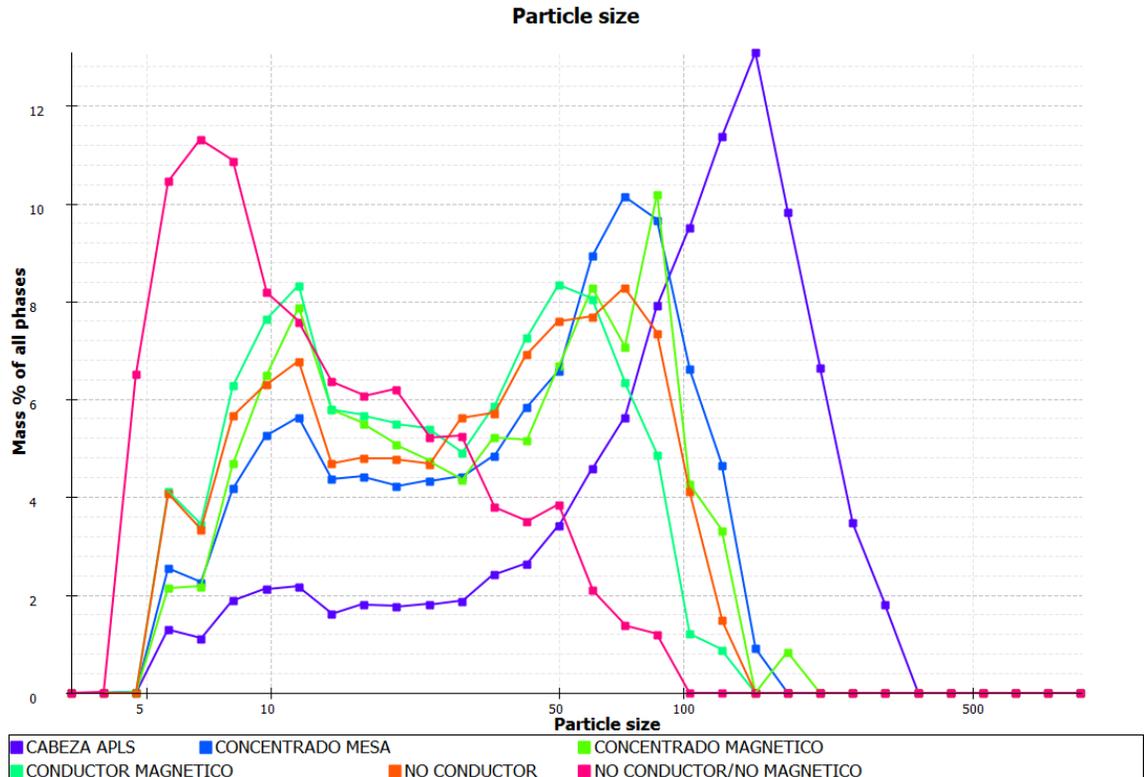


Figura N° 4. 70 Gráfico de tamaño de partículas respecto el porcentaje de masa.

En la figura 4.71 nos muestra un gráfico acumulativo del tamaño de partícula respecto al porcentaje de masa. Se analizaron las siguientes muestras de cabeza con un P80 de 167,02 μm , concentrado mesa con un P80 de 81,18 μm , concentrado magnético con un P80 de 76,11 μm , conductor magnético con un P80 de 76,11 μm , no conductor con un P80 de 67,62 μm y no conductor no magnético con un P80 27,47 μm . estos valores nos indican que las partículas de la muestra de cabeza son más grandes, en el caso de no conductor no magnético las partículas son menores.

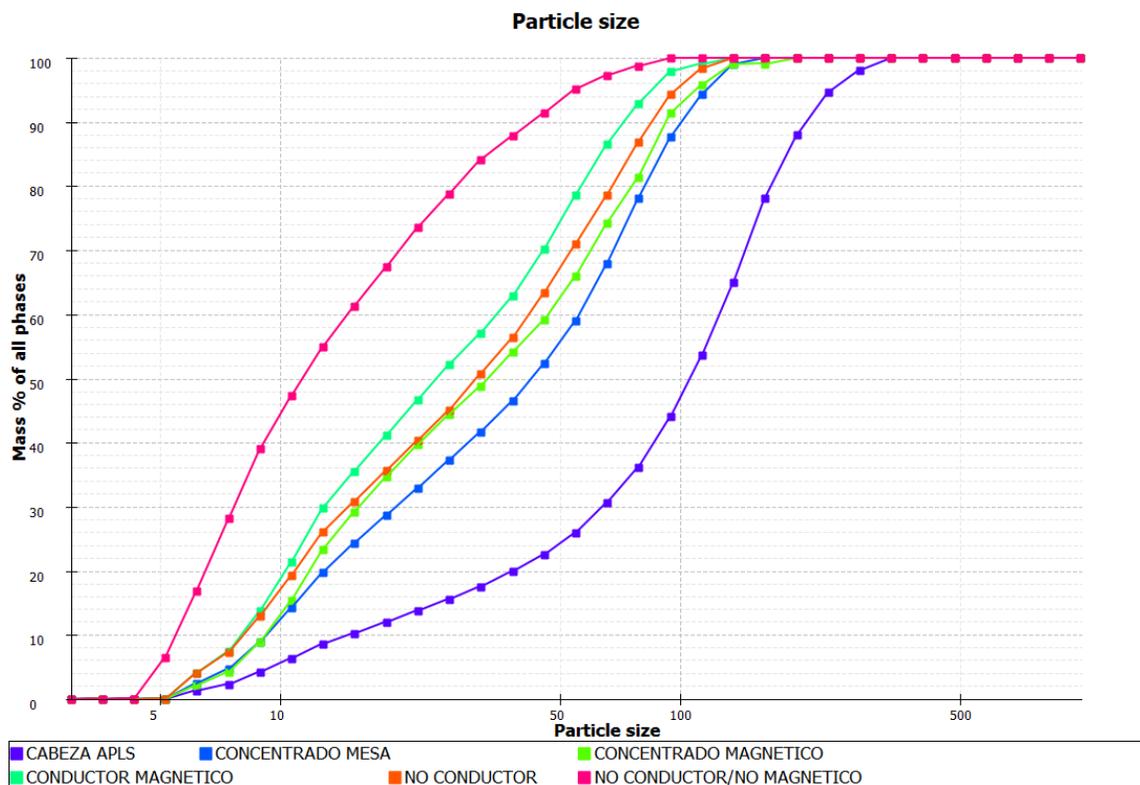


Figura N° 4. 71 Grafico acumulativo del tamaño de partícula respecto al porcentaje de masa.

En la figura 4.72 nos muestra gráfico con el análisis de liberación de partículas de (Fe, Ti) óxidos por perímetro. En él se observa en el rango de liberación de ≥ 90 es donde se concentra el mayor porcentaje de partículas. En la muestra de cabeza con un 28,7%, concentrado de mesa con un 43,6%, concentrado magnético con un 41,2%, conductor magnético con un 44%, no conductor con un 36,1% y el no conductor no magnético con un 58,1%. En el rango de liberación < 10 se observa el menor porcentaje de partículas en las muestras de concentrado de mesa con un 2,6%, concentrado magnético con un 1,5%, conductor magnético con un 1,6% y el no conductor no magnético con un 2,0%. En el rango de liberación $\geq 10 < 20$ no conductor con un 2,4% y la muestra de cabeza en el rango $\geq 40 < 50$ con un 2,8%.

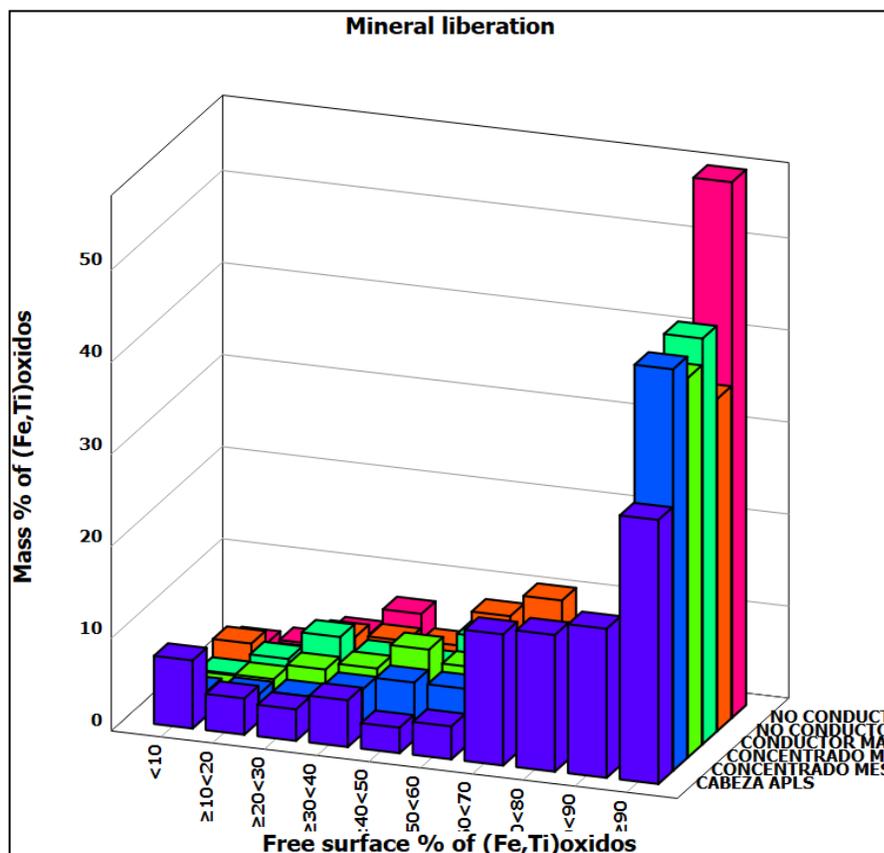


Figura N° 4. 72 Análisis de liberación de (Fe,Ti) óxidos por perímetro.

En la figura 4.73 nos muestra gráfico con el análisis de liberación de partículas de ilmenita por perímetro. En él se observa en el rango de liberación de ≥ 90 es donde se concentra el mayor porcentaje de partículas. En la muestra de cabeza con un 33,9%, concentrado de mesa con un 49,0%, concentrado magnético con un 29,2%, conductor magnético con un 58,3%, no conductor con un 59,5% y el no conductor no magnético con un 64,1%. En el rango de liberación $\geq 30 < 40$ se observa el menor porcentaje de partículas para la muestra de cabeza con un 1,3%. Para la muestra de concentrado de mesa con un 3,1% y la de conductor magnético con un 2,3% se encuentran el rango de liberación de < 10 . En la muestra de concentrado magnético se encuentra en el rango de $\geq 40 < 50$ con un 4,9%, no conductor en el rango $\geq 10 < 20$ con un 1,9% y el no conductor no magnético en el rango $\geq 50 < 60$ con un 1,9%.

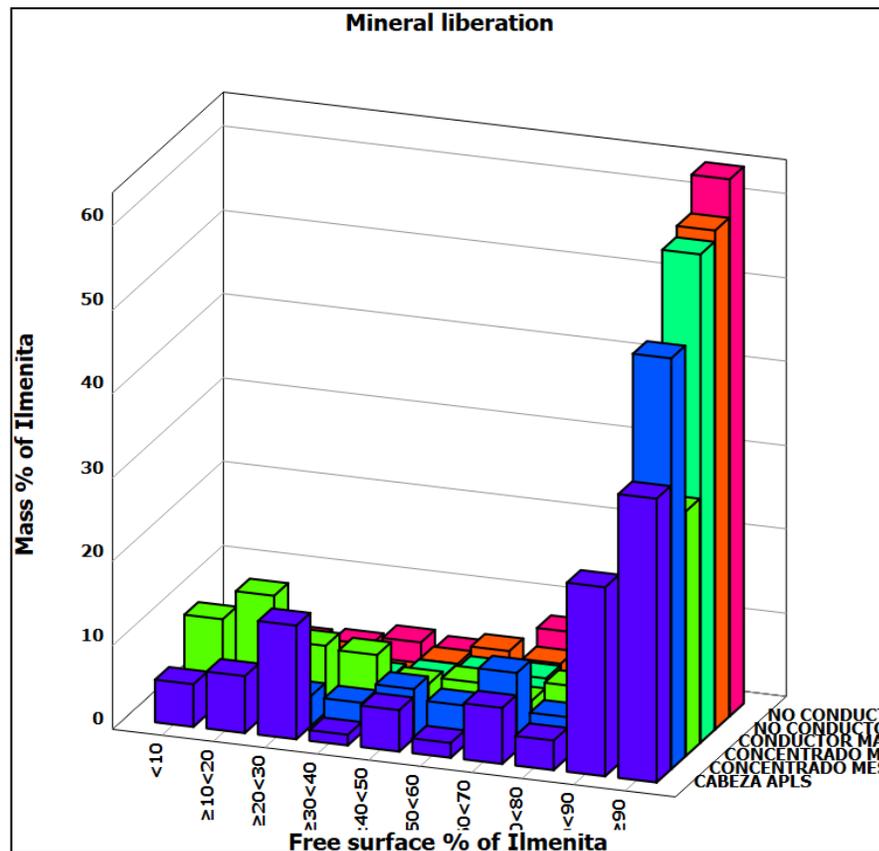


Figura N° 4. 73 Análisis de liberación de ilmenita por perímetro.

En la figura 4.74 nos muestra gráfico con el análisis de liberación de partículas de titanomagnetita por perímetro. En él se observa en el rango de liberación de ≥ 90 es donde se concentra el mayor porcentaje de partículas. En la muestra de cabeza con un 35,6%, concentrado de mesa con un 38,4%, concentrado magnético con un 27,1%, conductor magnético con un 39,0%, no conductor con un 33,9% y el no conductor no magnético con un 40,4%. En el rango de liberación < 10 se observa el menor porcentaje de partículas en las muestras concentrado magnético con un 3,6%, conductor magnético con un 2,7%. En el rango $\geq 20 < 30$ la muestra del no conductor con un 4,7%. En el rango $\geq 50 < 60$ el concentrado de mesa con un 1,9%. En el rango $\geq 60 < 70$ el no conductor no magnético con un 2,4%. En el rango $\geq 70 < 80$ la muestra de cabeza con un 3,4%.

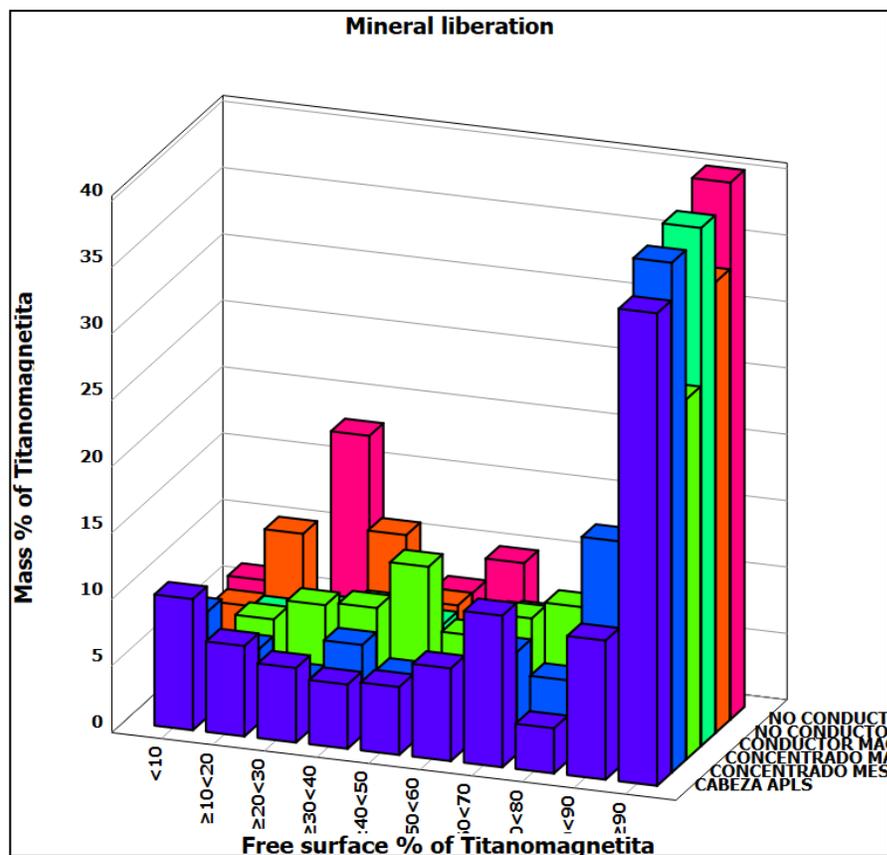


Figura N° 4. 74 Análisis de liberación de titanomagnetita por perímetro.

En la figura 4.75 nos muestra gráfico con el análisis de liberación de partículas de titanita por perímetro. En él se observa en el rango de liberación de ≥ 90 es donde se concentra el mayor porcentaje de partículas. En la muestra de cabeza con un 58,2%, concentrado de mesa con un 65,3%, concentrado magnético con un 31,3%, conductor magnético con un 32,9%, no conductor con un 74,6% y el no conductor no magnético con un 79,4%. En el rango de liberación < 10 se observa el menor porcentaje de partículas en la muestra del no conductor no magnético con 0,2%. En el rango $\geq 20 < 30$ el concentrado mesa con 1,5%. En el rango $\geq 30 < 40$ el conductor magnético con el 0,36%. En el rango $\geq 70 < 80$ las muestras de cabeza con el 0,11% y el concentrado magnético con el 1,38%. En el rango $\geq 80 < 90$ la muestra del no conductor con un 0,54%.

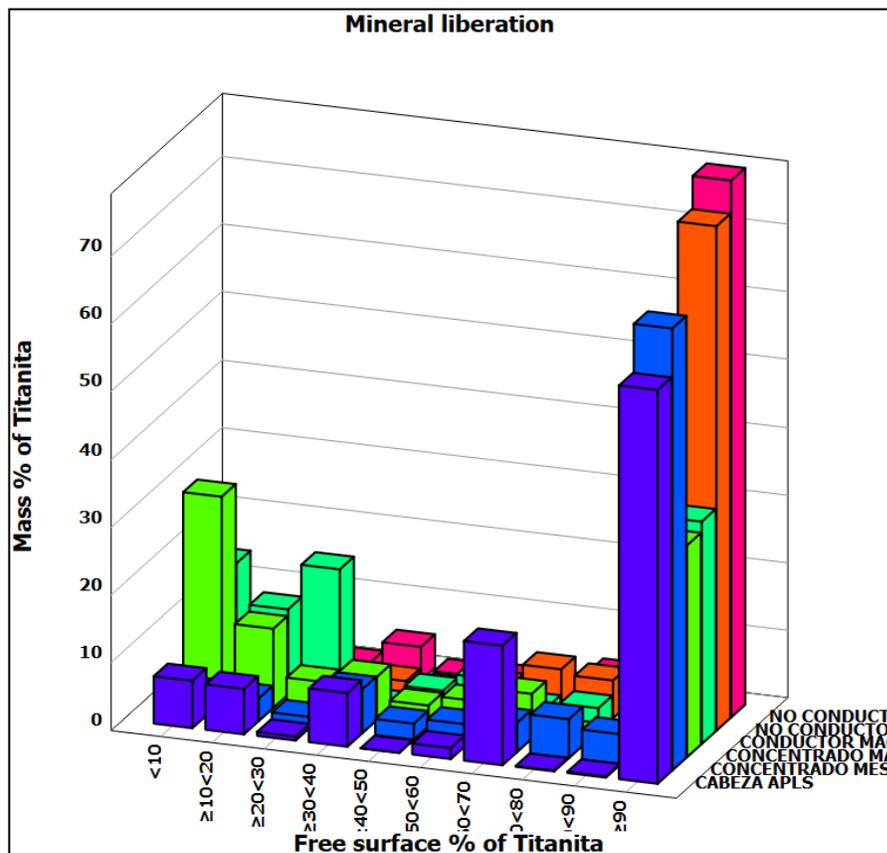


Figura N° 4. 75 Análisis de liberación de titanita por perímetro.

En la figura 4.76 nos muestra gráfico con el análisis de liberación de partículas de zircón por perímetro. En él se observa en el rango de liberación de ≥ 90 es donde se concentra el mayor porcentaje de partículas, para las muestras de concentrado de mesa con un 93,7%, conductor magnético con un 81,3%, no conductor con un 66,7% y el no conductor no magnético con un 84,2%. la muestra de cabeza se encuentra en el rango de $\geq 80 < 90$ con un 93,9% y la muestra de concentrado magnético se encuentra en el rango de $\geq 10 < 20$ con un 60,0%. También se observa que rangos donde el porcentaje de liberación es menor como el caso de la muestra de cabeza donde en los rangos < 10 y ≥ 90 es del 1,2%. En la muestra del concentrado de mesa se encuentra en el rango $\geq 70 < 80$ con el 0,22%, el concentrado magnético en el rango < 10 con el 2,6%, el conductor magnético en el rango < 10 con el 7,1%, el no conductor en el rango $\geq 60 < 70$ con el 0,3% y no conductor no magnético en el rango $\geq 10 < 20$ con el 0,2%. Además, Además, se observa que en algunos de los rangos no hay porcentaje de partículas liberados.

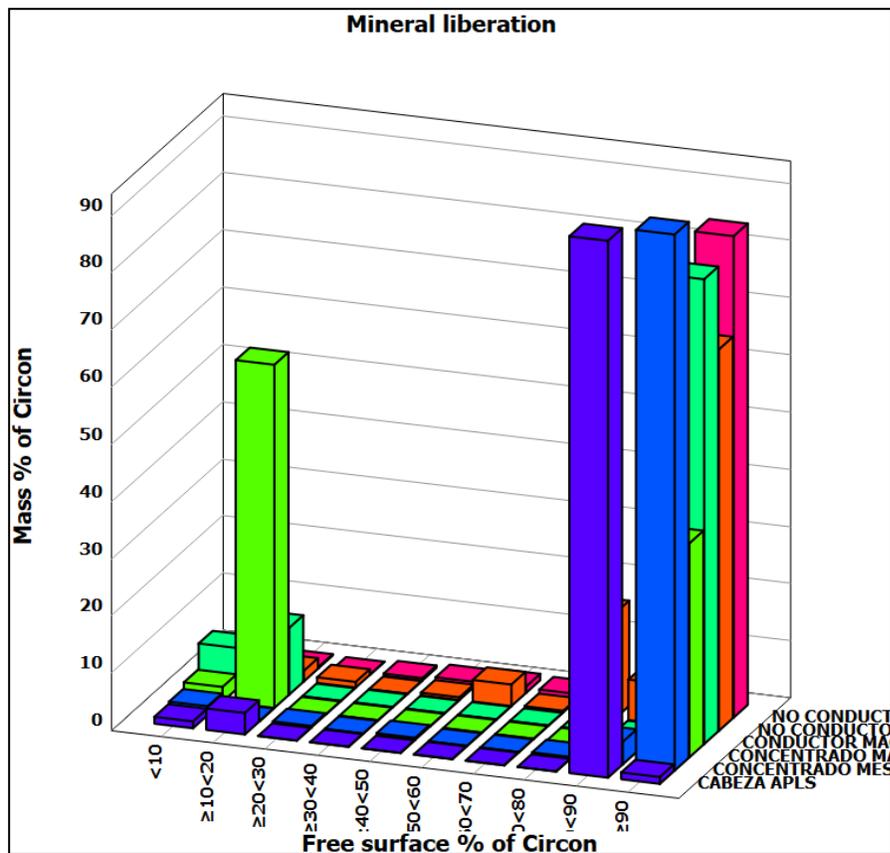


Figura N° 4. 76 Análisis de liberación de zircón por perímetro.

En la figura 4.77 nos muestra gráfico con el análisis de liberación de partículas de rutilo/anatasa por perímetro. En él se observa en el rango de liberación de ≥ 90 es donde se concentra el mayor porcentaje de partículas, para las muestras de cabeza con un 39,4%, concentrado de mesa con un 25,1%, conductor magnético con un 26%, no conductor con un 19,2% y el no conductor no magnético con un 40,9%. La muestra de concentrado magnético se encuentra en el rango de < 10 con un 70,1%. También se observa que rangos donde el porcentaje de liberación es menor como el caso de la muestra de concentrado magnético donde en los rangos $\geq 30 < 40$ y $\geq 50 < 60$ es del 1,5%. En la muestra de cabeza se encuentra en el rango $\geq 30 < 40$ con el 1,6%, el concentrado mesa en el rango $\geq 50 < 60$ con el 0,7%, el conductor magnético en el rango $\geq 80 < 90$ con el 1,3%, el no conductor en el rango $\geq 60 < 70$ con el 1,0% y no conductor no magnético en el rango $\geq 50 < 70$ con el 1,5%. Además, se observa que en algunos de los rangos no hay porcentaje de partículas liberados.

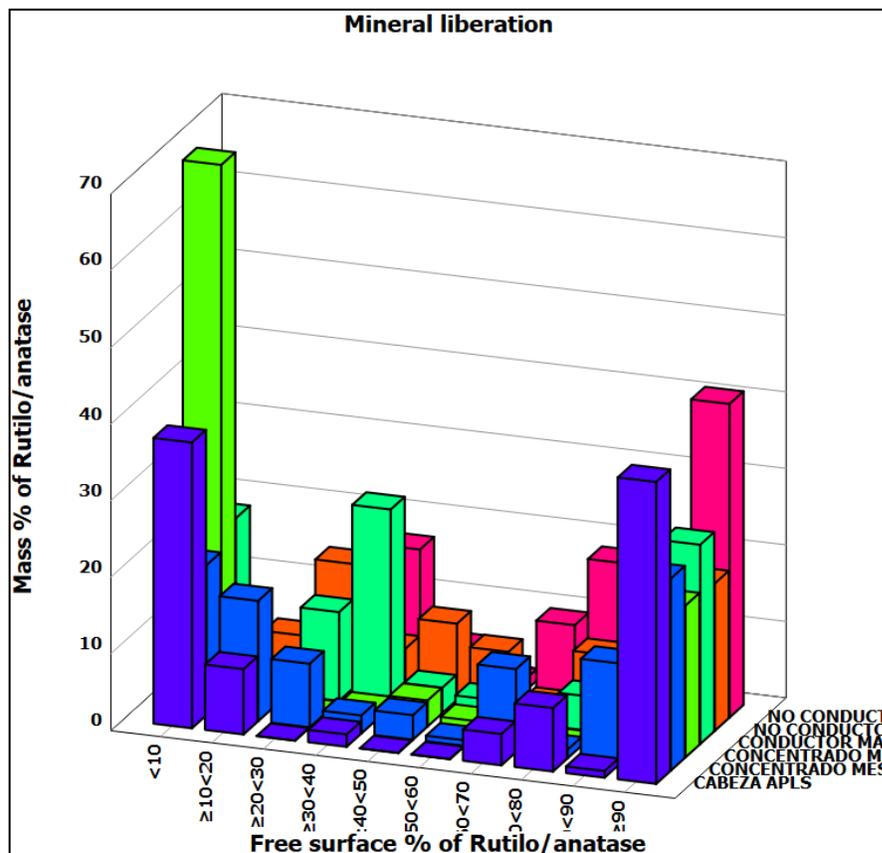


Figura N° 4. 77 Análisis de liberación de rutilo/anatasa por perímetro.

CAPÍTULO V Conclusiones.

De los resultados obtenidos con las muestras de arenas de playa las Salinas se puede concluir la siguiente:

La muestra de arena de las Salinas presenta una ley de cabeza de 8,6% de Fe y 2% de TiO₂, además posee una alta ley de SiO₂ de 62,3%. La distribución granulométrica y el análisis químico muestran que para el tamaño de 149 μm presenta un alto contenido de los elementos como el hierro que alcanza 46,8% y el TiO₂ con un 57,9%. Para el tamaño de 105 μm con un 32% de Fe y un 28,2% de TiO₂.

El análisis mineralógico confirmo que los principales constituyentes de la arena son cuarzo, calcita, pargasita, ankerita, augita, epidota, giniita, phillipsita, illita, magnetita, labradorita, anortoclasa, albita, ortoclasa, hematita, ilmenita, rutilo, anatasa, zirconita, monacita. Los cuales tienen una gran importancia y viabilidad económica.

En el primer proceso de concentración, tenemos la etapa de separación magnética de baja intensidad en seco en donde el 13,5% en peso es de la fracción magnética, con una ley de Fe 31,1% y una recuperación del 49%, una ley de TiO₂ del 6,1% con una recuperación del 41,8%. La fracción no magnética es el 86,5% en peso, con una ley de hierro de 5,1% y una ley de TiO₂ un 1,3%.

En cuanto a la fracción no magnética una parte de ella es llevada a separación por medios densos bajo, donde el 20,8% en peso es del hundido, con una ley de hierro del 20,66% y una recuperación del 85,1%, una ley de TiO₂ del 5,9% con una recuperación del 48,2%. Lo flotado es el 79,2% en peso, presenta una ley de hierro de 1,0% y una ley de TiO₂ del 1,8%

La otra parte de la fracción no magnética se concentra a través de una separación gravimétrica donde el 24,3% en peso pertenece al concentrado, con una ley de hierro del 14,69% y una recuperación metalúrgica del 67,2%, una ley de TiO₂ del 3,9% con una recuperación 12%. El relave es el 75,7% en peso presenta una ley de hierro del 2,3% y una ley de TiO₂ del 9,2%.

El concentrado obtenido se procesa a través de una separación electroestática donde el 91,1% en peso pertenece al conductor, con una ley de hierro del 45,8% y una

recuperación metalúrgica del 98,0%, una ley de TiO_2 de 4,0% con una recuperación del 92,0%. El no conductor es el 8,9% en peso presenta una ley de hierro del 9,7% y una ley de TiO_2 de 3,5%.

Tanto el conductor como el no conductor fueron concentrados en equipo de separación magnética de alta intensidad bajo las mismas condiciones. En la muestra conductora magnética el 92,5% en peso presenta una ley de hierro del 43,92% con una recuperación metalúrgica del 92,9% y una ley de TiO_2 del 11,6% con una recuperación del 94,6%. El no magnético es el 7,5% en peso presenta una ley de hierro del 41,7% y una ley de TiO_2 del 8,1%. En el caso del no conductor magnético el 59,9% en peso con una ley de hierro del 16,5% con una recuperación metalúrgica del 89,0% y una ley TiO_2 del 3,5% con una recuperación del 66,6%. El no magnético es el 40,1% en peso presenta una ley de hierro del 3,1% con y una ley de TiO_2 del 2,6%.

En el segundo proceso de concentración, tenemos la etapa de separación gravimétrica en donde el 18,0% en peso es del concentrado, con una ley de Fe 35,8% y una recuperación del 79,5%, una ley de TiO_2 del 8,6% con una recuperación del 70,6%. El mixto es el 7,8% en peso, con una ley de hierro de 7,2% y una ley de TiO_2 un 2,7%, el relave 50,6% en peso, con una ley de hierro de 1,4% y una ley de TiO_2 un 0,6% y las lamas un 23,6% en peso con una ley de hierro de 1,7% y una ley de TiO_2 un 0,5%.

Debido a que gran parte de los elementos se encuentran retenidos en el tamaño 105 μm , se integró una etapa de molienda con el objetivo de obtener un 100% -#272 μm en la muestra del concentrado, y así liberar las partículas, mejorar las leyes y recuperaciones.

El concentrado molido pasa por separación magnética de baja intensidad en húmedo en donde el 24,8% en peso es de la concentración magnética, con una ley de Fe 56,6% y una recuperación del 39,3%, una ley de TiO_2 del 8,13% con una recuperación del 23,4%. El relave no magnético es el 75,2% en peso, con una ley de hierro de 28,9% y una ley de TiO_2 un 8,8%.

La fracción del relave no magnético una parte de ella es llevada a separación por medios densos, donde el 84,6% en peso es del hundido, con una ley de hierro del 32,7% y una recuperación del 95,8%, una ley de TiO_2 del 9,8% con una recuperación del 94,6%.

Lo flotado es el 15,4% en peso, presenta una ley de hierro de 7,9% y una ley de TiO₂ del 3,1%

La otra parte de la fracción del relave no magnético se concentra a través una separación electrostática donde el 3,9% en peso pertenece al conductor, con una ley de hierro del 47,2% y una recuperación metalúrgica del 6,4%, una ley de TiO₂ de 12,7% con una recuperación del 5,7%. El no conductor es 96,1% en peso presenta una ley de hierro del 28,6% y una ley de TiO₂ de 8,6%.

Tanto el conductor como el no conductor fueron concentrados en equipo de separación magnética de alta intensidad bajo las mismas condiciones. En el conductor la muestra magnética es el 1,3% en peso presenta una ley de hierro del 49,5% con una recuperación metalúrgica del 3,7% y una ley de TiO₂ del 13,0% con una recuperación del 3,0%. El no magnético es el 98,7% en peso presenta una ley de hierro del 17,1% y una ley de TiO₂ del 8,1%. En el caso del no conductor el 90,3% en peso es de la muestra magnética tiene una ley de hierro del 28,6% con una recuperación metalúrgica del 94,8% y una ley TiO₂ del 8,6% con una recuperación del 93,5%. El no magnético es el 9,7% en peso presenta una ley de hierro del 14,6% con y una ley de TiO₂ del 5,6%.

Ambas etapas de concentración son viables para el tratamiento de las arenas. Un factor influyente en la concentración de ellas fue la granulometría ya que a pesar de haber aplicado la molienda hay muchas partículas que no se encuentra liberadas como lo indica el análisis modal. Cabe mencionar que en la segunda etapa se obtuvieron mejores leyes y recuperaciones.

CAPÍTULO VI Bibliografía.

- Arrazola, Garay, Irantzu, Iriarte, Soler, & M.G.E.P. (2013). Mecanizado de aleaciones de titanio empleadas en aeronáutica. San Sebastián.
- Bustamante, M. O., Gaviria, A., & Restrepo, O. (2007). Concentración de minerales. Medellín, Colombia.
- COCHILCO. (2016). Situación actual del mercado de tierras raras y su potencial en Chile.
- EPA. (2012). Rare Earth Elements: A review of production, processing, recycling and associated environmental issues. Environmental Protection Agency, Washington, DC.
- Gilchrist. (1989). Procesos de extracción. Oxford: Pergamon Press.
- Girardi. (2017). Elementos químicos radioactivos recuentan la historia de la formación del litoral sudeste de Brasil. Pesquisa Fapesp.
- Griem. (28 de 07 de 2010). Atacama virtual. Obtenido de <https://www.geovirtual2.cl/MVpaisaje/tur250PuertoViejo01.htm>
- Jones. (2015). Mineral Sands: An Overview of the Industry.
- Pavez, I. (2020). Proceso de Extracción de Elementos de Tierras Raras (lantánidos, neodimio y disprosio) de bajo impacto ambiental a partir de relaves geoquímicamente catastrados. Concepción, Chile.
- Pávez, O. (2005). Apuntes de concentración de minerales II. Copiapó.
- PREMARATNE, & ROWSON. (2003). The processing of beach sand from Sri Lanka the recovery of titanium using magnetic separation. Physical Separation in Science and Engineering, 12-22.
- Routray, Padhi, & Bera. (2014). Recovery of zircons of South Eastern Coast of India: Their potential as refractories and ceramics.
- Valderrama, Poblete, & Contreras. (2017). Concentración de minerales de titanio contenidas en las arenas de playas de la región de Atacama-Chile. Copiapó, Chile.
- Valderrama, Pop, Chamarro, Santander, & López. (2013). Caracterización y concentración de minerales pesados de arenas desérticas. Copiapó, Chile.

ANEXO 1 Análisis granulométricos

Tabla 1 Análisis granulométrico de la cabeza inicial de las arenas de playa las Salinas.

Malla ASTM	Abertura(μm)	G-1	G-2
		Acum. Pasante (%)	Acum. Pasante (%)
18	1000	100	100
20	850	99,95	99,93
30	600	98,94	98,83
40	425	91,65	91,32
50	300	71,92	72,07
70	212	39,94	39,3
100	150	12,26	12,38
140	106	3,11	3,14
200	75	0,2	0,2
-200	75	0	0

Tabla 2 análisis granulométrico de los productos de la concentración gravimétrica de las arenas de playa las Salinas.

Malla ASTM	Abertura μm	Lamas	Relave	Mixto	Concentrado
		Acum. Pasante (%)	Acum. Pasante (%)	Acum. Pasante (%)	Acum. Pasante (%)
18	1000	100,00	100,00	100,00	100,00
20	850	99,68	99,98	99,98	100,00
30	600	96,26	99,66	99,89	99,99
40	425	75,98	95,79	99,26	99,89
50	300	36,07	75,37	95,80	99,18
70	212	7,88	29,58	69,96	91,21
100	150	0,80	2,34	12,34	53,55
140	106	0,27	0,17	0,79	15,38
200	75	0,15	0,05	0,07	0,73
-200	75	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 3 análisis granulométrico de la etapa de molienda de las arenas de playa las Salinas.

Malla ASTM	Abertura μm	Concentrado	Con. Molienda	Cabeza inicial
		Acum. Pasante (%)	Acum. Pasante (%)	Acum. Pasante (%)
18	1000	100,00	100,00	100,00
20	850	100,00	100,00	99,95
30	600	99,99	100,00	98,94
40	425	99,89	100,00	91,65
50	300	99,18	100,00	71,92
70	212	91,21	100,00	39,94
100	150	53,55	98,46	12,26
140	106	15,38	59,03	3,11
200	75	0,73	31,77	0,20
-200	75	0,00	0,00	0,00

ANEXO 2 Peso específico

- Separación magnética de baja intensidad en seco.

Tabla 4 Peso específico fracción magnética.

W1	W2	W3	W4	Densidad real (kg/L)
40,5892	56,1792	101,065	90,0732	3,3905
39,7454	53,8174	99,6085	89,6444	3,4256
40,6162	62,6632	105,683	90,0697	3,4265
Densidad promedio				3,4142

Tabla 5 Peso específico fracción no magnética.

W1	W2	W3	W4	Densidad real (kg/L)
40,5892	56,81	100,3554	90,0966	2,7233
39,7753	58,7775	101,7521	89,6650	2,7479
40,6346	65,7005	105,9408	90,1318	2,7078
Densidad promedio				2,7263

- Separación por medios densos.

Tabla 6 Peso específico de lo sink y float.

Muestra	W1	W2	W3	W4	Densidad real (kg/L)
Sink	40,6142	44,1945	92,5330	90,0822	3,1698
Float	39,7438	46,1961	93,6379	89,6427	2,6260

- Separación gravimétrica.

Tabla 7 Peso específico del concentrado.

W1	W2	W3	W4	Densidad real (kg/L)
40,6102	45,8159	93,559	90,0725	3,0280
39,7468	47,3897	94,78	89,6373	3,0569
39,7604	45,7978	93,6966	89,6442	3,0415
Densidad promedio				3,0421

Tabla 8 Peso específico del relave.

W1	W2	W3	W4	Densidad real (kg/L)
39,7497	45,7733	93,3977	89,648	2,6490
40,5710	47,3223	94,2736	90,0625	2,6578
39,7586	46,3168	93,6805	89,6404	2,6044
Densidad promedio				2,6371

- Separación electrostática.

Tabla 9 Peso específico del conductor.

W1	W2	W3	W4	Densidad real (kg/L)
----	----	----	----	----------------------

40,4538	44,8991	93,5123	90,0809	4,1084
39,8436	43,3918	92,3656	89,6507	4,2541
39,8788	45,2512	93,8254	89,7587	4,1146
Densidad promedio				4,1590

Tabla 10 Peso específico del no conductor.

W1	W2	W3	W4	Densidad real (kg/L)
40,5706	44,0015	93,0185	90,0985	2,9326
32,1806	38,2244	86,4629	82,4349	2,9983
39,7485	45,4556	93,4048	89,6526	2,9194
Densidad promedio				2,9501

- Separación magnética de alta intensidad en húmedo.

Tabla 11 Peso específico del conductor magnético.

W1	W2	W3	W4	Densidad real (kg/L)
32,1812	38,1603	86,9968	82,4269	4,2429
39,7139	48,2449	96,1862	89,6537	4,2687
40,5705	49,2487	96,6947	90,0849	4,1956
Densidad promedio				4,2357

Tabla 12 Peso específico del conductor no magnético.

W1	W2	W3	W4	Densidad real (kg/L)
32,2146	34,3290	83,8958	82,4232	3,2945
39,7763	43,3695	92,3324	89,6434	3,9739
40,6028	44,0012	92,5756	90,0741	3,7891
Densidad promedio				3,6858

Tabla 13 Peso específico del no conductor magnético.

W1	W2	W3	W4	Densidad real (kg/L)
32,2346	37,2241	85,7819	82,4264	3,0535
39,7562	45,2942	93,4271	89,6517	3,1419
40,6083	45,6829	93,5447	90,0784	3,1572
Densidad promedio				3,1176

Tabla 14 Peso específico del no conductor no magnético.

W1	W2	W3	W4	Densidad real (kg/L)
32,2080	38,9385	86,7105	82,4294	2,7478
39,7581	46,8739	94,1369	89,7506	2,6070
40,6268	45,1059	92,8402	89,8637	2,9809
Densidad promedio				2,7786

Tabla 15 Peso específico del concentrado mesa.

W1	W2	W3	W4	Densidad real (kg/L)
40,6241	48,7000	96,0777	90,0986	3,8515
39,8806	46,5419	94,6859	89,7761	3,8032
40,4957	49,3391	96,5197	89,9959	3,8125
Densidad promedio				3,8224

Tabla 16 Peso específico del mixto mesa.

W1	W2	W3	W4	Densidad real (kg/L)
39,8400	46,4093	94,0987	89,6734	3,0640
39,8421	46,0354	93,8660	89,7726	2,9493
39,7511	45,9470	93,7774	89,6708	2,9655
Densidad promedio				2,9930

Tabla 17 Tabla 16 Peso específico del relave mesa.

W1	W2	W3	W4	Densidad real (kg/L)
39,7107	49,6195	95,8155	89,6763	2,6286
39,7126	50,5492	96,3912	89,6796	2,6271
40,5721	51,6206	96,9787	90,0993	2,6501
Densidad promedio				2,6353

Tabla 18 Peso específico de las lamas mesa.

W1	W2	W3	W4	Densidad real (kg/L)
39,7268	50,0733	96,1253	89,7114	2,6310
40,5788	49,6585	95,7578	90,1361	2,6257
40,6163	49,6195	95,2845	90,1053	2,5986
Densidad promedio				2,6184

ANEXO 3 Análisis químicos de todas las muestras.

- Primera etapa de concentración.

Tabla 19 Análisis químico de la prueba de separación magnética en seco de baja intensidad.

Flujo	Peso (g)	Peso (%)	Ley (%)						Recuperación (%)					
			Fe	P	SiO ₂	TiO ₂	K ₂ O	CaO	Fe	P	SiO ₂	TiO ₂	K ₂ O	CaO
Magnético	1431,6	13,5	31,14	0,116	29,2	6,14	0,866	5,38	49,0	19,4	6,3	41,8	6,4	8,8
No magnético	9186,1	86,5	5,05	0,075	67,5	1,33	1,98	8,68	51,0	80,6	93,7	58,2	93,6	91,2
Alimentación	10617,7	100	8,6	0,1	62,3	2,0	1,8	8,2	100	100	100	100	100	100

Tabla 20 Análisis químico de prueba de separación por medios densos.

Flujo	Peso (g)	Peso (%)	Ley (%)						Recuperación (%)					
			Fe	P	SiO ₂	TiO ₂	K ₂ O	CaO	Fe	P	SiO ₂	TiO ₂	K ₂ O	CaO
Flotado	112,2	79,2	0,95	0,051	63,6	1,67	2,23	7,03	14,9	52,9	88,3	51,8	95,6	62,0
Hundido	29,5	20,8	20,66	0,173	32,2	5,9	0,39	16,4	85,1	47,1	11,7	48,2	4,4	38,0
Alimentación	141,7	100	5,05	0,075	67,5	1,33	1,98	8,68	100	100	100	100	100	100

Tabla 21 Análisis químico de la prueba de separación gravimétrica.

Flujo	Peso (g)	Peso (%)	Ley (%)						Recuperación (%)					
			Fe	P	SiO ₂	TiO ₂	K ₂ O	CaO	Fe	P	SiO ₂	TiO ₂	K ₂ O	CaO
Concentrado	4690	24,3	14,69	0,14	45,7	3,93	0,973	11,3	67,2	42,8	21,2	12,0	13,6	23,7
Relave	14610	75,7	2,3	0,06	54,4	9,24	1,98	11,7	32,8	57,2	78,8	88,0	86,4	76,3
Alimentación	19300	100	5,3	0,079	52,3	7,95	1,74	11,6	100	100	100	100	100	100

Tabla 22 Análisis químico del proceso de separación electrostática.

Flujo	Peso (g)	Peso (%)	Ley (%)						Recuperación (%)					
			Fe	P	SiO ₂	TiO ₂	K ₂ O	CaO	Fe	P	SiO ₂	TiO ₂	K ₂ O	CaO
Conductor	3876,2	59,7	45,84	0,106	11,9	4	0,301	4,7	87,6	51,9	25,2	62,8	30,8	30,2
No conductor	378,8	40,0	9,72	0,147	52,9	3,54	1,01	16,2	12,4	48,1	74,8	37,2	69,2	69,8
Alimentación	4255	100	31,3	0,122	28,2	3,8	0,58	9,3	100	100	100	100	100	100

Tabla 23 Análisis químico del proceso de separación magnética de alta intensidad.

Flujo	Peso (g)	Peso (%)	Ley (%)						Recuperación (%)					
			Fe	P	SiO ₂	TiO ₂	K ₂ O	CaO	Fe	P	SiO ₂	TiO ₂	K ₂ O	CaO
NC-M	178,5	59,9	16,53	0,127	55,6	3,47	0,706	13,7	89,0	52,9	58,6	66,6	40,8	72,7
NC-NM	119,5	40,1	3,06	0,169	58,7	2,6	1,53	7,68	11,0	47,1	41,4	33,4	59,2	27,3
Alimentación	298	100	11,1	0,144	56,8	3,1	1,04	11,3	100	100	100	100	100	100

Tabla 24 Análisis químico del proceso de separación magnética de alta intensidad.

Flujo	Peso (g)	Peso (%)	Ley (%)						Recuperación (%)					
			Fe	P	SiO ₂	TiO ₂	K ₂ O	CaO	Fe	P	SiO ₂	TiO ₂	K ₂ O	CaO
C-M	297,8	59,9	43,92	0,11	11,3	11,6	0,339	6,35	92,9	93,2	88,2	94,6	89,1	91,7
C-NM	24,2	40,1	41,17	0,098	18,6	8,1	0,51	7,03	7,1	6,8	11,8	5,4	10,9	8,3
Alimentación	322	100	43,7	0,11	11,8	11,3	0,4	6,4	100	100	100	100	100	100

Tabla 25 Análisis químico por tamaño.

Abertura (µm)	Peso (g)	Peso (%)	Leyes (%)						Distribución (%)					
			Fe	P	SiO ₂	TiO ₂	k ₂ O	CaO	Fe	P	SiO ₂	TiO ₂	k ₂ O	CaO
149	1402,39	86,43	4,9	0,076	64,2	1,6	1,88	9,48	46,8	77,9	94,4	57,9	95,3	94,5
105	146,4	9,02	32,06	0,149	26,3	7,63	0,549	3,18	32,0	15,9	4,0	28,8	2,9	3,3
74	50,91	3,14	49,36	0,118	10,3	8,58	0,274	3,91	17,1	4,4	0,5	11,3	0,5	1,4
-74	22,93	1,41	26,17	0,104	40,8	3,5	1,51	4,78	4,1	1,7	1,0	2,1	1,3	0,8
Alim	1622,63	100	9,0	0,39	287,3	10,3	8,3	42,1	100	100	100	100	100	100

- Segunda etapa de concentración.

Tabla 26 Análisis químico de la prueba de separación gravimétrica.

Flujo	Peso (g)	Peso (%)	Ley (%)						Recuperación (%)					
			Fe	P	SiO ₂	TiO ₂	K ₂ O	CaO	Fe	P	SiO ₂	TiO ₂	K ₂ O	CaO
Concentrado	6575	18,01	35,77	0,147	20,2	8,62	0,343	4,96	79,55	33,02	6,09	70,6	3,84	18,01
Mixto	2861	7,84	7,18	0,131	34,5	2,74	0,952	8,95	6,95	12,80	7,14	9,77	4,64	7,86
Relave	18455	50,55	1,38	0,064	68,3	0,62	1,89	4,58	8,61	40,35	57,76	14,3	59,4	50,5
Lamas	8615	23,60	1,69	0,047	73,5	0,5	2,19	3,25	4,92	13,83	29,01	5,37	32,1	32,6
Alimentación	36506	100	8,1	0,08	59,8	2,2	1,6	1	100	100	100	100	100	100

Tabla 27 Análisis químico de la prueba de separación magnética de baja intensidad en húmedo.

Flujo	Peso (g)	Peso (%)	Ley (%)						Recuperación (%)					
			Fe	P	SiO ₂	TiO ₂	K ₂ O	CaO	Fe	P	SiO ₂	TiO ₂	K ₂ O	CaO
Concentrado	1044,1	24,81	56,63	0,08	4	8,13	0,99	0,41	39,27	13,4	4,74	23,4	6,9	2,13
Relave	3165	75,19	28,89	0,17	26,5	8,78	0,44	6,26	60,73	86,6	95,3	76,6	93,1	97,9
Alimentación	4209,1	100	35,77	0,147	20,2	8,62	0,343	4,96	100	100	100	100	100	100

Tabla 28 Análisis químico de la prueba de separación por medios densos.

Flujo	Peso (g)	Peso (%)	Ley (%)						Recuperación (%)					
			Fe	P	SiO ₂	TiO ₂	K ₂ O	CaO	Fe	P	SiO ₂	TiO ₂	K ₂ O	CaO
Flotado	18,4	15,38	7,88	0,23	56,8	3,06	1,33	7,14	4,20	20,9	32,9	5,4	46,3	17,6
Hundido	101,2	84,6	32,7	0,159	21	9,82	0,28	6,1	95,8	79,1	67,1	94,6	53,7	82,4
Alimentación	119,6	100	28,89	0,17	26,5	8,78	0,44	6,26	100	100	100	100	100	100

Tabla 29 Análisis químico de la prueba de separación electroestático.

Flujo	Peso (g)	Peso (g)	Peso (%)	Ley (%)						Recuperación (%)					
				Fe	P	SiO ₂	TiO ₂	K ₂ O	CaO	Fe	P	SiO ₂	TiO ₂	K ₂ O	CaO
Conductor	84,7	84,7	3,94	47,23	0,194	38,69	12,73	0,417	1,870	6,4	4,5	5,7	5,7	3,7	1,2
No conductor	2065,7	2065,7	96,06	28,14	0,169	26	8,62	0,442	6,44	93,6	95,5	94,3	94,3	96,3	98,8
Alimentación	2150,4	2150,4	100	28,89	0,17	26,5	8,78	0,44	6,26	100	100	100	100	100	100

Tabla 30 Análisis químico del proceso de separación magnética de alta intensidad.

Flujo	Peso (g)	Peso (%)	Ley (%)						Recuperación (%)					
			Fe	P	SiO ₂	TiO ₂	K ₂ O	CaO	Fe	P	SiO ₂	TiO ₂	K ₂ O	CaO
NC-M	688,3	90,29	28,58	0,149	24,6	8,6	0,367	6,35	94,8	75,1	84,2	93,5	80,9	87,2
NC-NM	74	9,71	14,6	0,46	42,8	5,55	0,808	8,65	5,2	24,9	15,8	6,5	19,1	12,8
Alimentación	762,3	100	28,14	0,169	26	8,62	0,442	6,44	100	100	100	100	100	100

Tabla 31 Análisis químico del proceso de separación magnética de alta intensidad.

Flujo	Peso (g)	Peso (%)	Ley (%)						Recuperación (%)					
			Fe	P	SiO ₂	TiO ₂	K ₂ O	CaO	Fe	P	SiO ₂	TiO ₂	K ₂ O	CaO
C-M	0,8	1,3	49,52	0,115	8	13	0,229	1,03	3,7	0,8	0,3	2,96	0,7	0,7
C-NM	60,7	98,7	17,12	0,195	39,1	5,61	0,419	1,88	93,3	99,2	99,7	97,04	99,3	99,3
Alimentación	61,5	100	47,23	0,194	38,69	12,73	0,417	1,870	100	100	100	100	100	100

ANEXO 4 Fluorescencia de rayos x.

Tabla 32 Fluorescencia de rayos x a la muestra de las lamas.

Elemento	%	+/- (*3)
Al ₂ O ₃	4,500	0,374
SiO ₂	36,782	0,569
P ₂ O ₅	0,397	0,052
S	0,258	0,029
Cl	0,106	0,015
K ₂ O	2,075	0,031
CaO	5,755	0,047
Ti	0,292	0,009
V	0,005	0,004
Mn	0,033	0,007
Fe	1,889	0,028
Ni	0,001	0,002
Cu	0,003	0,001
Zn	0,003	0,001
As	0,001	0,001
Rb	0,009	0,001
Sr	0,037	0,001
Y	0,001	0,001
Zr	0,011	0,001
Mo	0,001	0,001
Sn	0,003	0,020
Ba	0,035	0,016
Ta	0,001	0,001

Tabla 33 Fluorescencia de rayos x a la muestra del relave.

Elemento	%	+/- (*3)
Al ₂ O ₃	4,963	0,384
SiO ₂	35,133	0,561
P ₂ O ₅	0,456	0,056
S	0,242	0,029
Cl	0,114	0,015
K ₂ O	1,814	0,030
CaO	7,895	0,055
Ti	0,418	0,011
V	0,004	0,004
Mn	0,045	0,007
Fe	2,671	0,034
Ni	0,001	0,002
Cu	0,004	0,001

Zn	0,004	0,001
As	0,001	0,001
Rb	0,007	0,001
Sr	0,042	0,001
Y	0,002	0,001
Zr	0,011	0,001
Nb	0,001	0,001
Mo	0,001	0,001
Cd	0,001	0,002
Ba	0,032	0,015

Tabla 34 Fluorescencia de rayos x a la muestra del mixto.

Elemento	%	+/- (*3)
Al ₂ O ₃	4,624	0,408
SiO ₂	26,997	0,514
P ₂ O ₅	0,527	0,063
S	0,223	0,033
Cl	0,106	0,016
K ₂ O	0,904	0,025
CaO	12,325	0,070
Ti	1,687	0,022
V	0,028	0,007
Mn	0,147	0,011
Fe	8,953	0,065
Ni	0,005	0,003
Cu	0,006	0,002
Zn	0,007	0,001
Rb	0,004	0,001
Sr	0,048	0,002
Y	0,007	0,001
Zr	0,017	0,001
Nb	0,002	0,001

Tabla 35 Fluorescencia de rayos x a la muestra del concentrado.

Elemento	%	+/- (*3)
Al ₂ O ₃	2,335	0,459
SiO ₂	12,314	0,402
P ₂ O ₅	0,147	0,061
S	0,003	0,043
K ₂ O	0,304	0,022
CaO	7,270	0,061
Ti	6,575	0,046
V	0,082	0,013
Mn	0,321	0,016

Fe	30,317	0,121
Co	0,139	0,025
Ni	0,023	0,010
Cu	0,017	0,004
Zn	0,026	0,003
Rb	0,006	0,002
Sr	0,010	0,003
Y	0,012	0,002
Zr	0,180	0,004
Nb	0,011	0,003
Mo	0,001	0,003
Cd	0,001	0,006
Ba	0,058	0,033
Ta	0,003	0,005
Pb	0,023	0,004
Bi	0,018	0,006

Tabla 36 Fluorescencia de rayos x a la muestra del concentrado magnético.

Elemento	%	+/- (*3)
MgO	1,603	2,352
Al ₂ O ₃	1,554	0,472
SiO ₂	3,818	0,272
P ₂ O ₅	0,134	0,048
K ₂ O	0,129	0,018
CaO	1,734	0,035
Ti	7,090	0,051
V	0,262	0,016
Mn	0,418	0,018
Fe	45,256	0,142
Co	0,554	0,038
Ni	0,038	0,020
Cu	0,024	0,006
Zn	0,068	0,006
Rb	0,018	0,003
Zr	0,022	0,003
Au	0,002	0,006
Pb	0,056	0,004
Bi	0,046	0,010

Tabla 37 Fluorescencia de rayos x a la muestra del relave no magnético.

Elemento	%	+/- (*3)
-----------------	----------	-----------------

Al ₂ O ₃	2,965	0,452
SiO ₂	15,849	0,438
P ₂ O ₅	0,306	0,064
S	0,096	0,040
Cl	0,007	0,021
K ₂ O	0,422	0,046
CaO	9,325	0,068
Ti	6,715	0,046
V	0,048	0,013
Mn	0,292	0,015
Fe	26,024	0,114
Co	0,105	0,022
Ni	0,017	0,008
Cu	0,015	0,004
Zn	0,015	0,003
Rb	0,003	0,001
Sr	0,022	0,002
Y	0,012	0,002
Zr	0,192	0,004
Nb	0,010	0,002
Mo	0,003	0,002
Ba	0,071	0,031
Pb	0,016	0,004
Bi	0,013	0,005
Th	0,005	0,006

Tabla 38 Fluorescencia de rayos x a la muestra del sink.

Elemento	%	+/- (*3)
MgO	2,160	2,600
Al ₂ O ₃	2,551	0,457
SiO ₂	12,978	0,412
P ₂ O ₅	0,173	0,064
S	0,036	0,042
Cl	0,003	0,023
K ₂ O	0,237	0,021
CaO	8,878	0,067
Ti	7,880	0,051
V	0,055	0,014
Mn	0,331	0,016
Fe	29,033	0,121
Co	0,171	0,024
Ni	0,019	0,009

Cu	0,020	0,004
Zn	0,018	0,003
Rb	0,005	0,002
Sr	0,012	0,002
Y	0,013	0,002
Zr	0,236	0,004
Nb	0,014	0,003
Mo	0,004	0,003
Cd	0,002	0,006
Ba	0,069	0,032
Hf	0,001	0,004
Au	0,001	0,003
Pb	0,018	0,004
Bi	0,012	0,006
Th	0,007	0,007

Tabla 39 Fluorescencia de rayos x a la muestra del no conductor.

Elemento	%	+/- (*3)
MgO	2,673	2,523
Al ₂ O ₃	2,851	0,450
SiO ₂	15,677	0,437
P ₂ O ₅	0,160	0,064
S	0,048	0,040
Cl	0,018	0,021
K ₂ O	0,389	0,022
CaO	9,444	0,067
Ti	6,513	0,045
V	0,047	0,013
Mn	0,273	0,015
Fe	25,127	0,112
Co	0,100	0,021
Ni	0,015	0,008
Cu	0,020	0,004
Zn	0,016	0,003
Rb	0,005	0,002
Sr	0,021	0,002
Y	0,013	0,002
Zr	0,233	0,004
Nb	0,011	0,002
Mo	0,002	0,002
Ba	0,056	0,031
Pb	0,014	0,004
Bi	0,012	0,005
Th	0,009	0,007

Tabla 40 Fluorescencia de rayos x a la muestra del no conductor magnético.

Elemento	%	+/- (*3)
MgO	1,879	2,607
Al ₂ O ₃	2,750	0,441
SiO ₂	13,582	0,408
P ₂ O ₅	0,168	0,061
S	0,066	0,040
K ₂ O	0,313	0,022
CaO	8,706	0,065
Ti	6,507	0,045
V	0,052	0,013
Mn	0,296	0,015
Fe	25,040	0,110
Co	0,058	0,022
Ni	0,016	0,008
Cu	0,017	0,004
Zn	0,016	0,003
Rb	0,004	0,002
Sr	0,020	0,002
Y	0,012	0,002
Zr	0,177	0,004
Nb	0,011	0,002
Mo	0,001	0,002
Sn	0,003	0,017
Pb	0,015	0,004
Bi	0,012	0,005

Tabla 41 Fluorescencia de rayos x a la muestra del no conductor no magnético.

Elemento	%	+/- (*3)
Al ₂ O ₃	3,220	0,407
SiO ₂	20,649	0,467
P ₂ O ₅	0,136	0,071
S	0,176	0,037
Cl	0,045	0,017
K ₂ O	0,719	0,024
CaO	10,822	0,069
Ti	3,959	0,034
V	0,022	0,010
Mn	0,162	0,013
Fe	14,579	0,085
Ni	0,010	0,006
Cu	0,021	0,003
Zn	0,016	0,002

As	0,001	0,001
Rb	0,004	0,001
Sr	0,041	0,002
Y	0,023	0,002
Zr	0,674	0,006
Nb	0,006	0,002
Mo	0,005	0,003
Ag	0,002	0,002
Ba	0,220	0,031
Hf	0,009	0,005
Pb	0,010	0,004
Bi	0,010	0,005
Th	0,005	0,006

Tabla 42 Fluorescencia de rayos x a la muestra del conductor magnético.

Elemento	%	+/- (*3)
MgO	2,249	2,496
Al ₂ O ₃	2,161	0,475
SiO ₂	5,974	0,313
P ₂ O ₅	0,147	0,052
S	0,011	0,044
K ₂ O	0,277	0,021
CaO	2,505	0,040
Ti	11,604	0,063
V	0,099	0,017
Mn	0,367	0,017
Fe	39,541	0,138
Co	0,462	0,032
Ni	0,025	0,015
Cu	0,026	0,006
Zn	0,021	0,004
Rb	0,010	0,002
Y	0,003	0,002
Zr	0,043	0,003
Nb	0,019	0,004
Mo	0,004	0,003
Cd	0,001	0,008
Sn	0,007	0,017
Au	0,002	0,005
Pb	0,036	0,005
Bi	0,021	0,008

ANEXO 5 Análisis modal.

Tabla 43 Análisis mineralógico.

Grupo Mineral / Sample	Cabeza APLS	Concentrado mesa	Concentrado magnético	C-M	NC	NC/NM
Hematita/Magnetita	8,154	40,703	64,170	51,306	28,597	13,676
(Fe,Ti)óxidos	2,628	14,106	25,431	18,908	10,304	3,401
Cuarzo	30,015	3,068	0,276	0,727	3,465	11,563
Plagioclasa	27,196	2,458	0,235	0,392	3,770	13,857
Ilmenita	1,495	7,335	2,678	14,372	9,825	5,055
Piroxeno	3,397	6,794	0,271	0,327	11,575	9,995
Anfibol	3,170	5,629	0,438	0,819	8,548	12,113
Titanomagnetita	1,504	5,273	5,238	9,950	5,070	1,244
Epidota	3,988	4,915	0,179	0,369	7,437	5,869
Grosularia	0,937	3,307	0,050	0,584	3,259	3,325
Muscovita/illita	4,629	0,693	0,059	0,199	0,847	2,727
Feldespato K	6,397	0,321	0,041	0,083	0,399	1,705
Titanita	0,485	1,596	0,208	0,275	2,309	3,992
Calcita	2,864	0,164	0,016	0,015	0,372	1,529
Apatito	0,444	0,708	0,128	0,213	0,540	2,898
Circon	0,133	0,705	0,027	0,077	0,955	2,966
Biotita/flogopita	1,108	0,696	0,144	0,362	0,839	1,404
Clorita	1,165	0,631	0,098	0,325	0,901	1,031
Rutilo/anatase	0,079	0,315	0,032	0,216	0,422	0,650
Silicato Fe	0,060	0,168	0,083	0,201	0,140	0,101
Arcillas Al	0,103	0,102	0,012	0,049	0,101	0,277
Allanita-(Ce)	0,006	0,149	0,004	0,052	0,206	0,185
Baritina	0,005	0,021	-	-	0,034	0,203
otros	0,038	0,145	0,185	0,180	0,086	0,234
Total	100	100	100	100	100	100

Tabla 44 Ocurrencia de titanio.

Grupo Mineral / Sample	Cabeza APLS	Concentrado Mesa	Concentrado Magnético	C-M	NC	NC/NM
Ilmenita	34,42	38,88	15,46	47,83	47,95	41,2
(Fe,Ti)óxidos	25,5	31,51	61,86	26,52	21,19	11,68
Titanomagnetita	24,66	19,91	21,52	23,59	17,62	7,22
Titanita	6,43	4,87	0,69	0,53	6,48	18,73
Rutilo/anatasa	3,44	3,17	0,35	1,36	3,92	10,07
Anfibol	4,97	1,59	0,11	0,16	2,66	9,59
Piroxeno	0,58	0,09	0	0,01	0,17	1,51
Total	100	100	100	100	100	100

Tabla 45 Ocurrencia de zircón.

Grupo Mineral / Sample	Cabeza APLS	Concentrado Mesa	Concentrado Magnético	C-M	NC	NC/NM
Zircón	100	100	100	100	100	100
Total	100	100	100	100	100	100

Tabla 46 Análisis de liberación por perímetro.

Análisis de liberación por perímetro	id muestra	Clases liberación										
		<10	≥10<20	≥20<30	≥30<40	≥40<50	≥50<60	≥60<70	≥70<80	≥80<90	≥90	All particles
(Fe,Ti)óxidos	CABEZA APLS	7,38	3,93	3,42	5,07	2,76	3,57	14,22	14,83	16,17	28,65	100
	CONCENTRADO MESA	2,61	2,94	3,35	4,8	6,22	6,21	8,69	11,28	10,32	43,58	100
	CONCENTRADO MAGNETICO	1,5	3,1	4,9	5,6	8,4	7,0	9,8	9,4	9,0	41,2	100,0
	CONDUCTOR MAGNETICO	1,6	3,9	7,0	5,5	5,3	8,8	7,6	10,3	6,1	44,0	100,0
	NO CONDUCTOR	3,47	2,36	5,49	5,76	5,94	9,79	12,16	7,22	11,76	36,06	100
	NO CONDUCTOR/NO MAGNETICO	2,00	2,60	4,40	7,26	2,47	1,91	3,77	2,46	14,99	58,14	100,00
Ilmenita	CABEZA APLS	5,08	6,79	13,56	1,27	4,94	1,76	6,68	3,53	22,55	33,85	100,00
	CONCENTRADO MESA	3,10	4,72	3,58	3,48	5,87	4,62	9,27	4,72	11,62	49,02	100,00
	CONCENTRADO MAGNETICO	9,67	13,21	7,98	7,62	4,87	5,76	4,35	6,71	10,65	29,19	100
	CONDUCTOR MAGNETICO	2,3	3,57	3,41	3,45	4,19	5,33	5,46	5,83	8,2	58,26	100
	NO CONDUCTOR	2,84	1,87	3,48	1,99	4,14	6,39	5,63	5,42	8,71	59,52	100
	NO CONDUCTOR/NO MAGNETICO	2,91	2,95	3,21	4,37	3,83	1,91	7,76	3,05	5,95	64,06	100

Tabla 47 Análisis de liberación por perímetro.

Análisis de liberación por perímetro	id muestra	Clases liberación										
		<10	≥10<20	≥20<30	≥30<40	≥40<50	≥50<60	≥60<70	≥70<80	≥80<90	≥90	All particles
Titanomagnetita	CABEZA APLS	9,87	6,8	5,61	4,83	5,11	6,97	11,4	3,39	10,46	35,56	100
	CONCENTRADO MESA	7,91	5,58	3,85	6,81	4,99	1,89	7,68	6	16,92	38,37	100
	CONCENTRADO MAGNETICO	3,62	6,8	8,34	8,59	12,16	7,39	9,2	10,51	6,29	27,1	100
	CONDUCTOR MAGNETICO	2,69	6,3	6,94	7,64	6,82	5,04	8,23	4,82	12,52	38,99	100
	NO CONDUCTOR	5,34	11,25	4,67	12,08	7,26	5,95	6,93	7,31	5,27	33,93	100
	NO CONDUCTOR/NO MAGNETICO	6,28	3,33	18,09	5,46	7,19	9,9	2,37	3,04	3,92	40,41	100
Titanita	CABEZA APLS	6,99	6,72	0,59	7,94	0	1,62	17,67	0,11	0,16	58,19	100
	CONCENTRADO MESA	3,3	3,34	1,5	6,49	2,36	3,17	4,31	5,75	4,44	65,33	100
	CONCENTRADO MAGNETICO	30,28	11,68	4,7	6,38	3,07	4,58	6,62	1,38	0	31,31	100
	CONDUCTOR MAGNETICO	18,48	12,58	19,41	0,36	3,31	5,9	2,59	3,45	1,08	32,85	100
	NO CONDUCTOR	2,33	2,62	1,9	1,84	1,4	2,88	6,32	5,59	0,54	74,57	100
	NO CONDUCTOR/NO MAGNETICO	0,2	1,76	1,58	4,94	1,58	1,92	0,77	4,35	3,54	79,36	100

Tabla 48 Análisis de liberación por perímetro.

Análisis de liberación por perímetro	id muestra	Clases liberación											
		<10	≥10<20	≥20<30	≥30<40	≥40<50	≥50<60	≥60<70	≥70<80	≥80<90	≥90	All particles	
Zircón	CABEZA APLS	1,19	3,74	0	0	0	0	0	0	0	93,87	1,19	100
	CONCENTRADO MESA	1,53	0	0,25	0	0,33	0	0	0,22	3,94	93,73	100	
	CONCENTRADO MAGNETICO	2,58	60	0	0	0	0	0	0	0	37,42	100	
	CONDUCTOR MAGNETICO	7,07	11,66	0	0	0	0	0	0	0	81,27	100	
	NO CONDUCTOR	0,52	1,86	0,99	0	0,46	3,77	0,26	18,38	7,07	66,69	100	
	NO CONDUCTOR/NO MAGNETICO	1,8	0,23	0	0,4	0,84	1,11	0,85	2,27	8,33	84,17	100	
Rutilo/Anatasa	CABEZA APLS	37,28	8,52	0	1,6	0	0	4,07	8,27	0,86	39,38	100	
	CONCENTRADO MESA	19,56	15,7	8,3	2,35	3,2	0,73	10,82	1,12	13,17	25,06	100	
	CONCENTRADO MAGNETICO	70,05	3,86	0	1,45	3,38	1,45	0	0	0	19,81	100	
	CONDUCTOR MAGNETICO	22,22	2,86	11,57	25,77	3,32	2,52	0	4,47	1,26	26	100	
	NO CONDUCTOR	9,11	5,99	16,12	5,87	9,95	7,07	1,02	8,21	17,44	19,23	100	
	NO CONDUCTOR/NO MAGNETICO	2,89	0	0	17,09	5,05	1,5	9,63	18,47	4,45	40,91	100	

