

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA**



**TESIS**

RECUPERACION DE MINERALES DE TITANIO A PARTIR DE  
PRECONCENTRADOS OBTENIDOS DE LAS ARENAS DEL RIO URUBAMBA  
POR CONCENTRACION MAGNETICA PALMA REAL - LA CONVENCION

**PRESENTADO POR:**

**Bach. YORMAN JOSE ALOSILLA RODRIGUEZ**

**Bach. DANIEL LAROTA SUMA**

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE**

**INGENIERO METALÚRGICO**

**ASESOR:**

**ING. PORFIRIO CARRASCO TAPIA**

**CUSCO – PERU**

**2024**

# INFORME DE ORIGINALIDAD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-303-2020-UNSAAC)

El que suscribe, **Asesor** del trabajo de investigación/tesis titulada: RECUPERACIÓN DE MINERALES DE TITANIO A PARTIR DE PRECONCENTRADOS OBTENIDOS DE LAS ARENAS DEL RIO URUBAMBA POR CONCENTRACIÓN MAGNÉTICA PALMA REAL - LA CONUENCION

presentado por: YORMAN JOSÉ ALOSILLA RODRIGUEZ con DNI Nro.: 70415658 presentado por: DANIEL LAROTA SUMA con DNI Nro.: 72350207 para optar el título profesional/grado académico de INGENIERO METALURGICO

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 02 veces, mediante el Software Antiplagio, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso de Sistema Antiplagio de la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 09%.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No se considera plagio.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las correcciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto la primera página del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco, 18 de JULIO de 2024

  
.....  
Firma

Post firma Rodolfo Carrasco Tapia

Nro. de DNI 24002881

ORCID del Asesor 0000-0002-4360-9866

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: oid: 27259:368968029

NOMBRE DEL TRABAJO

**tesisRECUPERACIÓN DE MINERALES DE TITANIO (Autoguardado) (1).pdf**

AUTOR

**Daniel LAROTA SUMA**

RECUENTO DE PALABRAS

**23884 Words**

RECUENTO DE CARACTERES

**135560 Characters**

RECUENTO DE PÁGINAS

**144 Pages**

TAMAÑO DEL ARCHIVO

**5.2MB**

FECHA DE ENTREGA

**Jul 18, 2024 7:30 PM GMT-5**

FECHA DEL INFORME

**Jul 18, 2024 7:32 PM GMT-5**

### ● 9% de similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 8% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 3% Base de datos de trabajos entregados
- 1% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

### ● Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 17 palabras)

## PRESENTACIÓN

Señor Decano de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalúrgica de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

Señores catedráticos de la comisión de dictamen de tesis, y replicantes.

En cumplimiento con lo exigido por el estatuto de Grado y Tesis de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, pongo en vuestra consideración la presente tesis titulada:

**RECUPERACION DE MINERALES DE TITANIO A PARTIR DE PRECONCENTRADOS OBTENIDOS DE LAS ARENAS DEL RIO URUBAMBA POR CONCENTRACION MAGNETICA PALMA REAL - LA CONVENCION**

El presente trabajo tiene como objetivo demostrar la viabilidad de la recuperación de minerales de titanio a través de la aplicación de técnicas avanzadas de concentración magnética de alta intensidad. En particular, se investigará la eficiencia de la concentración de minerales a partir de preconcentrados gravimétricos, empleando un separador magnético de rodillo de alta intensidad. Este proceso permitirá la obtención de minerales con alto contenido de  $TiO_2$ , como la ilmenita, entre otros compuestos de interés. A través de este estudio, se pretende no solo optimizar el proceso de recuperación de titanio, sino también evaluar su potencial aplicación a escala industrial, contribuyendo así al desarrollo sostenible de los recursos minerales.

Bach. ALOSILLA RODRIGUEZ YORMAN JOSE

Bach. LAROTA SUMA DANIEL

## RESUMEN

El objetivo del presente tema de investigación es recuperar los minerales de titanio a partir de preconcentrados obtenidos de una mesa vibratoria de las arenas del río Urubamba, mediante el método de concentración magnética.

Para el presente trabajo de investigación se ha utilizado la metodología analítica y deductiva, Se ha tomado muestras representativas de preconcentrados obtenidos de una mesa vibratoria de las arenas del río Urubamba del centro poblado Palma Real.

Para la separación magnética de los minerales de titanio se usó las muestras de preconcentrado los cuales previamente pasaron por la concentración gravimétrica, también se realizó la concentración magnética de baja intensidad a 800 Gauss, con el objetivo de desmagnetizar el mineral, al tener la muestra de mineral libre de minerales de hierro, pasamos por la concentración magnética de alta intensidad de 6000 y 7000 Gauss, con la finalidad de obtener el concentrado de minerales de titanio.

Las variables que se determinaron son la granulometría, velocidad de giro del rodillo y la intensidad magnética, obteniendo resultados de una granulometría de  $106 \mu m$ , intensidad magnética de 7000 gauss y velocidad de giro del rodillo 35 rpm, obteniendo una recuperación de 80.65 %.

**Palabras clave:** Gravimetría, preconcentrado, concentración magnética, recuperación, minerales de titanio.

### ABSTRACT

The objective of this research is to recover titanium minerals from preconcentrates obtained from a vibrating table of the Urubamba river sands, using the magnetic concentration method.

For the present research work we have used the analytical and deductive methodology. We have taken representative samples of preconcentrates obtained from a vibrating table of the Urubamba river sands of the Palma Real town center.

For the magnetic separation of the titanium minerals we used the preconcentrate samples which previously went through the gravimetric concentration, we also carried out the low intensity magnetic concentration at 800 Gauss, with the objective of demagnetizing the mineral, having the mineral sample free of iron minerals, we went through the high intensity magnetic concentration of 6000 and 7000 Gauss, with the purpose of obtaining the titanium mineral concentrate.

The variables that were determined are the granulometry, speed of rotation of the roller and magnetic intensity, obtaining results of a granulometry of 106  $\mu\text{m}$ , magnetic intensity of 7000 gauss and speed of rotation of the roller 35 rpm, obtaining a recovery of 80.65 %.

## INTRODUCCION

Los motores silenciosos de todas las industrias son los minerales. El mineral de titanio, también conocido como materia prima de titanio, se extrae y concentra en todo el mundo, desde Mozambique hasta Kenia, desde Madagascar hasta Australia o Estados Unidos, por lo que cualquier cambio en la producción o la demanda, por pequeño que sea, puede aumentar los costos. La oferta y la demanda a menudo plantean preocupaciones sobre la seguridad del suministro. Como uno de los mayores productores de dióxido de titanio del mundo, comprendemos las tendencias de la industria y podemos compartir algunas consideraciones clave para ayudarlo a planificar y proteger mejor la cadena de suministro.

Es ideal para la industria aeroespacial. Debido a esta propiedad y su biocompatibilidad, también se usa ampliamente en la producción de muchos tipos de prótesis e implantes en la industria médica. Debido a su fuerte resistencia a la corrosión ácida, a menudo se requiere en la industria química, revestimiento de metales, embalaje y otras industrias. En la actualidad el Perú no cuenta con una empresa que se encuentre explotando yacimientos de titanio, existen estudios en el centro poblado de Palma Real, Distrito de Echarati, Provincia de la Convencion, región Cusco actual mente se está estudiando la cantidad y extensión que se tiene de minerales de titanio, ello implica que en estos estudios al realizar los primeros estudios se pudo demostrar que estos yacimientos cuentan con minerales de titanio como la ilmenita, y es aquí la importancia de este estudio, para poder demostrar que mediante el proceso de extracción de minerales de titanio por separación magnética si es viable.

## DEDICATORIA

A Dios por darme la oportunidad de vivir, a mis queridos padres Ana María y José quienes en todo momento me apoyaron y motivaron para seguir adelante en cualquier proyecto que me proponga.

Con mucho cariño para mi pequeña Ana Gahela y mis hermanos Frank, Leonel que me dan el motivo y las ganas de superación día a día.

A todos mis tíos, primos y familia en general por siempre brindarme su apoyo en todo momento.

ALOSILLA RODRIGUEZ YORMAN JOSE

A Dios por bendecirme y guiarme en mi día a día, a mis Padres Elena y Fabián quienes en todo momento están conmigo por ser mi soporte para seguir creciendo como persona.

A mis familiares y en especial a mi tía Lucia por ser mi segunda madre, por estar en los buenos y malos momentos de mi etapa universitaria.

A mis hermanos Alexander, Helen, Jhaling y Meyer, por estar siempre apoyándome en cada momento que los he necesitado.

A mi hija Sofía y mi esposa, quienes me motivan día a día para poder lograr todos mis objetivos, por ser el pilar de impulso de cada proyecto que me planteo.

LAROTA SUMA DANIEL

## **AGRADECIMIENTO**

Expresamos nuestro agradecimiento a cada uno de los catedráticos de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, Facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalúrgica de la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco, por brindarnos todos los conocimientos en nuestro proceso de formación profesional.

Todo nuestro agradecimiento y especial gratitud, al Ing. Porfirio Carrasco Tapia asesor de la tesis, por su tiempo, capacidad y conocimiento al orientarnos durante el desarrollo de la presente tesis, así también por habernos tenido paciencia para guiarnos en el logro de los objetivos trazados.

Finalmente, agradecemos a nuestros familiares quienes nos brindaron su apoyo e incentivo, su colaboración y comprensión han sido muy importantes para concluir nuestra tesis.

Los tesisistas.

## ÍNDICE GENERAL

<b>PRESENTACIÓN</b> .....	I
<b>RESUMEN</b> .....	II
<b>ABSTRACT</b> .....	III
<b>INTRODUCCION</b> .....	IV
<b>DEDICATORIA</b> .....	V
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	VI
<b>ÍNDICE GENERAL</b> .....	1
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	9
<b>CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	1
1.1. Situación Problemática .....	1
1.2 Formulación Del Problema.....	1
1.2.1 Problema General.....	1
1.2.2 Problemas Específicos .....	1
1.3 Justificación De La Investigación.....	2
1.3.1 Justificación Tecnológica: .....	2
1.3.2 Justificación Económica .....	2
1.3.3 Justificación Social .....	2
1.3.4 Justificación Ambiental .....	3
1.4 Objetivos De La Investigación.....	3

1.4.1 Objetivo General.....	3
1.4.2 Objetivos Específicos.....	4
2.1 Antecedentes De La Investigación.....	5
2.1 Internacional .....	5
2.2 Nacional .....	5
2.3 BASES TEORICAS.....	6
2.3.1 Titanio .....	6
2.3.2 Ilmenita .....	9
2.3.3 Albita.....	15
2.3.4 Apatito.....	16
2.3.5 Biotita.....	17
2.3.6 Calcita .....	18
2.3.7 Magnetita .....	19
2.3.8 Cuarzo .....	20
2.3.9 Rutilo.....	21
2.3.10 Titanita .....	25
2.3.11 Zircón.....	27
2.3.12 Monazita .....	29
2.2 Concentración De Minerales.....	30
2.4 Principios De La Concentración De Minerales .....	31

2.4.1 Concentración Gravimétrica .....	32
2.4.2 Clasificación De Métodos Gravimétricos.....	34
2.4.3 Jigs .....	35
2.4.4 Mesa Concentradora .....	36
2.4.5 Mesa Wilfley.....	36
2.4.6 Concentración Magnética .....	40
2.4.7 Principios Básicos De La Separación Magnética .....	40
2.4.8 Susceptibilidad Magnética.....	41
2.4.9 Intensidad Y Gradiente Del Campo Magnético.....	43
2.4.10 Fuerzas Que Compiten Para La Separación Magnética.....	44
2.4.11 Ley De Gauss En El Magnetismo .....	44
2.4.12 Magnetismo En La Materia .....	45
2.4.13 Momentos Magnéticos De Átomos .....	46
2.4.14 Magnetización E Intensidad Del Campo Magnético .....	47
2.4.15 Susceptibilidad Magnética De Los Materiales .....	50
2.4.16 Comparación de la susceptibilidad de los materiales .....	53
2.4.18 Magnetón de Bohr.....	54
2.4.19 Concentradores Magnéticos.....	55
2.4.20 Concentradores Magnéticos De Baja Intensidad.....	56
2.4.21 Concentración Magnética De Alta Intensidad .....	58

2.5 Fundamento Del Diseño Experimental .....	60
2.5.1 Control de Variables: .....	60
2.5.2 Aleatorización .....	61
2.5.3 Diseño de Experimentos .....	62
2.5.4 Validez y Fiabilidad .....	62
2.5.5 Análisis de Datos .....	63
2.5.6 Ética en la Investigación .....	64
<b>CAPITULO III: HIPÓTESIS Y VARIABLES</b> .....	<b>65</b>
3.1 Hipótesis .....	65
3.1.1 Hipótesis General .....	65
3.1.2 Hipótesis Específicas .....	65
3.2 Variables .....	65
3.2.1 Identificación de Variables .....	65
Variables Dependientes .....	65
Variables Independientes .....	65
3.2.2 Operacionalización de Variables .....	66
4.1 Ámbito Del Estudio .....	67
Ubicación Geográfica y Accesos .....	67
Accesibilidad .....	67
4.2 Diseño De Investigación .....	69

4.2.1 Método De Investigación.....	69
4.2.2 Tipo De Investigación.....	69
4.2.3 Diseño De Investigación.....	69
4.3 Población De Estudio.....	69
4.2.1 Universo Y Muestra.....	69
4.2.2 Técnicas E Instrumentos De Recolección De Datos.....	70
4.2.3 Técnicas E Instrumentos De Procesamiento De Datos.....	70
5.1 Desarrollo De Pruebas Experimentales.....	71
5.3 Muestreo De Minerales.....	72
5.4 Caracterización Mineralógica.....	75
5.4.1 Determinación Del Porcentaje De Humedad.....	75
5.4.2 Determinación De La Gravedad Específica.....	76
5.4.3 Análisis Mineralógico.....	78
5.4.4 Análisis Químico.....	78
5.5 Análisis Granulométrico Del Mineral.....	79
5.6 Distribución De Tamaños.....	79
5.7 Cálculo Del Tiempo Óptimo De Molienda.....	83
5.8 Concentración Magnética De Baja Intensidad En Húmedo.....	86
5.9 Concentración Magnética De Alta Intensidad En Seco.....	93
5.9.1 Separador Magnético De Rodillos Para Tierras Raras.....	94

5.9.2 Pruebas Experimentales De Separación Magnética De Alta Intensidad .....	96
5.10. Resumen De Resultados De Las Pruebas Experimentales .....	113
<b>CAPITULO VI: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b> .....	115
6.1 Diseño Factorial .....	115
6.1.1 Introducción .....	115
6.2. Diseño Experimental:.....	115
6.3. Variable De Un Proceso Experimental:.....	115
6.4 Ventajas De Un Diseño Experimental .....	116
6.5 Realización De Pruebas Experimentales Con Diseño Factorial .....	117
6.6 Diseño Factorial $2^3$ Con Replica En Punto Central Del Diseño .....	119
6.7 Diseño Factorial $2^3$ Con Replica En El Punto Central.....	121
6.8 Análisis De Variables Por Diseño Experimental .....	123
6.8.1 Diseño Factorial $2^k$ Con Replica En El Punto Central.....	123
6.9 Cálculo De Los Efectos .....	125
6.10 Modelo Matemático .....	129
<b>CONCLUSIONES</b> .....	130
<b>RECOMENDACIONES</b> .....	131
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	132
<b>ANEXOS</b> .....	134

## LISTA DE FIGURAS

Ubicación Geografica .....	9
<b>Imagen 2. 1:</b> Titanio.....	6
<b>Imagen 2. 2:</b> Morfologías de la Ilmenita.....	9
<b>Imagen 2. 3:</b> Minerales de Albita.....	15
<b>Imagen 2. 4:</b> Minerales de Apatito.....	16
<b>Imagen 2. 5:</b> Minerales de Biotita.....	18
<b>Imagen 2. 6:</b> Minerales de Calcita .....	19
<b>Imagen 2. 7:</b> Minerales de Magnetita .....	20
<b>Imagen 2. 8:</b> Minerales de Cuarzo .....	21
<b>Imagen 2. 9:</b> Minerales de Rutilo.....	22
Imagen 2. 10: Mineral de titanita.....	25
<b>Imagen 2. 11:</b> Minerales de Zircón .....	29
<b>Imagen 2. 12:</b> Monazita desde un Estetoscopio.....	29
<b>Imagen 2. 13:</b> Mesa Concentradora Wilfley .....	37
<b>Imagen 2. 14:</b> Esparcimiento de Mineral en la Mesa Wilfley .....	38
<b>Imagen 2. 15:</b> Líneas de campo magnético.....	45
<b>Imagen 2. 16:</b> Electrón en una órbita circular.....	46
<b>Imagen 2. 17:</b> Grafica de la fuerza magnética y las fuerzas en competencia como función del tamaño de partícula. ....	51
<b>Imagen 2. 18:</b> Separador de tambor .....	57
<b>Imagen 2. 19:</b> Diagrama de separador de disco .....	57
<b>Imagen 2. 20:</b> Separador de rodillo inducido.....	59

<b>Imagen 6. 1:</b> Diagrama de Flujo Clasificación de Variables .....	116
<b>Imagen 6. 2:</b> Diseño factorial $2^3$ .....	119
<b>Imagen 6. 3:</b> Representación del diseños factorial con replica en punto central de diseño .....	120
<b>Imagen 6. 4:</b> Diagrama de Pareto.....	128
<b>Imagen 6. 5:</b> Grafica de los efectos normales .....	129

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 2. 1:</b> Datos Generales de la Ilmenita .....	10
<b>Tabla 2. 2:</b> Propiedades Físicas de la Ilmenita.....	13
<b>Tabla 2. 3:</b> Cristalografía de la Ilmenita .....	14
<b>Tabla 2. 4:</b> Propiedades Químicas de la Ilmenita .....	14
<b>Tabla 2. 5:</b> Test Químicos de la Ilmenita.....	14
<b>Tabla 2. 6:</b> interpretación del Criterio de Concentración (CC).....	33
<b>Tabla 2. 7:</b> Rango de Tamaño de Diferentes Equipos de Separación por Gravedad .....	34
<b>Tabla 5. 1:</b> Cálculo de la gravedad específica .....	78
<b>Tabla 5. 2:</b> Reporte de análisis mineral de cabeza.....	78
<b>Tabla 5. 3:</b> Distribución granulométrica en peso .....	82
<b>Tabla 5. 4:</b> Cálculo del tiempo óptimo de molienda.....	84
<b>Tabla 5. 5:</b> Cálculo de modelo cinético .....	85
<b>Tabla 5. 6:</b> Balance metalúrgico de concentración magnética de baja intensidad.....	91
<b>Tabla 5. 7:</b> Condiciones de operación y resultados metalúrgicos de la separación magnética de baja intensidad en húmedo .....	92
<b>Tabla 5. 8:</b> Concentración magnética de baja intensidad (CMBI).....	92
<b>Tabla 5. 9:</b> Condiciones de operación y resultados metalúrgicos.....	96
<b>Tabla 5. 10:</b> Balance metalúrgico de prueba N° 01 .....	98
<b>Tabla 5. 11:</b> Condiciones de operación y resultados metalúrgicos.....	99
<b>Tabla 5. 12:</b> Balance metalúrgico de la prueba N° 02 .....	101
<b>Tabla 5. 13:</b> Condiciones de operación y resultados metalúrgicos.....	101

<b>Tabla 5. 14:</b> Balance metalúrgico de la prueba N° 3 .....	102
<b>Tabla 5. 15:</b> Condiciones de operación y resultados metalúrgicos.....	103
<b>Tabla 5. 16:</b> Balance metalúrgico de la prueba N° 4 .....	105
<b>Tabla 5. 17:</b> Condiciones de operación y resultados metalúrgicos.....	105
<b>Tabla 5. 18:</b> Balance metalúrgico de la prueba N° 5 .....	107
<b>Tabla 5. 19:</b> Condiciones de operación y resultados metalúrgicos.....	107
<b>Tabla 5. 20:</b> Balance metalúrgico de la prueba N° 6 .....	109
<b>Tabla 5. 21:</b> Condiciones de operación y resultados metalúrgicos.....	109
<b>Tabla 5. 22:</b> Balance metalúrgico de la prueba N° 7 .....	111
<b>Tabla 5. 23:</b> Condiciones de operación y resultados metalúrgicos.....	111
<b>Tabla 5. 24:</b> Balance metalúrgico de la prueba N° 8 .....	113
<b>Tabla 5. 25:</b> Resumen de pruebas experimentales.....	114
<b>Tabla 6. 1:</b> Variables de un proceso.....	116
<b>Tabla 6. 2:</b> Resumen de pruebas de diseño factorial con replicas centrales .....	121
<b>Tabla 6. 3:</b> Niveles de operacionalización de las pruebas en el diseño factorial $2^3$ .....	122
<b>Tabla 6. 4:</b> Plan de pruebas experimentales con la aplicación del diseño factorial $2^k$ con replica en el punto central .....	122
<b>Tabla 6. 5:</b> Condiciones operativas del diseño factorial $2^3$ .....	123
<b>Tabla 6. 6:</b> Variables en escala natural y codificada.....	124
<b>Tabla 6. 7:</b> Promedio general (Exceptúa puntos en el centro de diseño): $Y = 74.08$ .....	125
<b>Tabla 6. 8:</b> Cálculo de los efectos en la separación magnética de alta intensidad.....	128

## SIMBOLOGÍA

g: Gramo

kg: Kilogramo

mg: Miligramo

t: Tonelada

m: Metro

cm: Centímetro

mm: Milímetro

$\mu\text{m}$ : Micrómetro o micra

nm : Nanómetro

s: Segundo

min: Minuto

h: Hora

$\text{kg}/\text{m}^3$  : Kilogramos por metro cúbico

$\text{g}/\text{cm}^3$ : Gramos por centímetro cúbico

$\text{m}^3/\text{s}$ : Metros cúbicos por segundo

L/min: Litros por minuto

N: Newton

Pa: Pascal

T: Tesla

G: Gauss

A/m: Amperios por metro

$m^2$ : Metros cuadrados

$cm^2$ : Centímetros cuadrados

$m^3$ : Metros cúbicos

$cm^3$ : Centímetros cúbicos

L: Litros

J: Joule

W: Watt

Q: Caudal de agua

S: Porcentaje de sólidos en la pulpa

H: Intensidad del campo magnético

B: Inducción magnética o densidad de flujo magnético

$\chi$ : Susceptibilidad magnética.

d: Diámetro de la partícula

v: Velocidad de la partícula en el campo magnético

$F_m$ : Fuerza magnética

$F_g$  : Fuerza gravitacional

$F_c$  : Fuerza centrífuga

## CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1. Situación Problemática

Las arenas de **las playas del** río Urubamba, en la zona del centro poblado Palma Real, distrito de Echarate, provincia de La Convención, región de Cusco, han sido objeto de estudios preliminares por parte de la empresa GRAN RIO BRAVO. Estos estudios indican la presencia de aproximadamente 30 minerales pesados, destacándose entre ellos la ilmenita, monacita, magnetita y circón por su abundancia relativa. Sin embargo, a pesar de la riqueza mineralógica identificada, no se ha realizado hasta la fecha un estudio detallado sobre la concentración de estos minerales pesados en la región.

Dada esta carencia de investigación específica, proponemos como alternativa llevar a cabo un estudio exhaustivo que se enfoque en la concentración de minerales de titanio presentes en las arenas del río Urubamba, utilizando técnicas de concentración magnética. Este enfoque permitirá evaluar la viabilidad de recuperar minerales de titanio **como la ilmenita** de manera eficiente, contribuyendo al desarrollo económico de la región y optimizando el aprovechamiento de los recursos naturales disponibles.

### 1.2 Formulación Del Problema

#### 1.2.1 Problema General

¿Cómo recuperar los minerales de titanio, mediante la concentración magnética a partir del preconcentrado obtenido de una mesa vibratoria, de las arenas del río Urubamba?

#### 1.2.2 Problemas Específicos

1. ¿Cómo influye la granulometría en la concentración magnética de los minerales de titanio a partir del preconcentrados de las arenas del río Urubamba?

2. ¿Cómo influye la velocidad de giro del rodillo en la concentración magnética de los minerales de titanio a partir del preconcentrados de las arenas del rio Urubamba?
3. ¿Cómo influye la intensidad del campo magnético en la concentración magnética de los minerales de titanio a partir del preconcentrado de las arenas del rio Urubamba?

### 1.3 Justificación De La Investigación

#### 1.3.1 Justificación Tecnológica:

La importancia de la tecnología se ha asentado junto con la intensificación de los procesos, debido a que existe la tecnología adecuada para tratar minerales de titanio en el país.; los cuales nos proporcionan métodos gravimétricos y magnéticos para la obtención de los minerales de titanio de las arenas del rio Urubamba, esta investigación se realizara por medio de la concentración magnética a partir de preconcentrados obtenidos mediante la concentración gravimétrica,

#### 1.3.2 Justificación Económica

Las altas cotizaciones de los minerales de titanio justifican cualquier estudio que con lleve a la recuperación de estos, incluso de minerales muy difíciles de tratar. Siendo el estudio muy importante para la región y para el país, debido a que el Perú no posee en su cartera algunos minerales de importancia como minerales de titanio.

#### 1.3.3 Justificación Social

Generar espacios de trabajo que aporte al crecimiento de la económica local y nacional, la puesta en marcha de esta investigación beneficiaria de manera directa al centro poblado y aledaños, desarrollando un rubro alternativo a la actividad agrícola y trabajo en municipios locales.

### 1.3.4 Justificación Ambiental

El proceso propuesto en esta investigación para la recuperación de minerales de titanio ha sido diseñado para minimizar el impacto negativo sobre el medio ambiente. Es importante destacar que los minerales de titanio, como la ilmenita ( $\text{FeTiO}_3$ ), no se consideran contaminantes peligrosos en su forma natural. Estos minerales son generalmente inertes y no presentan riesgos significativos de toxicidad para el entorno.

Sin embargo, durante el proceso de concentración y recuperación, es fundamental asegurarse de que se respeten los límites máximos permisibles (LMP) de contaminantes ambientales, para evitar cualquier posible impacto adverso. En Perú, la normativa vigente establece una serie de Estándares de Calidad Ambiental (ECA) y Límites Máximos Permisibles que se aplican al sector minero-metalúrgico, los cuales deberán ser estrictamente observados en este proyecto.

Los minerales de titanio como la ilmenita, en su forma natural no tiene límites máximos permisibles específicos, dado que no es considerado un contaminante peligroso. Sin embargo, el proceso debe controlar la generación de polvo y partículas que puedan afectar la calidad del aire local, evitando que las concentraciones de partículas suspendidas excedan los límites establecidos por la ECA para aire.

## 1.4 Objetivos De La Investigación

### 1.4.1 Objetivo General

Recuperar los minerales de titanio, empleando la concentración magnética, a partir del preconcentrado obtenido de una mesa vibratoria de las arenas del río Urubamba.

#### 1.4.2 Objetivos Específicos

1. Determinar la granulometría adecuada para la concentración magnética de minerales de titanio a partir del preconcentrados de las arenas del rio Urubamba.
2. Determinar la velocidad de giro del rodillo, para la concentración magnética de minerales de titanio a partir del preconcentrados de las arenas del rio Urubamba.
3. Determinar la intensidad del campo magnético, para la concentración magnética de minerales de titanio a partir del preconcentrados de las arenas del rio Urubamba.

## **CAPITULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 Antecedentes De La Investigación**

##### **2.1 Internacional**

- Daniel Antonio Trujillo Regalado (2014) estudio sobre el Desarrollo De Un Proceso De Recuperación De Dióxido De Titanio A Partir De La Ilmenita Presente En Las Arenas Ferrotitaníferas De La Zona De Mompiche – Ecuador, cuyo objetivo fue evaluación del proceso de recuperación de  $TiO_2$  a partir de la ilmenita ( $FeO.TiO_2$ ) presente en las arenas ferrotitaníferas de la Playa del Suspiro en la zona de Mompiche, Esmeraldas, Ecuador, y se establecen las mejores condiciones para el adecuado aprovechamiento de las arenas ferrotitaníferas.
- Ing. Quim. Hector Mujica e Ing. Quim. Lorenzo Moratta (2008) Estudio De Un Esquema De Separación Y Concentración De Los Minerales Pesados De Las Arenas Negras De La Playa De Aguas Dulces De Rocha (Uruguay), Tiene como objetivo principal el lograr determinar dentro del área explorada por ANCAP en 1964, los límites geológicos del yacimiento de arenas negras y la estratigrafía de la zona donde está inserto el mismo y definir características básicas de yacimiento que permitan mejorar el conocimiento sobre este tipo de acumulaciones en la costa Uruguaya.

##### **2.2 Nacional**

- Ing. Vivtor Raul Bellota Florez e Ing. Nora Rodriguez Castro (2010) Recuperacion De Minerales De Titanio A Partir De Los Relaves Aluviales De La Zona De Huaypetuhe – Madre De Dios, tuvo el objetivo de proponer un método de concentración de minerales de titanio a partir de los relaves aluviales, realizar el análisis químico para determinar el

contenido de  $\text{TiO}_2$  utilizando una marcha analítica sistematizada, identificar las especies mineralógicas de carácter descriptivo mediante el estudio mineralógico.

## 2.3 BASES TEORICAS

### 2.3.1 Titanio

El titanio representa el 0.44% de la masa total de la corteza terrestre. Es el cuarto metal estructural más común después del aluminio, el hierro y el magnesio. Es posible encontrar yacimientos explotables en todo el mundo, está presente prácticamente en todas las rocas, así como en plantas y animales, meteoritos y estrellas. Los principales minerales de titanio son el rutilo, la brokita y la anatasa como óxido simple, la eugenita, la ilmenita y el perovskita como óxido mezclado y la titanita o la esfena como silicatos. *(Martin sarmiento, Definición y análisis del proceso más ventajoso para la concentración de la Ilmenita presente en la arena de la playa Ventanilla en el Estado de Oaxaca, 2011, P. 03).*

#### **Imagen 2. 1: Titanio**



*Nota: Heavy Minerals 2005, 16-19 de octubre, Society for Mining, Metallurgy and Exploration*

El titanio cuenta con características como la alta resistencia mecánica, rigidez, baja densidad, biocompatibilidad y buena resistencia a la corrosión. Además de ser el metal con la mejor relación tenacidad/peso, una característica en que puede pulirse para darle un lustre

excepcional, al encontrarse en estado puro es dúctil y tiene una baja conductividad eléctrica y térmica, el titanio es un metal que cuenta con un coeficiente de expansión termica menor que el acero, pero cuenta con una alta resistencia a la corrosión. Cuando el titanio hace contacto con el ácido fosfórico, clorhídrico y sulfúrico, cloro seco, cloruro de amonio (a más de 520 °C), amonio (a más de 150 °C) y sulfuro de hidrógeno (a más de 150 °C), se descompone rápidamente.

Debido a que se produce carburo de titanio, la reducción tradicional del  $TiO_2$  mediante el calor en presencia del carbón es imposible. Debido a la alta reactividad de los elementos del grupo IVA, con indeseados y graves efectos causados por impurezas residuales, la extracción de estos elementos normalmente no se realiza desde el óxido, sino mediante clorinación para reducir el cloruro; el magnesio o sodio se utilizan como reductor. Los costos aumentan inevitablemente, lo que hace que el metal final sea más caro, lo que limita sus aplicaciones y valor para usuarios potenciales. La contaminación por oxígeno persiste a pesar del uso de este proceso. *(Martin sarmiento, Definición y análisis del proceso más ventajoso para la concentración de la Ilmenita presente en la arena de la playa Ventanilla en el Estado de Oaxaca, 2011, P. 05).*

## **Aplicaciones**

El titanio puede ser aplicado de muchas formas, y generalmente se puede dividir en aeroespaciales y no aeroespaciales según el tipo de aleación utilizada y la industria en la que se utiliza, entra las cuales está la construcción, la aeronáutica, la aeroespacial, la naval, la energía, la medicina, la deportiva, la joyería, la automoción, el petróleo, la química, la militar y la alimentación son solo algunas de las industrias en las que se utiliza el titanio y la joyería de titanio que puede ser usada por personas alérgicas a ciertos metales es otro ejemplo.

- **Pigmentos y aditivos:** Más del 95% del mineral de titanio extraído se utiliza para refinar dióxido de titanio, que se usa como colorante blanco en pinturas e inclusive como colorante para alimentos.
- **Aplicaciones aeroespaciales y náuticas:** Es el más significativo, tanto para aviación comercial como militar. Mas de la mitad de la producción se produce a través de turbinas de gas. Las aleaciones de titanio se utilizan principalmente en discos, ejes, espaciadores, sellos y cuchillas de compresor a temperaturas superiores a 600°C.
- **Aplicaciones de consumo y arquitectónicas:** En la industria automotriz, el titanio se aplica en particular en los deportes de motor y la construcción de automóviles, ya que la reducción de peso sin afectar la resistencia o firmeza es de suma importancia. Por ejemplo, algunos motores utilizan piezas de titanio para mejorar su resistencia al calor. Asimismo, ha sido usado en diseños de arquitectura, por ejemplo, el memorial de treinta y cuatro metros de altura en honor a Yuri Gagarin dentro de Moscú, debido a la coloración que presenta y el vínculo con la industria aeroespacial.
- **Aplicaciones médicas:** Gracias a que es compatible con el cuerpo, el titanio se utiliza en implementos quirúrgicos y en implantes para medicina. Se utilizan mezclas que tienen entre 4 y 6 por ciento de Aluminio y entre 0 y 4 por ciento de Vanadio, para estas finalidades. Su habilidad para acoplarse con los huesos le proporciona una excelente utilidad para los implantes dentales y las ortopédicas, estas últimas, podrían perdurar por hasta treinta años.
- **Joyería:** El titanio es muy reconocido en joyería debido a que es muy durable y tiene características inertes, las cuales previenen las reacciones alérgicas y son resistentes al

agua. Es posible lograr su aleación con oro, lo que genera una combinación comercializada que se llama oro de 24 quilates.

### 2.3.2 Ilmenita

La ilmenita está compuesto por óxido de hierro y titanio, su fórmula molecular es  $\text{FeTiO}_3$  y su composición teórica es 36,8% Fe, 31,6% Ti y 31,6% O. La transición de hierro a hierro férrico suele producirse por oxidación del mineral. La forma cristalina de la ilmenita se transforma en una mezcla amorfa de  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y  $\text{TiO}_2$  mediante una meteorización muy lenta. El hierro se lixivía con agua, lo que da como resultado un aumento en la calidad del  $\text{TiO}_2$ , y el producto final de esta modificación puede ser rutilo, anatasa o leucosita. Las especies que resultan de la alteración de la ilmenita se denominan minerales secundarios de titanio. (*Luis Valderrama, concentración de minerales de titanio contenidos en las arenas de playas de la región de Atacama-Chile, 2008, P. 121*).

#### **Imagen 2. 2: Morfologías de la Ilmenita**



*Nota: Heavy Minerals 2005, 16-19 de octubre, Society for Mining, Metallurgy and Exploration*

## Morfología y Formación

La ilmenita se puede presentar como cristales finos, formando una placa rómbica. Además, este mineral suele encontrarse en la arena de las playas en forma de partículas muy pequeñas con un diámetro de 0,1 a 0,2 milímetros.

La ilmenita se encuentra en rocas ígneas y metamórficas entre las que están el gabro, la diabasa también la piroxenita. Es un mineral ortoígneo y puede estar presente en la mayoría de rocas ígneas, especialmente en rocas máficas y pegmatitas asociadas con el gabro. Así mismo se encuentra en sedimentos de minas de placer. Debido a las condiciones de su formación, actúa como un "termómetro geológico", esto debido a que se forma a temperaturas de 500 °C. Se asocia comúnmente con minerales como la pirrotita, hematita, rutilo, espinela y magnetita.

**Tabla 2. 1:** *Datos Generales de la Ilmenita*

Fórmula	$\text{Fe}^{2+}\text{TiO}_3$
Sistema de cristalización	Trigonal
Lustre	Submetálico
Color	Negro hierro o negro
Dureza	5-6
Rareza	común
Características distintivas	Hábito cristalino, densidad, ausencia de exfoliación, lustre y asociaciones.
Serie	Serie de la Geikielita - Ilmenita Serie de la Ilmenita – Pyrophanite

*Nota: (Luis Valderrama, concentración de minerales de titanio contenidos en las arenas de playas de la región de Atacama-Chile, 2008, P. 121).*

## Estructura Cristalina

**Sistema Cristalino:** Triclínico

**Red Cristalina:** La ilmenita tiene una estructura cristalina en la que los átomos de hierro (Fe) y titanio (Ti) están organizados en una red tridimensional con átomos de oxígeno (O) formando octaedros alrededor de estos cationes.

### Estructura de la Celda Unitaria:

Los átomos de titanio y hierro están en posiciones equivalentes en la red cristalina.

La estructura se puede describir como una disposición de octaedros de  $\text{TiO}_6$  y  $\text{FeO}_6$  compartiendo caras o aristas.

## Estructura Atómica

**Átomos y Enlaces:** En el nivel atómico, los átomos de hierro (Fe) y titanio (Ti) están coordinados con seis átomos de oxígeno en una estructura octaédrica y los enlaces entre los átomos de oxígeno y los cationes (Fe y Ti) son enlaces iónicos y covalentes, lo que da lugar a la formación de una red robusta.

## Niveles de Energía y Electrones

### Configuración Electrónica de los Cationes:

**Hierro (Fe):** Tiene una configuración electrónica en su estado fundamental de  $(\text{Ar}) 3d^6 4s^2$

En la ilmenita, el hierro se encuentra comúnmente en el estado de oxidación  $+2(\text{Fe}^{2+}) + 3(\text{Fe}^{3+})$ , con configuraciones electrónicas correspondientes de  $(\text{Ar}) 3d^6$  para  $\text{Fe}^{2+}$  y  $(\text{Ar}) 3d^5$  para  $\text{Fe}^{3+}$

**Titanio (Ti):** Tiene una configuración electrónica de  $(\text{Ar}) 3d^2 4s^2$  En ilmenita, titanio está en el estado de oxidación  $+4(\text{Ti}^{4+})$ , con la configuración  $(\text{Ar}) 3d^0$ .

### Electrones Desapareados:

**Hierro ( $\text{Fe}^{2+}$ ):** Presenta 4 electrones desapareados en el orbital 3d, lo que contribuye a su comportamiento magnético.

**Hierro ( $\text{Fe}^{3+}$ ):** Presenta 5 electrones desapareados en el orbital 3d.

**Titanio ( $\text{Ti}^{4+}$ ):** No tiene electrones desapareados en su estado de oxidación +4.

### **Propiedades Magnéticas**

**Magnetismo:** La ilmenita, debido a la presencia de  $\text{Fe}^{2+}$  y  $\text{Fe}^{3+}$ , tiene propiedades magnéticas. El  $\text{Fe}^{2+}$  y  $\text{Fe}^{3+}$  tienen electrones desapareados que contribuyen al magnetismo del mineral.

La ilmenita es conocida por su magnetismo débil a moderado debido a la presencia de estos cationes con electrones desapareados.

### **Uso**

La Ilmenita es combinada y procesada para crear dióxido de titanio, un pigmento blanco de alta calidad que es resistente a la radiación ultravioleta (UV), al agua y a los químicos, además de poseer la característica de no ser tóxico.

Se le destina más del 50% de dióxido de titanio a la producción de pinturas (automóviles, para viviendas, usos industriales, etc.) porque es capaz de reflejar los rayos solares ultravioleta así como de proteger la pintura contra daños. Además, el dióxido de titanio está presente en la elaboración de muchos protectores solares, cosméticos, aceites, plásticos, tintas, papel, pastas dentífricas y algunos alimentos como la harina o el azúcar en polvo.

La principal fuente de titanio metálico es la ilmenita, al combinar cantidades menores de titanio con algunos metales pueden crear aleaciones duraderas, resistentes y ligeras. Con las aleaciones se pueden fabricar gran cantidad de piezas, herramientas resistentes, también se pueden fabricar piezas de avión, implantes humanos, cuadros de bicicletas y equipos deportivos.

**Tabla 2. 2:** *Propiedades Físicas de la Ilmenita*

<b>Hábito</b>	En cristales normalmente tabulares delgados y con truncaduras romboédricas que le hacen parecerse al oligisto.
<b>Lustre</b>	Submetálico
<b>Transparencia</b>	Opaco
<b>Color</b>	Negro hierro o negro
<b>Color en sección fina</b>	Incolora
<b>Raya</b>	De negra a pardo rojiza.
<b>Dureza (Mohs):</b>	5-6
<b>Fractura</b>	Concoidal
<b>Densidad</b>	4,5-5 g/cm <sup>3</sup> (medida)   4,79 g/cm <sup>3</sup> (calculada)

*Nota: (Luis Valderrama, concentración de minerales de titanio contenidos en las arenas de playas de la región de Atacama-Chile, 2008, P. 121).*

## Yacimientos

La ilmenita a escala microscópica la puede encontrar en diversas rocas y arenas, en muchos lugares se hallaron ejemplares cristalizados, estos fueron encontrados en las montañas de Ura - Rusia, en la península de Kola, en Noruega y en Nueva York, Estados Unidos.

Los arenales del noroeste de Galicia, España, contienen abundante ilmenita, comúnmente asociado con rutilo, ambos minerales son extraídos a escala industrial en Braña Rubia, Coristanco y algunas zonas aledañas, como Tordia y Valle de dubra. La ilmenita también

se extrajo en las décadas de 1940 y 1950 en playa Barres, en el municipio de Ponteseo, también se explotaron yacimientos de casiterita e ilmenita en Ituero de Azaba (Salamanca)

**Tabla 2. 3:** *Cristalografía de la Ilmenita*

<b>Sistema cristalino</b>	<b>Trigonal</b>
<b>Clase (H-M)</b>	0m (3*) - Rombohedral
<b>Grupo espacial</b>	R3*
<b>Parámetros de la celda</b>	a=5,093Å c=14,06Å
<b>Volumen de unidad de celda:</b>	V 315,84Å

*Nota:* (Luis Valderrama, concentración de minerales de titanio contenidos en las arenas de playas de la región de Atacama-Chile, 2008, P. 121).

**Tabla 2. 4:** *Propiedades Químicas de la Ilmenita*

<b>Fórmula</b>	<b>Fe<sup>2+</sup>TiO<sub>3</sub></b>
<b>Elementos químicos</b>	<u>Fe</u> , <u>Ti</u> , <u>O</u>
<b>Composición química</b>	Ti: 31,56%, O: 31,63%, Fe: 36,81%,

*Nota:* (Luis Valderrama, concentración de minerales de titanio contenidos en las arenas de playas de la región de Atacama-Chile, 2008, P. 121).

**Tabla 2. 5:** *Test Químicos de la Ilmenita*

<b>Fusibilidad</b>	<b>7; Mineral tipo: Cuarzo; Punto de fusión: 1710°C; Infusible con soplete.</b>
<b>Reacción a los ácidos</b>	Se disuelve lentamente en ácido clorhídrico.
<b>Otros</b>	Test del titanio.

*Nota:* (Luis Valderrama, concentración de minerales de titanio contenidos en las arenas de playas de la región de Atacama-Chile, 2008, P. 121).

## MINERALES ACOMPAÑANTES:

### 2.3.3 Albita

La albita, mineral que pertenece al grupo de los silicatos, exactamente perteneciente al subgrupo de los tectosilicatos, se clasifica como uno de los feldespatos llamados plagioclasas. Es un aluminosilicato de sodio, puede contener calcio o potasio cambiando al sodio en su estructura cristalina. Sin embargo, para ser clasificada como albita, contendrá sodio superior al 90%, mientras que los minerales de calcio y potasio juntos deben constituir menos del 10%.

#### **Ambiente de Formación de la Albita**

El feldespato potásico se forma en condiciones de ambientes de cristalización a alta temperatura. Sin embargo al bajar la temperatura se produce un proceso de disolución y la albita se separa del resto del mineral, formando capas en los cristales de feldespato potásico.

#### **Imagen 2. 3: *Minerales de Albita***



*Nota: Heavy Minerals 2005, Society for Mining, Metallurgy and Exploration*

## Localización, Extracción y Uso

Se encuentran grandes depósitos en la península de Labrador y en la península Escandinava. Este material en estado sólido es usado para la fabricación de vidrio, cerámica y también en la fabricación de materiales refractarios.

### 2.3.4 Apatito

También denominada apatita, conocidos como un grupo de minerales que tiene una composición química de  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F},\text{Cl},\text{OH})$ . Esto depende del anión que predomine en la segunda parte de la fórmula, posee tres especies: fluorapatita, clorapatita e hidroxiapatita. Presenta una variable, los ejemplares incoloros, blancos y amarillos son los más comunes, también se encuentran en tonos parduzcos o verdosos. Frecuentemente los encontramos en forma de cristales hexagonales. (Wayback Machine., 2011)

#### **Imagen 2. 4:** *Minerales de Apatito*



*Nota: Heavy Minerals 2005, Society for Mining, Metallurgy and Exploration*

## **Formación y Yacimientos**

La apatita puede ser encontrada en una variedad de ambientes geológicos, a estos se incluyen los ambientes hidrotermales, pegmatitas y calizas metamórficas, así como sedimentos formados a partir de depósitos orgánicos. Los yacimientos minerales más importantes se encuentran en las minas del Sahara Occidental y en Perú en la localidad de Julcani, ciudad Huancavelica. En el siglo XIX, con el crecimiento de la industria europea de fertilizantes, existió una gran demanda de minerales de fosfato. Esto llevó a una exhaustiva investigación de campo y a múltiples ensayos de desarrollo.

### **2.3.5 Biotita**

La biotita en la actualidad es considerada como un grupo de minerales, antes era considerada un mineral en sí mismo. Sin embargo, en 1998, la Asociación Mineralógica Internacional (IMA) no reconoce el término "biotita" como un mineral individual. Sino que, lo considera un nombre de "grupo" que comprende otros minerales como son: la flogopita, la siderophyllita, la annita y la eastonita.

### **Características**

Desde una perspectiva química, la biotita está compuesta por hierro y aluminio, por ello es considerado un filosilicato, está incluida en el grupo de las micas. Variaciones en su fórmula pueden dar lugar a distintos minerales dentro del grupo de las micas, como la hendricksita (Zn) lepidomelana (FeO), la mangano-filita (Mn), la wodanita (Ti), la natrobiotita (Na).

**Imagen 2. 5: Minerales de Biotita**

*Nota: Heavy Minerals 2005, Society for Mining, Metallurgy and Exploration*

**Usos**

Considerando sus características como el de aislante y flexibilidad de sus cristales y su capacidad para exfoliarse en láminas delgadas, la biotita es utilizada en la industria como aislante eléctrico o térmico en diversas instalaciones.

**2.3.6 Calcita**

La calcita, compuesta de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), malinterpretada como caliza, aunque esta última es una roca, no un mineral. Su denominación proviene del latín "calx", que denota cal viva. Entre los polimorfos del carbonato de calcio, como el aragonito y la vaterita, la calcita destaca por su estabilidad superior y menor solubilidad. (Asociación Internacional Mineralógica, 1998).

**Localización, Extracción y Usos de la Calcita**

La calcita es un mineral ampliamente distribuido en canteras alrededor del mundo y frecuentemente se encuentra en asociación con otros minerales como: siderita, cuarzo, pirita,

precnita, fluorita, dolomita y barita. Su aplicación es diversa, abarcando desde la producción de cemento y mortero hasta la fabricación de piedra caliza y mármol, así como piedra y grava para la construcción. En el ámbito agrícola, se utiliza para neutralizar la acidez del suelo mediante fertilizantes. En la industria óptica, la calcita transparente se emplea para fabricar prismas polarizadores que son usados en microscopios. Además, la piedra caliza fundida es esencial en la industria siderúrgica y en la producción de vidrio.

**Imagen 2. 6:** *Minerales de Calcita*



*Nota: Heavy Minerals 2005, Society for Mining, Metallurgy and Exploration*

### **2.3.7 Magnetita**

La magnetita con formula ( $\text{Fe}_2+\text{Fe}_3+2\text{O}_4$ ), esta compuesto de óxido ferroso, la magnetita es un mineral de hierro y su nombre se debe al pastor Magnes, quien lo descubrió en el monte Ida, también es conocido como ferroferrita y morpholita.

### **Aplicaciones**

La magnetita, al igual que la hematita, se destaca como uno de los minerales más importantes, esto debido a su contenido de hierro, que puede alcanzar hasta el 72%. Siendo el mineral con la mayor concentración de metales. En la construcción, es emplea como árido natural de alta densidad, con valores entre 4.65 y 4.80 kg/litro, para la elaboración de hormigón, especialmente en aplicaciones de protección radiológica. Además, la magnetita es utilizada en calderas industriales debido a su notable estabilidad a altas temperaturas. Sin embargo, es importante mencionar si la magnetita se encuentra en un ambiente de aire húmedo o bajas temperaturas, se oxida gradualmente formando óxido de hierro. Su capacidad para soportar altas temperaturas es muy importante para ser usado como protector eficaz para el interior de los tubos de calderas.

**Imagen 2. 7:** *Minerales de Magnetita*



*Nota: Heavy Minerals 2005, Society for Mining, Metallurgy and Exploration*

### 2.3.8 Cuarzo

El cuarzo, un mineral predominante en la naturaleza, está compuesto principalmente por dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), es un mineral muy abundante después del feldespato. Se encuentra presente en diversas rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias. Es de gran dureza

y capacidad para resistir las condiciones ambientales adversas, el cuarzo se emplea tanto en la fabricación de instrumentos ópticos como en aplicaciones ornamentales, placas oscilantes y papel de lija.

**Imagen 2. 8:** *Minerales de Cuarzo*



*Nota: Heavy Minerals 2005, Society for Mining, Metallurgy and Exploration*

### **Química, estructura y propiedades**

El cuarzo, conocido también como sílice, es un óxido de silicio que tiene como fórmula química  $\text{SiO}_2$ . El cuarzo viene acompañado de ciertas impurezas como el litio, sodio, potasio, hierro o titanio. En la escala de Mohs se encuentra con una dureza de 7, lo que le caracteriza rayar el vidrio y aceros comunes, el cuarzo exhibe propiedades piezoeléctricas bajo presión o tensión, así mismo posee propiedades piroeléctricas.

#### **2.3.9 Rutilo**

La forma más común de óxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) presente en la naturaleza es el rutilo (otro polimorfo es la anatasa). El rutilo es un mineral que se origina en rocas plutónicas y metamórficas producidas a altas temperaturas y presión debido a su menor volumen molecular. Su

color marrón, a veces rojizo, su alto relieve y los fuertes colores de birrefringencia, que a veces se enmascaran por los colores naturales, son las características principales del microscopio de luz transmitida. A menor presión, se puede transformar a otros minerales ricos en Ti, como la ilmenita. El rutilo también puede ser un mineral de origen secundario como resultado de la alteración de la ilmenita y la magnetita, o como exsoluciones de agregados aciculares presentes en la clorita, que se produce como resultado de la alteración de las micas ferromagnesianas, lo que da como resultado la textura sagenítica. (*Grupo de petrología Ignea, Atlas de rocas ígneas, 2014*).

**Imagen 2. 9:** *Minerales de Rutilo*



*Nota: Heavy Minerals 2005, Society for Mining, Metallurgy and Exploration*

**Aplicaciones**

El rutilo tiene varios usos principales, incluido el uso como pigmento, la producción de cerámicas refractarias y metal titanio.

Al realizar una molienda fina del rutilo este tiene un aspecto de pigmentación blanco pálido que puede ser usado en la elaboración de plástico, papel, pinturas hasta alimentos y otros insumos que

requieran tonalidad de blanco intenso. Los pigmentos blancos más famosos del mundo son pigmentos de óxidos de titanio.

De manera similar, las nano partículas de rutilo absorben la radiación UV eficientemente, esto gracias a que son transparentes a la luz, gracias a esta propiedad el rutilo es usado para la fabricación de protectores solares de la piel humana. El rutilo también es usado ampliamente como recubrimiento para electrodos de soldadura y en la tecnología láser utilizada para fabricar láseres de zafiro y titanio. También es usado para producir yoduro de titanio, estos son usados para polímeros adheridos por éter por ser un catalizador muy eficiente. En el pasado, el rutilo se consideraba una alternativa a los diamantes por su fuerte dispersión y alto índice de refracción, esto hace que tenga un brillo similar al del diamante. Actualmente se utiliza para crear perlas elegantes.

### **Estructura Cristalina**

**Sistema Cristalino:** Tetragonal

**Red Cristalina:** El rutilo tiene una estructura cristalina en la que los átomos de titanio están rodeados por átomos de oxígeno en una disposición específica. La celda unitaria se describe como una estructura tetragonal en la que los átomos de oxígeno forman una red de octaedros alrededor de los átomos de titanio.

### **Estructura de la Celda Unitaria:**

Los átomos de titanio (Ti) están en el centro de octaedros formados por átomos de oxígeno (O). La disposición de los átomos da lugar a una estructura en forma de rutilo, con enlaces fuertes y simetría tetragonal.

## Estructura Atómica

### Átomos y Enlaces:

**Titanio (Ti):** Está rodeado por seis átomos de oxígeno en una estructura octaédrica.

**Oxígeno (O):** Forma enlaces covalentes con el titanio, creando una red tridimensional.

### Niveles de Energía y Electrones

#### Configuración Electrónica de los Átomos:

**Titanio (Ti):** En el estado fundamental, tiene la configuración  $[\text{Ar}] 3d^2 4s^2$ . En el rutilo, el titanio está en el estado de oxidación +4 ( $\text{Ti}^{4+}$ ), con la configuración electrónica resultante de  $[\text{Ar}] 3d^0$ . Esto significa que todos los electrones 3d y 4s han sido removidos en este estado.

**Oxígeno (O):** Tiene la configuración  $[\text{He}] 2s^2 2p^4$ . En el rutilo, el oxígeno tiene una configuración completa en sus orbitales 2s y 2p, con un total de 6 electrones en la capa de valencia.

#### Electrones Desapareados:

**Titanio ( $\text{Ti}^{4+}$ ):** No tiene electrones desapareados en su estado de oxidación +4. Esto es porque todos los electrones 3d y 4s han sido removidos.

**Oxígeno (O):** Cada átomo de oxígeno tiene 2 electrones desapareados en sus orbitales 2p, que forman pares en el enlace con el titanio.

### Propiedades Magnéticas

#### Magnetismo:

**Rutilo:** Debido a la ausencia de electrones desapareados en  $\text{Ti}^{4+}$ , el rutilo no tiene propiedades magnéticas intrínsecas notables. Sin embargo, puede mostrar magnetismo débil en ciertas condiciones debido a impurezas o defectos en la estructura cristalina.

### 2.3.10 Titanita

La titanita ( $\text{CaTiSiO}_5$ ) es un mineral con colores incoloros hasta amarillo, verde, marrón y negro. A menudo aparece en forma de masas granulares o cristales prismáticos. Se encuentra en rocas ígneas, metamórficas y algunos depósitos sedimentarios. Es un mineral que se encuentra en muchas rocas y puede ayudar en la interpretación de las condiciones de formación de estas rocas.

*Imagen 2. 10: Mineral de titanita*



*Nota: Heavy Minerals 2005, Society for Mining, Metallurgy and Exploration*

### Estructura Cristalina

**Sistema Cristalino:** Ortorrómbico

**Red Cristalina:** La titanita tiene una estructura en la que los átomos están dispuestos en una celda unitaria ortorrómbica. La fórmula química indica la presencia de calcio (Ca), titanio (Ti), silicio (Si) y oxígeno (O) en una red compleja.

### **Estructura de la Celda Unitaria:**

**Calcio (Ca):** Está coordinado por átomos de oxígeno en una estructura de tipo octaédrico.

**Titanio (Ti):** Forma octaedros con oxígeno.

**Silicio (Si):** Forma tetraédros con oxígeno, enlazados entre sí y a los octaedros de titanio.

**Oxígeno (O):** Está dispuesto en una red tridimensional, conectando átomos de calcio, titanio y silicio.

### **Características Físicas**

**Dureza:** 5 a 6 en la escala de Mohs. Es relativamente dura, pero puede ser rayada con materiales más duros.

**Densidad:** Aproximadamente 3.5 a 4.5 g/cm<sup>3</sup>. La densidad varía según la composición exacta y los posibles sustitutos en la estructura cristalina.

**Color:** Varía ampliamente; puede ser incoloro, amarillo, verde, marrón o negro.

**Brillo:** Vitreo a subadamantino, con un brillo que varía dependiendo de la pureza y el estado de la superficie del mineral.

**Sistema de Cristalización:** Ortorrómbico.

### **Propiedades Ópticas**

**Índice de Refracción:** Alto, lo que contribuye a su brillo y dispersión.

**Dispersión:** Alta, lo que produce un efecto de destello similar al de los diamantes, especialmente en piedras transparentes.

### **Propiedades Magnéticas y Eléctricas**

**Magnetismo:** Generalmente, la titanita no muestra propiedades magnéticas notables. Puede tener un leve magnetismo en algunas muestras debido a impurezas o defectos estructurales.

**Conductividad Eléctrica:** No es un buen conductor de electricidad. La titanita es un mineral aislante.

### Usos

**Joyería:** La titanita es valorada en joyería debido a su brillo y dispersión. Se utiliza en anillos, pendientes y otras piezas decorativas. Las gemas de titanita pueden ser de gran belleza y claridad.

### Usos en la industria:

**Fabricación de Cerámica:** Se utiliza en la fabricación de ciertos tipos de cerámica y vidrio debido a sus propiedades como fundente y estabilizador.

**Industria de la Pintura:** En algunas aplicaciones industriales, la titanita se utiliza como pigmento debido a su color y opacidad.

**Minería:** La titanita puede ser una fuente de titanio, aunque no es la principal. El titanio extraído de la titanita se utiliza en aleaciones de alta resistencia y pigmentos.

### 2.3.11 Zircón

El zircón, llamado también como circón, considerado como un nesosilicato. Su nombre químico es silicato de circonio y su fórmula química correspondiente es  $ZrSiO_4$ , los colores naturales del circón son incoloros, amarillo dorado, rojo, marrón, azul y verde.

### **Propiedades**

El circón se puede encontrar en rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias. Es raro poder divisar cristales de circón de gran tamaño, el tamaño normal que se puede encontrar en rocas graníticas es de 0.1 a 0.3 mm, como también pueden llegar a encontrar de mayor medida, estos normalmente se pueden encontrar en pegmatitas y cabonatitas. Una de las propiedades del circón es que es resistente a la corrosión como al calor.

Los circones pueden sufrir metamictización por su contenido de torio y uranio, este proceso está relacionado a daños internos por radiación, que hacen alterar su estructura cristalina y explican en cierta medida las propiedades variables del circon.

El circon sufre una disminución de su densidad por el daño interno de la radiación, esto ocasiona que la estructura cristalina se comprometa y cambie de color.

Al circon la podemos encontrar en distintos colores pueden ser amarillo, azul, gris, rojizo hasta incoloro, los colores del circon se pueden modificar por tratamiento térmico, los más comunes son de color café que pueden convertirse en azules e incoloros, esta transformación puede ocurrir si se calientan a 800 y 1000 °C. La formación del circon rosa, rojo y púrpura, en entornos geológicos se pueden producir en cientos de millones de años. También en condiciones geológicas por encima de los 400°C se puede producir zircón rojo o rosa.

### **Aplicaciones**

El circon como piedra preciosa muchas veces es usado como sustituto del diamante debido a su tamaño y pureza (también existe el  $ZrO_2$ , que es el circon artificial). Pero, tienen varias desventajas, la más notable de las cuales es que no son resistentes a la limpieza ultrasónica y son propensos a decolorarse cuando se exponen al calor. Además, sus bordes se rompen con facilidad. El cambio de color tras el calentamiento también puede ser una propiedad deseable para conseguir la alteración del circon. Se puede obtener un atractivo color azul tratando térmicamente el circon granate.

Otro uso principal para el zinc metálico, pero se usa limitadamente y también para los compuestos de zinc, como el zinc dióxido ( $ZnO$ ), este es uno de los materiales más reactivos que se conocen.

**Imagen 2. 11:** *Minerales de Zircón*



*Nota: Heavy Minerals 2005, Society for Mining, Metallurgy and Exploration*

### 2.3.12 Monazita

La monazita, en términos geológicos, es aquel fosfato con una tonalidad pardo rojizo, que cuya composición es de tierras raras, con una densidad de  $5.4 \text{ g/cm}^3$ . Suele manifestarse en forma de diminutos cristales individuales. De hecho, existen al menos cuatro variantes distintas de monazita, cada una con su propia composición específica.

**Imagen 2. 12:** *Monazita desde un Estetoscopio*



*Nota: Propia*

La monazita contiene lantano en mayor proporción como también está la sílice que está presente en menor cantidad, también está el uranio, dependiendo con el tipo de mineral con el que se encuentre presente, la monazita puede llegar hacer radioactiva ya que tiene presencia de torio y además contiene cierta cantidad de helio y otros elementos como lantano, cerio, uranio, se puede representar de las siguientes formas:  $(\text{Ce, La, Pr, Nd, Th, Y})\text{PO}_4$ ,  $(\text{La, Ce, Nd, Pr})\text{PO}_4$ ,  $(\text{Nd, La, Ce, Pr})\text{PO}_4$ ,  $(\text{Pr, Nd, Ce, La})\text{PO}_2$ .

## 2.2 Concentración De Minerales

La concentración de minerales tiene como propósito enriquecer menas económicamente útiles o minerales mineralógicos mediante la eliminación de los componentes estériles, y utilizar sus propiedades físicas características para separarlos entre sí.

Por lo tanto, el concentrado de mineral viene hacer un producto intermedio entre el producto puro disponible comercialmente y el estado natural del mineral. Para separar físicamente la ganga estéril del mineral útil y varios minerales interrelacionados entre sí, las propiedades físicas del mineral y la ganga deben ser diferente, por lo que la "gradiente" es lo bastante alta para aseverar que la separación sea: Cuantitativamente eficiente, Cualitativamente selectiva, Cinéticamente enérgica, para realizar el proceso de tal forma se de rápidamente y económicamente viable, en equipos adecuados.

El proceso de concentración se desarrolla en etapas, realizando operaciones de trituración y concentración, o realizando diversos de concentración de minerales en serie o paralelo, con la finalidad de optimizar, la recuperación, purificación y separación de varios minerales útiles.

## 2.4 Principios De La Concentración De Minerales

- Los minerales se recuperan inmediatamente después de su liberación
- Por razones económicas y metalúrgicas conocidas, evitar la sobre molienda
- Ajuste el diseño y los parámetros de las etapas de mayor grado específico con la finalidad de mejorar al máximo su eficiencia.
- Minimizar operaciones de conminución las fracciones ricas en especies minerales útiles.

## **Método De Separación De Minerales Según Sus Diferentes Propiedades Físicas O Volumétricas**

Para separar las partículas es importante tener en cuenta el tamaño de partícula y las propiedades diferenciales dependen las características de estos métodos de separación. Los tipos de concentración pueden ser:

- Concentración gravimétrica: Se realiza a través de la variación de densidades de cada sólido, es decir distinta velocidad de sedimentación de partículas.
- Concentración magnética: ciertos minerales tienen susceptibilidad magnética y pueden ser separados en un campo magnético donde la intensidad es variable.
- Concentración eléctrica: Es realizada por la conductividad eléctrica, esto sucede si las partículas se hallan en un campo eléctrico donde las partículas pueden saltar de una placa a otra o quedarse pegadas a la misma.

## **Método De Separación De Minerales Según Sus Diferentes Propiedades Fisicoquímicas De Superficie**

El procesamiento de minerales que se encuentren con una granulometría fina, dependiendo de sus propiedades superficiales, esto genera que varios minerales se encuentren en

una fase o pueda ser cambiado a otra, a esto proceso la denominamos flotación. Los reactivos ayudan en el cambio de sus propiedades superficiales.

Este proceso se basa fundamentalmente en que los minerales cuentan con propiedades hidrofobicas e hidrofílicas, quiere decir el comportamiento que tienen los minerales cuando están en contacto con el agua

Principios de métodos de separación

- La hidrofobicidad del mineral.
- Se forma espuma estable en la superficie.

Para que ocurra el principio de separación se añaden reactivos químicos en el proceso de separación, entre los que entran están los activadores, colectores, depresores y modificadores los cuales inducen e inhiben la hidrofobicidad de los minerales, generando estabilidad cuando la espuma está formada.

#### 2.4.1 Concentración Gravimétrica

La concentración gravimétrica es un método sencillo y económico que consiste en la separación de dos o más especies mineralógicas de distinto peso específico, ya que facilita el trabajo con tamaño de partículas tan gruesas que sea posible y de esa forma evitando los costos de conminación. Generalmente utilizamos para separar feldespatos, silicatos del mineral de interés.

#### **Criterio de Concentración**

El criterio de concentración (o criterio de Taggart CT) determina la factibilidad de la concentración gravimétrica, la diferencia entre densidades y el medio fluido de separación de los minerales son los parámetros y es definido por la siguiente expresión:

$$CC = \frac{D_h - D_f}{D_i - D_f} \quad (2.1)$$

**Donde:**

Dh: Densidad del mineral pesado

Di: Densidad del mineral liviano

Df: Densidad del agua

Se muestra en la tabla 2.6 la relación de facilidad de realizar una separación gravitacional y el criterio de concentración.

**Tabla 2. 6:** *interpretación del Criterio de Concentración (CC)*

CC	Significado
>2.5	Separación eficiente hasta 200 malla.
2.5 – 1.75	Separación eficiente hasta 100 malla.
1.75 – 1.50	Separación eficiente hasta 10 malla, sin embargo es difícil.
1.50 – 1.20	Separación eficiente hasta ¼", sin embargo es difícil.

*Nota: (Pavez, 2009, P. 7)*

**Efectos Del Tamaño De Partícula.**

Las partículas que realizan movimientos dentro del fluido, dependerá de su tamaño y de la densidad relativa y las partículas pequeñas no son afectadas de la misma forma que los grandes

Un punto importante a tener en cuenta es reducir Para controlar el tamaño de alimentación en los concentradores gravimétricos, se deberá de disminuir el efecto de tamaño y que el movimiento relativo de las partículas dependa de la densidad de ellas mismas.

**Tabla 2. 7:** *Rango de Tamaño de Diferentes Equipos de Separación por Gravedad*

<b>EQUIPO</b>	<b>TAMAÑO DE PARTICULA</b>
<b>Jig</b>	0.08 mm – 1 mm
<b>Mesa Vibratoria</b>	0.02 mm – 2 mm
<b>Jig Neumatico</b>	0.1 mm – 25 mm
<b>Mesa Con Flujo De Aire</b>	0.25 mm – 6 mm
<b>Centrifugas</b>	0.01 mm – 12 mm
<b>Espirales</b>	0.05 mm – 2 mm

*Nota: (Pavez, 2009, P. 9)*

#### 2.4.2 Clasificación De Métodos Gravimétricos.

##### **Método De Concentración En Medio Denso**

El método de concentración en medio denso, ocurre cuando los minerales a separar tiene densidad intermedia dependiendo de aquellas especies a separar, contando con dos tipos de separación en medio denso que es el estático y dinámico.

##### **Método De Concentración En Corrientes Verticales**

En el método de separación de corrientes verticales, las densidades de las especies es superior a la densidad del medio a separar, la separación se puede dar por corrientes verticales, corrientes centrifugas, corrientes oscilantes y corrientes longitudinales.

En corrientes verticales se pueden usar los Jigs, para la concentración de minerales, se genera mediante el agua corrientes verticales.

### 2.4.3 Jigs

Equipo usado para distintos tipos de granulometría la característica de los minerales es que las densidades no son tan distintas. Preferentemente se aplica con una granulometría gruesa (25,4 a 1,0 mm). Se obtiene una buena recuperación hasta los 150  $\mu\text{m}$  y una mediana recuperación hasta los 75  $\mu\text{m}$ . Las variaciones hidrodinámicas en la concentración con Jig hacen que el proceso sea complejo, con la generación de corriente pulsante de agua extendido entre todo el lecho separa los minerales de distintas densidades.

Los tipos de JIG de parrilla son los siguientes:

- a) JIGS DE PISTÓN.- el pistón que está ubicado en el estanque de agua, origina movimientos de pulsación del agua.
- b) JIGS DE DIAFRAGMA.- Las paredes elásticas de un estanque producen las pulsaciones por movimientos alternados.
- c) JIGS PULSADORES.- El agua y el aire producen pulsaciones por chorros interrumpidos de forma periódica.

#### **Características De Los Jigs:**

En la industria se cuenta con distintos tipos de JIGS, diferenciándose por la geometría, accionamiento, y otras variaciones. Los elementos del JIGS son:

- Caja estática, en el interior un medio fluido en este caso es el agua sufre movimientos de succión e impulsión.
- Cuenta con sistema de accionamiento, normalmente compuesto por un pistón, sistemas de lubricación y un motor.
- Los Jigs, cuentan con sistemas de accionamiento mecánico, hidráulico-mecánico neumático e hidráulico.

- El lecho mantiene una criba.

#### 2.4.4 Mesa Concentradora

Las mesas de concentración, también conocidas como mesas húmedas, se componen de una cubierta con un borde elevado sobre algún tipo de soporte. Por lo general, tienen un motor montado en la mesa, que puede describirse como una superficie rectangular o romboidal con rifles añadidos en su superficie. La forma de operar es mediante movimientos longitudinales por todo el eje axial, un brazo pequeño que se encarga de la vibración de la mesa a lo largo de su longitud, esto es producido por el agua cuando circula hacia la dirección del eje más corto.

Las mesas de agitación cuentan con un método de procesamiento de los minerales más amigables con el medio ambiente, ya que el único reactivo utilizado es el agua. Son ampliamente empleadas en operaciones mineras comerciales.

#### 2.4.5 Mesa Wilfley

En 1985 fueron creadas las mesas Wilfley, consagrándose como modelo para las mesas vibratorias. Al comprobar su eficacia, se ha usado ampliamente, resultado de ello se ha modificado el recubrimiento del tablero de forma parcial con riffles, estos fueron ubicados de forma paralela al eje longitudinal, permitiendo procesar mineral grueso e incremento de su capacidad. La introducción de los "riffles" tenía varios propósitos como crear cavidades para facilitar la creación de un lecho y la estratificación, similar a lo que ocurre en los jigs, evitar que las partículas pesadas sufran vibraciones y estén en contacto con partículas livianas y grandes con la salida del agua de forma transversal. Una mesa vibratoria cuenta con una forma de suministrar un movimiento de forma lateral de vibración diferencial de forma transversal al flujo de pulpa, todo esto origina que las partículas se desplacen a lo largo de los rifles.

Entre las funciones de los rifles es de cubrir aquellas partículas pesadas que se encuentran presentes con la finalidad de cubrir las de vibraciones en la mesa, y exponer aquellas partículas de mayor tamaño o livianas hacia el flujo del agua que viene de forma transversal.

La mesa concentradora Wilfley, están compuestas por mecanismos que originan movimientos laterales de vibración diferenciado esto en sentido transversal hacia el flujo de la pulpa, esto origina que las partículas se desplacen a lo largo de los rifles.

**Imagen 2. 13:** *Mesa Concentradora Wilfley*



*Nota: Propiedad de la empresa Rio Bravo*

### **Funciones de los Riffles**

- Evitar toda partícula pesada pueda emerger del fondo.
- Transferir consecuentemente la operación de la superficie hacia la pulpa.
- Causar flujo turbulento para generar separación de las partículas.

### **Métodos de separación con mesa vibratoria Wilfley.**

Existen dos métodos para la separación con una mesa vibratoria Wilfley están divididos en dos regiones: la zona lisa y la zona con riffles. La alimentación del mineral se realiza de forma transversal a los "riffles", con movimientos desordenados en la mesa, lo que resulta en

un desplazamiento de las partículas hacia adelante. Se observa un mayor desplazamiento en las partículas pequeñas y pesadas en comparación con las partículas grandes y livianas, esta situación origina que los minerales grades y livianos queden por encima de los minerales pequeños y pesados. El mineral que se encuentra en la superficie a la altura de los "riffles" es arrastrado por encima de ellos debido a la nueva alimentación y al agua de lavado transversal. Una forma de poder evidenciar un desgaste de los rifles de la mesa es que tanto partículas finas y pesadas llegar a tener contacto.

En la zona lisa de la mesa se ubica la concentración del mineral, la capa de mineral es más delgada. Esto produce movimientos asimétricos direccionados a los rifles y la velocidad en el escurrimiento laminar perpendicular ocasiona la dispersión de los minerales, se muestra en la figura 2.13, como el mineral realiza los movimientos a los largo de la mesa vibratoria.

**Imagen 2. 14:** *Esparcimiento de Mineral en la Mesa Wilfley*



*Nota: Propiedad de la empresa Rio Bravo*

### **Las Variables de Diseño en la Mesa Vibratoria Wilfley**

- Material con la cual está hecha la superficie de la mesa.
- Diseño de la mesa.
- Diseño y distribución de los “riffles”.
- Espesor de los “riffles”.
- Características de motor (desaceleración y aceleración).
- Distribución del agua de lavado.
- Forma de la alimentación de la pulpa.

### **Las Variables Operacionales de la Mesa Vibratoria Wilfley**

- Pulpa de alimentación.
- Inclinación de la mesa.
- Flujo de agua de lavado.
- Frecuencia de vibración de la mesa.
- Posición de los cortadores de productos.
- Elongación de la superficie de desplazamiento de la mesa al vibrar.

Para garantizar la capacidad optima de la mesa vibratoria Wilfley, es necesario considerar varias características del mineral, como la densidad de las partículas, forma de las partículas, la granulometría de la alimentación, el ángulo de inclinación de la mesa, la frecuencia y caudal de agua.

El tamaño mínimo del mineral que puede tratarse en la mesa Wilfley depende del movimiento de la mesa y el caudal de agua. Para obtener el concentrado es importante que las partículas de mineral queden debajo de las partículas livianas y grandes.

#### 2.4.6 Concentración Magnética

La separación magnética se basa en la variación de las propiedades magnéticas de los minerales, que pueden clasificarse como ferromagnéticos (altamente magnéticos), paramagnéticos (magnéticos débiles) o diamagnéticos (no magnéticos). Este proceso puede llevarse a cabo en seco o en húmedo, pero la mayoría de las aplicaciones de separación magnética en húmedo se realizan mediante el uso de separadores magnéticos de tambor.

El separador magnético de tambor húmedo ha sido utilizado durante más de 50 años y consiste en un tambor giratorio instalado dentro de un tanque. En el tambor se encuentran dispuestos imanes permanentes estacionarios en forma de arco para generar el campo magnético necesario. Estos imanes pueden ser de ferrita cerámica (genera campo magnético de baja intensidad), o de tierras raras, que proporcionan un campo magnético de alta intensidad.

Los tambores húmedos se utilizan de tres formas principales: para recuperar y reciclar el medio utilizado en el medio denso (DMS), para eliminar los contaminantes magnéticos de los minerales y concentrados, y para recuperar productos magnéticos valiosos. Se aplican en una variedad de materias primas, incluyendo carbón, diamantes, mineral de hierro, cromo, platino, arenas minerales pesadas, minerales industriales y metales básicos.

#### 2.4.7 Principios Básicos De La Separación Magnética

Clasificación de las sustancias magnéticas:

Los materiales capaces de ser magnetizados en diferentes grados por la influencia de campo magnético estos son conocidos como sustancias magnéticas. Desde una perspectiva de utilidad, estas sustancias pueden ser categorizadas según su comportamiento magnético de la siguiente manera:

- Fuertemente magnéticas o ferromagnéticas, como el ferrosilicio y la magnetita.

- Débilmente magnético o paramagnético como la hematita.
- No magnético o diamagnético como el cuarzo.

Todo material ferromagnético que es expuesto a un campo magnético, se magnetiza; sin embargo, incluso después de retirarlo del campo magnético, permanece magnetizado. La cantidad de magnetización, conocida como magnetización de saturación, depende del tipo de material. Es un procedimiento de magnetización es en gran medida irreversible y se conoce como histéresis. La única manera práctica de revertir esta magnetización es a través del proceso de desmagnetización.

Los materiales paramagnéticos, cuando son inducidos a un campo magnético, se magnetiza, pero a diferencia de los materiales ferromagnéticos, no conserva esta magnetización. La fuerza del campo magnético requerido para atraer a los materiales paramagnéticos variará según el tipo de material.

Existe una idea equivocada acerca del término "no magnético". Muchas personas creen que si un imán común no atrae a un material, entonces ese material es considerado no magnético. Sin embargo, un imán ordinario genera un campo magnético de 1000 a 2000 gauss, lo cual solo atrae a los materiales ferromagnéticos. Para que un material sea verdaderamente no magnético, incluso la generación de un campo magnético muy intenso no atraerá al material.

#### 2.4.8 Susceptibilidad Magnética

Es la medida de respuesta magnética que genera un material con un magneto externo. Esta susceptibilidad define la magnetización del material, por la unidad de masa y el campo magnético externo, entonces se tiene la siguiente ecuación:

$$J = xH \tag{2.2}$$

Donde:

J: Susceptibilidad magnetica

H: campo magnético externo

X: media en unidades de  $m^3/Kg$

Los materiales exhiben susceptibilidad magnética, se puede dar el caso que es clasificada como negativo, para los materiales diamagnéticos o positivos, en el caso de materiales ferromagnéticos y paramagnéticos. Los materiales ferromagnéticos poseen susceptibilidades magnéticas positivas y significativas, mientras que los paramagnéticos muestran susceptibilidades magnéticas positivas, pero de menor magnitud

En la fuerza magnética (F), que actúa sobre una partícula es proporcional a la suma de la susceptibilidad de la masa x y la masa de la partícula m, como se muestra a continuación:

$$F \propto xm^3 \quad (2.3)$$

Debido a la susceptibilidad magnética positiva de las partículas, requiere que el campo magnético sea menor con la finalidad de recuperar partículas más grandes. Esto significa que partículas más gruesas necesitarán menos intensidad de campo magnético para su recuperación, incluso si tienen una susceptibilidad magnética similar. Por ejemplo, una partícula de 1 mm con una susceptibilidad magnética de 10 requerirá la misma intensidad de campo magnético que una partícula de 1 micra con una susceptibilidad magnética de 10,000.

Por otro lado, las partículas muy finas a menudo se consideran no magnéticas porque necesitan intensidades de campo magnético muy altas para su recuperación. Bajo ciertas condiciones de separación magnética, la recuperación de la fracción magnética disminuirá cuando el tamaño de las partículas disminuya. Para mejorar la recuperación de partículas más finas, es necesario ajustar las condiciones.

La susceptibilidad magnética de todos los materiales ferromagnéticos y paramagnéticos disminuye con el aumento de la temperatura, alcanzando su máxima susceptibilidad magnética a cero absoluto. Al incrementar la temperatura los materiales paramagnéticos muestran una disminución gradual de la susceptibilidad magnética, mientras que los materiales ferromagnéticos mantienen su susceptibilidad magnética hasta que alcanzan el punto de Curie. En el punto de Curie, los materiales ferromagnéticos se vuelven paramagnéticos. A temperaturas superiores al punto de Curie, los materiales permanecen paramagnéticos con una disminución gradual de la susceptibilidad magnética. Sin embargo, en términos de beneficio, esto no tiene un impacto significativo, ya que los puntos de Curie de los materiales de interés suelen ser a temperaturas elevadas ( $>300^{\circ}\text{C}$ ).

#### 2.4.9 Intensidad Y Gradiente Del Campo Magnético

Para poder poner en funcionamiento a un separador magnético de tambor húmedo, los imanes permanentes alojados en el tambor generan un campo magnético externo cuya fuerza depende de la intensidad de dichos imanes. La mayoría de estos separadores utilizan imanes de ferrita cerámica, que generan un campo magnético con una intensidad entre 1,500 y 2,500 gauss. Por otro lado, los separadores de tambor húmedo con imanes (tierras raras) producen campo magnético con una intensidad entre 3,000 y 10,000 gauss. Estas intensidades se miden en la superficie del tambor.

La intensidad de campo magnético y combinación del gradiente son fundamentales para la recuperación efectiva de una partícula magnética. En gran parte los separadores magnéticos de tambor son usados para recuperar materiales ferromagnéticos, estos poseen un grado elevado de susceptibilidad magnética. Quiere decir que el gradiente y campo magnético que son generados por el separador que son adecuados para esta tarea. En cuanto a los materiales paramagnéticos, la

eficacia de los separadores de tambor húmedo es limitada y solo resulta efectiva para partículas más gruesas, generalmente mayores de 100 micras.

#### 2.4.10 Fuerzas Que Compiten Para La Separación Magnética

La separación magnética por vía húmeda, se da cuando una partícula con susceptibilidad magnética positiva es atraída por un campo magnético externo, la fuerza generada por este campo compite principalmente con la fuerza gravitatoria y la fuerza de arrastre. En todos los procesos de beneficio físico, la fuerza gravitacional está presente y, en algunos casos, facilita el proceso (como en la concentración por gravedad), mientras que en otros, como en la separación magnética, debe superarse. Sin embargo, en el caso de los separadores de tambor húmedo, la competencia con la fuerza de arrastre o hidrodinámica es crucial.

En la separación magnética por vía húmeda, los efectos de la fuerza hidrodinámica están vinculados a la velocidad y densidad de los lodos. Un aumento en la velocidad de los lodos incrementará la fuerza de arrastre del fluido, lo que a su vez reducirá la recuperación de las partículas magnéticas cuando esta fuerza supere a la fuerza magnética. Por otro lado, un aumento en la densidad de los lodos aumentará su viscosidad. Si la viscosidad de la pulpa aumenta más allá de cierto punto (que varía según los diferentes materiales de alimentación), se producirá un arrastre excesivo de partículas no magnéticas dentro del concentrado magnético.

Los efectos de la fuerza hidrodinámica son más evidentes cuando disminuye el tamaño de las partículas en la alimentación, y los impactos de las fuerzas competitivas son similares para los materiales ferromagnéticos y paramagnéticos.

#### 2.4.11 Ley De Gauss En El Magnetismo

En la ley de Gauss en el magnetismo, el resultado será siempre será cero, cuando el flujo magnético atraviesa por una superficie.

$$\oint B \times dA = 0 \quad (2.3)$$

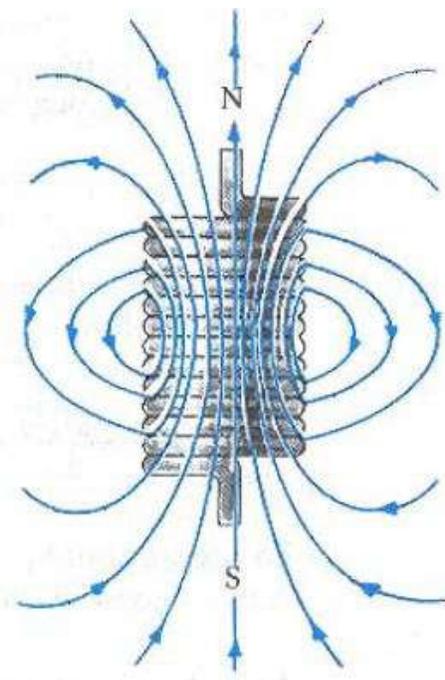
B: Inducción magnética.

Esta declaración se fundamenta en la observación experimental de que no se ha identificado ni detectado ningún polo magnético aislado, también conocido como unipolar, lo que sugiere que podría no existir en realidad. Se ha observado que la única fuente de campos magnéticos conocida son los dipolos, que son bucles de corriente. En efecto, los fenómenos magnéticos observados en la materia son expresados por el momento dipolar, que está relacionado al número de vueltas de la corriente efectiva en los electrones y los núcleos atómicos.

#### 2.4.12 Magnetismo En La Materia

El campo magnético que es generado con corriente de una bobina proporcionará una comprensión esto se da por qué ciertos materiales exhiben una fuerte magnetización. Inicialmente, se observó que la bobina representada en la figura 2.14.

**Imagen 2. 15:** *Líneas de campo magnético*



*Nota: Serway, Electricidad y Magnetismo, 222*

Cuenta con polo norte y polo sur. Normalmente el circuito de corriente genera campo y momento magnético. Del mismo modo, el momento magnético en un material magnetizado está asociado con el flujo de átomos internos. Las corrientes mencionadas se entienden como electrones que giran alrededor del núcleo que se alinean entre sí dentro del núcleo.

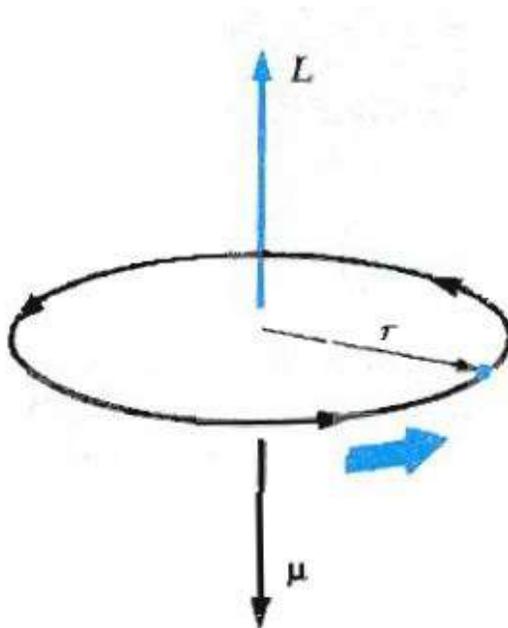
### 2.4.13 Momentos Magnéticos De Átomos

El momento magnético de un electrón ocurre cuando por el movimiento orbital y spin. La interacción entre estos dipolos magnéticos y su relación con campos magnéticos externos resulta fundamental para entender el comportamiento de los materiales magnéticos.

Los electrones se desplazan en orbitas circulares en el contorno de un núcleo considerablemente grande y los electrones se ubican en su orbita se conceptualizan como corrientes delgadas mientras el momento magnético está agrupado con su movimiento orbital.

En la figura 2.15, observamos un electrón girando con velocidad constante  $v$ , alrededor del núcleo en una órbita circular de radio  $r$ .

**Imagen 2. 16:** *Electrón en una órbita circular*



*Nota: Serway, Electricidad y Magnetismo, 222*

El electrón  $2\pi r$  (distancia de circunferencia del círculo) en el tiempo  $T$ , ( $T$ =tiempo de una revolución) la velocidad orbital del electrón esta dado por:

$$v = 2\pi r / T \quad (2.4)$$

*“La corriente efectivamente asociada con el electrón orbitando es igual a su carga dividida entre el tiempo de una revolución” (Serway, Electricidad y Magnetismo, 1997, P. 222).*

Usando  $T = \frac{2\pi}{\omega}$  y  $\omega$ , se tiene:

$$I = \frac{e}{T} = \frac{e\omega}{2\pi} = \frac{ev}{2\pi r} \quad (2.5)$$

La ecuación 2.6 muestra la corriente efectiva, vinculada con el momento magnético.

$\mu = IA$  Donde  $A = \pi r^2$ , es el área de la órbita. Por lo tanto,

$$\mu = IA = \left(\frac{ev}{2\pi r}\right) \pi r^2 = \frac{1}{2} evr \quad (2.6)$$

La magnitud del momento angular orbital de un electrón es  $L = mvr$ , entonces el momento magnético esta dado de la siguiente forma:

$$\mu = \left(\frac{e}{2m}\right) L \quad (2.7)$$

De acuerdo con la ecuación 2.7 el momento magnético del electrón es igual a su momento orbital. Se debe de tener en cuenta que los electrones que se encuentran cargados negativamente, los vectores, como también  $L$  están dirigidos a direcciones opuestas.

#### 2.4.14 Magnetización E Intensidad Del Campo Magnético

*“El estado magnético de una sustancia se describe mediante una cantidad llamada vector de magnetización  $M$ . La magnitud del vector de magnetización es igual al momento magnético de la sustancia por unidad de volumen. Se puede esperar que el campo magnético total en una sustancia dependa del campo magnético (externo) aplicado por la magnetización de la sustancia” (Serway, Electricidad y Magnetismo, 1997, P. 224).*

En un área específica cuando su campo magnético  $B_0$  es generado por un conductor dentro de un arreglo toroidal, en caso esta área es ocupado por una sustancia magnética, entonces su campo magnético  $B$  en este area se da de la siguiente forma:

$$B = B_0 + B_m \quad (2.8)$$

Donde:

$B_0$  : Campo producido por la sustancia producida

*La contribución se expresa en términos del vector magnetizado como:  $B_m = \mu_0 M$ , así, el campo total en la sustancia se convierte en (Serway, Electricidad y Magnetismo, 1997, P. 225):*

$$B = B_0 + \mu_0 M \quad (2.9)$$

Lo adecuado es suministrar una determinada cantidad de campo  $H$  diferente a la intensidad del campo magnético. Entonces se definida por la relación:

$$H = (B/\mu_0) - M \quad (2.10)$$

$$\text{ó } B = \mu_0(H + M) \quad (2.11)$$

En unidades del SI, las dimensiones de  $H$  y  $M$  son A/m.

Para interpretar se debe tener en cuenta que el área dentro de una bobina toroidal que conduce la corriente  $I$ . Si la región interior está vacía por lo tanto  $M = 0$  y  $B = B_0 = \mu_0 H$ . Como  $B_0 = \mu_0 nI$  en el interior de un toroide,  $n$  es igual al número de vueltas por unidad de longitud en su devanado, por lo tanto  $H = B_0/\mu_0 = \mu_0 nI/\mu_0$ , o bien

$$H = nI \quad (2.12)$$

Se entiende como la intensidad de campo magnético dentro del toroide es debida a la corriente en su devanado.

Cuando  $H$  (intensidad de campo magnético) permanecerá sin cambios dentro de la sustancia, con magnitud  $nI$ , siempre en cuando el núcleo del toroide esta lleno de la sustancia y la corriente  $I$  permanece constante.

Las sustancias en un gran grupo, específicamente sustancias diamagnéticas y paramagnéticas,  $M$  (magnetización) es proporcional a la intensidad del campo magnético  $H$ . En las sustancias lineales podemos escribir:

$$M = xH \quad (2.13)$$

Donde:

$x$ : Susceptibilidad magnética (factor adimensional).

Cuando determinada muestra es paramagnética, hace que  $x$  sea positiva, entonces  $M$  y  $H$ , se encuentran en la misma dirección. En caso el mineral sea diamagnético,  $x$  es negativa y  $M$  y  $H$  serán opuestos. Esta relación lineal no aplica para sustancias ferromagnéticas.

Sustituimos  $M$  de la ecuación 2.12 en la ecuación 2.10 se obtiene:

$$B = \mu_0(H + M) = \mu_0(H + xH) = \mu_0(1 + x)H \quad (2.14)$$

o bien

$$B = K_m M \quad (2.15)$$

Donde:

$K_m$ : Permeabilidad de la sustancia cuyo valor es  $K_m = \mu_0(1 + x)$

La capacidad de una sustancia para atraer un campo magnético, y pasar la relación de entre la resistencia del campo e inducción magnética existente, a esto de le denomina permeabilidad magnética.

La permeabilidad absoluta es el grado de magnetización en respuesta a un campo magnético, y está representada por el símbolo  $\mu$ :

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (2.16)$$

Donde:

$\mu$ : Permeabilidad absoluta.

B: inducción magnética (también denominada densidad de flujo magnético).

H: Intensidad de campo magnético.

La constante magnética o permeabilidad del vacío, representada por el símbolo  $\mu_0$  y es igual:

$$\mu_0 = 4\pi * 10^{-7} NA^{-2} \quad (2.17)$$

#### 2.4.15 Susceptibilidad Magnética De Los Materiales

La susceptibilidad magnética de los materiales esta clasificado por tres grupos dependiendo del valor de su susceptibilidad magnética.

$$X = m/h \quad (2.18)$$

Materiales diamagnéticos  $X < 0$

Materiales paramagnéticos  $X > 0$

Materiales ferro magnéticos  $X \rightarrow \alpha$

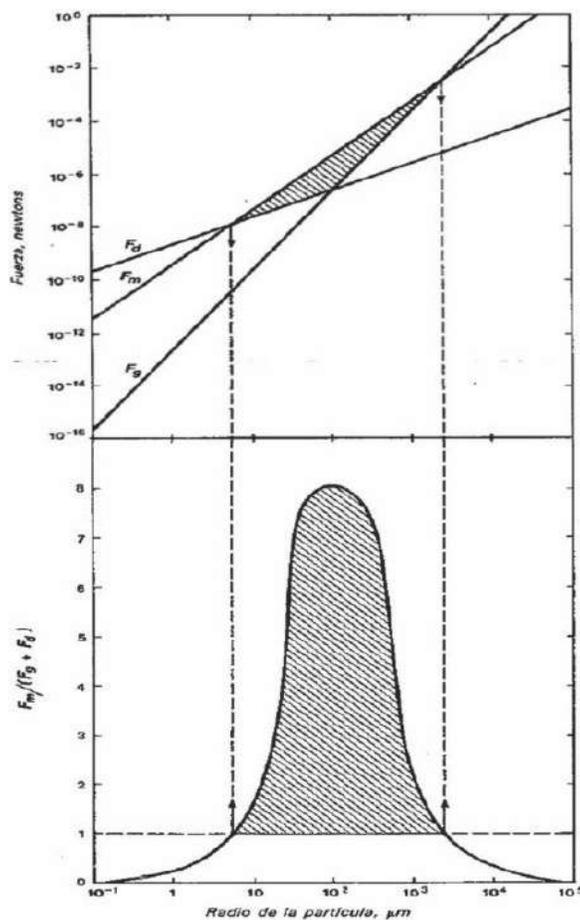
#### **Los Ferromagnéticos**

Los materiales fuertemente magnéticos son el hierro, cobalto, níquel y gadolino y generalmente se llama ferromagnética. Los materiales ferromagnéticos normalmente son usados

en la fabricación de imanes. Estos materiales están compuestos por momentos magnéticos atómicos que en presencia de un campo magnético externo fuerte se alinean en paralelo.

*“Todos los materiales ferromagnéticos contienen regiones microscópicas llamadas dominios, en las que todos los momentos están alineados. Estos dominios tienen volúmenes alrededor de  $10^{-12}$  a  $10^{-8}$  m<sup>3</sup> y contienen  $10^{17}$  a  $10^{21}$  átomos. Los límites entre varios dominios que tienen diferentes direcciones se llaman números de dominio. En una muestra no magnetizada, los dominios están orientados accidentalmente para que el campo magnético total sea cero” (Serway, Electricidad y Magnetismo, 1997, P. 226):*

**Imagen 2. 17:** Grafica de la fuerza magnética y las fuerzas en competencia como función del tamaño de partícula.



Nota: Serway, Electricidad y Magnetismo, 222

## Los Paramagnéticos

*Las sustancias paramagnéticas tienen un pequeño valor de susceptibilidad positivo ( $\chi < 1$ ), que se debe a la presencia de átomos (o iones) con momentos magnéticos permanentes. Estos dipolos intervienen fuertemente entre ellos. Cuando la sustancia está situada en un campo magnético externo, sus dipolos atómicos tienden a alinearse en el campo. Pero, este proceso de alineación debe competir con los efectos del movimiento térmico, que tiende a desorientar los dipolos. Al experimentar, se evidenció que la magnetización en la sustancia paramagnética es proporcional al campo aplicado e inverso a la temperatura absoluta. Esto significa (Serway, Electricidad y Magnetismo, 1997, P. 228):*

$$M = C \frac{B}{T} \quad (2.19)$$

Donde:

C : Constante de Curie

Esto se conoce como la **Ley Curie** (1859 - 1906).

Esto demuestra que la magnetización se aumenta si es que el campo aplicado aumenta y si es que la temperatura disminuye. Si es que  $B=0$ , la magnetización es "0", correspondiente a cierta orientación aleatoria de dipolos para campos distintas temperaturas, la magnetización se acerca al valor máximo o saturación correspondiente a la alineación completa de los dipolos y la ecuación (2.19), se convierte en no válida.

## Los Diamagnéticos

*Una sustancia diamagnética es la que cuyos átomos no tienen dipolo magnético constante. Si se emplea un campo magnético externo a la sustancia diamagnética que puede ser*

*bismuto o plata, se induce un incremento bajo en el sentido opuesto al campo aplicado. Incluso si es que el efecto diamagnético está situada a lo largo de la materia, es más débil que el paramagnetismo y el ferromagnetismo. Se entiende que el diamagnetismo incluye dos átomos de un átomo de órbita de núcleos en sentidos contrarios, pero con la misma velocidad. Cuando los electrones permanecen en su órbita se debe a que la fuerza electrostática atractiva (fuerza centrípeta). Dado que los momentos magnéticos de dos electrones son las mismas magnitudes pero opuestos en dirección, se anulan uno al otro y el momento dipolar del átomo es cero. Si se aplica un campo magnético externamente, los electrones experimentan una fuerza adicional  $q \cdot B$  (Serway, Electricidad y Magnetismo, 1997, P. 229).*

#### 2.4.16 Comparación de la susceptibilidad de los materiales

A continuación mostramos un cuadro comparativo de los metales dependiendo de su susceptibilidad magnética.

Los ferromagnéticos tiene una susceptibilidad magnética alta y positiva del orden de  $10^3$  a  $10^4$  y una intensidad magnética alta de 15000 Gauss, como la del hierro, esto significa que se magnetizan fuertemente y pueden retener una alta magnetización incluso después de que se retira el campo magnético a diferencia de los paramagnéticos con una susceptibilidad Magnética baja y positiva del orden de  $10^{-5}$  a  $10^{-3}$  y de intensidad magnética baja de 10000 Gauss, esto quiere decir que se magnetizan débilmente en presencia de un campo magnético, pero la magnetización desaparece cuando se retira el campo. Los diamagnéticos son todo lo contrario ya que cuentan con una susceptibilidad magnética negativa y muy baja del orden de  $-10^{-6}$  a  $-10^{-4}$  e intensidad magnética muy bajo, similar a los paramagnéticos, su comportamiento es de débil repulsión hacia los campos magnéticos aplicados, sin mantener una magnetización significativa.

### 2.4.18 Magnetón de Bohr

El magnetón de Bohr es una unidad fundamental utilizada para describir el momento magnético de un electrón en un átomo. Es particularmente relevante en la teoría del magnetismo y la física atómica., se define como:

$$\mu_B = \frac{eh}{2m_e} \quad (2.20)$$

Donde:

e: Es la carga elemental del electrón ( $1.602 \times 10^{-19}$  Culombios)

h: es la constante de Planck reducida ( $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ , con  $h \approx 6.626 \times 10^{-34}$  Js),

$m_e$ : Es la masa del electron ( $9.109 \times 10^{-31}$  Kg)

El valor aproximado del magnetón de Bohr es  $9.274 \times 10^{-24}$  J/T

El magnetón de Bohr representa el momento magnético que tiene un electrón debido a su spin y al movimiento orbital en un átomo. Es una medida fundamental para describir cómo el momento magnético del electrón responde a un campo magnético externo.

#### Unidades y Escalas del magnetón de Bohr

En términos prácticos, el magnetón de Bohr es una unidad relativamente pequeña. Para un electrón, el momento magnético en términos de magnetones de Bohr permite comparar y entender los efectos magnéticos en átomos y moléculas.

#### Aplicaciones en la Física del magnetón de Bohr

**Efecto Zeeman:** Es la división de líneas espectrales en un campo magnético. El magnetón de Bohr ayuda a cuantificar el cambio en las energías de los niveles de los electrones debido a la interacción con el campo magnético, proporcionando información sobre la estructura atómica y molecular.

**Resonancia Magnética Nuclear (RMN):** El magnetón de Bohr se usa para calcular la energía de transición entre niveles de spin nuclear. La RMN es crucial en química y biología para determinar estructuras moleculares y dinámicas.

**Espectroscopía de Átomo de Hidrógeno:** En el modelo de Bohr del átomo de hidrógeno, el magnetón de Bohr se usa para describir el momento magnético del electrón en diferentes estados. Esto es esencial para la comprensión de las líneas espectrales y el comportamiento magnético del hidrógeno.

**Magnetismo de Electrones en Átomos:** La teoría de la mecánica cuántica usa el magnetón de Bohr para describir los momentos magnéticos de electrones en átomos. Esto incluye tanto el momento magnético orbital como el spin, influyendo en las propiedades magnéticas de materiales y moléculas.

#### **Aplicaciones Tecnológicas del magnetón de Bohr:**

Las propiedades magnéticas de los materiales, descritas en términos de magnetones de Bohr, son cruciales para el desarrollo de tecnologías como discos duros, memorias y sensores magnéticos.

#### **2.4.19 Concentradores Magnéticos**

Los concentradores magnéticos se utilizan en la industria minera para separar minerales según su susceptibilidad magnética. Estos dispositivos son fundamentales en el procesamiento de minerales, ya que permiten la separación eficiente de los materiales deseados.

Además, los imanes también se emplean en el flujo de procesamiento para retirar elementos metálicos indeseables que podrían dañar equipos críticos como chancadoras y molinos, protegiendo así la integridad del proceso y reduciendo costos operativos asociados a reparaciones y mantenimiento.

#### **2.4.20 Concentradores Magnéticos De Baja Intensidad**

Los concentradores magnéticos de baja intensidad están diseñados específicamente para la separación de minerales con alta susceptibilidad magnética, como la magnetita. Este tipo de concentración, a menudo denominada "mazorca magnética", se lleva a cabo comúnmente en separadores de tambor. Cuando los minerales tienen un tamaño de hasta 0.5 cm, se puede optar por la separación magnética en seco o húmedo. La separación en seco es preferida en ciertos casos para minimizar la polución y obtener un producto final más limpio. Los concentradores de baja intensidad en seco se dividen principalmente en dos tipos: separadores de tambor y separadores de disco, cada uno optimizado para diferentes aplicaciones según el tamaño y las propiedades del mineral procesado.

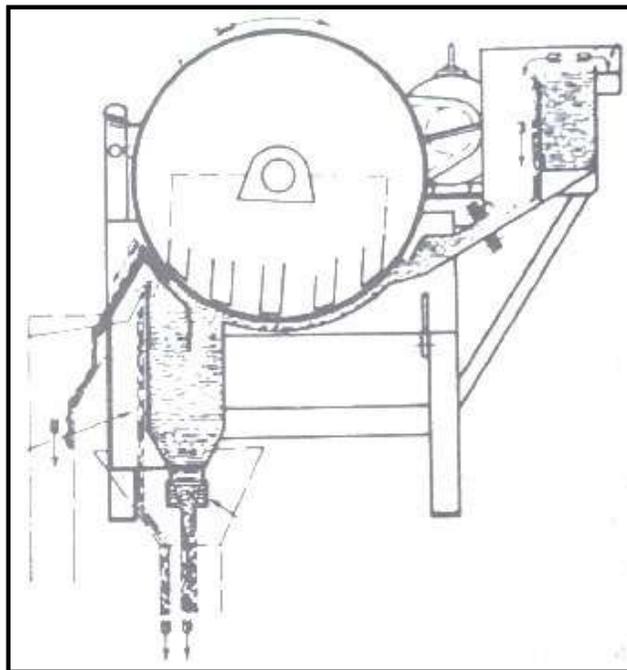
#### **Separador De Tambor y Separador De Disco**

Separadores de tambor son equipos usados actualmente para el procesamiento de concentración de menas de hierro fino. El separador de tambor se muestra en la imagen 2.18, cuenta con un tambor giratorio no magnético, cuenta con 03 a 06 magnetos estacionarios con polaridad alterna.

El separador de discos, fabricado por el Boxmag-Fast Ltd. , que permite un espacio de aire mucho más pequeño que el separador de banda y un mayor grado de selectividad. Tiene una serie de discos que han incorporado las ranuras de concentración en el transportador de diseño de rotación magnetizados por la inducción por potentes electro magnetos estacionarios ubicado en

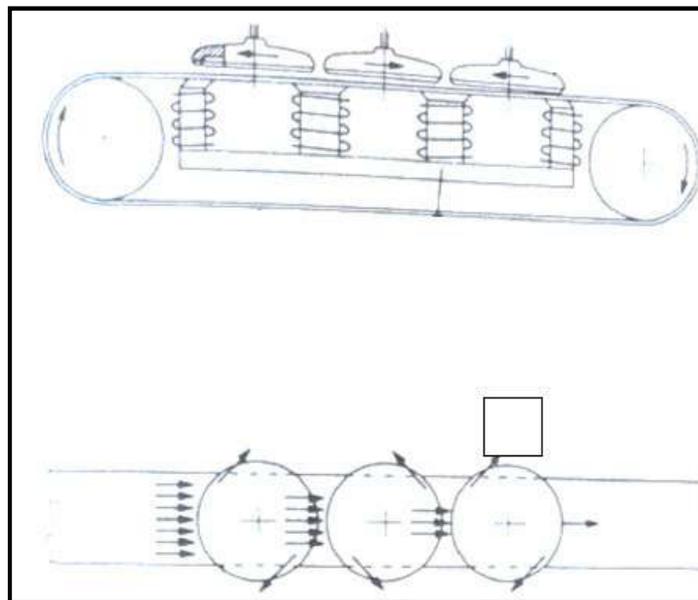
la banda y que constituye el principio de operación Figura 2.18. (Wills, Mimm, *Tratamiento de Minerales y Recuperación de Menas*, 1994, P. 430).

**Imagen 2. 18:** *Separador de tambor*



*Nota: Wills, Tratamiento de Minerales y Recuperación de Menas, 428*

**Imagen 2. 19:** *Diagrama de separador de disco*



*Nota: Wills, Tratamiento de Minerales y Recuperación de Menas, 1994, P. 431*

Cada disco se coloca de manera que la arista guía proporcione un espacio de aire más grande que la arista rastreadora, lo que permite que cada disco elimine y separe dos productos magnéticos de diferente permeabilidad. La intensificación intensiva del campo magnético se obtiene en la dirección del viaje de la banda de alimentación a través del ajuste vertical de los discos y el control del flujo de corriente en cada electromagneto. La mena clasificada se extiende por igual sobre la banda que se mueve y pasa a través de las zonas magnéticas graduadas (*Wills, Mimm, Tratamiento de Minerales y Recuperación de Menas, 1994, P. 430*).

#### 2.4.21 Concentración Magnética De Alta Intensidad

El separador magnético de alta intensidad se usa para separar partículas débilmente paramagnéticas, se eliminan de una alimentación de mena solo si tienen contacto directo con el polo de extremo del imán. Las máquinas de alta intensidad generalmente trabajan con una intensidad de campo más grande y estos equipos se limitan solo a su uso seco y se utilizan comercialmente desde 1908. La concentración seca de alta intensidad se usa generalmente en menas, que contienen un material fino que  $75\ \mu\text{m}$ , la eficiencia al usar este sistema, está limitada por los efectos de los flujos de aire, la adhesión partículas - partículas y la adhesión partícula-rotor (*Wills, Mimm, Tratamiento de Minerales y Recuperación de Menas, 1994, P. 432*).

En los últimos años, el mayor progreso tecnológico se ha generado en el campo de la concentración magnética, se han desarrollado separadores húmedos continuos de alta intensidad.

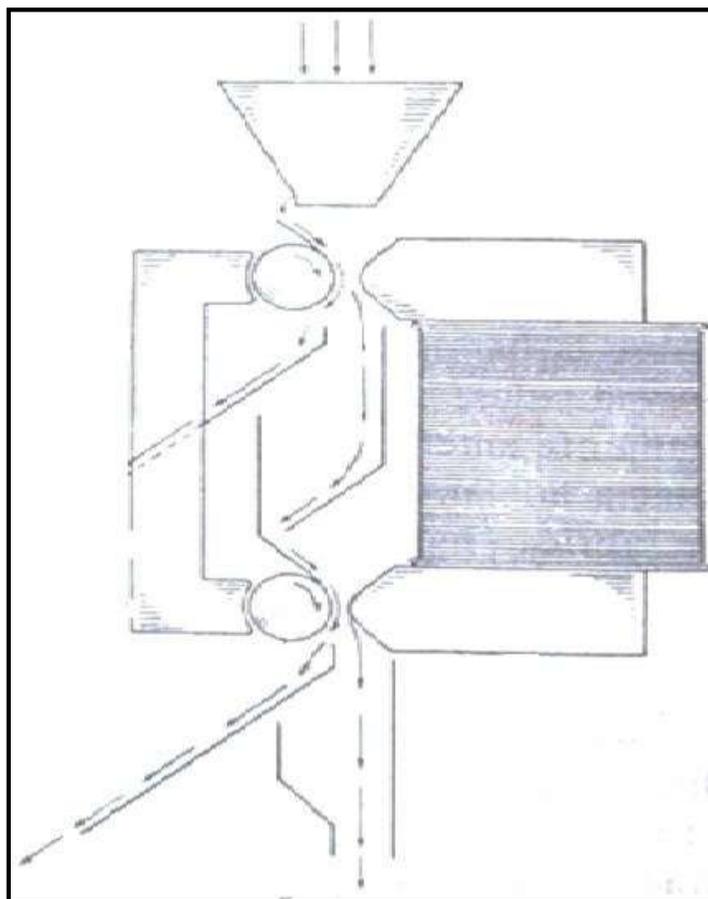
#### **Separado De Rodillo Inducido**

Los separadores de rodillos inducidos (Figura 2.20) se usan mucho para tratar arenas de playa, menas de estaño, wolframita, las arenas de vidrio y la roca de fosfato. También se utilizan para tratar menas de hierro débilmente magnéticas, especialmente en Europa el rodillo al cual se alimenta la mena, compuesto de láminas de acero de fosfato comprimido en una flecha

no magnética de acero inoxidable (*Wills, Mimm, Tratamiento de Minerales y Recuperación de Menas, 1994, P. 432*).

Usando dos dimensiones de laminación, con una ligera diferencia en el diámetro externo, el rodillo recibe un perfil dentado que facilita la alta intensidad de campo y los gradientes requeridos. Las intensidades del campo de hasta 22 kG en el espacio entre el polo del alimentador y el rodillo. Las partículas no magnéticas están excluidas del rodillo en la dirección de comportamiento de colas, mientras que las magnéticas son atraídas y se dirigen fuera de la influencia del campo y depositarlo en el compartimento de partículas magnéticas (*Wills, Mimm, Tratamiento de Minerales y Recuperación de Menas, 1994, P. 433*).

**Imagen 2. 20:** *Separador de rodillo inducido*



*Nota: Wills, Tratamiento de Minerales y Recuperación de Menas, 432*

## Superconductivos

Algunas aleaciones tienen la propiedad para no presentar la resistencia a una corriente eléctrica a temperaturas extremadamente bajas. Un ejemplo es la aleación de Niobio-Tantalio, la temperatura del helio líquido. Después de que un flujo de corriente comenzara a fluir a través de una bobina hecha de material de superconducción, continuará fluyendo sin estar conectado a una fuente de energía y la bobina en realidad se convierte en un imán permanente. Los imanes superconductores producen campos magnéticos uniformes y extremadamente intensos de hasta 150 kG, con gradientes de 7000 G cm<sup>-1</sup> o más. Actualmente, se trabaja mucho para desarrollar un práctico separador magnético de alta intensidad. Se construyó y probó un modelo piloto y el equipo que lo desarrolló está seguro de que se puede alcanzar las capacidades de hasta 100 t h<sup>-1</sup> en una máquina comercial (*Wills, Mimm, Tratamiento de Minerales y Recuperación de Menas, 1994, P. 442*).

## 2.5 Fundamento Del Diseño Experimental

### 2.5.1 Control de Variables:

**Variables Independientes:** Estas son las variables que el investigador cambia o manipula para observar su efecto. Por ejemplo, en un experimento sobre el efecto de la intensidad del campo magnético en la recuperación de minerales, la intensidad de campo magnético es la variable independiente.

**Variables Dependientes:** Son las variables que se miden para ver el impacto de la variable independiente. En el ejemplo anterior, la recuperación es la variable dependiente.

**Variables Controladas:** Son factores que se mantienen constantes para evitar que influyan en el resultado del experimento.

**Manipulación de Variables:**

**Manipulación Directa:** Implica ajustar la variable independiente para observar los cambios en la variable dependiente. Por ejemplo, variando la intensidad de campo magnético en 6000 y 7000 Gauss y midiendo cómo cambia la recuperación.

**Asignación Experimental:** Distribuir sujetos o unidades experimentales en diferentes condiciones de tratamiento para evaluar el efecto de la variable independiente.

### 2.5.2 Aleatorización

Importancia de la Aleatorización:

**Eliminación de Sesgos:** La aleatorización asegura que las asignaciones a los grupos experimentales o de control se realicen sin sesgos sistemáticos, lo que permite que los grupos sean comparables al inicio del experimento.

**Representatividad:** Facilita que las muestras sean representativas de la población general, ayudando a generalizar los resultados.

#### Métodos de Aleatorización:

**Aleatorización Simple:** Utiliza métodos como lanzar una moneda, números aleatorios o software especializado para asignar sujetos a diferentes grupos.

**Aleatorización Estratificada:** Los sujetos se dividen en subgrupos homogéneos (estratos) y luego se asignan aleatoriamente a diferentes tratamientos dentro de cada estrato. Esto es útil cuando se sabe que ciertas características (como edad o género) pueden influir en los resultados.

**Aleatorización en Bloques:** Similar a la estratificación, pero se organiza en bloques de tamaño fijo para garantizar que cada tratamiento esté igualmente representado en cada bloque.

### 2.5.3 Diseño de Experimentos

Diseños Experimentales Comunes:

**Diseño Completamente Aleatorizado:** Todos los sujetos se asignan al azar a los diferentes grupos de tratamiento sin considerar ninguna característica previa. Ideal para experimentos simples con una sola variable independiente.

**Diseño de Bloques al Azar:** Se divide a los sujetos en bloques (por ejemplo, por edad o nivel de habilidad) y dentro de cada bloque se asignan aleatoriamente los tratamientos. Esto controla la variabilidad entre los bloques.

**Diseño Factorial:** Permite investigar el efecto de dos o más variables independientes simultáneamente y sus posibles interacciones. Por ejemplo, un diseño factorial 2x2 examina dos niveles de dos factores diferentes y permite estudiar las interacciones entre ellos.

**Diseño de Medidas Repetidas:** Cada sujeto es expuesto a todos los niveles de la variable independiente. Esto es útil para controlar la variabilidad entre sujetos, ya que cada sujeto actúa como su propio control.

### 2.5.4 Validez y Fiabilidad

**Validez Interna:**

**Causalidad:** Asegura que los cambios observados en la variable dependiente sean realmente causados por la manipulación de la variable independiente y no por otras variables no controladas.

**Control de Confusores:** Identificar y controlar variables externas que podrían confundir los resultados. Esto se logra mediante la aleatorización y el uso de grupos de control.

**Validez Externa:**

**Generalización:** Evaluar si los resultados del experimento pueden aplicarse a situaciones, contextos o poblaciones fuera del estudio.

**Muestra Representativa:** Asegurarse de que la muestra utilizada en el experimento sea representativa de la población general.

**Fiabilidad:**

**Consistencia:** La capacidad de obtener resultados similares bajo condiciones similares. Esto se mide usando métodos estadísticos como la consistencia entre mediciones repetidas o la estabilidad en diferentes contextos.

**Precisión de Mediciones:** Asegurar que los instrumentos de medición sean precisos y fiables, lo que ayuda a reducir el error de medición.

### 2.5.5 Análisis de Datos

**Pruebas Estadísticas:**

**Pruebas Paramétricas:** Incluyen t-test, ANOVA y regresión, que asumen que los datos siguen una distribución normal. Se utilizan para comparar medias y evaluar relaciones entre variables.

**Pruebas No Paramétricas:** Como la prueba de chi-cuadrado, se utilizan cuando los datos no cumplen con los supuestos de las pruebas paramétricas. Son útiles para analizar datos categóricos o no distribuidos normalmente.

**Interpretación de Resultados:**

**Significación Estadística:** Determina si los resultados observados son suficientemente improbables bajo la hipótesis nula para ser considerados significativos.

**Efecto Práctico:** Considera la magnitud del efecto y su relevancia práctica, más allá de la significación estadística. Esto puede incluir el cálculo de tamaños del efecto o intervalos de confianza.

### 2.5.6 Ética en la Investigación

#### **Principios Éticos:**

**Consentimiento Informado:** Los participantes deben estar plenamente informados sobre el propósito del estudio, los procedimientos, y cualquier posible riesgo o beneficio antes de participar.

**Confidencialidad y Anonimato:** Asegurar que la información personal de los participantes se mantenga confidencial y que los datos se manejen de manera que se preserve el anonimato.

**Bienestar de los Participantes:** Garantizar que la participación en el estudio no cause daño físico, psicológico o emocional a los sujetos.

#### **Revisión Ética:**

**Comités de Ética:** Los experimentos deben ser revisados y aprobados por un comité de ética que evalúe los aspectos éticos y de seguridad del estudio.

**Cumplimiento de Normas:** Seguir las normas y directrices éticas establecidas por instituciones y organismos reguladores, como las normas APA.

Estos fundamentos proporcionan una base sólida para la creación y ejecución de experimentos científicos rigurosos, y aseguran que los resultados sean válidos, fiables, y éticamente obtenidos.

## CAPITULO III: HIPÓTESIS Y VARIABLES

### 3.1 Hipótesis

#### 3.1.1 Hipótesis General

El método de concentración magnética es el más óptimo para la recuperación de minerales de titanio, a partir del preconcentrado obtenido de una mesa vibratoria de las arenas del rio Urubamba del centro poblado Palma Real.

#### 3.1.2 Hipótesis Específicas

1. La granulometría influye en la concentración magnética de los minerales de titanio a partir del preconcentrados de las arenas del rio Urubamba.
2. La velocidad de giro del rodillo influye en la concentración magnética de los minerales de titanio a partir del preconcentrados de las arenas del rio Urubamba.
3. La intensidad del campo magnético influye en la concentración magnética de los minerales de titanio a partir del preconcentrados de las arenas del rio Urubamba.

### 3.2 Variables

#### 3.2.1 Identificación de Variables

##### Variables Dependientes

- Recuperación

##### Variables Independientes

- 1.- Granulometría.      2.- Velocidad de giro del rodillo      3.- Intensidad del campo magnético

### 3.2.2 Operacionalización de Variables

						<b>Técnica E</b>
<b>Variable</b>		<b>Definición Operacional</b>	<b>Indicador</b>	<b>Rango</b>	<b>Unidad</b>	<b>Instrumentos de Medición</b>
<b>DEPENDIENTE</b>	Recuperación	Es el porcentaje de mineral valioso en el concentrado	Recuperación		%R	Balance metalúrgico
	Granulometría.	Distribución de las partículas de mineral por tamaño.	Tamaño de partícula	106 -150	MICRONES	Rotap
<b>INDEPENDIENTES</b>	Velocidad de giro del rodillo	A cuantas revoluciones gira el rodillo del separador magnetico.	Velocidad del rodillo	25 -35	RPM	Separador magnético
	Intensidad del campo magnético	La intensidad del magnetismo con la qu cuenta rodillo.	Intensidad	6000 - 7000	Gauss	Separador magnetico

## CAPITULO IV: METODOLOGIA

### 4.1 Ámbito Del Estudio

#### Ubicación Geográfica y Accesos

Las playas de arenas con contenido de minerales de titanio y otros minerales se encuentran ubicados en el río Urubamba, por el sector de Palma Real (Latitud: 11.6240°S y Longitud: 73.0603°O), en el distrito de Echarate, Provincia la convención, departamento de Cusco a 295 Km de la ciudad imperial.

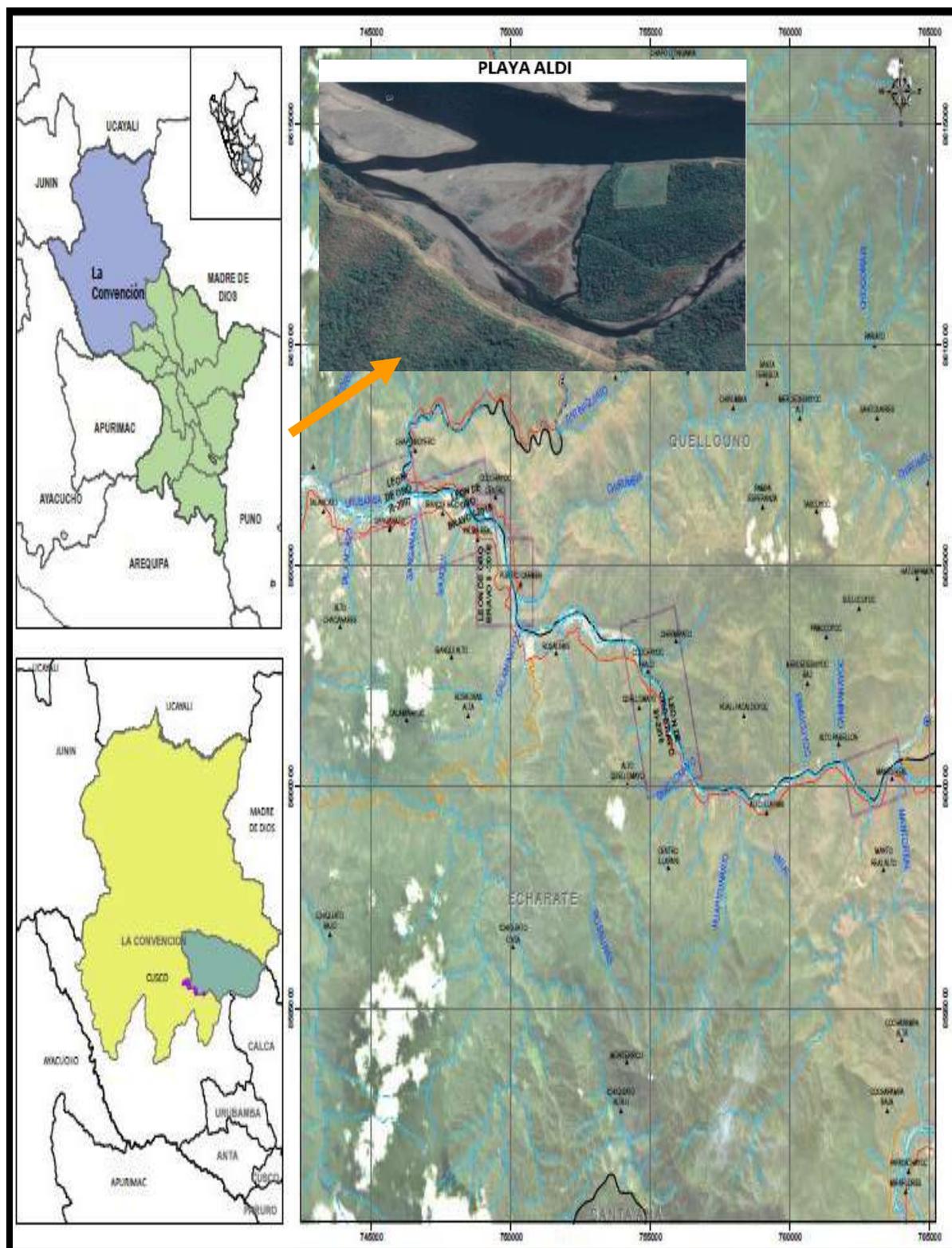
El estudio que se realizara se refiere a arenas de las playas del río Urubamba con contenido de minerales valiosos como la ilmenita.

Las playas de la cuenca del río, estas en el poblado de Palma Real habitado por 2000 personas aproximadamente según fuentes de Censos 2017, cuyos habitantes se dedican a la agricultura, trabajos en el sector público entre otros.

#### Accesibilidad

La vía de acceso es por carretera, para llegar al Centro Poblado Palma Real se realiza un viaje de aproximadamente 8 horas, desde la ciudad del Cusco, la ruta es pasando por Ollantaytambo, subes hacia el Abra Málaga que está a 4200 msnm, desde ahí se empieza a descender pasando por varios poblados hasta llegar a Quillabamba, de ahí se inicia la segunda ruta de aproximadamente una hora y media, por carretera llegando al poblado de Palma Real. Para poder llegar a la playa denominada Aldi se inicia el tercer viaje de 10 minutos.

Imagen 4. 1 Ubicación geográfica



## 4.2 Diseño De Investigación

### 4.2.1 Método De Investigación

Aplicamos fundamentalmente el método deductivo, porque considera la conclusión del trabajo de investigación, esto significa que las conclusiones son consecuencia de los efectos de la variable independiente en la variable dependiente, cuando ellas resultan verdaderas y tienen validez. Para nuestro caso, es el porcentaje de recuperación del mineral valioso (minerales de titanio) en el concentrado.

### 4.2.2 Tipo De Investigación

El trabajo es experimental utilizando la metodología analítica y deductiva, Se tomaron muestras representativas de preconcentrados obtenidos de una mesa vibratoria de las arenas del rio Urubamba del centro poblado Palma Real.

### 4.2.3 Diseño De Investigación

El diseño de investigación que se uso es con el diseño experimental, pruebas experimentales en laboratorio, teniendo presente las variables de operación del concentrador magnético. Los estudios mineralógicos y químicos las desarrollaran empresas especialistas obtenidas en una mesa vibratoria de las arenas del rio Urubamba del centro poblado Palma Real.

## 4.3 Población De Estudio

### 4.2.1 Universo Y Muestra

El universo de la muestra fueron las arenas de las playas del rio Urubamba. Las muestras fueron obtenidas de los preconcentrados de mesa vibratoria de las arenas del rio Urubamba un total de 78 Kg.

#### 4.2.2 Técnicas E Instrumentos De Recolección De Datos

Se aplica la técnica de muestreo, con esta técnica se extrajo muestras representativas, con muestras tomadas se realizaron todos los procedimientos necesarios destinados a la preparación de muestras, con precauciones de contaminación.

#### 4.2.3 Técnicas E Instrumentos De Procesamiento De Datos

Para realizar el análisis de datos se procedió con los siguientes análisis:

**Análisis Descriptivo:** Mediante este análisis se pudo verificar cómo se comportan las muestras que se estén estudiando, mediante tablas, gráficos, etc.

**Análisis Explorativo:** Mediante el siguiente análisis, verificamos la información a detalle y posibles recientes datos obtenidos con anterioridad, se trabajo inductivamente, esto para obtener pruebas ajustadas de datos.

**Análisis Cuantitativo:** Los resultados de como se comportan las muestras se evidencian mediante gráficos representativos, tablas, entre otros.

El procedimiento que se realizo es el siguiente:

- Determinar cuál será el programa el análisis de datos (Microsoft Excel y/o Minitab).
- Mediante la variable de estudio se evaluó y analizo los datos.
- Se evaluara la confiabilidad y validez de los instrumentos escogidos.
- Se realizó un análisis estadístico descriptivo de cada variable de estudio.
- Se realizó análisis estadístico inferencial respecto a las hipótesis planteadas.
- Se realizó análisis adicionales.
- Preparación de los resultados.

**Análisis Explicativo:** Conducirá a precisar conceptos como variables potenciales a tener en cuenta, así mismo recolectar datos iniciales inmersión en el ambiente a estudiar.

## CAPITULO V: DESARROLLO EXPERIMENTAL

### 5.1 Desarrollo De Pruebas Experimentales

En el desarrollo de la tesis, se realizaron varias pruebas experimentales, para determinar cada una de las variables que intervienen en la concentración magnética del mineral en estudio.

Para iniciar el trabajo de investigación se empezó realizando la caracterización del mineral, como son humedad del mineral, gravedad específica, análisis granulométrico, cálculo del tiempo óptimo de molienda y las pruebas de concentración magnética de baja intensidad (CMBI), para la desmagnetización del mineral, estos estudios fueron realizados en el laboratorio de procesamiento de minerales de la escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica.

Seguidamente se procedió con la concentración magnética de alta intensidad (CMAI), para la recuperación del concentrado de Titanio expresado como  $TiO_2$ ; para determinar el parámetro y el efecto de las variables mediante el uso del diseño factorial  $2^K$ .

#### **Preparación del mineral para las pruebas experimentales**

Se muestra en la imagen 5.1 el diagrama de flujo de procedimiento para la recuperación de minerales de titanio.

#### **Descripción del diagrama de flujo**

E.1 Se adquirió una muestra total de 78 kg de preconcentrado de arenas del río Urubamba, que previa mente pasaron por una mesa vibratoria.

E.2 Se seleccionó una muestra representativa de 1 Kg, por el método de muestreo manual de cono y cuarteo, para su respectivo análisis químico y de ello obtener las leyes de mineral de cabeza, también se obtuvo una muestra representativa de 2 Kg, para determinar la caracterización del mineral (análisis mineralógico, gravedad específica y porcentaje de humedad)

E.3 En la tercera etapa se realizó el análisis granulométrico, donde se observó que el preconcentrado de las arenas del río Urubamba Palma Real – La Convención, presentaba una granulometría de 76 % pasante en malla 100, por lo cual para llegar al 100% de malla pasante se hizo una molienda con un tiempo óptimo de 18 minutos.

E.4 Al tener el mineral preparado se inició con las pruebas experimentales en el laboratorio de procesamiento de minerales de la Escuela Profesional de Ingeniería metalúrgica – UNSAAC, procediendo a separar la magnetita de los minerales de titanio a través de un separador magnético de baja intensidad (800 gauss), obteniéndose como concentrado (magnetita) y como relave de minerales de titanio.

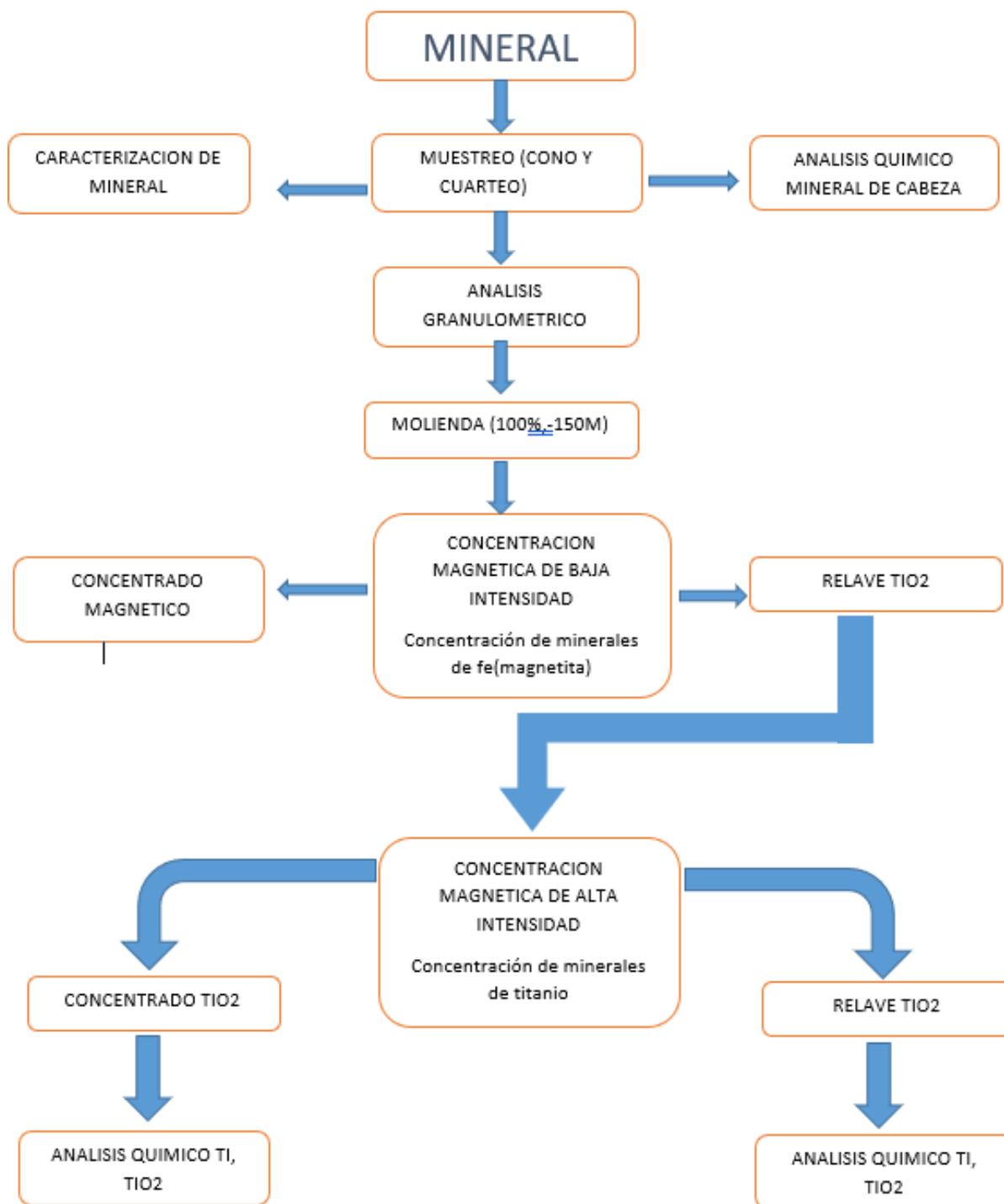
E.5 El relave obtenido en la concentración magnética (800 gauss), viene a ser ahora la alimentación para la concentración de los minerales de titanio, el cual será pasado por un separador de alta intensidad.

### 5.3 Muestreo De Minerales

Las muestras representativas de mineral para las pruebas en laboratorio, se obtuvo del preconcentrado de la mesa vibratoria, los cuales se encontraban listos para ser concentrados mediante la separación magnética.

Las muestras obtenida de un total de 78 Kg, se paso a realizar un muestreo manual de cono y cuarteo, que consistio en mezclar la muestra varias veces para luego formar el mineral como un cono, inmediatamente se aplasta con un espátula o pala, y se traza líneas divisoras de partes iguales (4 partes iguales), de estas cuatro partes se retiran dos cuartos opuestos y con los dos restantes se vuelve a repetir el proceso hasta poder obtener una muestra representativa, lo suficiente como para poder pasar la siguiente etapa de cuarteo, como se muestra en la imagen 5.2.

**Imagen 5. 1:** Diagrama de flujo de procedimiento para la recuperación de minerales de titanio



*Nota: Elaboración propia*

**Imagen 5. 2:** *Cuarteo de muestra representativa*



*Nota: Propio*

La siguiente y última etapa de muestreo que se realizó fue el muestreo por cortador de rifles, el cual consiste en realizar con un cortador de rifles que es un recipiente en forma de V, que cuenta entre sus costados con una serie de canaletas que tiene la función de descargar indistintamente en dos bandejas los cuales están ubicados en ambos lados del cortador, el cortador de rifles se muestra en la imagen 5.3.

**Imagen 5. 3:** Cuarteador de rifles



*Nota: propiedad de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica - UNSAAC*

#### 5.4 Caracterización Mineralógica

El objetivo de la caracterización del mineral es poder determinar a partir de una muestra representativa un análisis mineralógico, un análisis químico del mineral de cabeza, su gravedad específica, y a partir de lo obtenido poder desarrollar las pruebas experimentales de separación magnéticas en húmedo y seco, de acuerdo al diseño factorial establecido para dicho estudio.

##### 5.4.1 Determinación Del Porcentaje De Humedad

- Materiales y equipos
- Muestra de mineral de 500 gr
- Bandeja metálica para secado

- Balanza electrónica (peso max. 4100gr, precisión d=0.1g)
- Espátulas

### Procedimiento

Realizar el tamizaje del mineral para obtener una muestra representativa y homogénea, se realizó al 100% malla 100.

Procedemos a obtener una muestra representativa por cuarteo un peso de 500 gr.

Ahora al tener una muestra representativa procedemos al secado de la muestra por un periodo de 1 hora en el horno, hasta que se pueda visualizar una aparente liberación de la humedad.

Ahora procedemos a pesar la muestra que se retira del horno.

Finalmente realizamos los cálculos de porcentaje de humedad, que a continuación muestra.

Cálculo del porcentaje de humedad

$$\%H = \frac{PESO\ HUMEDO - PESO\ SECO}{PESO\ HUMEDO} \times 100 \quad (5.1)$$

Datos:

- ✓ Peso húmedo : 500 gr.
- ✓ Peso seco : 484 gr

Reemplazando en la fórmula 3.1

$$\%H = \frac{500 - 484}{500} \times 100 = 3.2\%$$

Entonces el porcentaje de humedad es del 3.2%.

#### 5.4.2 Determinación De La Gravedad Específica.

La obtención de la gravedad específica de un mineral podemos realizarlo por varios métodos: método de desplazamiento de volúmenes (método de la probeta), método de la balanza marcy, método del pictometro y método de la fiola con el cual trabajaremos para la determinación de la gravedad.

## A. Procedimiento

Pasos para determinar la gravedad específica:

- Obtener una muestra representativa, en este caso se obtiene la muestra por cono y cuarteo.
- El mineral obtenido es una muestra representativa que nos ayudara a determinar la gravedad especifica (la muestra debe de estar a 100% -100 malla).
- Pesamos la fiola vacía, registramos el valor obtenido.
- Pasamos a llenar la fiola con 100 ml, se considera como volumen inicial.
- Realizamos el pesado de 5 gr de mineral, para poder verter a la fiola con 100 ml de agua.
- Procedemos a pesar la fiola con agua más mineral.

Realizamos el registro de todos los datos para realizar los cálculos correspondientes y obtener la gravedad especifica.

## B. Materiales y equipos

- Balanza electrónica (peso max. 4100gr, precisión d=0.1g)
- Espátulas
- Muestra de mineral de 5 gr
- Fiola 100 ml

## C. Cálculo de la gravedad específica

Para realizar el cálculo de la gravedad específica (método de la fiola), aplicamos la siguiente ecuación:

$$G.E. = \frac{M-P}{W+(M-P)-S} \quad (5.2)$$

Donde:

P: Peso de la fiola

W: Peso de la fiola más agua.

M: Peso de fiola más mineral.

S: Peso de fiola + agua + peso de mineral

Calculamos la gravedad específica con 5 gr de mineral

**Tabla 5. 1:** *Cálculo de la gravedad específica*

Nº	Peso de fiola (gr) P	Peso de fiola + agua (gr) W	Peso de fiola + mineral M	Peso de fiola + agua + mineral S	Determinación de gravedad específica
1	56.3	156.1	61.3	160	4.55
2	56.3	156.1	61.3	159.8	3.85
3	56.3	156.1	61.3	159.9	4.17
4	56.3	156.1	61.3	160.01	4.59
5	56.3	156.1	61.3	160.04	4.72
Promedio gravedad específica calculada					4.37

*Nota: Elaboración propia*

#### 5.4.3 Análisis Mineralógico

La muestra de preconcentrado obtenida en la mesa vibratoria, cuyas arenas fueron obtenidas de las playas del río Urubamba del sector Palma Real, se muestra con una granulometría fina y de color marrón, visualizada mediante un estetoscopio.

#### 5.4.4 Análisis Químico

Mediante el LABORATORIO ANALITICOS DEL SUR – AREQUIPA, se solicitó el servicio de análisis químico de la muestra de preconcentrado procesada en la mesa vibratoria, cuyas arenas fueron obtenidas de las playas del río Urubamba del sector Palma Real, Los resultados son los siguientes:

**Tabla 5. 2:** *Reporte de análisis mineral de cabeza*

Muestra	Nombre De Muestra	Precedencia De Muestra	Descripción De Muestra	Au g/TM	Fe %	Ti %
MN21002013	Muestra de arena de río	Playa del río Urubamba Palma Real	Mineral pulverizado	0.1	1.0	3.37

*Fuente: Laboratorio Analítico del Sur – Arequipa.*

## 5.5 Análisis Granulométrico Del Mineral

Un sistema de partículas de diferentes tamaños solo puede ser descrito por funciones estadísticas. El tamaño del sistema, el área y el volumen promedio se pueden estimar a partir de estas distribuciones.

Se pasara por una serie de tamices de forma sucesiva para determinar las propiedades granulométricas en un sistema determinado.

Esta es la razón, por la que la malla 200 (74 micrones) o la malla 270 (53 micrones) a menudo se eligen como límite inferior. Los tamices utilizados cuentan con una abertura más pequeña que la anterior. De esta forma, el sistema de partículas se retiene en el tamiz correspondiente.

El tamaño de partícula se asigna al tamaño de malla del tamiz. La malla es el número de aberturas por pulgada lineal. El tamaño de abertura será menor, si se tiene mayor número de mallas.

## 5.6 Distribución De Tamaños

Al determinar el tamaño de partícula, necesitamos determinar con qué frecuencia ocurre ese tamaño en un sistema particular.

Determinamos la función frecuencia  $f(x)$ , se define como la frecuencia relativa  $f(x)dx$  y tiene el siguiente significado:

- Dentro del sistema podemos encontrar una partícula de tamaño que puede fluctuar entre  $X$  y  $X+dx$ .
- Fracción de partículas del sistema con tamaños comprendidos en  $X$  y  $X + dx$ .

### A. Materiales y equipos

- Tamices de la serie ASTM (Mallas 30, 65, 100, 120, 150, 200, 270).
- Muestra de mineral 500 g.

- Balanza electrónica sartorius (precisión d=0. 1 g. máximo=4100 g)
- Bandejas debidamente rotuladas.
- Espátulas.
- Brochas.

### **B. Procedimiento**

- Seleccionar las mallas según el sistema ASTM (Mallas 30, 65, 100, 120, 150, 200, 270).
- Pesar 500 g. de muestra de mineral
- Realizar el tamizaje por 10 minutos
- Realizar el pesado de cada tamiz.
- Realizar los respectivos cálculos.

### **C. Cálculo de distribución granulométrica en peso y frecuencia de distribución granulométrica**

#### **Distribución granulométrica en peso**

Porcentaje en peso retenido o rechazado por las mallas indicadas de la malla 30 a la malla -270.

$$F(x_i) = \frac{W_i}{W} * 100 \quad (5.3)$$

Donde:

F (X<sub>i</sub>): Distribución granulométrica en peso.

W: Peso en (g.) mineral retenido.

W: Peso total (g.).

$F(x_i) = \frac{0.9}{500} * 100 = 0.18\%$	Malla #30
$F(x_i) = \frac{387.4}{500} * 100 = 77.48\%$	Malla #65
$F(x_i) = \frac{70.6}{500} * 14.12\%$	Malla #100
$F(x_i) = \frac{20.5}{500} * 100 = 4.10\%$	Malla #120
$F(x_i) = \frac{11}{500} * 100 = 2.20\%$	Malla #150
$F(x_i) = \frac{08}{500} * 100 = 1.60\%$	Malla #200
$F(x_i) = \frac{1.3}{500} * 100 = 0.26\%$	Malla #270
$F(x_i) = \frac{0.3}{500} * 100 = 0.06\%$	Malla #-270

El valor de % Ac. Retenido  $G(X_i)$  se obtuvo de la siguiente manera:

$$\text{Si: } f(X_i) = 0.18$$

$$G(X_i) = f(X_i) + f(X_i) + f(X_i) + f(X_i) + \dots + f(X_i) \quad (5.4)$$

$$G(X_i) = 0.18$$

$$G(X_i) = 0.18 + 77.48 = 77.66$$

$$G(X_i) = 0.18 + 77.48 + 14.12 = 91.78$$

$$G(X_i) = 0.18 + 77.48 + 14.12 + 4.1 = 95.88$$

$$G(X_i) = 0.18 + 77.48 + 14.12 + 4.1 + 2.2 = 98.88$$

$$G(X_i) = 0.18 + 77.48 + 14.12 + 4.1 + 2.2 + 1.6 = 99.68$$

$$G(X_i) = 0.18 + 77.48 + 14.12 + 4.1 + 2.2 + 1.6 + 0.26 = 99.94$$

$$G(X_i) = 0.18 + 77.48 + 14.12 + 4.1 + 2.2 + 1.6 + 0.26 + 0.6 = 100$$

El valor de porcentaje acumulativo pasante  $F(X_i)$  se obtuvo de la siguiente forma:

$$G(X_i) + F(X_i) = 100.$$

$$F(X_i) = 100 - G(X_i)$$

$$F(X_i) = 100 - 0.18 = 99.82$$

$$F(X_i) = 99.82 - 77.66 = 22.34$$

$$F(X_i) = 22.34 - 14.12 = 8.22$$

$$F(X_i) = 8.22 - 4.1 = 4.12$$

$$F(X_i) = 4.12 - 2.2 = 1.92$$

$$F(X_i) = 1.92 - 1.6 = 0.32$$

$$F(X_i) = 0.32 - 0.26 = 0.06$$

$$F(X_i) = 0.06 - 0.06 = 0.0$$

De acuerdo con los datos obtenidos realizaremos la tabla 5.3.

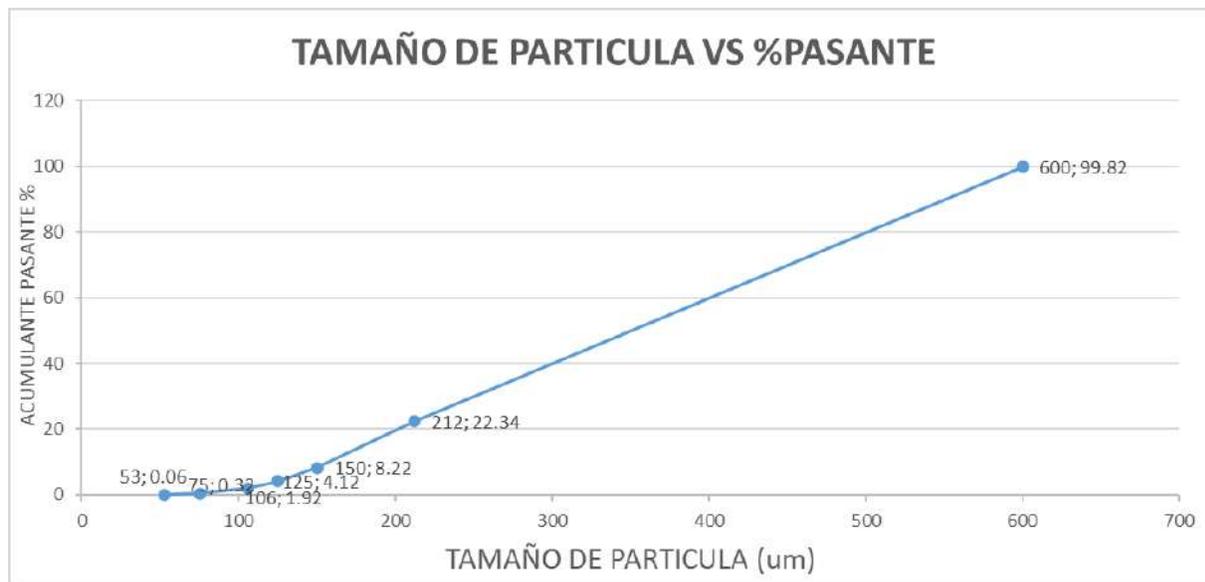
**Tabla 5. 3:** *Distribución granulométrica en peso*

<b>N°</b>	<b>Malla</b>	<b>Abertura Micrones (<math>\mu m</math>)</b>	<b>PESO (gr)</b>	<b><math>f(X_i)\%</math> parcial</b>	<b><math>G(X_i)\%</math> Acum. Retenido</b>	<b><math>F(X_i)\%</math> Acum.Pasante</b>
<b>1</b>	30	600	0.9	0.18	0.18	99.82
<b>2</b>	65	212	387.4	77.48	77.66	22.34
<b>3</b>	100	150	70.6	14.12	91.78	8.22
<b>4</b>	120	125	20.5	4.1	95.88	4.12
<b>5</b>	150	106	11	2.2	98.08	1.92
<b>6</b>	200	75	8	1.6	99.68	0.32
<b>7</b>	270	53	1.3	0.26	99.94	0.06
<b>8</b>	-270	-53	0.3	0.06	100	0

*Nota: elaboración propia*

Según la tabla 5.3 se grafica el % acumulativo pasante Vs. Tamaño de partícula.

**Imagen 5. 4:** Gráfico de porcentaje pasante vs tamaño de partícula



*Nota: Elaboración propia*

### 5.7 Cálculo Del Tiempo Óptimo De Molienda

El cálculo del tiempo óptimo de molienda tiene por objetivo determinar la liberación del mineral en un tiempo determinado en función a la malla de control, en este trabajo de investigación tomamos la malla #150, y lograr pasar un 75% acumulado pasante.

#### Procedimiento

- Obtener una muestra representativa, mediante la técnica de cono y cuarteo
- La muestra representativa fue de 1000 g.
- Preparar 04 muestras de 1000 g. cada uno, para cada tiempo de molienda (5, 10, 15 y 20) minutos.
- Efectuar la molienda a diferentes tiempos.

- Realizar el tamizaje en diferentes mallas siendo la malla de control malla #100, el cual nos servirá para determinar el tiempo óptimo de molienda.

### **Materiales**

- Molino de Bolas (Motor monofásico de 1750 60 Hz, 220 Volts, 15.8 rpm), de laboratorio (13" \* 8").
- Ro Tap N° 1 (testing sieve shocker, model B TYLER).
- Malla (15,-100).
- Balanza electrónica Satorius (precisión d = 0. 1 g, Max 4100g)
- Cronometro.
- 500 g. de mineral de cabeza para el tamizado.

### **Cálculo del tiempo óptimo de molienda**

Se muestra en el cuadro siguiente los datos del tiempo de molienda (0, 5, 10, 15, 20 minutos), peso pasante, peso retenido y el porcentaje pasante.

**Tabla 5. 4:** *Cálculo del tiempo óptimo de molienda*

<b>Tiempo (minutos)</b>	<b>Peso Pasante (g)</b>	<b>Peso Retenido</b>	<b>% Pasante</b>
<b>0</b>	101.1	398.9	20.22
<b>5</b>	169.2	330.8	24.28
<b>10</b>	255	245	39.48

<b>15</b>	255.4	244.6	48.92
<b>20</b>	381.2	118.8	76.24

*Nota: Elaboración Propia*

**Tabla 5. 5: Cálculo de modelo cinético**

<b>Tiempo (X)</b>	<b>% Pasante (Y)</b>	<b>X*Y</b>	<b>X<sup>2</sup></b>
<b>0</b>	20.22	0	0
<b>5</b>	24.28	121.4	25
<b>10</b>	39.48	394.8	100
<b>15</b>	48.92	733.8	225
<b>20</b>	76.24	1524.8	400
$\sum X = 50$	$\sum Y = 188.92$	$\sum X * Y = 2774.8$	$\sum X^2 = 750$

*Nota: Elaboración propia*

Determinamos la pendiente mediante la fórmula de mínimos cuadrados.

$$b = \frac{n(\sum XY) - (\sum X)(\sum Y)}{n(\sum X^2) - (\sum X)^2}$$

$$b = \frac{5 * 2774.8 - 50 * 188.92}{5 * 750 - (50)^2}$$

$$b = 3.54$$

$$a = \bar{Y} - b\bar{X}$$

$$a = 37.78 - 3.54 * 10$$

$$a = 2.38$$

$$Y = bX + a$$

$$Y = 3.54X + 2.38$$

**Imagen 5. 5:** Gráfico de tiempo óptimo de molienda



*Nota: Elaboración propia*

Determinamos por el tiempo óptimo de molienda con una granulometría de 75% -100M es de 18 minutos.

### 5.8 Concentración Magnética De Baja Intensidad En Húmedo

El objetivo de aplicar la concentración magnética de baja intensidad en húmedo es separar eficientemente los minerales de titanio, como la ilmenita, de los minerales ferromagnéticos presentes en las arenas del río Urubamba, como la magnetita. Este proceso se basa en las diferencias en susceptibilidad magnética entre los distintos minerales, lo que permite una

separación precisa. Al emplear un entorno húmedo, se optimiza la separación de la magnetita, un mineral con alta susceptibilidad magnética, del titanio y otros minerales menos magnéticos, logrando así un producto final de mayor pureza y valor comercial.

### **5.8.1. Pruebas De Concentración Magnética De Baja Intensidad En Húmedo**

Las pruebas de concentración magnética de baja intensidad en húmedo cuyo objetivo es separar el hierro de los minerales de titanio, se realizaron en el laboratorio de la escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica.

#### **Materiales y equipos**

- Arena de las playas del río Urubamba
- Concentrador magnético en húmedo de baja intensidad marca ERIEZ
- Balanza electrónica sartorius (precisión de = 0.1g, máximo = 4100g).
- Bandejas.
- Baldes.
- Espátulas.
- Pizeta.
- Probeta.

#### **Procedimiento**

Para realizar las pruebas de concentración magnética de baja intensidad, se contó con una muestra representativa de 20 Kg de preconcentrado obtenida en la mesa vibratoria.

Para obtener una muestra para el análisis químico, se realizó un muestreo manual con el cuarteador de rifles.

Se realizó la caracterización como determinación del porcentaje de humedad, determinación de la gravedad específica y análisis mineralógico.

Se obtuvo un parámetro de la variable de estudio de molienda con un tiempo óptimo de 18 minutos para llegar a 100% - 100M.

Se ha realizado varias pruebas para determinar los parámetros óptimos de operación para realizar la desmagnetización de minerales de titanio.

Una vez obtenido los parámetros óptimos, se realizó el proceso de desmagnetización de baja intensidad con una muestra representativa de 4.5 Kg de mineral a -100 malla desmagnetización, preparado con una pulpa de 3500cm<sup>3</sup> de agua.

La muestra se alimentó de forma continua en el separador magnético de baja intensidad para realizar la separación de hierro presente; densidad de pulpa de 1200 g/cm<sup>3</sup>, granulometría de 100 malla, y 3.5 Amps.

De la prueba realizada en el separador magnético de baja intensidad se obtuvo un concentrado de 98.4 g.

Cabe aclarar que debido a la presencia de Fe, en un buen porcentaje de la muestra de mineral, se realizó la separación de magnetita en un separador magnético de baja intensidad en húmedo, para obtener un relave con un alto porcentaje de minerales de titanio; el cual será separado por concentración magnética en alta intensidad.

### **Cálculos del balance metalúrgico para la separación magnética de baja intensidad (desmagnetización de los minerales de titanio)**

Para el desarrollo del balance metalúrgico de la separación magnética de baja intensidad, se desarrolló bajo las siguientes relaciones:

$$F = C + T \quad (5.4)$$

Donde:

F: Peso de la alimentación

C: Peso del concentrado

T: Peso del relave

$$Ff = Cc + Tt \quad (5.5)$$

Donde:

f: Ley de cabeza del mineral aluvial

c: Ley de concentrado Fe.

t: Ley de relave Fe

por lo tanto:

$$Ff = Cc + (C - F)t \quad (5.6)$$

Queda:

$$\frac{F}{C} = \frac{(c-t)}{(f-t)} \quad (5.7)$$

Donde:

$\frac{F}{C}$ : Representa la relación de concentración.

El contenido metálico para Fe sea en la cabeza, concentrado, relave, está definido por la siguiente relación, según sea el caso.

$$Cont. Met. = \frac{X*x}{100} \quad (5.8)$$

Donde:

X: Peso: alimentación, concentrado, relave.

x: ley de cabeza, concentrado, relave.

La recuperación está dada por:

$$\%Rec = \frac{Con.Met.C}{Cont.Met.T} * 100 \quad (5.9)$$

Reemplazando en las ecuaciones para el balance de materia para la separación de baja intensidad, se tiene.

1) De acuerdo a la ecuación (5.5) y la ecuación (5.8), se tiene:

Contenido metálico en la cabeza.

$$Cont. Met. Cab. = \frac{F * f}{100}$$

Contenido metálico en la concentración.

$$Cont. Met. con. = \frac{C * c}{100}$$

Contenido metálico en el relave.

$$Cont. Met. Rel. = \frac{T * t}{100}$$

2) Del mismo modo con los valores para la ecuación (5.5) y la ecuación (5.9), se tiene.

Porcentaje de recuperación de  $TiO_2$  en el concentrado:

$$\%Rec. = \frac{Cont. Met. C}{Cont. Met. T} * 100$$

Para realizar el cálculo del balance metalúrgico reemplazaremos en las ecuaciones anteriores, siguiendo el mismo procedimiento en las posteriores pruebas de separación magnética de alta intensidad.

Para la separación magnética de baja intensidad se tiene:

1) De acuerdo a la ecuación (5.5) y la ecuación (5.8), se tiene:

Contenido metálico en la cabeza.

$$\text{Cont. Met. Cab.} = \frac{4500 * 1}{100} = 45$$

Contenido metálico en la concentración.

$$\text{Cont. Met. Con.} = \frac{206.6 * 12.87}{100} = 26.59$$

Contenido metálico en el relave.

$$\text{Cont. Met. Rel.} = \frac{4293.4 * 0.43}{100} = 18.41$$

2) En función a las ecuaciones (4.5) y la ecuación (4.8) hallamos el porcentaje de recuperación del hierro presente en los minerales de titanio, se tiene:

$$\% \text{Rec.} = \frac{26.59}{45} * 100\% = 59.09\%$$

### **Cuadro de resultados del balance metalúrgico**

**Tabla 5. 6:** *Balance metalúrgico de concentración magnética de baja intensidad*

PRODUCTOS	PESO (G)	Ley % Fe	Cont. Metálico	% Recuperación
CABEZA	4500	1.00	45.00	100
CONCENTRADO	206.6	12.87	26.59	59.09
RELAVE	4293.4	0.37	18.41	40.91
TOTAL	4500		45	100

*Nota: propia*

**Tabla 5. 7:** *Condiciones de operación y resultados metalúrgicos de la separación magnética de baja intensidad en húmedo*

<b>CONDICIONES DE OPERACION: RECUPERACION DE MINERALES DE TITANIO</b>		
<b>CONDICION</b>	<b>VALOR</b>	<b>UNIDAD</b>
Gravedad especifica	1.65	g/cm3
Tiempo de molienda	18	min.

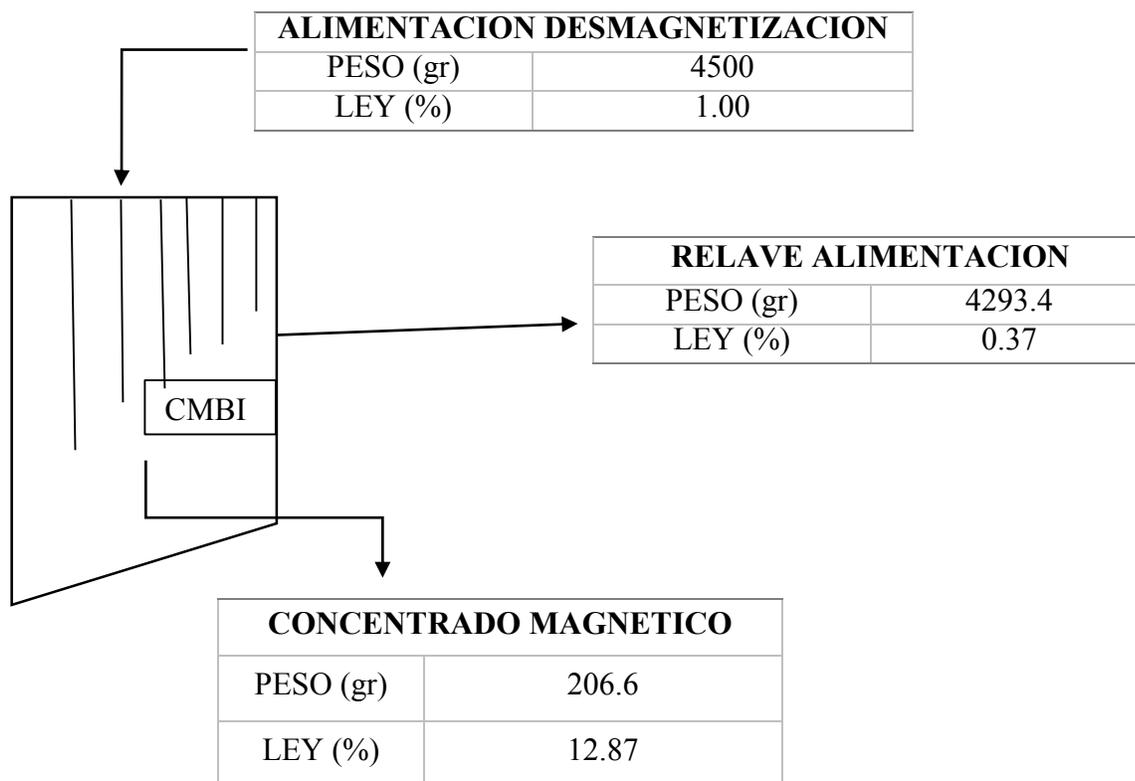
*Nota: Elaboración propia*

**Tabla 5. 8:** *Concentración magnética de baja intensidad (CMBI)*

<b>CONCENTRACION MAGNETICA DE BAJA INTENSIDAD (CMBI)</b>		
Peso de mineral	4500	g
Campo magnético	800	G
Ley Mineral de Cabeza (Fe)	1.00	%

*Nota: Elaboración propia*

**Diagrama de flujo 5. 1:** *Concentración magnética de baja intensidad (desmagnetización de minerales de titanio)*



*Nota: Elaboración propia*

#### 5.9 Concentración Magnética De Alta Intensidad En Seco.

Para este estudio se realiza las pruebas experimentales a partir de la separación del hierro de los minerales de titanio que fueron realizados por la concentración magnético de baja intensidad en húmedo.

Las pruebas de concentración magnética de alta intensidad en seco, se realizó en el separador magnético de alta intensidad de tierras raras en el Centro Poblado de Palma Real.

A continuación, se detalla los materiales, procedimiento y desarrollo experimental.

#### **Materiales y equipos**

- Mineral 1901.4 g.
- Separador magnético (RARE EARTH MAGNETIC ROLL SEPARATOR)

- Alimentador vibratorio modelo
- Bandejas debidamente rotuladas.
- Tolva de alimentación

### **Procedimiento**

- I. Una vez concluida la desmagnetización de la muestra, se procede a realizar el secado del mineral, para iniciar con los pruebas de separación magnética de alta intensidad de minerales de titanio, en seco.
- II. La separación magnética de baja intensidad nos proporcionara dos productos un concentrado de minerales de hierro y un relave con un alto porcentaje de minerales de titanio.
- III. El relave obtenido de la concentración magnética de baja intensidad (800 Gauss), viene a ser el producto para la alimentación en la concentración magnética de alta intensidad.
- IV. Con la separación magnética en seco de alta intensidad se obtuvo dos productos primero un concentrado de mineral de titanio (TiO<sub>2</sub>) y un respectivo relave.
- V. Los productos obtenidos, concentrado de mineral de titanio (TiO<sub>2</sub>) fue enviado a laboratorio para su respectivo análisis químico, obteniéndose resultados para su posterior análisis. **(Ver ANEXO N° 2).**

#### 5.9.1 Separador Magnético De Rodillos Para Tierras Raras

El separador magnético de rodillo inducido de alta intensidad para laboratorio es un separador electromagnético seco de alta intensidad para laboratorio/planta piloto alimentado por la parte

superior, diseñado para separar materiales paramagnéticos (débilmente magnéticos) de materiales no magnéticos. Este modelo compacto se utiliza ampliamente para pruebas en banco y a escala piloto de materiales granulares, control de producción en plantas que utilizan separadores magnéticos industriales de alta intensidad y para investigación mineral aplicada.

### **Principio De Operación**

Este separador pone todos los materiales en contacto con el campo magnético más alto en las zonas de gradiente magnético más pronunciado y utiliza la fuerza magnética y la gravedad para capturar los materiales débilmente magnéticos. Un rodillo magnético giratorio utilizado para transportar los materiales a través de la zona activa proporciona una fuerza centrífuga opuesta para la separación de materiales magnéticos y no magnéticos.

### **Forma De Uso**

- Los componentes y controles están integrados en una consola compacta para que se pueda observar y controlar fácilmente la separación de forma simultánea.
- Una tolva de alimentación de acero inoxidable pulido equipada con asistencia vibratoria se utiliza para controlar la velocidad del material que se separa.
- Una tolva de producto de tres vías fabricada en acero inoxidable pulido permite recoger productos magnéticos, intermedios y no magnéticos.
- Un motor de corriente continua permite variar continuamente la velocidad de los rodillos de 0 a 300 rpm.
- El rodillo separador tiene un diámetro de 127 mm (5 pulgadas) y una anchura de 50 mm (2 pulgadas) y está fabricado con materiales magnéticos y no magnéticos laminados.

- La corriente de la bobina de entrada variable de forma continua (0-3 amperios) mediante rectificación de corriente continua de estado sólido a una bobina magnética refrigerada por aire permite ajustar la intensidad del campo magnético del separador, para distintos ajustes de separación.
- Tanto las piezas cromadas de la nariz como las de la cola son ajustables para adaptarse a una amplia gama de tamaños de partículas y requisitos de campo magnético.
- Los fusibles están instalados en los principales circuitos de alimentación del separador para la protección de los componentes asociados. Son fácilmente accesibles en el panel frontal y pueden sustituirse manualmente en caso de sobre corriente.

#### 5.9.2 Pruebas Experimentales De Separación Magnética De Alta Intensidad

En las siguientes tablas y diagramas se detalla los resultados de las pruebas metalúrgicas realizadas por el método de separación magnética de alta intensidad

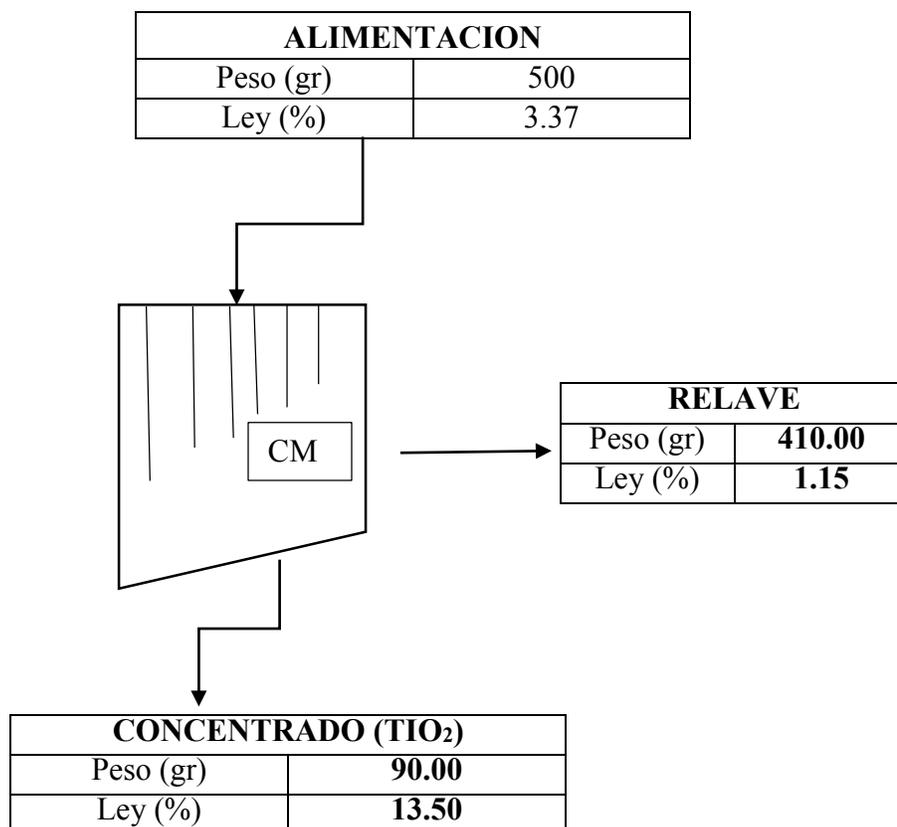
#### PRUEBA N.º 1

**Tabla 5. 9:** *Condiciones de operación y resultados metalúrgicos*

CONDICIONES DE OPERACION		
CONDICION	VALOR	UNIDAD
Gravedad específica	1.65	g/cm <sup>3</sup>
Ley de Cabeza	3.37	%
Granulometría	106	µm
Velocidad de giro Rodillo	25	Rpm
Intensidad Campo Magnético	6000	Gauss

*Nota: Elaboración propia*

**Diagrama de flujo 5. 2:** Concentración magnética de alta intensidad de la prueba N° 1



*Nota: Elaboración propia*

### Balance metalúrgico en la concentración magnética de alta intensidad

De la misma forma como se realizó el balance metalúrgico de la separación magnética de baja intensidad de los minerales de titanio, se procede a realizar el cálculo:

1) Hallamos el contenido metálico de la cabeza, concentrado, relave.

- **Contenido metálico de la cabeza**

$$\text{Cont. Met. Cab.} = \frac{F * f}{100}$$

$$\text{Cont. Met. Cab.} = \frac{500 * 3.37}{100} = 16.85 \text{ gr}$$

- **Contenido metálico de concentrado**

$$\text{Cont. Met. Con.} = \frac{C * c}{100}$$

$$\text{Cont. Met. Con.} = \frac{90 * 13.5}{100} = 12.15 \text{ gr}$$

- **Contenido metálico de relave**

$$\text{Cont. Met. Rel.} = \frac{F * f}{100}$$

$$\text{Cont. Met. Rel.} = \frac{410 * 1.15}{100} = 4.72 \text{ gr}$$

2) Hallamos el porcentaje de recuperación

$$\% \text{Rec.} = \frac{\text{Cont. Met. C}}{\text{Cont. Met. T}} * 100$$

$$\% \text{Rec.} = \frac{12.15}{16.85} * 100 = 72.11 \%$$

**Tabla 5. 10:** Balance metalúrgico de prueba N° 01

PRODUCTOS	PESO (G)	Ley % TiO2	Cont. Metálico	% Recuperación
CABEZA	500	3.37	16.85	100
CONCENTRADO	90	13.5	12.15	72.11
RELAVE	410	1.15	4.70	27.89
TOTAL	500		16.85	100

Nota: Elaboración propia

## PRUEBA N.º 2

Tabla 5. 11: Condiciones de operación y resultados metalúrgicos

CONDICIONES DE OPERACION		
CONDICION	VALOR	UNIDAD
Gravedad especifica	1.65	g/cm <sup>3</sup>
Ley de Cabeza	3.37	%
Granulometría	150	µm
Velocidad de giro Rodillo	25	Rpm
Intensidad Campo Magnético	6000	Gauss

*Nota: Elaboración propia*

Hallamos el contenido metálico de la cabeza, concentrado, relave.

- **Contenido metálico de la cabeza**

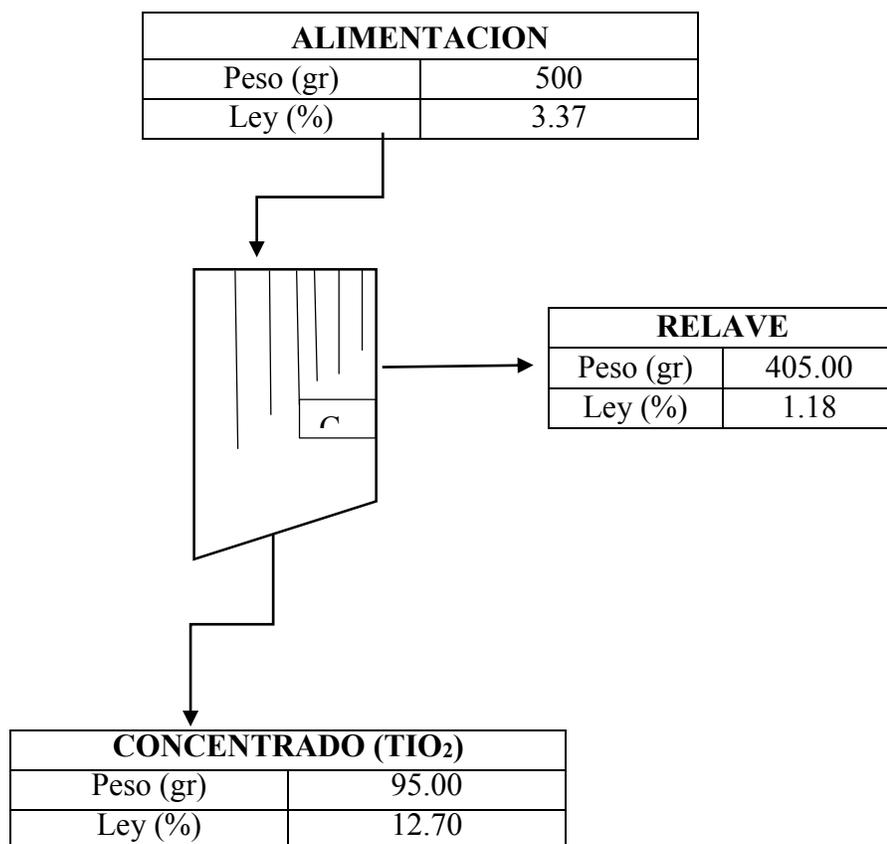
$$Cont. Met. Cab. = \frac{F * f}{100}$$

$$Cont. Met. Cab. = \frac{500 * 3.37}{100} = 16.85 \text{ gr}$$

- **Contenido metálico de concentrado**

$$Cont. Met. Con. = \frac{C * c}{100}$$

$$Cont. Met. Con. = \frac{95 * 12.70}{100} = 12.07 \text{ gr}$$

**Diagrama de flujo 5. 3: Concentración magnética de alta intensidad de la prueba N° 2**

- **Contenido metálico de relave**

$$Cont. Met. Rel. = \frac{F * f}{100}$$

$$Cont. Met. Rel. = \frac{405 * 1.18}{100} = 4.78 \text{ gr}$$

Hallamos el porcentaje de recuperación

$$\%Rec. = \frac{Cont. Met. C}{Cont. Met. T} * 100$$

$$\%Rec. = \frac{12.07}{16.85} * 100 = 71.63\%$$

**Tabla 5. 12:** *Balance metalúrgico de la prueba N° 02*

<b>PRODUCTOS</b>	<b>PESO (G)</b>	<b>Ley % TiO2</b>	<b>Cont. Metálico</b>	<b>% Recuperación</b>
CABEZA	500	3.37	16.85	100
CONCENTRADO	95	12.70	12.07	71.63
RELAVE	405	1.18	4.78	28.37
TOTAL	500		16.85	100

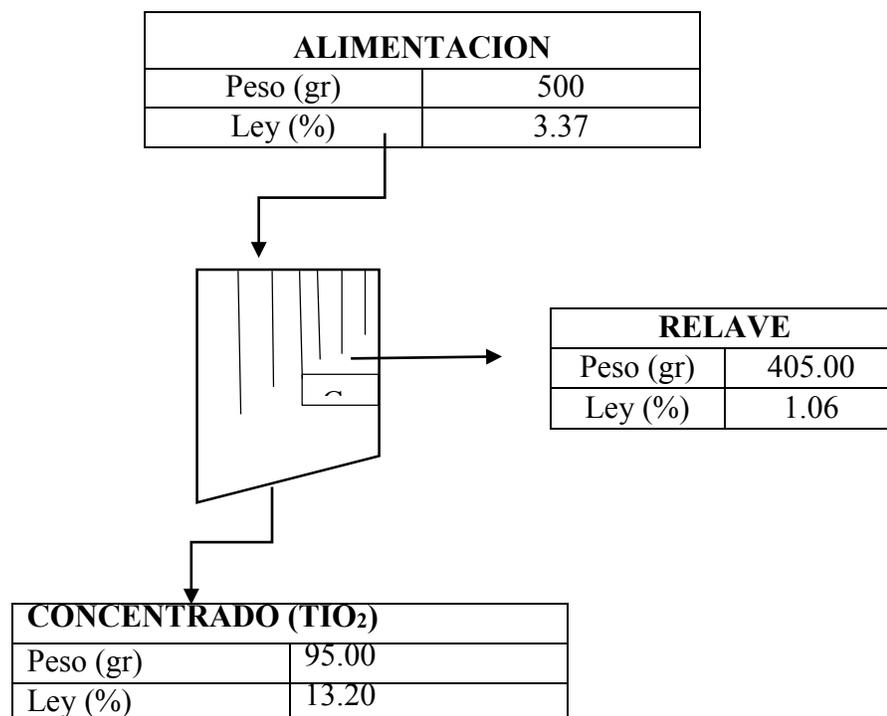
*Nota: Elaboración propia*

### **PRUEBA N. ° 3**

**Tabla 5. 13:** *Condiciones de operación y resultados metalúrgicos*

<b>CONDICIONES DE OPERACION</b>		
<b>CONDICION</b>	<b>VALOR</b>	<b>UNIDAD</b>
Gravedad específica	1.65	g/cm <sup>3</sup>
Ley de Cabeza	3.37	%
Granulometría	106	µm
Velocidad de giro Rodillo	35	Rpm
Intensidad Campo Magnético	6000	Gauss

*Nota: Elaboración propia*

**Diagrama de flujo 5. 4:** Concentración magnética de alta intensidad de la prueba N° 3**Tabla 5. 14:** Balance metalúrgico de la prueba N° 3

PRODUCTOS	PESO (G)	Ley % TiO <sub>2</sub>	Cont. Metálico	% Recuperación
<b>CABEZA</b>	500	3.37	16.85	100
<b>CONCENTRADO</b>	95	13.20	12.54	74.42
<b>RELAVE</b>	405	1.06	4.29	25.58
<b>TOTAL</b>	500		16.85	100

*Nota: propia*

Hallamos el contenido metálico de la cabeza, concentrado, relave.

- **Contenido metálico de la cabeza**

$$\text{Cont. Met. Cab.} = \frac{F * f}{100}$$

$$\text{Cont. Met. Cab.} = \frac{500 * 3.37}{100} = 16.85 \text{ gr}$$

- **Contenido metálico de concentrado**

$$\text{Cont. Met. Con.} = \frac{C * c}{100}$$

$$\text{Cont. Met. Con.} = \frac{95 * 13.20}{100} = 12.54 \text{ gr}$$

- **Contenido metálico de relave**

$$\text{Cont. Met. Rel.} = \frac{F * f}{100}$$

$$\text{Cont. Met. Rel.} = \frac{405 * 1.06}{100} = 4.29 \text{ gr}$$

Hallamos el porcentaje de recuperación

$$\%Rec. = \frac{\text{Cont. Met. C}}{\text{Cont. Met. T}} * 100$$

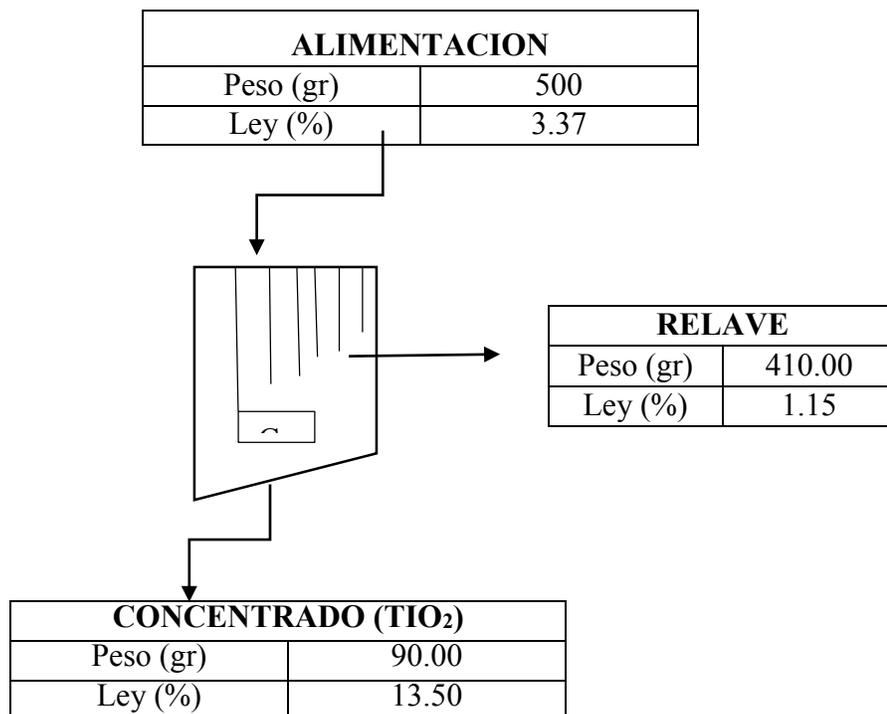
$$\%Rec. = \frac{12.54}{16.85} * 100 = 74.42\%$$

**PRUEBA N. ° 4**

**Tabla 5. 15:** *Condiciones de operación y resultados metalúrgicos*

CONDICIONES DE OPERACION		
CONDICION	VALOR	UNIDAD
Gravedad específica	1.65	g/cm <sup>3</sup>
Ley de Cabeza	3.37	%
Granulometría	150	µm
Velocidad de giro Rodillo	35	Rpm
Intensidad Campo Magnético	6000	Gauss

*Nota: Propia*

**Diagrama de flujo 5. 5** Concentración magnética de alta intensidad de la prueba N° 4

Hallamos el contenido metálico de la cabeza, concentrado, relave.

- **Contenido metálico de la cabeza**

$$Cont. Met. Cab. = \frac{F * f}{100}$$

$$Cont. Met. Cab. = \frac{500 * 3.37}{100} = 16.85 \text{ gr}$$

- **Contenido metálico de concentrado**

$$Cont. Met. Con. = \frac{C * c}{100}$$

$$Cont. Met. Con. = \frac{90 * 13.50}{100} = 12.15 \text{ gr}$$

- **Contenido metálico de relave**

$$Cont. Met. Rel. = \frac{F * f}{100}$$

$$\text{Cont. Met. Rel.} = \frac{410 * 1.15}{100} = 4.72 \text{ gr}$$

Hallamos el porcentaje de recuperación

$$\% \text{Rec.} = \frac{\text{Cont. Met. C}}{\text{Cont. Met. T}} * 100$$

$$\% \text{Rec.} = \frac{12.15}{16.85} * 100 = 72.11\%$$

**Tabla 5. 16:** Balance metalúrgico de la prueba N° 4

PRODUCTOS	PESO (G)	Ley % TiO2	Cont. Metálico	% Recuperación
CABEZA	500	3.37	16.85	100
CONCENTRADO	90	13.50	12.15	72.11
RELAVE	410	1.15	4.72	27.89
TOTAL	500		16.85	100

*Nota: propia*

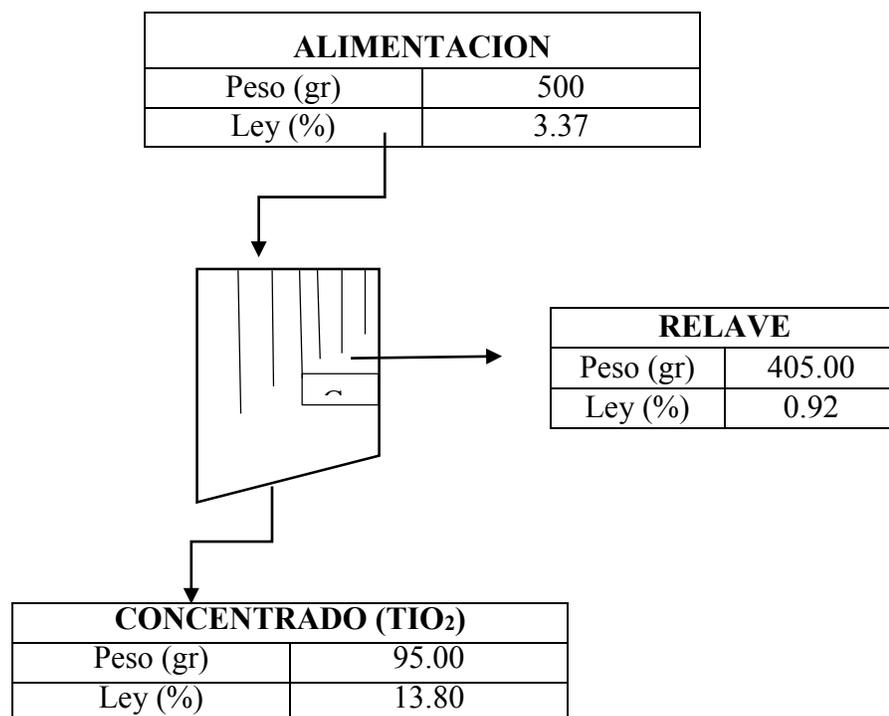
## PRUEBA N. ° 5

**Tabla 5. 17:** Condiciones de operación y resultados metalúrgicos

CONDICIONES DE OPERACION		
CONDICION	VALOR	UNIDAD
Gravedad específica	1.65	g/cm3
Ley de Cabeza	3.37	%
Granulometría	106	µm
Velocidad de giro Rodillo	25	Rpm
Intensidad Campo Magnético	7000	Gauss

*Nota: Propia*

**Diagrama de flujo 5. 6:** Concentración magnética de alta intensidad de la prueba N° 5



Hallamos el contenido metálico de la cabeza, concentrado, relave.

- **Contenido metálico de la cabeza**

$$Cont. Met. Cab. = \frac{F * f}{100}$$

$$Cont. Met. Cab. = \frac{500 * 3.37}{100} = 16.85 \text{ gr}$$

- **Contenido metálico de concentrado**

$$Cont. Met. Con. = \frac{C * c}{100}$$

$$Cont. Met. Con. = \frac{95 * 13.8}{100} = 13.11 \text{ gr}$$

- **Contenido metálico de relave**

$$Cont. Met. Rel. = \frac{F * f}{100}$$

$$Cont. Met. Rel. = \frac{405 * 0.92}{100} = 3.73 \text{ gr}$$

Hallamos el porcentaje de recuperación

$$\%Rec. = \frac{Cont. Met. C}{Cont. Met. T} * 100$$

$$\%Rec. = \frac{13.11}{16.85} * 100 = 77.80\%$$

**Tabla 5. 18:** Balance metalúrgico de la prueba N° 5

<b>PRODUCTOS</b>	<b>PESO (G)</b>	<b>Ley % TiO2</b>	<b>Cont. Metálico</b>	<b>% Recuperación</b>
<b>CABEZA</b>	<b>500</b>	<b>3.37</b>	<b>16.85</b>	<b>100</b>
<b>CONCENTRADO</b>	<b>95</b>	<b>13.8</b>	<b>13.11</b>	<b>77.80</b>
<b>RELAVE</b>	<b>405</b>	<b>0.92</b>	<b>3.73</b>	<b>22.2</b>
<b>TOTAL</b>	<b>500</b>		<b>16.85</b>	<b>100</b>

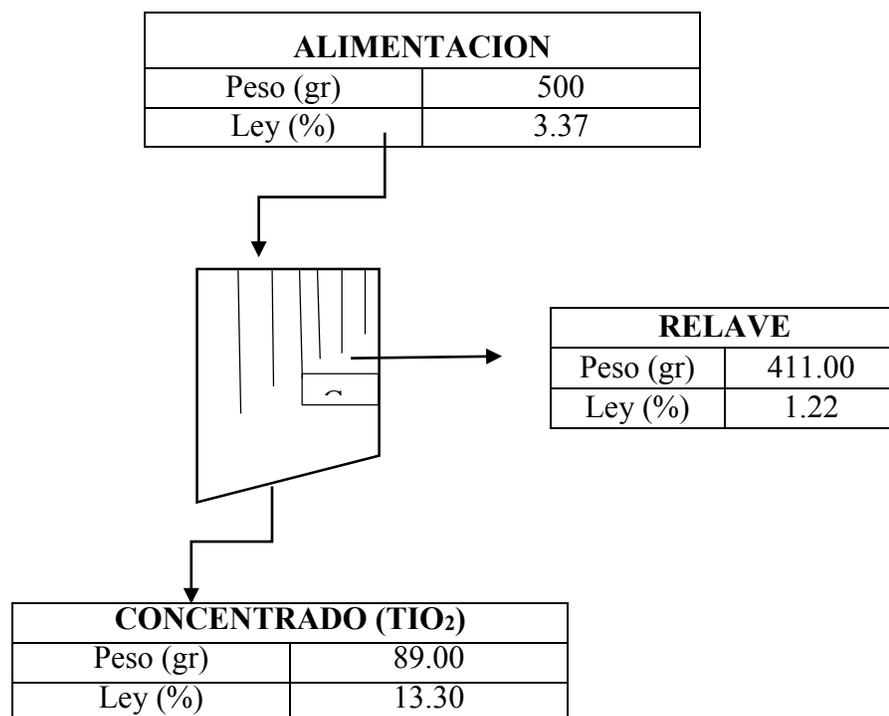
*Nota: propia*

## PRUEBA N° 6

**Tabla 5. 19:** Condiciones de operación y resultados metalúrgicos

<b>CONDICIONES DE OPERACION</b>		
<b>CONDICION</b>	<b>VALOR</b>	<b>UNIDAD</b>
Gravedad específica	1.65	g/cm <sup>3</sup>
Ley de Cabeza	3.37	%
Granulometría	150	μm
Velocidad de giro Rodillo	25	Rpm
Intensidad Campo Magnético	7000	Gauss

*Nota: propia*

**Diagrama de flujo 5. 7: Concentración magnética de alta intensidad de la prueba N° 6**

Hallamos el contenido metálico de la cabeza, concentrado, relave.

- **Contenido metálico de la cabeza**

$$Cont. Met. Cab. = \frac{F * f}{100}$$

$$Cont. Met. Cab. = \frac{500 * 3.37}{100} = 16.85 \text{ gr}$$

- **Contenido metálico de concentrado**

$$Cont. Met. Con. = \frac{C * c}{100}$$

$$Cont. Met. Con. = \frac{89 * 13.3}{100} = 11.84 \text{ gr}$$

- **Contenido metálico de relave**

$$Cont. Met. Rel. = \frac{F * f}{100}$$

$$\text{Cont. Met. Rel.} = \frac{411 * 1.22}{100} = 5.01 \text{ gr}$$

Hallamos el porcentaje de recuperación

$$\% \text{Rec.} = \frac{\text{Cont. Met. C}}{\text{Cont. Met. T}} * 100$$

$$\% \text{Rec.} = \frac{11.84}{16.85} * 100 = 70.26\%$$

**Tabla 5. 20:** Balance metalúrgico de la prueba N° 6

<b>PRODUCTOS</b>	<b>PESO (G)</b>	<b>Ley % TiO2</b>	<b>Cont. Metálico</b>	<b>% Recuperación</b>
<b>CABEZA</b>	500	3.37	16.85	100
<b>CONCENTRADO</b>	89	13.3	11.84	70.26
<b>RELAVE</b>	411	1.22	5.01	29.74
<b>TOTAL</b>	500		16.85	100

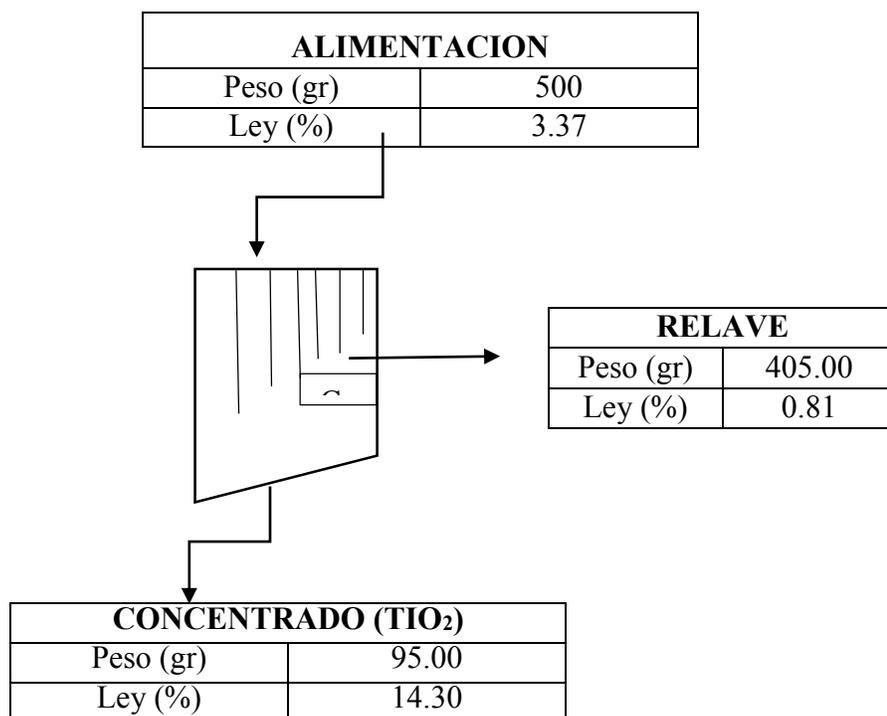
*Nota: propia*

## PRUEBA N° 7

**Tabla 5. 21:** Condiciones de operación y resultados metalúrgicos

<b>CONDICIONES DE OPERACION</b>		
<b>CONDICION</b>	<b>VALOR</b>	<b>UNIDAD</b>
Gravedad específica	1.65	g/cm <sup>3</sup>
Ley de Cabeza	3.37	%
Granulometría	106	μm
Velocidad de giro Rodillo	35	Rpm
Intensidad Campo Magnético	7000	Gauss

*Nota: Elaboración propia*

**Diagrama de flujo 5. 8** Concentración magnética de alta intensidad de la prueba N° 7

Hallamos el contenido metálico de la cabeza, concentrado, relave.

- **Contenido metálico de la cabeza**

$$Cont. Met. Cab. = \frac{F * f}{100}$$

$$Cont. Met. Cab. = \frac{500 * 3.37}{100} = 16.85 \text{ gr}$$

- **Contenido metálico de concentrado**

$$Cont. Met. Con. = \frac{C * c}{100}$$

$$Cont. Met. Con. = \frac{95 * 13.40}{100} = 13.50 \text{ gr}$$

- **Contenido metálico de relave**

$$Cont. Met. Rel. = \frac{F * f}{100}$$

$$Cont. Met. Rel. = \frac{405 * 0.81}{100} = 3.28 \text{ gr}$$

Hallamos el porcentaje de recuperación

$$\%Rec. = \frac{Cont. Met. C}{Cont. Met. T} * 100$$

$$\%Rec. = \frac{12.73}{16.85} * 100 = 75.55\%$$

**Tabla 5. 22:** Balance metalúrgico de la prueba N° 7

PRODUCTOS	PESO (G)	Ley % TiO <sub>2</sub>	Cont. Metálico	% Recuperación
CABEZA	500	3.37	16.85	100
CONCENTRADO	95	14.30	13.58	80.62
RELAVE	405	0.81	4.12	19.38
TOTAL	500		16.85	100

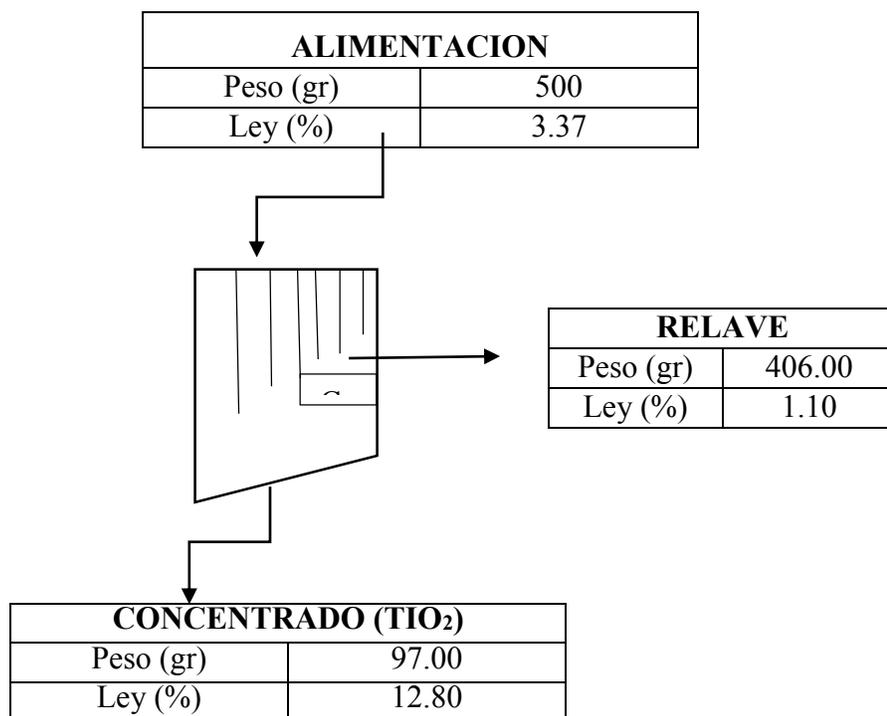
*Nota: Elaboración propia*

## PRUEBA N° 8

**Tabla 5. 23:** Condiciones de operación y resultados metalúrgicos

CONDICIONES DE OPERACION		
CONDICION	VALOR	UNIDAD
Gravedad específica	1.65	g/cm <sup>3</sup>
Ley de Cabeza	3.37	%
Granulometría	150	μm
Velocidad de giro Rodillo	35	Rpm
Intensidad Campo Magnético	7000	Gauss

*Nota: Elaboración Propia*

**Diagrama de flujo 5. 9:** Concentración magnética de alta intensidad de la prueba N° 8

Hallamos el contenido metálico de la cabeza, concentrado, relave.

- **Contenido metálico de la cabeza**

$$Cont. Met. Cab. = \frac{F * f}{100}$$

$$Cont. Met. Cab. = \frac{500 * 3.37}{100} = 16.85 \text{ gr}$$

- **Contenido metálico de concentrado**

$$Cont. Met. Con. = \frac{C * c}{100}$$

$$Cont. Met. Con. = \frac{97 * 12.8}{100} = 12.42 \text{ gr}$$

- **Contenido metálico de relave**

$$Cont. Met. Rel. = \frac{F * f}{100}$$

$$\text{Cont. Met. Rel.} = \frac{403 * 1.10}{100} = 4.43 \text{ gr}$$

Hallamos el porcentaje de recuperación

$$\%Rec. = \frac{\text{Cont. Met. C}}{\text{Cont. Met. T}} * 100$$

$$\%Rec. = \frac{12.42}{16.85} * 100 = 73.71\%$$

**Tabla 5. 24:** Balance metalúrgico de la prueba N° 8

<b>PRODUCTOS</b>	<b>PESO (G)</b>	<b>Ley % TiO2</b>	<b>Cont. Metálico</b>	<b>% Recuperación</b>
<b>CABEZA</b>	500	3.37	16.85	100
<b>CONCENTRADO</b>	97	12.8	12.42	73.71
<b>RELAVE</b>	403	1.10	4.43	26.29
<b>TOTAL</b>	500		16.85	100

*Nota: Elaboración Propia*

#### 5.10. Resumen De Resultados De Las Pruebas Experimentales

En la tabla (5.25), observamos un resumen total de las pruebas experimentales realizadas; consideramos la ley del concentrado y su porcentaje de recuperación, Se muestra el informe de análisis de laboratorio. (Anexo N° 02)

##### 5.10.1 Análisis De Resultados

De los resultados obtenidos, se observar que bajo el tamaño de partícula (106 um), velocidad del tambor (35 rpm) y fuerza del campo magnético (7000 gauss), la tasa de recuperación es mayor al 80.62%, en la prueba N°.7.

**Tabla 5. 25:** *Resumen de pruebas experimentales*

N°	Ley Cabeza (%)	Granulom ( $\mu\text{m}$ )	Vel Rodill (Rpm)	Camp Mag (Gauss)	Ley Conc (%)	Peso Conc (gr)	Peso Relav (gr)	Ley Relave (%)	% Recup (%)
1	3.37	106	25	6000	13.5	90	410	1.15	72.11
2	3.37	150	25	6000	12.7	95	405	1.18	71.60
3	3.37	106	35	6000	13.2	95	405	1.06	74.42
4	3.37	150	35	6000	13.5	90	410	1.15	72.11
5	3.37	106	25	7000	13.8	95	405	0.92	77.80
6	3.37	150	25	7000	13.3	89	411	1.22	70.25
7	3.37	106	35	7000	14.3	95	405	0.81	80.62
8	3.37	150	35	7000	12.8	97	403	1.10	73.69

*Nota: Elaboración Propia*

## CAPITULO VI: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 6.1 Diseño Factorial

#### 6.1.1 Introducción

En una investigación, los experimentos deben diseñarse adecuadamente para obtener resultados óptimos. El desarrollo de métodos experimentales es una herramienta clave en los procesos metalúrgicos e industriales. Permite el desarrollo efectivo de un proceso utilizando métodos y técnicas estadísticas para recolectar, tabular, analizar e interpretar datos para reducir la incertidumbre de conclusiones incompletas. En este caso, el diseño factorial permite corregir el modelo matemático (optimización) al inicio del trabajo de investigación, cuando aún no se conoce el comportamiento del proceso a optimizar, por lo general una lista de variables afecta el proceso a optimizar.

#### 6.2. Diseño Experimental:

El propósito de realizar las pruebas experimentales es indicar las variables que son más importantes durante el diseño factorial y permitir la optimización de estas variables utilizando un diseño óptimo, que es un diseño hexagonal.

#### 6.3. Variable De Un Proceso Experimental:

Normalmente los sistemas multivariados tienen dos tipos de variables cuyo conocimiento depende del control que se pueda ejercer sobre el proceso.

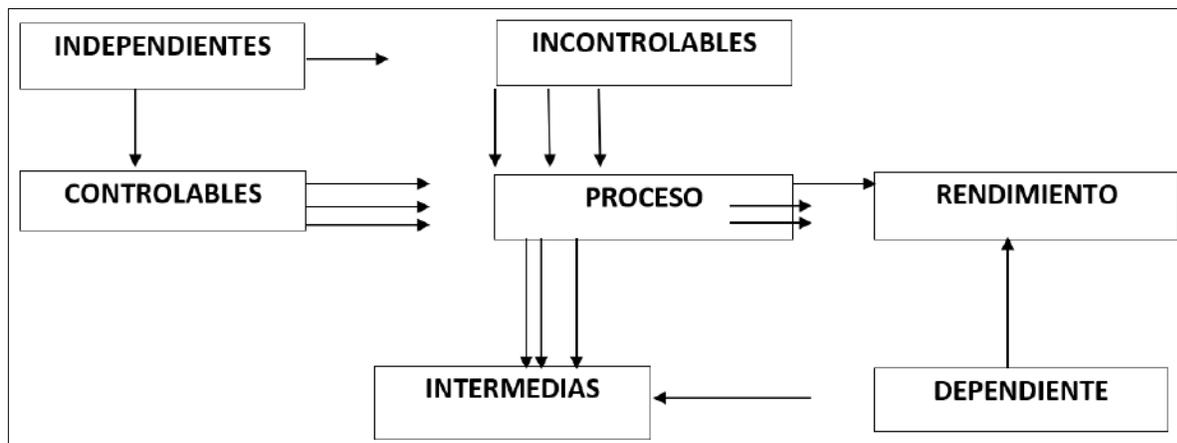
##### 6.3.1. Variable De Entrada:

Son las variables independientes del proceso, se definen de acuerdo con las características del proceso, y el valor de otras variables del sistema está determinado por su valor relativo.

### 6.3.2. Variable De Salida:

Estas variables son dependientes del proceso se considera como un efecto o respuesta a la variable de entrada, se clasifican diferentes tipos de variables.

**Imagen 6. 1:** Diagrama de Flujo Clasificación de Variables



Nota: Elaboración Propia

**Tabla 6. 1:** Variables de un proceso

VARIABLES INDEPENDIENTES	VARIABLES DEPENDIENTES
<p><b>a) CONTROLABLES</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Velocidad de giro del rodillo</li> <li>- Intensidad de campo magnético</li> <li>- Granulometría</li> </ul> <p><b>b) INCONTROLABLES</b></p> <p>Materia prima (preconcentrado de arenas del río Urubamba)</p> <p>Condiciones de operación de factores económicos</p>	<p><b>a) DE RENDIMIENTO</b></p> <p>Porcentaje de recuperación</p> <p><b>b) INTERVINIENTES</b></p> <p>Valores intermedios de los parámetros de operación.</p>

Nota: Aires H, Fernando, "Diseño experimentales y sus aplicaciones en ingeniería de procesos".

### 6.4 Ventajas De Un Diseño Experimental

Se menciona cuatro importantes ventajas de un diseño experimental los cuales son:

- Brinda información más útil concerniente al experimento con ello tener la capacidad de identificar las variables o factores que tienen mayor impacto en su proceso en el menor tiempo posible y con la mayor eficiencia.
- Se pueden organizar el conjunto de datos seleccionados para facilitar la evaluación de la información obtenida.
- Las evaluaciones claramente integradas de la información obtenida mediante el experimento y la autocrítica de los resultados, por lo tanto, tienen una mayor confianza en las conclusiones.
- Puede identificar interacciones entre variables relacionadas, lo que permite hacer pronóstico referente a los resultados obtenidos en zonas no cubiertas por la prueba.

#### 6.5 Realización De Pruebas Experimentales Con Diseño Factorial

Se realizó cada prueba experimental con la finalidad de establecer la influencia de las variables como la velocidad de giro del rodillo, intensidad del campo magnético y granulometría.

Se usó como instrumento el diseño factorial  $2^3$ , el cual estudia el efecto de los dos factores en dos niveles, llámese nivel máximo y nivel mínimo, del cual se estudio la correlación entre estos tres factores y sus resultados. Dicho estudio consta de  $2*2 *2= 8$  pruebas o puntos de diseño.

$$2^3= 8$$

Donde:

2: niveles de pruebas (nivel máximo y nivel mínimo)

3: Numero de variables o factores.

8: Pruebas o cantidad de experimentos.

Para comprender la forma de diseño, definiremos los siguientes puntos:

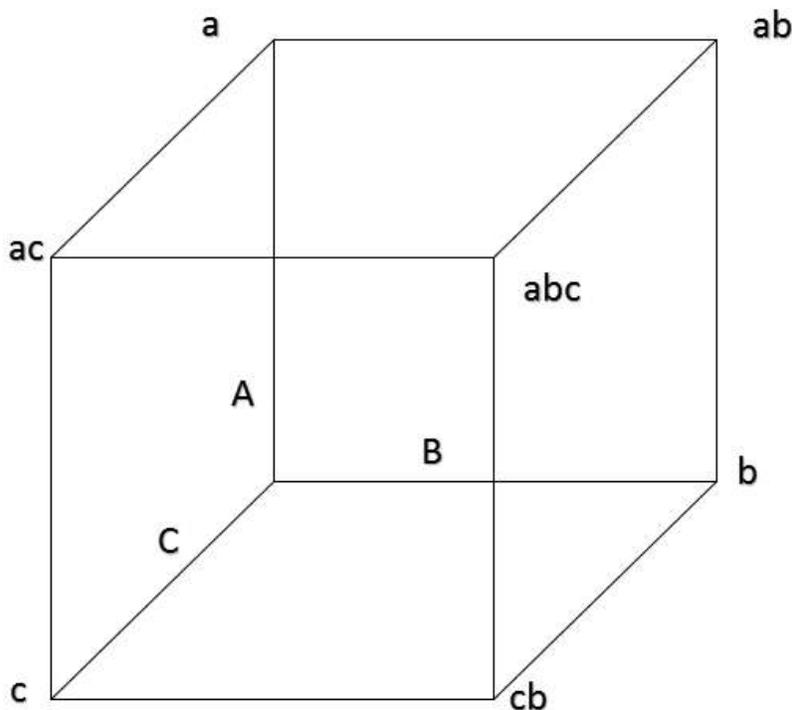
- El nivel de factor, que a cada valor que se propone aun determinado experimento, esto significa el grado de intensidad de un factor.
- Combinación de tratamiento; es aquel grupo de todos los factores que se emplean en un experimento determinado, logrando una combinación determinada de cualquiera de los niveles del factor.
- La respuesta; se define como el producto numérico en un experimento, que son las variables independientes.
- Efecto de un factor; es aquella variación en el resultado, generados por cambios en el nivel del factor, ocurre solo en dos niveles; siendo la diferencia entre el promedio de cada resultado del experimento en el nivel superior menos el promedio en el nivel inferior
- La interacción: Efecto adicional de la influencia combinada de varios factores; es la respuesta diferencial de un factor en niveles variables cuando dos factores se aplican al mismo tiempo.
- Una unidad experimental viene hacer aquella unidad básica donde se aplica un tratamiento o una combinación de tratamientos.
- el error experimental se produce cuando dos unidades experimentales iguales toman el mismo tratamiento o una combinación de tratamientos, pero tienen diferentes respuestas o mediciones.

El diseño  $2^3$ , se considera geométricamente y las combinaciones experimentales puede graficarse, correspondiendo a cada punto en el espacio, y las coordenadas son +1 y -1. Y su representación matemática obedece a un modelo lineal del tipo:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + E \quad (6.1)$$

La figura 6.2, se observa la representación espacial con las combinaciones para el diseño factorial  $2^3$ .

**Imagen 6. 2:** *Diseño factorial  $2^3$*

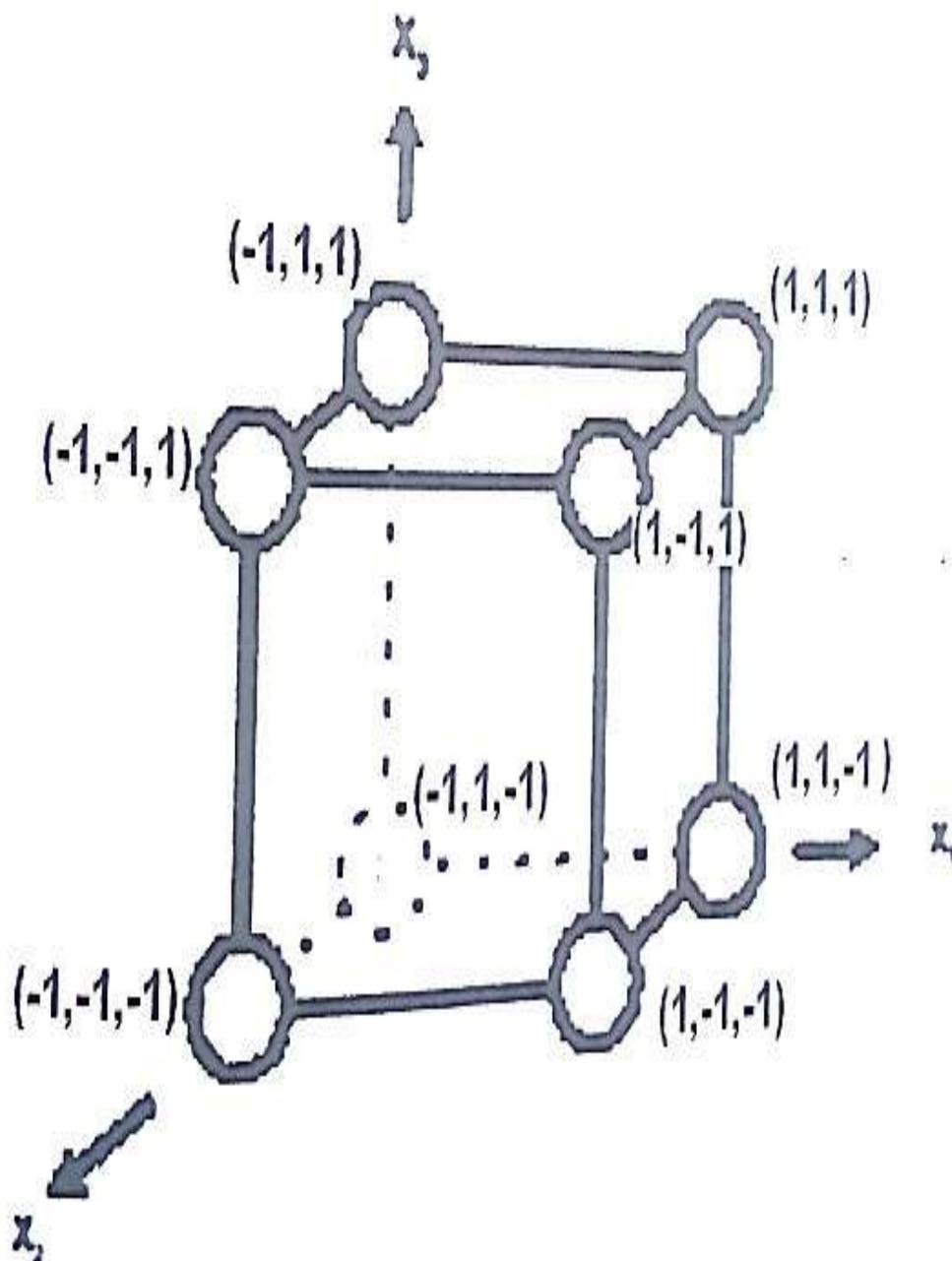


#### 6.6 Diseño Factorial $2^3$ Con Replica En Punto Central Del Diseño

Para el cálculo del diseño factorial se realizó un total de 08 pruebas, esto nos ayudaron a demostrar cual es el efecto de las variables en el proceso, obteniendo información para el análisis de los cálculos de diseño factorial  $2^3$ .

Para realizar la evaluación del error aleatorio y la curva de función matemática, se confirmara los valores hallados para una de las variables, adicionando el corrido de pruebas centrales en este diseño.

**Imagen 6. 3:** Representación del diseños factorial con replica en punto central de diseño



Para ratificar los resultados hallados para cada variable, incluimos los corridos de cada prueba central de diseño. Los cuales nos permiten analizar los errores aleatorios, también nos permiten analizar la curvatura de la función matemática hallada.

### 6.6.1 Pruebas Del Diseño Factorial Con Replicas Centrales

**Tabla 6. 2:** *Resumen de pruebas de diseño factorial con replicas centrales*

PRUEBA	Z1	Z2	Z3	Y
N°	GRANULO METRIA	VELOCIDAD DE GIRO DEL RODILLO	INTENSIDAD DE CAMPO MAGNETICO	% RECUPERACION
1	106	25	6000	72.11
2	150	25	6000	71.63
3	106	35	6000	74.42
4	150	35	6000	72.10
5	106	25	7000	77.80
6	150	25	7000	70.26
7	106	35	7000	80.62
8	150	35	7000	73.71
<b>9</b>	<b>128</b>	<b>30</b>	<b>6500</b>	<b>75.44</b>
<b>10</b>	<b>128</b>	<b>30</b>	<b>6500</b>	<b>75.44</b>
<b>11</b>	<b>128</b>	<b>30</b>	<b>6500</b>	<b>76.11</b>

*Nota: Elaboración Propia*

### 6.7 Diseño Factorial 2<sup>3</sup> Con Replica En El Punto Central

En la tabla 6.3 se muestra los niveles de operación, plan de pruebas experimentales aplicando y el diseño factorial, las condiciones operativas y el balance metalúrgico.

**Tabla 6. 3:** Niveles de operacionalización de las pruebas en el diseño factorial  $2^3$ 

Variable	Nivel inferior	Nivel superior
Z1 : Granulometría ( $\mu\text{m}$ )	150	106
Z2 : Velocidad de rodillo (rpm)	25	35
Z3 : Campo magnético (gauss)	6000	7000

*Nota: Elaboración propia*

**Tabla 6. 4:** Plan de pruebas experimentales con la aplicación del diseño factorial  $2k$  con replica en el punto central

Numero de prueba	Escala natural			Escala codificada		
	Z1	Z2	Z3	X1	X2	X3
1	106	25	6000	-1	-1	-1
2	150	25	6000	1	-1	-1
3	106	35	6000	-1	1	-1
4	150	35	6000	1	1	-1
5	106	25	7000	-1	-1	1
6	150	25	7000	1	-1	1
7	106	35	7000	-1	1	1
8	150	35	7000	1	1	1
9	128	30	6500	0	0	0
10	128	30	6500	0	0	0
11	128	30	6500	0	0	0

*Nota: Elaboración propia*

**Tabla 6. 5:** *Condiciones operativas del diseño factorial 2<sup>3</sup>*

N° de prueba	Granulometría	Velocidad de rodillo (rpm)	Campo magnético (Gauss)
1	106	25	6000
2	150	25	6000
3	106	35	6000
4	150	35	6000
5	106	25	7000
6	150	25	7000
7	106	35	7000
8	150	35	7000
9	128	30	6500
10	128	30	6500
11	128	30	6500

*Nota: Elaboración propia*

## 6.8 Análisis De Variables Por Diseño Experimental

### 6.8.1 Diseño Factorial 2<sup>k</sup> Con Replica En El Punto Central

El objetivo es el de estudiar el nivel de interacción entre variables y el efecto de cada una de ellas sobre la respuesta, esta es establecido por un modelo matemático.

En la ecuación 6.2, se define el número total de experimentos que se desarrollaran en la ecuación:

$$2^k = N + r \quad (6.2)$$

**Donde:**

- $2$ : Niveles de pruebas
- $k$ : Numero de variables (3)

- $N$ : Numero de pruebas experimentales
- $r$ : Numero de réplicas en el punto central

Según la ecuación 6.2 el número de pruebas experimentales para el completo desarrollo de nuestro diseño serian un total de 11 (08 pruebas combinadas y 03 réplicas en el punto central), como mostramos en la tabla 6.6,

**Tabla 6. 6:** *Variables en escala natural y codificada*

Nro. prueba	Escala natural			Escala codificada			Respuesta Y
	Z1	Z2	Z3	X1	X2	X3	
1	106	25	6000	-1	-1	-1	72.11
2	150	25	6000	1	-1	-1	71.63
3	106	35	6000	-1	1	-1	74.42
4	150	35	6000	1	1	-1	72.10
5	106	25	7000	-1	-1	1	77.80
6	150	25	7000	1	-1	1	70.26
7	106	35	7000	-1	1	1	80.62
8	150	35	7000	1	1	1	73.71
9	128	30	6500	0	0	0	75.44
10	128	30	6500	0	0	0	75.44
11	128	30	6500	0	0	0	76.11

*Nota: Elaboración propia*

**Tabla 6. 7:** Promedio general (Exceptúa puntos en el centro de diseño):  $Y = 74.08$ 

Numero de prueba	Escala natural			Escala codificada		
	<b>Z1</b>	<b>Z2</b>	<b>Z3</b>	<b>X1</b>	<b>X2</b>	<b>X3</b>
1	106	25	6000	-1	-1	-1
2	150	25	6000	1	-1	-1
3	106	35	6000	-1	1	-1
4	150	35	6000	1	1	-1
5	106	25	7000	-1	-1	1
6	150	25	7000	1	-1	1
7	106	35	7000	-1	1	1
8	150	35	7000	1	1	1
9	128	30	6500	0	0	0
10	128	30	6500	0	0	0
11	128	30	6500	0	0	0

*Nota: Elaboración Propia*

### 6.9 Cálculo De Los Efectos

Calculo de efecto es aquella diferencia entre valores de las respuestas, esta se realiza para determinar cuantitativamente cuanto afecta las variables los resultados o criterio de optimización del proceso.

Cuando los tratamientos respectivos las variables se encuentran en su nivel inferior y cuando se encuentra en su nivel superior, definido por:

$$E_X = \frac{(\sum Y_+) - (\sum Y_-)}{\left(\frac{N}{2}\right) * 2} = \frac{\sum_{i=1}^N X_{ij} Y_j}{\left(\frac{N}{2}\right) * r} = \frac{[X^T][Y]}{\left(\frac{N}{2}\right) * r} \quad (6.3)$$



[XT]								[Y]	=	[XT][Y]
1	1	1	1	1	1	1	1	72.11		592.68
-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	71.63		17.28
-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	74.42	*	9.08
-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	72.10		12.16
1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	77.80		-1.24
1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	70.26		-11.68
1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	80.62		3.52
-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	73.71		2.44

Posterior a todas las operaciones que se realizan por medio de las matrices, para obtener la tabla

6.8 procedemos a realizar el cálculo de los efectos:

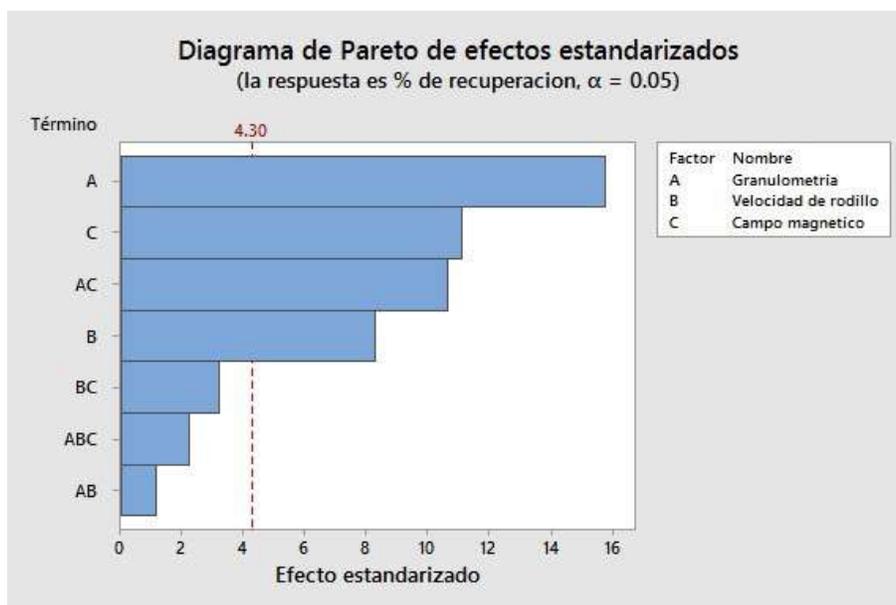
$Ex_0 = \frac{592.68}{\left(\frac{8}{2}\right) * 1} = 148.17$	$Ex_4 = \frac{-1.24}{\left(\frac{8}{2}\right) * 1} = -0.31$
$Ex_1 = \frac{17.28}{\left(\frac{8}{2}\right) * 1} = 4.32$	$Ex_5 = \frac{-11.68}{\left(\frac{8}{2}\right) * 1} = -2.92$
$Ex_2 = \frac{9.08}{\left(\frac{8}{2}\right) * 1} = 2.27$	$Ex_6 = \frac{3.52}{\left(\frac{8}{2}\right) * 1} = 0.88$
$Ex_3 = \frac{12.16}{\left(\frac{8}{2}\right) * 1} = 3.04$	$Ex_7 = \frac{2.44}{\left(\frac{8}{2}\right) * 1} = 0.61$

**Tabla 6. 8:** Cálculo de los efectos en la separación magnética de alta intensidad

	X0	X1	X2	X3	X1X2	X1X3	X2X3	X1X2X3
		Granulo metría	Velocidad	Campo				
[Xt][Y]	592.6	17.28	9.08	12.16	-1.24	-11.68	3.52	2.44
Efectos	148.17	4.32	2.27	3.04	-0.31	-2.92	0.88	0.61

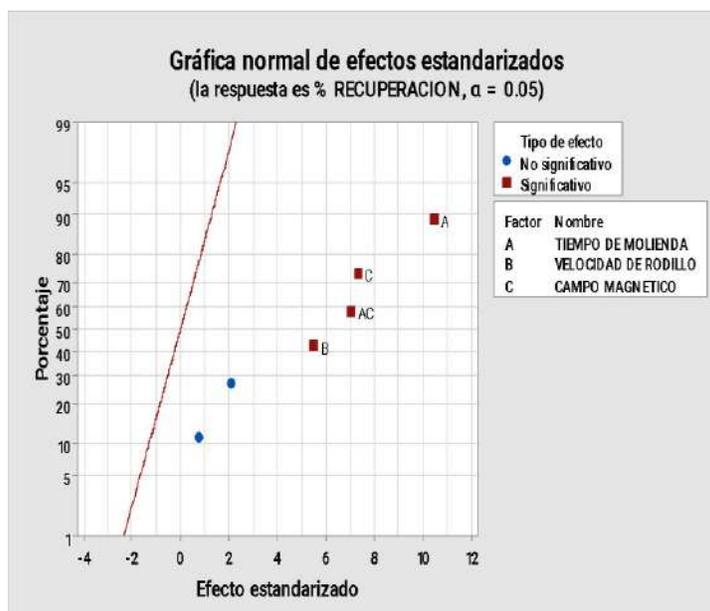
- Al incrementar el grado de liberación logramos un 4.32% más de extracción de minerales de titanio.
- Al incrementar la velocidad de giro del rodillo, se logro un 2.27% más de extracción de minerales de titanio.
- Al incrementar el campo magnético logramos un 3.04% más de extracción de minerales de titanio.

Para representar el grado de significancia de cada variable, así como las interacciones se grafica el valor absoluto de los medios efectos (Figura N° 6.4)

**Imagen 6. 4:** Diagrama de Pareto

Nota: Elaboración propia (Software Minitab 18)

Imagen 6. 5: Grafica de los efectos normales



Nota: Elaboración propia

#### 6.10 Modelo Matemático

Se determino los efectos y teniendo en cuenta el analisis de los resultados, procedemos a obtener el modelo matematico.

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_j X_j + \sum_{u,j=1}^k b_{uj} X_u X_j + \mu \#j \quad (6.4)$$

Para estimar los coeficiente  $b_j$  y  $b_{uj}$  se hace uso de la formula matricial a partir de los efectos:

$$[B] = ([X^T] * [X])^{-1} * ([X^T] * [Y]) \quad (6.5)$$

$$b_j = \frac{EX_j}{2} \quad (6.6)$$

A partir de los efectos calculados reemplazando en la ecuacion (6.6), obtenemos las ecuaciones y los respectivos  $b_j$  (coeficientes de regresion).

$$Y_{Est} = 74.08 + 2.16X_1 + 1.14X_2 + 1.52X_3$$

$$\hat{Y} = 74.08 + 2.16X_1 + 1.14X_2 + 1.52X_3$$

	X0	X1	X2	X3	X1X2	X1X3	X2X3	X1X2X3
Efectos	148.17	4.32	2.27	3.04	-0.31	-2.92	0.88	0.61
$b_j$	74.08	2.16	1.14	1.52	-0.16	1.46	0.44	0.31

## CONCLUSIONES

Primero.- Se ha realizado la concentración magnética de alta intensidad en los minerales de titanio a partir de los preconcentrados obtenidos de las arenas del río Urubamba, lográndose una recuperación del 80.62% con una ley de concentrado del 14.3%.

Segundo.- Para obtener una recuperación del 80.62% con una ley de concentrado del 14.3%, se ha trabajado con una granulometría de 106  $\mu\text{m}$ , velocidad de giro del rodillo de 35 RPM y una intensidad de campo magnético del 7000 gauss.

Tercero.- A través del cálculo de efecto hemos podido determinar:

- Al incrementar el grado de liberación logramos un 4.32% más de extracción de minerales de titanio.
- Al incrementar la velocidad de giro del rodillo, se logró un 2.27% más de extracción de minerales de titanio.
- Al incrementar el campo magnético logramos un 3.04% más de extracción de minerales de titanio.

Cuarto.- Para poder realizar la concentración magnética de alta intensidad de los minerales de titanio ha sido necesario realizar una concentración magnética de baja intensidad en húmedo, con la finalidad de desmagnetizar los minerales de titanio.

## RECOMENDACIONES

1. Se recomienda seguir realizando investigación referente a la concentración de minerales de titanio de las playas del río Urubamba por el sector Palma Real y playas que se encuentren en alrededores, al contar con playas muy extensa y distantes entre sí, se requiere realizar mayores estudios en varios puntos de la zona.
2. Se recomienda realizar los estudios de concentración magnética en húmedo de alta intensidad con un campo magnético de hasta 10000 gauss, con la finalidad de estudiar el comportamiento de los minerales de titanio con esta intensidad de campo magnético y poder lograr un mayor grado de recuperación.
3. Se sugiere continuar realizando mayores investigaciones con el objetivo de mejorar la recuperación y ley del concentrado de los minerales de titanio, los cuales deben de ser adecuados a los valores del mercado actual.
4. Se recomienda realizar mayores pruebas de limpieza en la mesa concentradora, como más pruebas de grado de liberación, previo a realizar la concentración magnética de alta intensidad.
5. Se recomienda hacer uso del modelo matemático obtenido por el software MINITAB para combinar las variables y optimizar el proceso.

## BIBLIOGRAFÍA

- A. y Tatsumi, Y. ((1994). ). *Análisis cuantitativo de muestras de roca mediante un espectrómetro de fluorescencia de rayos X (I)*. Goto, .
- Asociación Internacional Mineralógica. (1998). Calcita. En *Manual de Mineralogía*. págs. (pp. 234-236.
- Cantu, L. L. (1975). *Electricidad y magnetismo*. Mexico: Limusa.
- Elder J., y. K. ((2005) ). *The new mineral sands plant of the 3rd Millennium*.
- ERROL G. KELLY, D. J. (1990). *Introducción al PROCESAMIENTO DE MINERALES*. Mexico: Limusa S.A C.V.
- ÍGNEA, G. D. (2014). *ATLAS DE ROCAS ÍGNEAS*. Madrid - España.
- J., E. (2005. ). *Physical Separation of minerals: Evolución y tendencias*. *Littleton*, , 127-131.
- KELLY, E. G. (1990). *Introducción al Procesamiento de Minerales* . MEXICO: NORIEGA - LIMUSA.
- Mayra Aguilar, O. C. (2016). *Diseño y Construcción de una Mesa de Concentración*. Ecuador.
- Mineralogía, A. I. (1998). Calcita. *Manual de Mineralogía*, 234 - 236.
- NORA Gutierrez Castro, V. B. (2010). *RECUPERACION DE MINERALES DE TITANIO A PARTIR DE LOS RELAVES ALUVIALES DE LA ZONA DE HUAYPETUHE - MADRE DE DIOS*. *TESIS*. CUSCO, PERÚ.
- Oswaldo, D. P. (2019). *Apuntes de Concentracion de Minerales*. Chile.

- Raul Tafur Gutierrez, M. I. (2015). *COMO HACER UN PROYECTO DE INVESTIGACION*. Colombia: Alfaomega.
- S.K., J. ((2001) ). Mineral Processing, 2nd Edition. *The Rigaku Journal*, págs. 20-39.
- Sampieri, R. H. (2014). *METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN*. Mexico: Punta Santa Fe.
- SANTIAGO, P. M. (2011). *Definición y análisis del proceso más ventajoso para la concentración de la Ilmenita presente en la arena de la playa Ventanilla en el Estado de Oaxaca*. Mexico.
- Serway, R. A. (s.f.). *Electricidad y Magnetismo*. Mc Graw Hill.
- Society for Mining. (16-19 de octubre de 2005). *Heavy Minerals*.
- Victor Bellota, N. R. (2010). *Recuperacion de Minerales de Titanio*. Cusco.
- Wayback Machine. (18 de NOVIEMBRE de 2011). Apatita.
- WILLS, B. A. (1994). *Tecnología del Procesamiento de Minerales*. Mexico: Limusa S.A. de C.V.

# ANEXOS

## ANEXO 01: MATRIZ DE CONSISTENCIA

FORMULACION DEL PROBLEMA	OBJETIVO	HIPOTESIS	VARIABLE	INDICADORES	METODOLOGIA
<p><b>PROBLEMA GENERAL</b></p> <p>¿Cómo recuperar los minerales de titanio, mediante la concentración magnética a partir del preconcentrado obtenido de una mesa vibratoria, de las arenas del rio Urubamba?</p> <p><b>PROBLEMAS ESPECIFICOS</b></p> <p>¿Cómo influye la granulometría en la concentración magnética de los minerales de titanio a partir del preconcentrados de las arenas del rio Urubamba?</p> <p>¿Cómo influye la velocidad de giro del rodillo en la concentración magnética de los minerales de titanio a partir del preconcentrados de las arenas del rio Urubamba?</p> <p>¿Cómo influye la intensidad del campo magnético en la concentración magnética de los minerales de titanio a partir del preconcentrado de las arenas del rio Urubamba?</p>	<p><b>OBJETIVO GENERAL</b></p> <p>Recuperar los minerales de titanio, empleando la concentración magnética, a partir del preconcentrado obtenido de una mesa vibratoria de las arenas del rio Urubamba.</p> <p><b>OBJETIVOS ESPECIFICOS</b></p> <p>Determinar la granulometría adecuada para la concentración magnética de minerales de titanio a partir del preconcentrados de las arenas del rio Urubamba.</p> <p>Determinar la velocidad de giro del rodillo, para la concentración magnética de minerales de titanio a partir del preconcentrados de las arenas del rio Urubamba.</p> <p>Determinar la intensidad del campo magnético, para la concentración magnética de minerales de titanio a partir del preconcentrados de las arenas del rio Urubamba.</p>	<p><b>HIPOTESIS GENERAL</b></p> <p>El método de concentración magnética es el más óptimo para la recuperación de minerales de titanio, a partir del preconcentrado obtenido de una mesa vibratoria de las arenas del rio Urubamba del centro poblado Palma Real.</p> <p><b>HIPOTESIS ESPECIFICAS</b></p> <p>La granulometría influye en la concentración magnética de los minerales de titanio a partir del preconcentrados de las arenas del rio Urubamba.</p> <p>La velocidad de giro del rodillo influye en la concentración magnética de los minerales de titanio a partir del preconcentrados de las arenas del rio Urubamba.</p> <p>La intensidad del campo magnético influye en la concentración magnética de los minerales de titanio a partir del preconcentrados de las arenas del rio Urubamba.</p>	<p><b>VARIABLES INDEPENDIENTES</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Granulometría.</li> <li>• Velocidad de giro del rodillo.</li> <li>• Intensidad del campo magnético</li> </ul> <p><b>VARIABLES DEPENDIENTES</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Porcentaje de recuperación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• frecuencia (Hz)</li> <li>• concentración (%)</li> <li>• tamaño de partícula (<math>\mu\text{m}</math>)</li> </ul>	<p><b>Método de investigación</b></p> <p>Es descriptivo y experimental.</p> <p><b>Tipo de investigación</b></p> <p>Es investigación tecnológica.</p> <p><b>Alcance de la investigación</b></p> <p>Es descriptivo y explicativo</p> <p><b>Enfoque de investigación</b></p> <p>Es cuantitativa y experimental.</p> <p><b>Diseño de investigación</b></p> <p>Utiliza el diseño experimental de factorial diseño central compuesto (DCC), porque utilizaremos más pruebas para tener mejor modelamiento en el software MINITAB.</p> <p><b>Población de estudio</b></p> <p>Son los preconcentrados obtenidos de una mesa vibratoria de las arenas del rio Urubamba.</p> <p><b>Tamaño de muestra:</b> 78 Kg</p> <p><b>Técnica e instrumentos de recolección de datos</b></p> <p>Se aplica la técnica de observación, donde se hace el registro sistemático, valido y confiable de comportamientos y situaciones observables.</p>

**ANEXO 02:** Informe de ensayo sobre la presencia de minerales de titanio en el concentrado de separación magnética de alta intensidad



Laboratorios Analíticos del Sur

# Laboratorios Analíticos del Sur

Parque Industrial Rio Seco C-1 Cerro Colorado – Arequipa – Perú  
www.laboratoriosanaliticosdelsur.com

+51 (054) 443294  
+51 (054) 444582  
+51 958 961 254  
+51 958 961 253

Clave generada : 825001F2

## INFORME DE ENSAYO LAS01-MN-22-06919

Fecha de emisión: 8/09/2022

Página 1 de 1

Señores: LAROTA SUMA DANIEL  
Dirección: APV JOSE DE SAN MARTIN B-6 SAN SEBASTIAN - CUSCO  
Atención: LAROTA SUMA DANIEL  
Recepción: 2/09/2022  
Realización: 2/09/2022  
Observación: El Laboratorio no realiza la toma de muestra.

### Métodos ensayados

\*630 Método de ensayo para Titanio fusión alcalina - ICP-OES

Código Interno L.A.S.	(c) Nombre de Muestra	(c) Procedencia de Muestra	(c) Descripción de Muestra	*630	
				Ti %	TiO2 %
MN22014263	MUESTRA A-001	No proporcionado por el cliente.	Mineral pulverizado	4,92	13,50
MN22014264	MUESTRA A-002	No proporcionado por el cliente.	Mineral pulverizado	2,02	12,70
MN22014265	MUESTRA A-003	No proporcionado por el cliente.	Mineral pulverizado	4,94	13,20
MN22014266	MUESTRA A-004	No proporcionado por el cliente.	Mineral pulverizado	2,37	13,50
MN22014267	MUESTRA A-005	No proporcionado por el cliente.	Mineral pulverizado	4,02	13,80
MN22014268	MUESTRA A-006	No proporcionado por el cliente.	Mineral pulverizado	3,94	13,30
MN22014269	MUESTRA A-007	No proporcionado por el cliente.	Mineral pulverizado	4,02	14,30
MN22014210	MUESTRA A-008	No proporcionado por el cliente.	Mineral pulverizado	3,94	12,80

Fin del Informe

  
Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.  
Omar A. Juárez Soto  
Gerente de Operaciones  
M. Sc. Ingeniero Químico CIP. 114426

(\*) Los métodos Indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA.

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Los resultados presentados sólo están relacionados a la muestra ensayada. Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

(c) : Datos proporcionados por el cliente. El laboratorio no se responsabiliza técnica ni legalmente por esta información. Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

**ANEXO 03:** Informe de ensayo sobre la presencia de minerales de titanio en el preconcentrado de mesa vibratoria



Laboratorios Analíticos del Sur

# Laboratorios Analíticos del Sur

Parque Industrial Rio Seco C-1 Cerro Colorado – Arequipa – Perú  
www.laboratoriosanaliticosdelsur.com

+51 (054) 443294  
+51 (054) 444582  
+51 958 961 254  
+51 958 961 253

## INFORME DE ENSAYO LAS01-MN-22-00688

Fecha de emisión: 4/02/2022

Página 1 de 1

Clave generada : AA292CC

**Señores:** LAROTA SUMA, DANIEL  
**Dirección:** APV JOSE DE SAN MARTIN B-6 SAN SEBASTIAN - CUSCO  
**Atención:** LAROTA SUMA, DANIEL  
**Recepción:** 2/02/2022  
**Realización:** 2/02/2022  
**Observación:** El Laboratorio no realiza la toma de muestra.

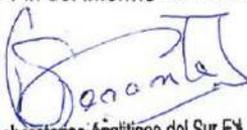
### Métodos ensayados

\*521 Método de ensayo para Hierro por digestión específica - volumetría

\*630 Método de ensayo para Titanio fusión alcalina - ICP-OES

Código Interno L.A.S.	(c) Nombre de Muestra	(c) Procedencia de Muestra	(c) Descripción de Muestra	*630	
				Ti %	TiO2 %
MN22014263	MUESTRA A-001	No proporcionado por el cliente	Mineral pulverizado	2,02	3,37

----- Fin del informe -----

  
Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.  
Sixto Vicente Juárez Neira  
Gerente General  
Ing. Químico C.I.P. 19474

(\*) Los métodos Indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA.

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Los resultados presentados sólo están relacionados a la muestra ensayada. Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

(c) : Datos proporcionados por el cliente. El laboratorio no se responsabiliza técnica ni legalmente por esta información. Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

**Anexo fotográfico**

Tamizado de minerales



Muestra minerales tamizados



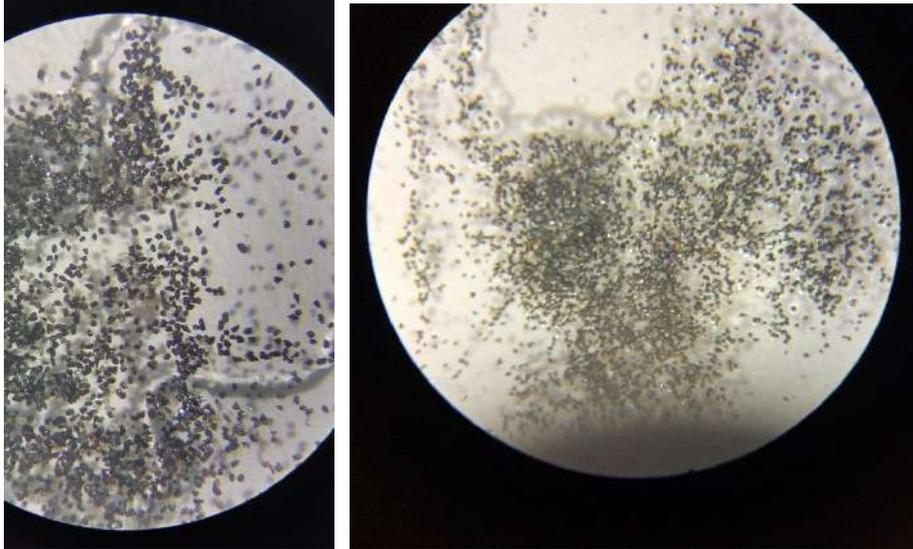
Desmagnetización de mineral de titanio por separación magnética de baja intensidad en húmedo.



Separación magnética de alta intensidad, con un parador magnético READING.



Muestras obtenidas por el proceso de separación magnética de alta intensidad



Vista de minerales de titanio a través de microscopio.