



**UNIVERSIDAD DEL AZUAY**  
**FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA EN MINAS**

**“Comparación de procesos de concentración gravimétrica  
entre mesa vibratoria y espiral para la obtención de un  
concentrado de óxido de hierro (FeO)”**

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:  
**INGENIERO EN MINAS**

**Autor:**

**RONNY ROLANDO CASTRO BRAVO**

**Director:**

**FERNANDO TULIO VALENCIA GUARICELA**

**CUENCA – ECUADOR**

**2022**

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo en primer lugar a Dios por darme la oportunidad de llegar a esta etapa profesional, con mucho amor y gratitud a mis padres Rolando Castro y Narcisa Bravo, por ser los pilares fundamentales durante toda mi vida, además los responsables de todos los logros que he obtenido y les agradezco por el inmenso esfuerzo que han hecho para sustentar mis estudios, a mis hermanos Lizzeth e Israel Castro Bravo por ayudarme y estar presentes en todo momento, a mi novia Vanessa Abad por todo su apoyo durante estos años y a mi hija Martina Isabella Castro por ser mi motivación y llenar mi vida de felicidad.

A mis abuelos Jaime Cornelio Castro Salcedo (†) quien me enseñó que el estudio es la mejor herencia que nos pueden dejar nuestros padres, Medardo Ángel Bravo Ochoa (†), María Eufemia Guzmán Idrobo, Julia Macrina Jaramillo Cabrera (†), quienes me han brindado su sabiduría y cariño durante toda mi vida, sé que estarán orgullosos de ver hasta donde he llegado.

A mi primo Edison Leonardo Bravo Jaramillo (†), siempre estaré agradecido porque fuiste como mi hermano mayor, siempre pendiente en mis momentos de enfermedad, te voy a recordar por siempre y sé que estarás feliz sabiendo que lo conseguí.

**Ronny Castro Bravo.**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a la Universidad del Azuay, a los Ingenieros Leonardo Núñez, Patricio Feijoo, Julia Martínez y a todos los profesores de la carrera de Ingeniería en Minas quienes han ido forjando en mí un profesional y persona de bien, con gran estima a mi director de tesis Ing. Fernando Valencia por su amistad, tiempo y ayuda en el desarrollo de este trabajo.

Un agradecimiento de manera especial al Ing. Eduardo Luna, por su inmensa ayuda dentro del laboratorio y por los conocimientos brindados, los cuales me han facilitado el desarrollo de la presente tesis.

A mis compañeros y grandes amigos que me dejaron estos años de estudio, por las experiencias compartidas dentro y fuera de la Universidad.

**Ronny Castro Bravo.**

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA .....	ii
AGRADECIMIENTO .....	iii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS .....	ix
ÍNDICE DE GRÁFICAS .....	x
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO 1 .....	3
MARCO TEÓRICO.....	3
1.1 Concentración de minerales .....	3
1.2 Tenor .....	3
1.3 Principal objetivo de la concentración .....	3
1.4 Índices metalúrgicos.....	4
1.5 Recuperación .....	4
1.6 Razón de enriquecimiento .....	4
1.7 Razón de recirculación .....	5
1.8 Concentración Gravimétrica.....	5
1.8.1 Principio fundamental de la concentración gravimétrica .....	5
1.8.2 Criterio de concentración.....	5
1.8.3 Métodos de concentración gravimétrica: .....	6
1.9 JIG .....	8
1.9.1 Principales partes de un JIG.....	8
1.9.2 Características del JIG .....	9
1.10 Concentración en corrientes longitudinales .....	10
1.11 Mesa Vibratoria.....	11

1.11.1 Los rifles en la mesa vibratoria.....	11
1.11.2 Variables de operación.....	12
1.11.3 Funcionamiento .....	12
1.11.4 Características de la concentración en mesas vibratorias .....	15
1.11.5 Capacidad y consumo de una mesa vibratoria.....	15
1.11.6 Función de los rifles.....	16
1.12 Espiral.....	17
1.12.1 Generalidades.....	18
1.12.2 Parámetros de operación .....	20
1.12.3 Características operacionales de las espirales.....	20
1.12.4 Regiones de una espiral .....	22
1.12.5 Clasificación .....	22
1.13 Estado del arte .....	24
<b>CAPÍTULO 2.....</b>	<b>25</b>
<b>DESARROLLO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>25</b>
2.1 Caracterización del material .....	25
2.2 Selección del material .....	26
2.3 Análisis granulométrico.....	27
2.4 Geología de la zona .....	28
2.5 Georreferenciación del sitio de la toma de muestras.....	28
2.6 Coordenadas del sitio de toma de muestras.....	29
2.7 Calibración de equipos e instrumentos.....	30
2.7.1 Mesa vibratoria .....	30
2.7.2 Espiral .....	31
2.7.3 Equipos auxiliares.....	32
2.8 Determinación de parámetros operacionales.....	33
2.8.1 Mesa vibratoria .....	33

2.8.2 Espiral .....	33
2.8.3 Densidad de la muestra .....	33
2.8.4 Fracción de sólidos .....	34
2.9 Desarrollo de ensayos experimentales.....	35
2.9.1 Ensayos en la mesa vibratoria.....	36
2.9.2 Ensayos en la espiral.....	38
2.10 Cálculo de recuperación en cada ensayo .....	43
2.10.1 Concentrado: .....	43
2.10.2 Tenor de concentrado: .....	43
2.10.3 Alimento: .....	43
2.10.4 Tenor de alimento: .....	44
<b>CAPÍTULO 3 .....</b>	<b>47</b>
<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>47</b>
3.1 Interpretación de resultados de los ensayos de laboratorio .....	47
3.2 Resultados en la mesa vibratoria .....	47
3.3 Resultados en la espiral .....	49
3.4 Tablas de los resultados.....	50
3.5 Gráficas de los resultados .....	51
3.6 Recuperación promedio.....	51
3.7 Recuperación promedio.....	52
3.8 Discusión de resultados .....	53
3.9 Equipo y variable óptima para la recuperación gravimétrica.....	55
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>56</b>
Conclusiones .....	56
Recomendaciones .....	58
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>60</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>62</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Esquema de un proceso de concentración. ....	4
Figura 1.2 Posibilidad de separación según el criterio de concentración .....	6
Figura 1.3 Características de los métodos de separación por corrientes.....	7
Figura 1.4 Jig de concentración .....	9
Figura 1.5 Capas de un JIG .....	10
Figura 1.6 Mesa vibratoria parcial y totalmente rifleada .....	11
Figura 1.7 Distribución de partículas dentro de la mesa vibratoria .....	13
Figura 1.8 Efecto del flujo de partículas con desplazamiento lateral .....	13
Figura 1.9 Movimiento de la mesa vibratoria .....	14
Figura 1.10 Estratificación progresiva en los rifles .....	14
Figura 1.11 Mesa vibratoria tipo Deister .....	16
Figura 1.12 Rifles de una mesa vibratoria .....	17
Figura 1.13 Esquema de separación de una espiral.....	18
Figura 1.14 Sección transversal de una espiral .....	19
Figura 1.15 Efecto en el porcentaje de sólidos en el rendimiento de una espiral .....	20
Figura 1.16 Recuperación vs tamaño en concentración con espirales .....	21
Figura 1.17 Regiones en la espiral .....	21
Figura 1.18 Espiral de concentración.....	23
Figura 2.1 Presencia de Óxido de Hierro en el lugar de toma de muestras. ....	25
Figura 2.2 Propiedad magnética del FeO presente en las muestras tomadas.....	26
Figura 2.3 Primer tamizaje del material .....	26
Figura 2.4 Material de desecho obtenido después del tamizaje .....	27
Figura 2.5 Maquina tamizadora de vibración .....	27
Figura 2.6 Geología de la zona .....	28

Figura 2.7 Recorrido desde la cabecera cantonal hasta el sitio de toma de muestras	29
Figura 2.8 Coordenadas del sitio de toma de muestras .....	30
Figura 2.9 Mesa vibratoria calibrada .....	31
Figura 2.10 Calibración del tanque de alimentación de la espiral .....	31
Figura 2.11 Tubos PVC embonados en la salida de productos finales .....	32
Figura 2.12 Equipos Auxiliares.....	32
Figura 2.13 Pesaje de la alimentación.....	35
Figura 2.14 Fijación de la mesa vibratoria a 1°, 2° y 3° de inclinación.....	36
Figura 2.15 Desarrollo de ensayos experimentales en la mesa vibratoria .....	37
Figura 2.16 Canales helicoidales realizando la separación de materiales.....	39
Figura 2.17 Productos finales obtenidos luego de los experimentos de laboratorio ..	40
Figura 3.1 Limpieza de separación en la mesa vibratoria con 3° de inclinación.....	48
Figura 3.2 Separación deficiente utilizando un ángulo de 2° de inclinación.....	48
Figura 3.3 Visibilidad de la separación en la espiral .....	49
Figura 3.4 Pureza del material de alta densidad que obtuvo la mejor recuperación ..	54

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 2.1 Variables de operación en los ensayos de la mesa vibratoria .....	37
Tabla 2.2 Variables de operación en los ensayos de la mesa vibratoria .....	40
Tabla 2.3 Productos finales obtenidos en la mesa vibratoria .....	41
Tabla 2.4 Productos finales obtenidos en la espiral .....	42
Tabla 2.5 Resultados de recuperación en la mesa vibratoria .....	45
Tabla 2.6 Resultados de recuperación en la espiral .....	46
Tabla 3.1 Mínima y máxima recuperación en la mesa vibratoria .....	50
Tabla 3.2 Mínima y máxima recuperación en la espiral .....	50
Tabla 3.3 Características de la mejor recuperación obtenida.....	55

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 3.1 Recuperación en mesa vibratoria .....	51
Gráfica 3.2 Recuperaciones promedio resultado de los ensayos en la mesa vibratoria .....	51
Gráfica 3.3 Recuperación en la espiral .....	52
Gráfica 3.4 Recuperaciones promedio resultado de los ensayos en la espiral .....	52

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Fórmulas de recuperación de los ensayos en la mesa vibratoria .....	62
Anexo 2. Fórmulas de recuperación de los ensayos en la espiral .....	67

**“COMPARACIÓN DE PROCESOS DE CONCENTRACIÓN  
GRAVIMÉTRICA ENTRE MESA VIBRATORIA Y ESPIRAL PARA LA  
OBTENCIÓN DE UN CONCENTRADO DE ÓXIDO DE HIERRO (FeO)”**

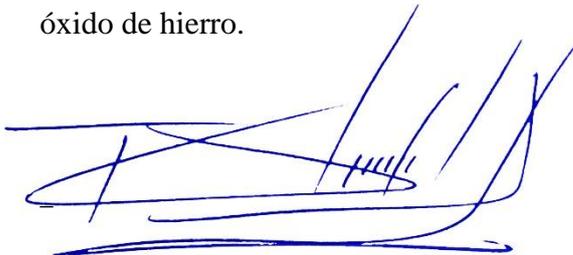
**RESUMEN**

La investigación realizada permitió determinar mediante ensayos de laboratorio de concentración gravimétrica y utilizando equipos como mesa vibratoria y espiral, los parámetros operaciones que maximizan la recuperación de óxido de hierro proveniente de una muestra de origen aluvial.

En el caso de la mesa vibratoria se realizaron pruebas variando el ángulo de inclinación 1°, 2° y 3°; con una fracción de sólidos en pulpa del 10%, 15%, 20% y 25%, obteniendo la mayor recuperación equivalente del 98,31%, con un ángulo de inclinación de 3° y una fracción de sólidos del 25%.

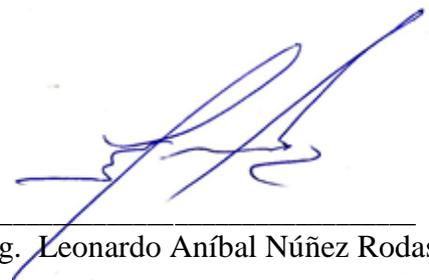
Para el ensayo en el espiral se trabajó con fracciones de sólidos en pulpa al 10%, 15%, 20% y 25%, variando en este caso la cantidad de agua, en valores de 15, 25 y 35 litros, para cada fracción de sólidos, obteniendo una recuperación del 99.06%.

**Palabras clave:** Concentración gravimétrica, recuperación, mesa vibratoria, espiral, óxido de hierro.



Ing. Fernando Tulio Valencia Guaricela

**Director del Trabajo de Titulación**



Ing. Leonardo Aníbal Núñez Rodas

**Coordinador de Escuela**



Ronny Rolando Castro Bravo

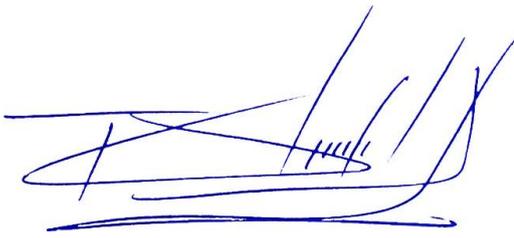
**Autor**

**“COMPARISON PROCCESS OF GRAVIMETRIC CONCENTRATION  
BETWEEN VIBRATING TABLE AND SPIRAL TO OBTAIN IRON OXIDE  
CONCENTRATE (FeO)”**

**ABSTRACT**

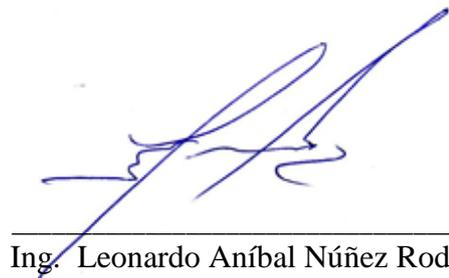
This research allowed the determination, through gravimetric concentration laboratory tests and by using equipment such as vibrating table and spiral, the operational parameters which maximize the recuperation of iron oxide coming from a sample of alluvial origin. In the case of the vibrating table, tests were carried out varying the inclination angle to 1, 2 and 3 degrees: with a fraction of pulp density of 10%, 15%, 20% and 25%. The highest equivalent recovery of 98.31% was obtained with an inclination angle of 3 degrees and 25% fraction of solids. For the spiral test, solid fractions in pulp at 10%, 15%, 20% and 25% were used, which varied, in this case, in the amount of water from 15, 25 and 35 liters for each fraction of solids. A recovery of 99.06% was obtained.

**Key words:** Gravimetric concentration, recuperation, vibration table, spiral, recovery, iron oxide.



Ing. Fernando Tulio Valencia Guaricela

**Thesis Director**



Ing. Leonardo Aníbal Núñez Rodas

**School Coordinator**



Ronny Rolando Castro Bravo

**Author**




Translated by Ronny Castro

Ronny Rolando Castro Bravo

Trabajo de Titulación

Ing. Fernando Tulio Valencia Guaricela

Diciembre, 2021

**COMPARACIÓN DE PROCESOS DE CONCENTRACIÓN  
GRAVIMÉTRICA ENTRE MESA VIBRATORIA Y ESPIRAL PARA LA  
OBTENCIÓN DE UN CONCENTRADO DE ÓXIDO DE HIERRO (FeO)**

**INTRODUCCIÓN**

La minería se considera como la actividad de tipo industrial más antigua de la humanidad y con el pasar del tiempo se ha posicionado como la actividad pionera en proporcionar materias primas a todas las industrias alrededor del mundo, sin minería no hubiera sido posible obtener los avances a los cuales tenemos acceso hoy en día, principalmente en el área de la tecnología, medicina y medios de transporte. Dichas materias primas se obtienen a través de varios procesos, siendo uno de ellos la concentración de minerales, que será el objeto de estudio dentro del presente trabajo de investigación.

La separación o concentración de minerales ha sido durante la historia de la minería, uno de los campos más importantes y también uno de los más criticados de esta actividad; no hace mucho tiempo, la obtención de minerales representaba en la mayoría de los casos una considerable contaminación ambiental, esto debido a la gran presencia de mineros ilegales, los cuales desarrollaban métodos de concentración sin contar con medidas de protección ambiental.

Los avances en la tecnología y la creación de instituciones que regulan y controlan las actividades extractivas tanto metálicas como no metálicas, han permitido desarrollar diferentes y numerosas opciones de concentración, así como una gran variedad de equipos de diferentes características y costos, los cuales se adaptan a las necesidades de las empresas mineras y a las características de los minerales.

Dentro de estos métodos, la concentración gravimétrica ha llamado la atención, esto debido a que la separación de minerales por gravedad utiliza equipos más económicos con un modo de uso más sencillo, y en los cuales el agua que se utiliza para el proceso puede ser reutilizada casi en su totalidad, resultando esto en un menor grado de afectación al medio ambiente, al contrario de la concentración por flotación, en la cual se utilizan reactivos de altos costos, los mismos que si no reciben una manipulación adecuada pueden contaminar considerablemente al medio ambiente.

La concentración gravimétrica aprovecha la diferencia de densidades, así como las diferencias físicas y de volumen, entre los materiales que constituyen una muestra.

## CAPÍTULO 1

### MARCO TEÓRICO

#### 1.1 Concentración de minerales

La concentración de minerales se puede definir como el proceso a través del cual se separa uno o más minerales de interés de una mena, este procedimiento se lleva a cabo mediante diversos métodos y equipos, los cuales pueden ser utilizados según las necesidades y distintas características del material de interés.

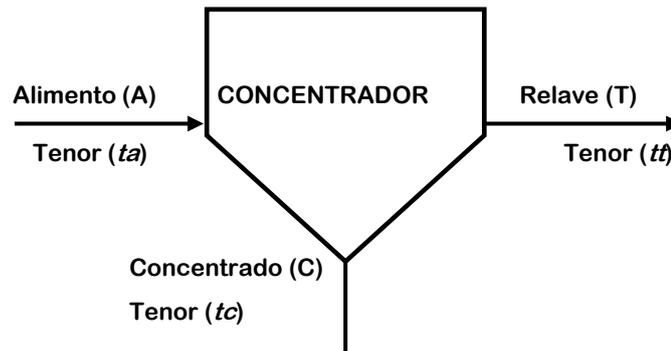
#### 1.2 Tenor

Se entiende como tenor a la relación que existe entre el peso del mineral de interés en relación al peso o al volumen de la mena, por lo cual, el tenor se puede expresar tanto en gramos por tonelada de material, como también en porcentaje. (Bustamante, Gaviria, & Restrepo, 2008)

$$t = \frac{W \text{ (peso del mineral de interés)}}{W \text{ o } V \text{ (peso o volumen de la mena)}} \quad (1)$$

#### 1.3 Principal objetivo de la concentración

La concentración tiene un objetivo fundamental, el cual es obtener un mineral de un volumen determinado de material, este mineral obtenido se denomina concentrado (C) cuyo tenor es  $t_c$ , mientras que la ganga o material sin interés mineralógico se denomina relave (T) cuyo tenor es  $t_t$ . A continuación, se presenta un esquema básico de un proceso de concentración. (Bustamante, Gaviria, & Restrepo, 2008)



**Figura 1.1** Esquema de un proceso de concentración.

**Fuente:** Elaboración propia

#### 1.4 Índices metalúrgicos

Como lo menciona (Bustamante, Gaviria & Restrepo, 2008), estos índices se utilizan para determinar el grado de efectividad producto de una separación de minerales realizados en una o diversas etapas, a más de esto, sirven como guía para la calibración de equipos en plantas concentradoras.

Se necesita que el cálculo de estos índices vaya acompañado de un balance de masas durante las etapas de concentración, si se omite este paso, lo más probable es que los valores obtenidos para los índices sean extraños o incongruentes y esto afectará a las siguientes etapas de separación.

#### 1.5 Recuperación

La recuperación es la relación que hay entre el peso del mineral obtenido, el cual se encuentra dentro del concentrado, y el peso de dicho mineral en el alimento o cantidad de material de mena que entró al equipo. (Bustamante, Gaviria, & Restrepo, 2008)

$$R = \frac{\text{Peso de mineral dentro del concentrado}}{\text{Peso de mineral dentro del alimento}} \quad (2)$$

$$R = \frac{C * t_c}{A * t_a} \quad (3)$$

#### 1.6 Razón de enriquecimiento

La razón de enriquecimiento es la relación entre el tenor del concentrado “tc” y el tenor del alimento “ta”. (Bustamante, Gaviria, & Restrepo, 2008)

$$R = \frac{t_c}{t_a} \quad (4)$$

### 1.7 Razón de recirculación

Este principio se debe cumplir teniendo en cuenta que en ningún caso se recomienda realizar el proceso de concentración combinando dos o más especies minerales de características diferentes, esto debido a que se va a entorpecer el proceso de separación, favoreciendo a la mena que contenga más concentración mineral. (Bustamante, Gaviria, & Restrepo, 2008)

### 1.8 Concentración gravimétrica

#### 1.8.1 Principio fundamental de la concentración gravimétrica

La separación por gravedad o concentración gravimétrica, aprovecha la diferencia de densidades de dos o más materiales para obtener un mineral de interés, se puede realizar utilizando la fuerza de la gravedad y también haciendo uso de corrientes de agua. En la mayoría de los ensayos que se realizaron bajo este método de separación se obtuvieron 3 productos, que para el caso de este trabajo de tesis fueron los siguientes: el concentrado o material más denso, los medios o el material con una densidad media y el relave o material menos denso. (Vilcapoma & Chávez, 2012)

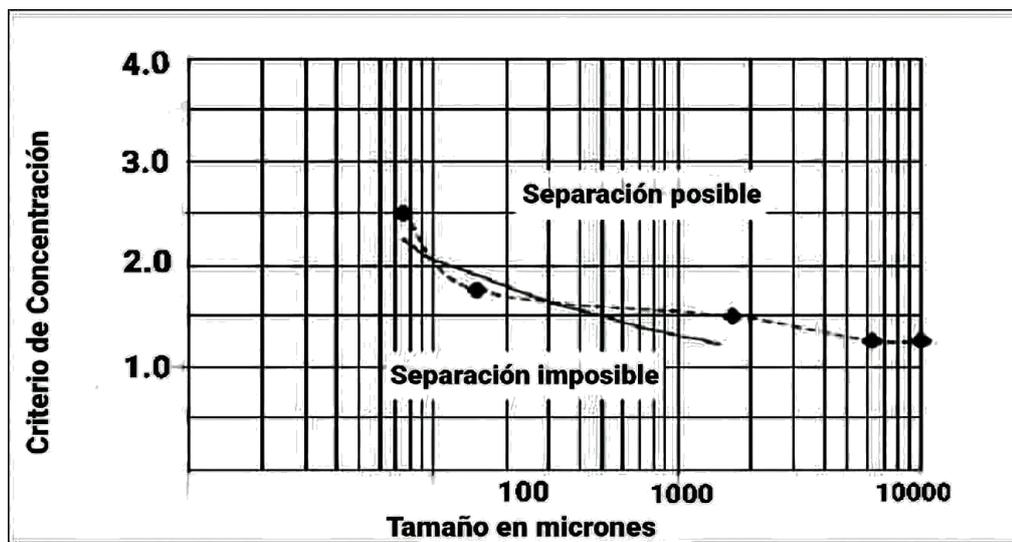
#### 1.8.2 Criterio de concentración

La concentración gravimétrica, independientemente del equipo que se vaya a utilizar, requiere de manera indispensable una diferencia considerable de densidades entre los materiales que conforman la mena, ya que, al utilizar menas con densidades semejantes, los minerales actuarían de forma similar durante el proceso y la separación se entorpecería, obteniendo resultados erróneos. (Vilcapoma & Chávez, 2012)

$$\text{Criterio de Concentración} = \frac{(Dh - Df)}{(Dl - Df)} \quad (5)$$

Donde  $D_h$ ,  $D_l$  y  $D_f$ , son las densidades de la especie pesada, ligera y el fluido respectivamente.

El resultado de este criterio de concentración puede variar por diferentes factores, el principal se debe a las características de la mena, los valores se pueden presentar en cantidades que van desde 2.5 hasta 1.25 (adimensional), siendo la primera un indicativo de que la separación se realizará de forma sencilla, mientras que el segundo valor indica el límite bajo el cual se puede realizar concentración húmeda por gravedad. (Merchán & Monsalve, 2019)



**Figura 1.2** Posibilidad de separación según el criterio de concentración

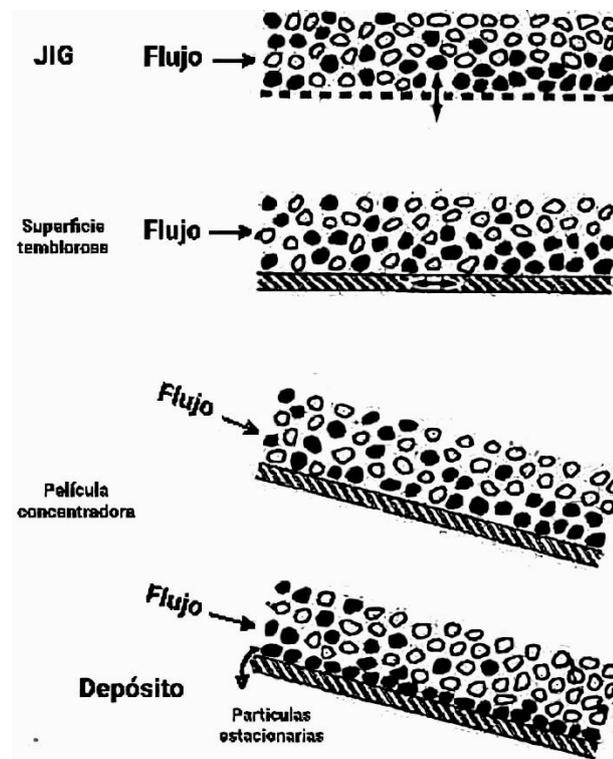
Fuente: (Merchán & Monsalve, 2019)

**1.8.3 Métodos de concentración gravimétrica:** Los diversos métodos de concentración por gravedad que existen se agrupan en 3 categorías:

**1.8.3.1 Concentración por medios densos.** - En este método, el mineral es separado con la ayuda de un fluido de densidad media, el cual ayuda a que el material más denso sedimente y el más liviano se eleve a la superficie.

**1.8.3.2 Concentración por corrientes.** - Siendo el JIG el equipo más utilizado para este tipo de concentración, en el cual se aprovecha la rapidez de sedimentación entre partículas. La separación por corrientes puede darse de distintas formas: corrientes verticales, corrientes longitudinales, corrientes oscilatorias y corrientes centrífugas, (Figura 1.3).

**1.8.3.3 Concentración mediante corrientes superficiales de agua.** - Es el método en el cual se basó el desarrollo de este trabajo, ya que en este tipo de concentración se aprovecha la diferencia de pesos entre las partículas que conforman la mena, siendo los equipos más utilizados la mesa vibratoria y la espiral.



**Figura 1.3** Características de los métodos de separación por corrientes

**Fuente:** (Pavez, 2005)

## 1.9 JIG

Haciendo uso del peso específico de la mena a separar, el JIG es un equipo que, a través de un flujo de agua, aprovecha la sedimentación libre y la sedimentación obstaculizada para obtener el concentrado. La concentración en estos equipos se da mediante pulsaciones en un flujo de agua, donde al concluir la expansión del material prosigue una etapa denominada de “succión” en la cual las partículas se empezarán a depositar de acuerdo a su densidad y tamaño, los cuales están determinados por las siguientes relaciones:

**Ley de Stokes** (partículas inferiores a 50  $\mu\text{m}$  o  $Rc < 3.0$ )

$$Vt = \frac{gd^2 (\rho_s - \rho_f)}{18\eta} \quad (6)$$

**Ley de Newton** (partículas superiores a 0.50 cm o  $Rc > 600$ )

$$Vt = \frac{3gd (\rho_s - \rho_f)^{1/2}}{\rho_f^{1/2}} \quad (7)$$

**Ley de Castleman** (partículas entre 50  $\mu\text{m}$  y 0.50 cm o  $3 < Rc < 600$ )

$$Rc^2 D = \frac{4}{3} \frac{gd^3 (\rho_s - \rho_f) \rho_f}{\eta^2} \quad (8)$$

Donde:

$Vt$  = velocidad terminal.

$\rho_i$  = densidad del sólido o fluido.

$\eta$  = viscosidad del fluido.

$d$  = diámetro de partícula.

$g$  = constante gravitacional.

**Fuente:** (Soto Almaguer Rosalba)

### 1.9.1 Principales partes de un JIG

**1.9.1.1 Caja con fondo perforado.** - Es el lugar en donde se deposita la alimentación, la cual debe ingresar al equipo de tal manera que cubra todo el ancho del tamiz. La caja es elaborada en hierro, evitando así su rápido desgaste. El material de desecho se acumula en la parte horizontal del tamiz.

**1.9.1.2 Depósito o cama hidráulica de agua.** - Es la parte del JIG en la cual se descarga o acumula el concentrado, posee mangueras o llaves de agua que contribuyen a la separación.

**1.9.1.3 Dispositivos para producir pulsaciones.** - Como su nombre lo indica, estos dispositivos a través de pulsaciones, logran separar el material de interés debido a la diferencia de densidades, están conformados por un motor, diafragma, lecho de partículas y sistema de lubricación que ayuda a evitar el pronto desgaste.

**1.9.1.4 Dispositivo de descarga del concentrado y relave.** - Es el lugar en donde quedarán depositados por una parte el mineral de interés y por otro la ganga o material de desecho, este procedimiento se puede realizar de forma mecánica y constante.



**Figura 1.4** JIG de concentración

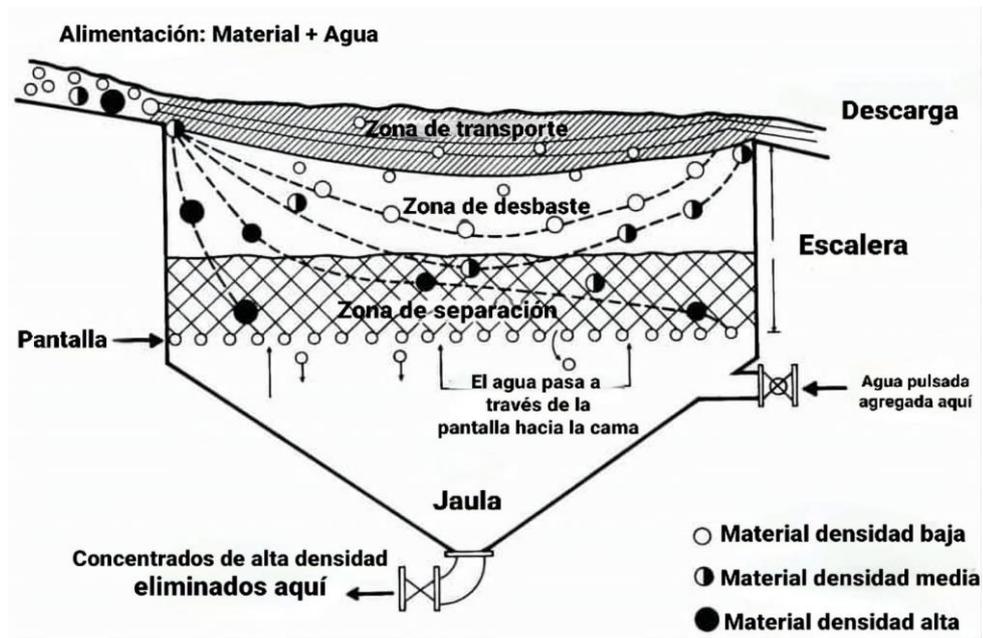
**Fuente:** Elaboración propia

## 1.9.2 Características del JIG

De acuerdo a (Vilcapoma & Chávez, 2012), las principales características de un JIG son las siguientes:

- Una caja fija dentro de la cual la pulpa es sometida tanto a pulsaciones como a succiones, generando así la separación.
- El sistema de funcionamiento (sistema de lubricación, motor, pistón).
- La criba que sostiene el lecho.
- Sistema de descarga del concentrado y el relave.

- Su accionamiento puede ser mecánico, hidráulico, hidráulico-neumático.
- Los parámetros operacionales que más influyen en el funcionamiento de un JIG son: el tipo y características de la mena a utilizar, cantidad de agua, frecuencia, amplitud, entre otros.



**Figura 1.5** Capas de un JIG

**Fuente:** (Fueyo, Gómez, & Rodríguez, 2012)

### 1.10 Concentración en corrientes longitudinales

Este tipo de concentración combina la velocidad de sedimentación de las partículas con un movimiento longitudinal, a medida que transcurren las distintas etapas del proceso de separación, las partículas que componen la mena se comportan de diferentes formas según su granulometría y densidad.

Las partículas más pesadas tendrán mayor velocidad de caída y sedimentarán en un tiempo más corto, mientras que las partículas livianas serán sometidas a la corriente longitudinal por lo que llegarán a sedimentar lejos de las partículas de mayor peso y tardarán más tiempo. (Pavez, 2005).

## 1.11 Mesa vibratoria

La mesa vibratoria es uno de los equipos más utilizados en concentración gravimétrica, su principio de funcionamiento se basa en movimientos acelerados asimétricos sobre una superficie “plana” inclinada, que sumados a una alimentación en pulpa y en algunos casos con la ayuda del principio de escurrimiento laminar, logran la recuperación deseada.

El primer equipo de este tipo se desarrolló en el año de 1895, y fue la llamada “Mesa Wilfley” y durante muchos años fue la única disponible, luego con el avance de la tecnología se añadieron los denominados “rifles”, los cuales facilitaron la separación utilizando materiales con partículas gruesas.

Este equipo trabaja bajo un mecanismo que permite crear vibraciones laterales, las cuales, con la ayuda de pequeñas corrientes de agua, harán que la pulpa se desplace hacia los rifles que es donde ocurre la concentración del mineral de interés. (Vilcapoma & Chávez, 2012)

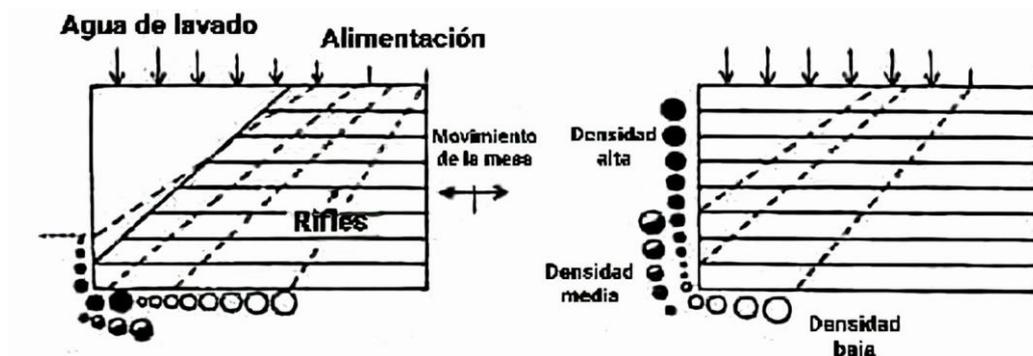


Figura 1.6 Mesa vibratoria parcial y totalmente rifleada

Fuente: (Vilcapoma & Chávez, 2012)

### 1.11.1 Los rifles en la mesa vibratoria

La adición de los rifles a la mesa vibratoria tiene los siguientes objetivos:

- Componer pequeños canales en la base de la mesa, donde se da la formación del lecho de estratificación.

- Agrupar diferenciadamente las partículas más densas de las más livianas, dando la oportunidad a todo el material de ser alcanzado por la corriente de agua de lavado.

### **1.11.2 Variables de operación**

#### **Variables de diseño**

- Forma.
- Materiales que la componen.
- Estructura y composición de los rifles.
- Rapidez de movimientos vibratorios.

#### **Controles operacionales**

- Grados de inclinación.
- Presión y cantidad de agua de lavado.
- Densidad del material que ingresará al alimento.

**Fuente:** (Vilcapoma & Chávez, 2012)

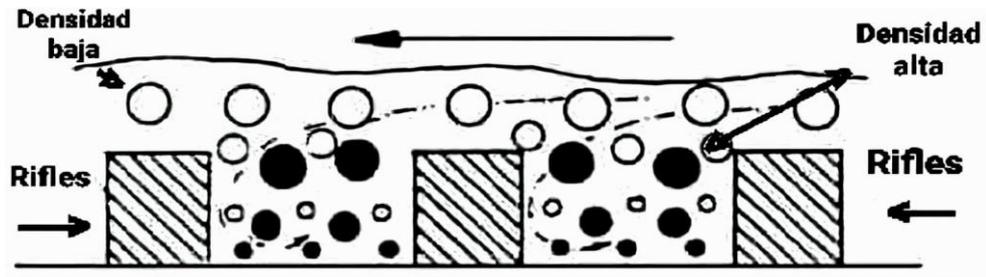
### **1.11.3 Funcionamiento**

El principio de funcionamiento de una mesa vibratoria consiste en una base la cual realiza movimientos oscilatorios continuos, existen mesas cuyo ángulo de inclinación puede variar generalmente de 0° a 6°.

Luego de que la mesa haya realizado la separación se obtendrán 3 productos, que generalmente se denominan finos, medios y gruesos. Sin embargo, en este caso se va a trabajar por densidades o peso de partículas, por lo que los 3 productos resultantes fueron el material pesado o concentrado, el material de peso intermedio y el material liviano o relave.

Las mesas vibratorias están formadas por dos partes: una parte lisa y la otra que contiene los rifles, que al ser paralela al eje longitudinal forma pequeños canales, los cuales poseen una altura descendente de un extremo a otro, lo que facilita que el material se dirija al lado liso de la mesa y se deposite en su lugar de destino según su separación. (Rivera, 2017)

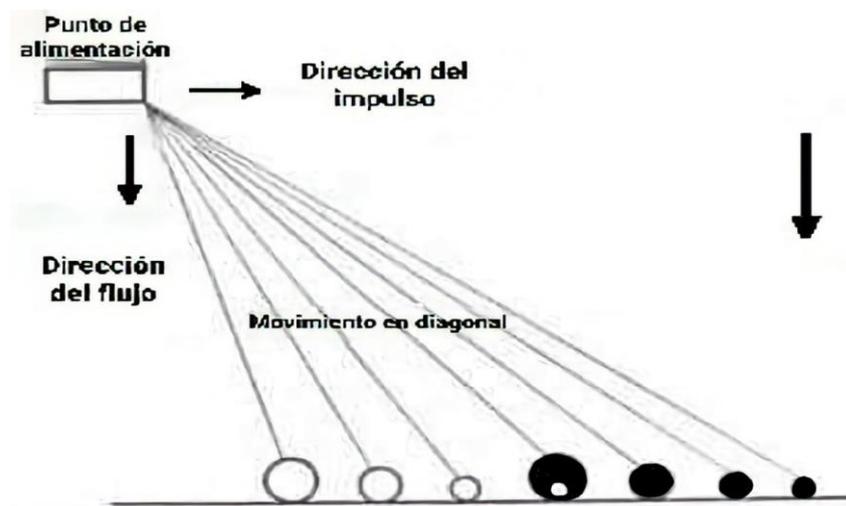
Con la ayuda de un motor, la mesa produce movimientos horizontales asimétricos los cuales hacen que la pulpa se desplace hacia los rifles de tal manera que, como se puede observar en la figura 1.7, las partículas más livianas (color blanco) avanzan por los rifles y las partículas más pesadas (color negro) quedan atrapadas entre ellos, luego el material más denso con la ayuda del agua de lavado es llevado a la región lisa de la mesa, que es el lugar donde ocurre la concentración final. (Vilcapoma & Chávez, 2012)



**Figura 1.7** Distribución de partículas dentro de la mesa vibratoria

**Fuente:** (Pavez, 2005)

La mesa vibratoria se ha posicionado como uno de los equipos más utilizados al momento de concentrar materiales de granulometría fina, los cuales no pueden ser tratados por el JIG.



**Figura 1.8** Efecto del flujo de partículas con desplazamiento lateral h

**Fuente:** (Metallurgy Corp, 2012)



**Figura 1.9** Movimiento de la mesa vibratoria

**Fuente:** Elaboración propia

Como se puede apreciar en la figura 1.8, la circunferencia grande representa la partícula más liviana, la cual tiene un desplazamiento horizontal casi imperceptible gracias a su rapidez; por otro lado, la circunferencia pequeña que es la más pesada, es desplazada por la corriente de agua hacia un costado de la mesa.

De esta manera luego de verter el alimento en el equipo, la separación tiene lugar según el tamaño y la densidad de los materiales que componen la mena, luego de terminar el proceso, el equipo segregará 3 materiales los cuales serán recogidos en las distintas bandas de la mesa según la separación. (Merchán & Monsalve, 2019).



**Figura 1.10** Estratificación progresiva en los rifles

**Fuente:** (Metallurgy Corp., 2012).

#### **1.11.4 Características de la concentración en mesas vibratorias**

- El máximo tamaño de partículas que pueden ser separadas en la mesa es de 2 a 3mm y el tamaño mínimo equivale a 75 micrones aproximadamente, lo cual representa una ventaja en el uso de estos equipos, ya que materiales muy pequeños no pueden ser separados por otros métodos.
- Se debe controlar el porcentaje de sólidos que ingresan a la alimentación de la mesa, de tal manera que faciliten la estratificación y dilatación de las partículas entre los rifles, se recomienda que la densidad de la pulpa sea de máximo el 25% para arenas y del 30% para materiales más finos.
- Mientras la base de la mesa tenga un ángulo de inclinación alto, la necesidad del agua de lavado será menor, pero esta inclinación dependerá del tamaño de las partículas de la mena a utilizar.

La capacidad de la mesa vibratoria depende de los siguientes factores:

- Según el tipo de alimentación a utilizar se definirán el número de golpes y la velocidad a la cual va a operar el equipo, para materiales finos se puede operar con golpes cortos a velocidades más o menos altas y se realiza lo contrario para materiales gruesos.
- El ángulo de inclinación es un factor importante ya que de este depende mucho la calidad de separación, mientras más significativa sea la diferencia de densidades entre los materiales que componen el alimento, es mejor utilizar un ángulo de inclinación alto.
- El caudal o cantidad de agua a utilizar debe cubrir por completo la bandeja de alimentación, pero este factor puede variar de acuerdo al tamaño de las partículas que ingresarán a la mesa, y en algunos casos se podría necesitar en una cantidad mayor o menor.

#### **1.11.5 Capacidad y consumo de una mesa vibratoria**

##### **Capacidad**

- Las características de la mena a utilizar: densidad, granulometría, forma de las partículas, proporción de agua necesaria, ángulo de inclinación, etc. De ser necesario un valor específico, su capacidad se define en base a la granulometría de alimentación que va desde 5 t/día en materiales finos y alrededor de 50 t/día en materiales gruesos.

### Consumo de agua y energía

- En cuanto al agua de consumo, esta varía de 10 a 45 l/min en materiales finos, en el presente trabajo el consumo de agua se fijó en 15 l/min.
- La mesa utiliza aproximadamente 0,6 HP como consumo medio de energía.

### Ventajas

- La descarga de los productos finales es continua.
- Ambientalmente amigables (consumo mínimo de agua y energía).
- La recuperación es bastante favorable.
- La separación se puede visualizar desde la base de la mesa.

### Desventajas

- Su alimentación y supervisión debe ser continua.
- Requiere un sistema de accionamiento. (Rivera, 2017)



**Figura 1.11** Mesa vibratoria tipo Deister

**Fuente:** Elaboración propia

#### 1.11.6 Función de los rifles

- En conjunto con la frecuencia de golpe, contribuyen a la separación mineral.

- Acumula en los diferentes canales el material separado para luego llevarlo a los puntos de descarga.



**Figura 1.12** Rifles de una mesa vibratoria

**Fuente:** Elaboración propia

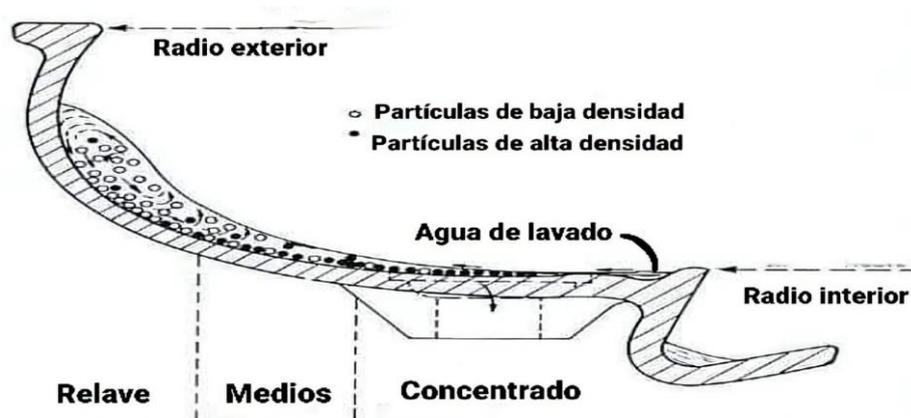
### **1.12 Espiral**

La espiral es un equipo de concentración gravimétrica constituido por un canal de forma helicoidal cuyo número de vueltas varía dependiendo de su diseño. Mediante una corriente de agua aprovecha la diferencia de pesos entre partículas para realizar la separación. Se usa ampliamente en la pre-concentración de materiales de origen metálico, una de las grandes ventajas de este equipo es que, en caso de tener acceso limitado al agua, esta puede ser reutilizada, lo cual representa también un menor impacto al medio ambiente. (Shubert, 1987)

Según (Shubert, 1987), fue en el año de 1945 en EEUU, cuando se desarrolló el primer tipo de espiral, su principio de funcionamiento está apoyado en el uso de fuerzas centrífugas las cuales intervendrán en la concentración con la ayuda de una corriente de agua, este principio se ha mantenido hasta la actualidad, únicamente variando en los modelos actuales algunos factores como medidas, diseños y materiales de los cuales están contruidos.

La espiral posee aberturas que están ubicadas al final de la parte helicoidal, cada una de estas aberturas ayudan a recolectar los 3 materiales finales que resultan después de la separación, dichas aberturas están conectadas a tuberías cortas por las cuales saldrán los materiales de densidad alta media y baja.

Cabe indicar también que mientras más material se vaya a separar, se va a necesitar una cantidad mayor de agua, esto debido a que el material pasa por una bomba y si este material está demasiado seco se corre el peligro de que obstruya la bomba y esto entorpezca el proceso.



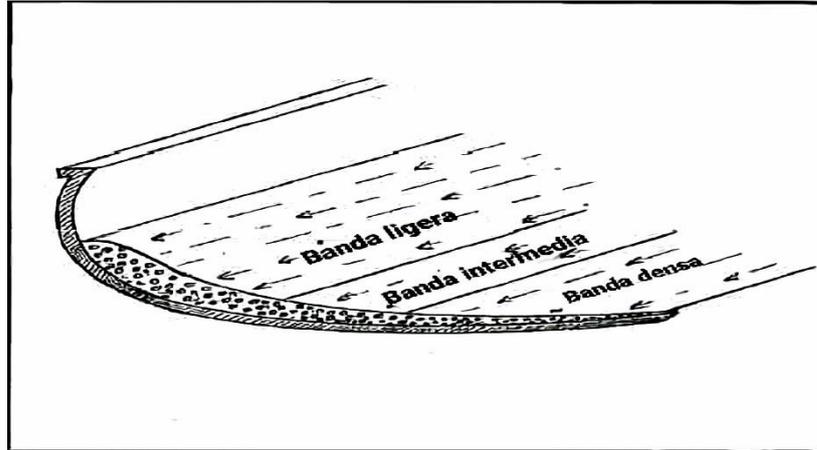
**Figura 1.13** Esquema de separación de una espiral

**Fuente:** (Pavez, 2005)

### 1.12.1 Generalidades

Este equipo de concentración basa su principio de funcionamiento en su parte helicoidal, la cual además posee una sección transversal parecida a la de un tobogán, posee además un cajón de gran capacidad en el cual se deposita la alimentación, aquí es donde se forma la pulpa en la cual las partículas de mayor densidad forman una línea gruesa a lo largo de la parte interior del flujo para luego ser llevadas a las aberturas, de las cuales ya se habló anteriormente.

Luego de verter la pulpa en el tanque de alimentación, se procede a abrir la llave de paso, de tal manera que el material empiece a recorrer las secciones, para posteriormente realizar la concentración mineral gracias a la velocidad de la corriente de agua; luego de esto, la parte de la pulpa que contiene el material más pesado se deposita de manera inmediata y por el contrario la pulpa con material menos denso tiene una velocidad relativamente baja por lo que tarda más tiempo en sedimentar. (Carvajal & Chávez, 2015)



**Figura 1.14** Sección transversal de una espiral

**Fuente:** (Merchán & Monsalve, 2019)

Las partículas cuyas densidades son mayores, son sometidas a diferentes fuerzas, las cuales serán descritas a continuación:

- **Peso aparente**

$$G = V(y - q)g \quad (9)$$

- **Fuerza centrífuga**

$$Z = V(y - q) * \frac{v^2}{r} \quad (10)$$

- **Fuerza de arrastre al fondo de la canaleta**

$$S = c * Aq * \frac{u_2}{2} \quad (11)$$

- **Fuerza de rodamiento**

$$R = \mu * (z' \text{sen}\beta + G' \text{sen}\beta - S) \quad (12)$$

**Fuente:** (Fueyo, Gómez, & Rodríguez, 2012)

### 1.12.2 Parámetros de operación

- La espiral promedio posee una capacidad de trabajo de 0,5 a 2,5 t/h, pero la unidad de medida más utilizada es de 1,5 t/h, la cantidad de alimento va de la mano con las propiedades de la mena que será utilizada, sean finos o gruesos.
- Los valores sobre la cantidad de agua necesaria para el proceso también varían en base a las características de la mena, su consumo puede ir desde los 15 l/min hasta los 110 l/min en operaciones más grandes. En el presente trabajo, luego de los cálculos realizados se utilizaron 20, 30 y 40 litros de agua para el proceso.
- En cuanto al porcentaje de sólidos, las espirales con un diseño moderno pueden optimizar este factor, ya que son capaces de operar con un porcentaje de sólidos que va desde el 30% al 50%. Se debe tener en cuenta que el tamaño de las partículas y la densidad son factores de gran influencia en el proceso.

Fuente: (Carvajal & Chávez, 2015)

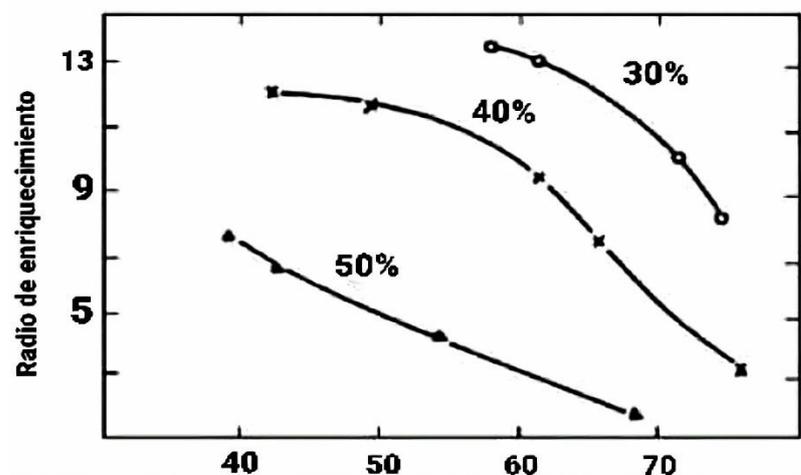


Figura 1.15 Efecto en el porcentaje de sólidos en el rendimiento de una espiral

Fuente: (Bustamante, Gaviria, & Restrepo, 2008)

### 1.12.3 Características operacionales de las espirales

#### 1.12.3.1 Granulometría de alimentación

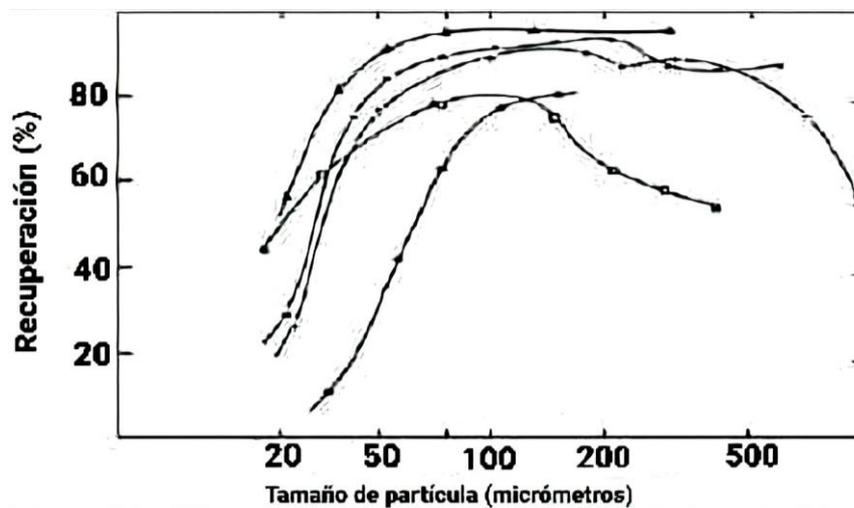
Según (Carvajal & Chávez, 2015), la granulometría máxima con la cual puede trabajar una espiral es de hasta 200 mallas y la mínima es 8 mallas, los materiales con un peso específico bajo pueden variar hasta en 4 mallas sin afectar el proceso y mientras más pequeña sea la diferencia granulométrica, mejor será el resultado de la concentración.

### 1.12.3.2 Peso específico de los minerales a separar

En la práctica, se ha comprobado que, para obtener una concentración favorable en la espiral, la resta de los pesos específicos entre el concentrado y el relave debe dar como resultado siempre un valor mayor o igual a 1. (Pavez, 2005)

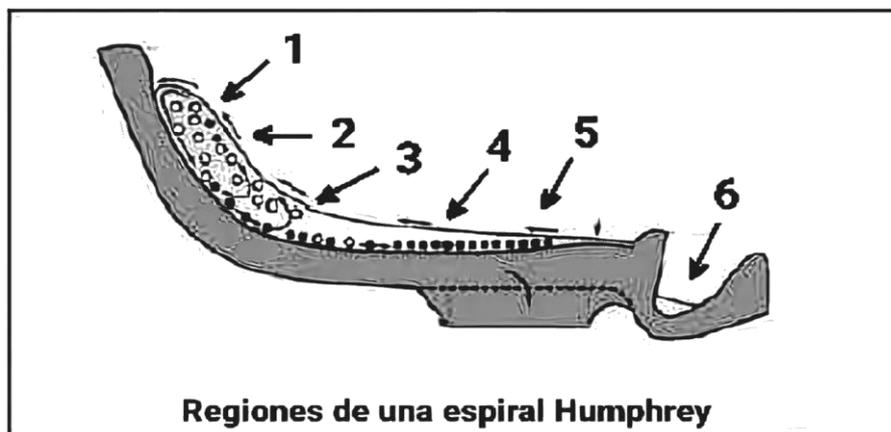
### 1.12.3.3 Forma y tamaño de las partículas

Es un factor muy relevante dentro del proceso de concentración ya que puede intervenir de manera positiva o negativa en su resultado, las menas cuyos materiales tengan pesos específicos de valores cercanos, darán como resultado un concentrado con alto índice mineral.



**Figura 1.16** Recuperación vs tamaño en concentración con espirales

Fuente: (Pavez, 2005)



**Figura 1.17** Regiones en la espiral

Fuente: (Auris, y otros, 2013)

### 1.12.4 Regiones de una espiral

Las espirales se dividen en 6 regiones, las cuales se detallan a continuación:

**Región 1.-** Es la sección que está constituida por agua casi en su totalidad y por otra parte de partículas finas que han sedimentado en esta región desde la alimentación, el agua en esta parte de la espiral experimenta un movimiento hacia la izquierda.

**Región 2.-** Es en esta parte de la espiral en donde el agua alcanza su mayor velocidad y también la fuerza centrífuga llega a su punto máximo, debido a esto se impide cualquier actividad en las regiones 1 y 3.

**Región 3.-** En la cual la pulpa alcanza su máxima rapidez debido a que es la parte más alta del equipo, aquí el agua gira hacia la derecha y es en esta región en donde se da la parte más importante de la concentración, el material más pesado sedimenta en el fondo y va hacia la región 5.

**Región 4.-** Es una pequeña parte de la espiral que complementa a las regiones 3 y 5.

**Región 5.-** En este lugar se acumula el material más denso o pesado mientras que las partículas más livianas son desplazadas lejos de esta región por la corriente de agua que pasa sobre la superficie de la capa de la pulpa.

**Región 6.-** Dependiendo de su diseño, las espirales pueden tener una sexta región en la cual se agrega agua con el propósito de lavar el material más liviano antes de que las partículas densas lleguen al depósito de concentrados. (Auris, y otros, 2013)

### 1.12.5 Clasificación

#### 1.12.5.1 Espirales de múltiples retiradas

La más común de este diseño, es la espiral Humphrey la cual consta de una canaleta de forma helicoidal adherida a una base vertical en el centro, la cual ayuda a la descarga del concentrado final, cada segmento tiene un ángulo de 120° con materiales de hierro y fibra de vidrio.

#### 1.12.5.2 Espirales de retiradas limitadas

La ventaja de estos equipos es que requieren una cantidad muy pequeña de agua para su funcionamiento y el agua de lavado, en algunos casos, no es necesaria. (Pavez, 2005)



**Figura 1.18** Espiral de concentración

**Fuente:** Elaboración propia

### **Ventajas**

- Se producirán pre-concentrados de manera ininterrumpida.
- No necesitan de un sistema de accionamiento motriz.
- El agua usada en el proceso de separación puede ser recirculada y reutilizada.
- Su mantenimiento es básico y poco constante.

### **Desventajas**

- Ocupan un espacio vertical considerable.
- Se requiere una vigilancia constante de la proporción de la pulpa y el agua en el proceso.

### **Aplicaciones**

- Se aprovechan menas con altas diferencias de densidades, obteniendo resultados muy favorables.
- Obtención de concentrado, medios y relave en un solo proceso
- Utilizado para tratar el scavenger obtenido en el proceso de flotación.
- Para el tratamiento de materiales con partículas de granulometría inferior a 1mm.

### 1.13 Estado del arte

La concentración gravimétrica de metales pesados ha sido en la historia de la humanidad un proceso geológico mediante el cual, la madre naturaleza ha concentrado en depósitos de placeres minerales como: oro, casiterita, entre otros. Los métodos gravimétricos han sido usados desde hace muchos años, por ejemplo los egipcios (3000 A.C) lavaban oro. En el siglo XIX., Rittinger en Europa, realiza estudios teórico-prácticos de concentración gravimétrica. Luego de esto se han venido implementando poco a poco todas las tecnologías que conocemos hasta el día de hoy. (Fuerstenau, & Han 2003).

Según (Concha, 2007) a través de la muestra de un material rico en oro de la mina “El Diamante” ubicada en el departamento de Nariño, Colombia, utilizando un equipos de concentración gravimétrica con una inclinación de 2° y otros parámetros operacionales, se realizó un análisis de varianza denominado “Anova” el cual utilizó una herramienta estadística para la determinación de la variable con mayor grado de incidencia al proceso de concentración, realizaron el análisis para cada variable de respuesta donde los resultados mostraron cambios significativos en los rangos probados, para el rendimiento de concentración.

La empresa minera reactivó la zona de concentración gravimétrica que ya había sido implementada hace un tiempo y con ello se logró aumentar la proporción de pesados en cada experimento.

Según este estudio y de acuerdo con la caracterización mineralógica y granulométrica del material de cabeza, se encontró una concentración de material fino inferior a 75 micras igual al 43% en peso encontrando: pirita, arsenopirita, esfalerita, calcopirita, etc.

## CAPÍTULO 2

### DESARROLLO EXPERIMENTAL

#### 2.1 Caracterización del material

El material que se utilizó en el desarrollo del presente trabajo de tesis fue tomado del Río León, ubicado en el cantón Oña, Provincia del Azuay, este material es de tipo aluvial y se tomaron diferentes muestras a lo largo de la orilla de río con la finalidad abarcar la mayor extensión posible.

El material recolectado fue arena de río, la cual contiene una alta cantidad de Óxido de Hierro ( $\text{FeO}$ ), la presencia de este óxido se puede comprobar en el sitio, incluso visualmente (ver figura 2.1), como una serie de franjas de color oscuro las cuales son altamente magnéticas (ver figura 2.2).



**Figura 2.1** Presencia de Óxido de Hierro en el lugar de toma de muestras.

**Fuente:** Elaboración propia



**Figura 2.2.** Propiedad magnética del FeO presente en las muestras tomadas.

**Fuente:** Elaboración propia

## 2.2 Selección del material

Luego de haber tomado las muestras en el sitio y debido a la humedad de las mismas se procedió a dejarlas secar al ambiente por varios días. Posterior a esto, como resultado de haber obtenido muestras de diferentes puntos, se observó que el material presentaba rocas de tamaño considerable en comparación a la arena de río, por lo cual con la ayuda de tamices se clasificó el material.



**Figura 2.3.** Primer tamizaje del material

**Fuente:** Elaboración propia



**Figura 2.4.** Material de desecho obtenido después del tamizaje

**Fuente:** Elaboración propia

### 2.3 Análisis granulométrico

Al constatar que el material producto del primer tamizaje aún tenía fragmentos gruesos que no podrían ser introducidos en los equipos, se decidió tamizar por segunda vez utilizando una máquina de vibración multinivel, en la cual se usaron 2 tipos de malla, la #10 (2 mm) que retuvo el material más grueso o de desecho y la #30 (0,6 mm), todo el material que pasó esta última malla fue utilizado para los ensayos de laboratorio.



**Figura 2.5** Máquina tamizadora de vibración

**Fuente:** Elaboración propia

## 2.4 Geología de la zona

En la zona de estudio predomina la formación Saraguro, la cual se caracteriza por ser una de las formaciones de más baja evolución ya que su tiempo de desarrollo ha sido relativamente muy corto o muy lento, forma un cubrimiento o manto volcánico que abarca extensas zonas de la zona sur ecuatoriana.

Aflora en los valles de terrenos, estratos de lava y piroclásticos que varían desde tobas de grano fino a conglomerados, pero lo más común es una toba masiva aglomerática amarilla en estratos de 50 a 100 m de espesor y que forman escarpas prominentes. Afloran también tobas arenosas, de grano fino con bandeamiento multicolor y lentes de conglomerado; así como también, ignimbritas (blanco – rosáceas) que varían en composición entre riolita y dacita, además de los materiales aluviales que conforman los cauces y terrazas de algunos drenajes de la zona, entre ellos se encuentra el Río León, sitio en donde se tomaron las muestras para el presente trabajo de tesis.



- MEDIO ALUVIAL, RÍOS
- MOLLISOLES, TOBAS DE GRANO FINO
- INCEPTISOLES, TEXTURA ARCILLOSA PIROCLÁSTICA
- ENTISOLES, FRANCO ARCILLOSO, TOBAS ARENOSAS

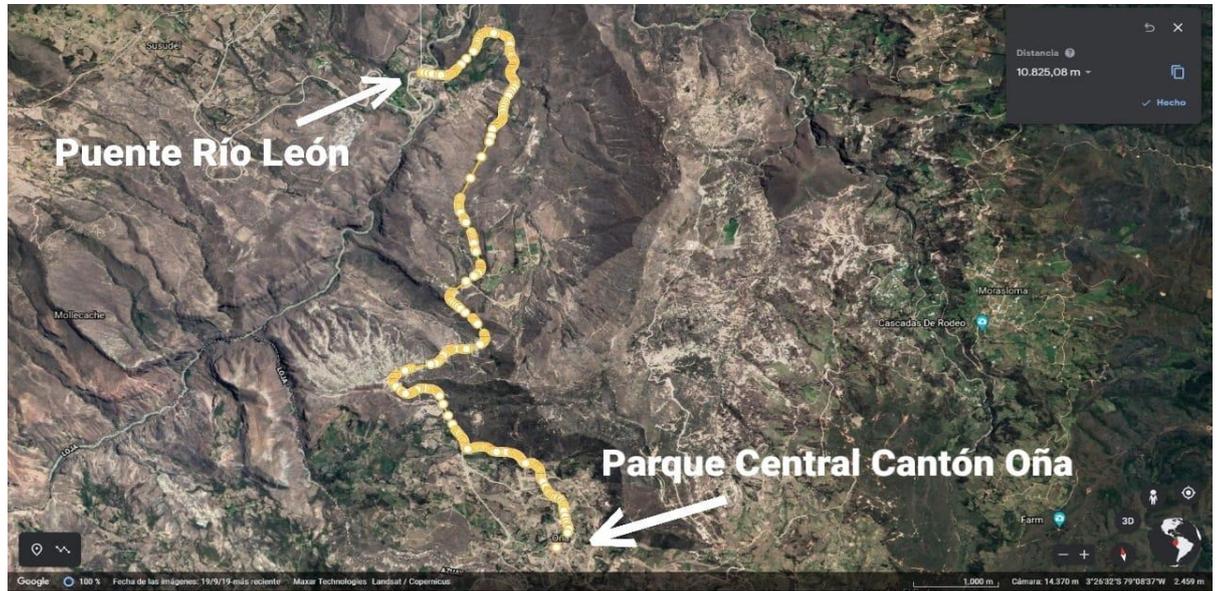
**Figura 2.6** Geología de la zona

**Fuente:** Elaboración propia (adaptado de: Geoportal SIG Tierras)

## 2.5 Georreferenciación del sitio de la toma de muestras

El puente Río León, se sitúa a una distancia de 10,82 km partiendo desde el parque central de la cabecera cantonal Oña, siguiendo la vía de concreto Panamericana en el sentido

Loja – Cuenca, esta vía es de primer orden, luego se debe realizar un descenso a pie de aproximadamente 150 m desde el puente hasta la orilla del río que es el lugar donde se puede divisar el material de interés.



**Figura 2.7** Recorrido desde la cabecera cantonal hasta el sitio de toma de muestras

**Fuente:** www.googleearth.com

## 2.6 Coordenadas del sitio de toma de muestras

### - Geográficas

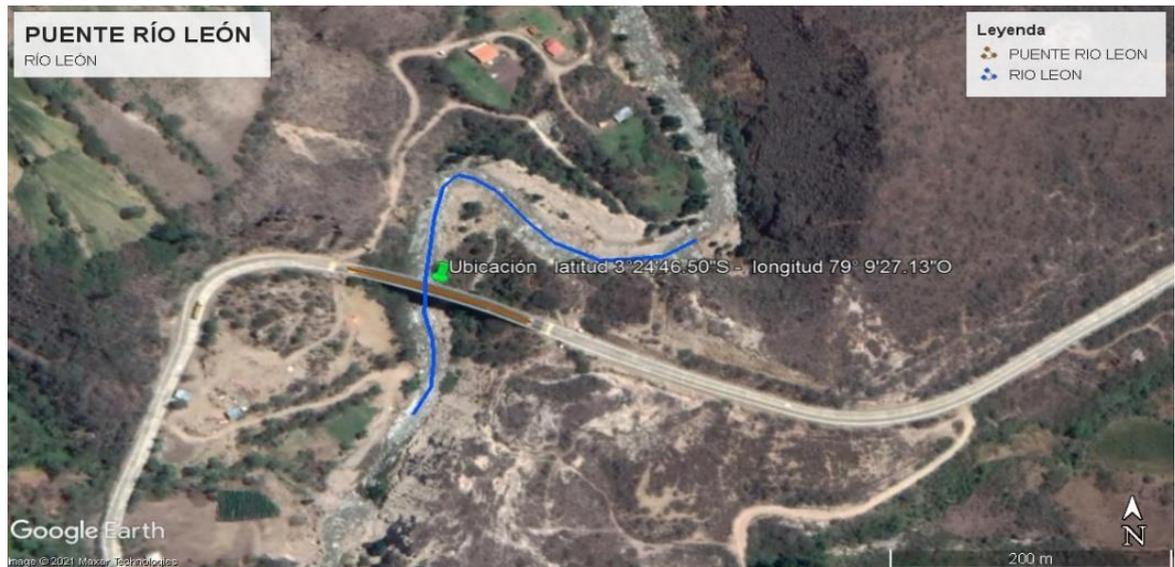
- Latitud 3° 24' 46.50" S
- Longitud 79° 9' 27.13" O

### - Sistema de coordenadas U.T.M

**DATUM: WGS 84**

**Zona 17 Sur**

- Este: 704694.2
- Norte: 9622569.7



**Figura 2.8** Coordenadas del sitio de toma de muestras

**Fuente:** SIG Tierras, GADMI Saraguro

## 2.7 Calibración de equipos e instrumentos

Antes de empezar con los ensayos de laboratorio, fue necesario verificar el funcionamiento y calibrar las distintas partes de los equipos a utilizar, con el fin de no tener ningún inconveniente durante el desarrollo de los experimentos.

### 2.7.1 Mesa vibratoria

Para la calibración de este equipo se realizó una preparación general, la cual incluyó la limpieza, lubricación, verificación del estado de las partes eléctricas y sistema de accionamiento, constatando que los mismos se encontraban en un buen estado.

El laboratorio de Ingeniería en Minas de la Universidad del Azuay cuenta con una mesa vibratoria tipo Deister en la cual se realizaron pruebas para determinar el mínimo y máximo ángulo de inclinación que puede alcanzar la mesa, para ello se comenzó con la mesa totalmente horizontal observando un ángulo de inclinación que dio como resultado  $0^\circ$  siendo este el valor más pequeño y al girar la perilla en su totalidad se obtuvo un ángulo de  $3,8^\circ$  el cual es el valor máximo de inclinación que puede alcanzar esta mesa.

Es necesario acotar que estas mesas poseen mecanismos que permiten variar algunos parámetros durante su funcionamiento, pero la inclinación longitudinal, fue el objetivo de la presente tesis.



**Figura 2.9** Mesa vibratoria calibrada

**Fuente:** Elaboración propia

### 2.7.2 Espiral

Para el caso de la espiral, se verificó principalmente el óptimo estado de funcionamiento de la bomba de recirculación, hidrociclón, mangueras, llaves de paso, manómetro y sistema de accionamiento.



**Figura 2.10** Calibración del tanque de alimentación de la espiral

**Fuente:** Elaboración propia

En el diseño de esta espiral, los tubos de salida de los productos finales son bastante cortos y se encuentran juntos, lo cual dificultó la recolección de los distintos materiales ya que se correría el riesgo de que se mezclen luego de concluir con la separación, por lo cual se instalaron tres tubos PVC a estas salidas para facilitar el trabajo (ver figura 2.11).



**Figura 2.11** Tubos PVC embonados en la salida de productos finales

**Fuente:** Elaboración propia

### 2.7.3 Equipos auxiliares

Los equipos auxiliares no requirieron mayor calibración, pues todos estaban listos y en condiciones óptimas para su uso, dichos equipos se describen a continuación:

- Máquina tamizadora de vibración multinivel.
- Picnómetro.
- Balanza electrónica.
- Bandejas plásticas y metálicas.
- Horno.



**Figura 2.12** Equipos Auxiliares

**Fuente:** Elaboración propia

## 2.8 Determinación de parámetros operacionales

Se debe tener en cuenta que en el caso de la mesa vibratoria se varió el ángulo de inclinación y para la espiral la cantidad de agua. Sin embargo, se mantuvo en ambos equipos la misma fracción de sólidos.

### 2.8.1 Mesa vibratoria

- **Consumo de agua.-** Para este equipo, se realizó una prueba previa de cuanto es el volumen de agua por minuto, para esto se utilizó un cronómetro dando como resultado un consumo de 15 l/min con la llave abierta a la mitad y un consumo de 32 l/min con la llave abierta en su totalidad, por lo cual, con la finalidad de ahorrar la mayor cantidad de agua posible se decidió trabajar con un volumen de agua de **15 litros/minuto**, siendo esta una cantidad suficiente para el óptimo funcionamiento del equipo y para las características de la mena a utilizar.
- **Ángulos de inclinación.** - Como se indicó anteriormente, la mesa vibratoria presenta ángulos que van desde los 0° hasta los 3,8°; Es por ello, que se realizaron 3 ensayos experimentales con un ángulo de **1°, 2° y 3°** de inclinación.

### 2.8.2 Espiral

- **Cantidad de agua (Q).** - En este tipo de espiral, la cantidad de agua a utilizar se puede visualizar en las líneas que van marcadas en el interior del tanque de recirculación, las mismas que van desde 15 litros (consumo mínimo promedio) hasta 150 litros. Para conocer la cantidad de agua a utilizar en los ensayos se tomó en cuenta el mayor peso de alimentación y el consumo mínimo promedio, por lo tanto, se utilizaron **20 litros, 30 litros, y 40 litros** respectivamente para cada ensayo.

### 2.8.3 Densidad de la muestra

La densidad de la mena se determinó utilizando el método del picnómetro, la misma se estableció en:

- Volumen = 0,8 cm<sup>3</sup>
- Peso de la muestra = 2 gramos

$$\delta = 2500 \text{ kg/m}^3$$

## Cálculo de pulpa y alimentación

### Volumen de líquido (H<sub>2</sub>O) a utilizar

$$V = \frac{15 \text{ kg H}_2\text{O}}{997 \text{ kg/m}^3}$$

$$V = 0,015 \text{ m}^3$$

### Masa respecto al volumen de agua

$$M = (2500 \text{ kg/m}^3) * (0,015 \text{ m}^3)$$

$$M = 37,5 \text{ kg}$$

### 2.8.4 Fracción de sólidos

Según (Merchán & Monsalve, 2019), al realizar un experimento de práctica utilizando una fracción de sólidos del 30% y 40%, el experimento fracasó en su totalidad, debido a la densidad alta del material y al exceso de material de alimentación lo que causó un colapso en el equipo.

Dados estos antecedentes y considerando que la densidad del material a estudiar también es relativamente alta, y con la finalidad de no causar ningún tipo de daño en el equipo, ni inconvenientes en los experimentos, se decidió trabajar con fracciones de sólidos al 10%, 15%, 20% y 25%, cuyos cálculos se muestran a continuación:

### Pesos de alimentación

$$\phi S = \frac{Ps}{Ps + Pl} \quad (13)$$

$\phi S$  = Fracción de sólidos

$Ps$  = Peso del sólido

$Pl$  = Peso del líquido

$$Ps + Pl = 37,5 \text{ kg}$$

$$\phi S = \frac{Ps}{37,5 \text{ kg}}$$

$$Ps = (\phi S) * (37,5 \text{ kg})$$

10%

***Ps = 3,75 kg***

15%

***Ps = 5,62 kg***

20%

***Ps = 7,5 kg***

25%

***Ps = 9,37 kg***

## 2.9 Desarrollo de ensayos experimentales

Antes de iniciar con los experimentos de laboratorio se procedió a pesar las diferentes cantidades de alimentación.



**Figura 2.13** Pesaje de la alimentación

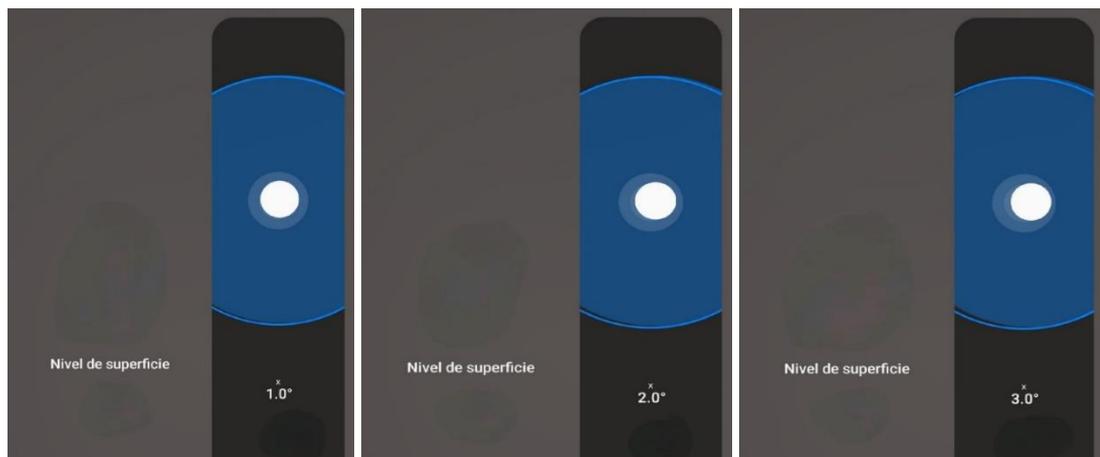
**Fuente:** Elaboración propia

### 2.9.1 Ensayos en la mesa vibratoria

Con el equipo ya calibrado, lo primero fue fijar los ángulos de inclinación correspondientes (ver figura 2.14), para luego proceder a realizar uno a uno los ensayos. Para ello, se enciende el motor que permite la vibración de la mesa, y se abre la llave del agua de lavado a la mitad para obtener el consumo de 15 li/min que se fijó.

Luego se procedió a verter poco a poco, pero continuamente la alimentación en la parte alta de la mesa para que con la ayuda de la corriente de agua, se forme una pulpa que se desplazó hacia la base de la mesa en donde los rifles realizaron la separación de los materiales.

Cuando se terminó de verter el alimento se superviso en todo momento para constatar que no haya quedado material en la celda de alimentación y tampoco en la base de la mesa, al final, luego de cerrar la llave del agua de lavado se verifica que los materiales se hayan depositado en las tres salidas o desfogues existentes.



**Figura 2.14** Fijación de la mesa vibratoria a 1°, 2° y 3° de inclinación

**Fuente:** Elaboración propia



**Figura 2.15** Desarrollo de ensayos experimentales en la mesa vibratoria

**Fuente:** Elaboración propia

### 2.9.1.1 Variables de operación

Se realizaron en total 12 experimentos en la mesa vibratoria, 4 para cada ángulo de inclinación con las fracciones de sólidos ya calculadas anteriormente, los parámetros de cada ensayo se muestran en la tabla 2.1:

**Tabla 2.1** Variables de operación en los ensayos de la mesa vibratoria

<b>Mesa Vibratoria</b>				
<b>Ángulo de inclinación</b>	<b>Fracción de sólidos</b>			
	10%	15%	20%	25%
1°	3,75 kg	5,62 kg	7,5 kg	9,37 kg
2°	3,75 kg	5,62 kg	7,5 kg	9,37 kg
3°	3,75 kg	5,62 kg	7,5 kg	9,37 kg

**Fuente:** Elaboración propia

A medida que se fueron realizando los experimentos se pudo observar que mientras mayor era el ángulo de inclinación se obtenía una separación más limpia y esto se debe a la

marcada diferencia de densidades que componen la mena que se utilizó, por lo cual con una inclinación más pronunciada las partículas más livianas sufren una mayor incidencia por la vibración generada por la mesa y permite que sobrepasen más fácilmente las partículas por los rifles, mientras que las partículas pesadas quedan atrapadas en la parte inicial de los rifles y poco a poco forman una corriente en la cual se encuentra el material de interés es decir el material más denso.

Para asegurar la efectividad del proceso es muy importante tener en cuenta que la cantidad de alimentación que se deposite en la celda no sea demasiada, teniendo en cuenta que el porcentaje de sólidos en la pulpa debe ser lo suficientemente bajo para permitir la estratificación y dilatación del material al ingresar a los rifles y recordando que el tamaño de los materiales que se pueden tratar en una mesa se da en función del volumen de agua y del movimiento de la mesa.

### **2.9.2 Ensayos en la espiral**

Con el equipo calibrado se procedió a realizar uno a uno los experimentos, se inició fijando la cantidad de agua definida para cada ensayo y luego de encender la bomba se empezó a depositar poco a poco el alimento, también se hizo uso del hidrociclón con la finalidad de homogenizar la pulpa. Finalmente con la pulpa recirculada y homogenizada se procedió a cerrar la llave de paso del hidrociclón e inmediatamente abrir la llave de paso de la tubería que conduce la pulpa desde el tanque de alimentación hasta el canal de la espiral que es el lugar donde se produce la separación de materiales.

En la espiral también se requiere una constante supervisión del equipo luego de que los materiales finales se empiecen a depositar, ya que el tanque de alimentación no puede quedar vacío o sin agua, ya que esto produciría un daño en la bomba de recirculación. Al final, como también se indicó en el caso de la mesa, se debe esperar a que los materiales se terminen de depositar en los diferentes recipientes, terminando así con el proceso de separación.



**Figura 2.16** Canales helicoidales realizando la separación de materiales

**Fuente:** Elaboración propia

### 2.9.2.1 Variables de operación

Tal como en la mesa vibratoria, en la espiral también se realizaron 12 experimentos, solo que en este se varió el caudal de agua, que es el factor que se varió en este equipo, los parámetros operacionales se muestran a continuación:

**Tabla 2.2** Variables de operación en los ensayos de la espiral

<b>Espiral</b>				
<b>Cantidad de agua (Q)</b>	<b>Fracción de sólidos</b>			
	10%	15%	20%	25%
20 litros	3,75 kg	5,62 kg	7,5 kg	9,37 kg
30 litros	3,75 kg	5,62 kg	7,5 kg	9,37 kg
40 litros	3,75 kg	5,62 kg	7,5 kg	9,37 kg

**Fuente:** Elaboración propia

Al finalizar los experimentos se obtuvo una clasificación según: la densidad, la pulpa que ingresó al equipo y a la fuerza centrífuga la cual se debe a la forma de la espiral.

El material más liviano fue llevado inmediatamente por el empuje haciendo que el material se dirija hacia la periferia del equipo, por otro lado, el material de mayor densidad o más pesado fue llevado a un sitio cercano a la columna central, esto se debe a que dicho material experimenta una menor velocidad tangencial.

Previo a la recuperación en cada uno de los experimentos es necesario indicar que luego de que cada equipo termino el trabajo de separación se obtuvieron, en casi todos los ensayos, 3 productos finales que son: **material de densidad alta** (o material de interés), **material de densidad media** y **material de densidad baja** (relave).



**Figura 2.17** Productos finales obtenidos luego de los experimentos de laboratorio

**Fuente:** Elaboración propia

Los productos finales obtenidos se muestran en las siguientes tablas.

**Tabla 2.3** Productos finales obtenidos en la mesa vibratoria

<b>Mesa vibratoria</b>			
<b>1°</b>			
Fracción de sólidos	Productos finales		
	Densidad alta	Densidad media	Densidad baja
10%	✓	✓	✓
15%	✓	x	✓
20%	✓	x	✓
25%	✓	x	✓
<b>2°</b>			
10%	✓	✓	✓
15%	✓	✓	✓
20%	✓	✓	✓
25%	✓	✓	✓
<b>3°</b>			
10%	✓	✓	✓
15%	✓	✓	✓
20%	✓	✓	✓
25%	✓	✓	✓

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 2.4** Productos finales obtenidos en la espiral

<b>Espiral</b>			
<b>20 litros</b>			
Fracción de sólidos	Productos finales		
	Densidad alta	Densidad media	Densidad baja
10%	✓	✓	✓
15%	✓	✓	✓
20%	✓	✓	✓
25%	✓	✓	✓
<b>30 litros</b>			
10%	✓	✓	✓
15%	✓	✓	✓
20%	✓	✓	✓
25%	✓	✓	✓
<b>40 litros</b>			
10%	✓	✓	✓
15%	✓	✓	✓
20%	✓	✓	✓
25%	✓	✓	✓

Fuente: Elaboración propia

## 2.10 Cálculo de recuperación en cada ensayo

Para determinar este factor, se hizo uso de la siguiente fórmula:

$$R = \frac{C * Tc}{A * Ta} \quad (14)$$

Donde:

$R$  = Recuperación

$C$  = Concentrado

$Tc$  = Tenor de concentrado

$A$  = Alimento

$Ta$  = Tenor de alimento

**2.10.1 Concentrado:** Es el valor en peso de cada producto final con densidad alta, resultado de los experimentos de laboratorio, se expresa en kilogramos.

**2.10.2 Tenor de concentrado:** Estas cantidades se obtuvieron de forma manual. Se depositó cada uno de los concentrados obtenidos en un recipiente plástico, luego con la ayuda de un imán se procedió a revolver este material por unos minutos, de tal manera que el óxido de hierro o material de interés quedó adherido al imán, luego de que se verificó que se ha extraído todo el óxido se procedió a calcular el tenor de concentrado utilizando la siguiente fórmula:

$$Tc = \frac{\text{Peso FeO extraído}}{\text{Peso del concentrado}} \times 100 \quad (15)$$

**2.10.3 Alimento:** Es el valor en peso de la cantidad de material que entró a los equipos, la cual fue la misma para los ensayos de la mesa vibratoria y la espiral, estos pesos fueron:

- 10% - 3,75 kg
- 15% - 5,62 kg
- 20% - 7,50 kg
- 25% - 9,37 kg

**2.10.4 Tenor de alimento:** Al igual que con el tenor de concentrado, el tenor de alimento se determinó de forma manual, en este caso, se realizaron 3 experimentos con diferentes pesos, para luego sumar estos resultados y dividirlos para el número de experimentos, obteniendo así el tenor de alimento, se debe tener presente que este valor fue constante para todos los cálculos de recuperación.

$$Ta = \frac{\text{Peso FeO extraído}}{\text{Peso del material}} \times 100$$

**Tenor de alimento con un peso de 3 kg (Ta1)**

$$Ta1 = \frac{0,1129 \text{ kg}}{3 \text{ kg}} \times 100$$

$$Ta1 = 3,76$$

**Tenor de alimento con un peso de 4 kilogramos (Ta2)**

$$Ta2 = \frac{0,1397 \text{ kg}}{4 \text{ kg}} \times 100$$

$$Ta2 = 3,49$$

**Tenor de alimento con un peso de 5 kilogramos (Ta3)**

$$Ta3 = \frac{0,1927 \text{ kg}}{5 \text{ kg}} \times 100$$

$$Ta3 = 3,85$$

**Sumatoria**

$$Ta = \frac{Ta1 + Ta2 + Ta3}{3}$$

$$Ta = \frac{3,76 + 3,49 + 3,85}{3}$$

$$Ta = 3,7$$

**Tabla 2.5** Resultados de recuperación en la mesa vibratoria**Recuperaciones en mesa vibratoria**

Fracción de sólidos (%)	Alimento (kg)	Tenor de alimento (Ta)	Concentrado (kg)	Tenor de concentrado (Tc)	Recuperación (%)
<b>1°</b>					
10	3,75	3,7	0,040	60	<b>17,29</b>
15	5,62	3,7	0,13	56,15	<b>35,10</b>
20	7,5	3,7	0,060	46,66	<b>10,08</b>
25	9,37	3,7	0,310	32,90	<b>29,41</b>
<b>2°</b>					
10	3,75	3,7	0,31	32,25	<b>72,05</b>
15	5,62	3,7	0,080	22,5	<b>8,65</b>
20	7,5	3,7	0,30	80	<b>86,48</b>
25	9,37	3,7	1,13	28,31	<b>92,27</b>
<b>3°</b>					
10	3,75	3,7	1,57	6,05	<b>68,45</b>
15	5,62	3,7	0,54	16,66	<b>43,26</b>
20	7,5	3,7	2,46	11,09	<b>98,31</b>
25	9,37	3,7	3,62	8,83	<b>92,19</b>

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 2.6** Resultados de recuperación en la espiral**Recuperaciones en la espiral**

Fracción de sólidos (%)	Alimento (kg)	Tenor de alimento (Ta)	Concentrado (kg)	Tenor de concentrado (Tc)	Recuperación (%)
<b>20 litros</b>					
10	3,75	3,7	0,35	35,71	<b>90,07</b>
15	5,62	3,7	0,48	41,66	<b>96,16</b>
20	7,5	3,7	0,57	26,31	<b>54,04</b>
25	9,37	3,7	0,67	8,50	<b>16,42</b>
<b>30 litros</b>					
10	3,75	3,7	0,11	81,81	<b>64,85</b>
15	5,62	3,7	0,080	71,25	<b>27,41</b>
20	7,5	3,7	0,14	83,57	<b>42,16</b>
25	9,37	3,7	0,15	92	<b>39,80</b>
<b>40 litros</b>					
10	3,75	3,7	0,13	90,76	<b>85,03</b>
15	5,62	3,7	0,29	71,03	<b>99,06</b>
20	7,5	3,7	0,33	58,18	<b>69,18</b>
25	9,37	3,7	0,36	91,66	<b>95,17</b>

Fuente: Elaboración propia

## CAPÍTULO 3

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 3.1 Interpretación de resultados de los ensayos de laboratorio

Para el presente trabajo de tesis se realizaron 24 experimentos en el laboratorio, de los cuales 12 se desarrollaron en la mesa vibratoria, variando el ángulo de inclinación en 1°, 2° y 3°, manteniendo constantes los demás parámetros operacionales en todos los ensayos; y 12 experimentos más en la espiral, en este caso, variando el consumo de agua en 20, 30 y 40 litros y de igual forma manteniendo constantes los demás parámetros de operación.

La finalidad del trabajo de laboratorio fue obtener un producto final denominado “concentrado” para cada experimento, dicho concentrado permitió determinar la recuperación en cada ensayo y la cantidad de óxido de hierro (FeO) obtenido luego de cada proceso de concentración.

El análisis y la interpretación de los resultados de cada equipo se expondrán a continuación.

#### 3.2 Resultados en la mesa vibratoria

De acuerdo a la tabla 2.5 de los resultados de recuperación, con una inclinación de 3°, un consumo promedio de agua de 15 l/min y una fracción de sólidos al 20% la cual representa 7,5 kg de peso de alimentación, la mayor recuperación que se obtuvo en este equipo fue del 98,31 %.

La calidad de separación bajo estos parámetros operacionales se muestra en la figura 3.1, en la cual se puede evidenciar claramente la separación, el material o la franja de color negro representa el óxido de hierro (FeO) el cual posee una alta densidad y es el material de interés, mientras que el resto del material de color amarillo oscuro representa la ganga o material de desecho el cual posee una densidad mucho menor que la del concentrado.



**Figura 3.1** Limpieza de separación en la mesa vibratoria con 3° de inclinación

**Fuente:** Elaboración propia

Por otro lado, con una inclinación de 2°, la misma cantidad de agua y una fracción de sólidos al 15 % con 5,62 kg en peso de alimentación, se obtuvo la recuperación más baja con un valor del 8,65%. En este caso no se pudo evidenciar la separación, la cual fue muy deficiente, por lo cual no hubo diferencia entre el material que ingresó al alimento y el que se depositó finalmente en el concentrado (ver figura 3.2).



**Figura 3.2** Separación deficiente utilizando un ángulo de 2° de inclinación

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.3 Resultados en la espiral

De la misma forma, basándonos en la tabla 2.6 de resultados, con un consumo de agua de 40 litros y una fracción de sólidos al 15% la cual representa 5,62 kg en peso de alimento, se obtuvo la mayor recuperación utilizando este equipo, la cual fue de 99,06 % y este valor también representa la mayor recuperación de todos los ensayos de laboratorio, incluyendo la mesa vibratoria.

Para el caso de la espiral no fue posible observar la calidad de separación durante el proceso, esto debido a que esta separación ocurre en los canales helicoidales, los cuales se encuentran ubicados en la parte alta y las llaves de paso, las cuales requieren una constante supervisión del operador, se encuentran en la parte baja del equipo.

Se pudo obtener una imagen la cual fue tomada en el momento exacto en donde el material empieza a descender por la canaleta, en el segundo nivel de esta parte helicoidal se puede evidenciar como el material de mayor densidad (franja de color negro) empieza a dirigirse hacia la parte céntrica de la canaleta, mientras que el material menos denso es llevado hacia la pared del canal por la corriente de agua, ocurriendo así la separación.



**Figura 3.3** Visibilidad de la separación en la espiral

**Fuente:** Elaboración propia

Y la recuperación más baja en este equipo se obtuvo con un consumo de 20 litros de agua y una fracción de sólidos al 25% que representa un peso de 9,37 kg en peso de alimentación, dando como resultado una recuperación de 16,42 %.

### 3.4 Tablas de los resultados

Las tablas con las máximas y mínimas recuperaciones descritas anteriormente se muestran a continuación:

**Tabla 3.1** Mínima y máxima recuperación en la mesa vibratoria

<b>Mesa vibratoria</b>				
<b>Ángulo de inclinación</b>	<b>Fracción de sólidos</b>	<b>Peso de alimento</b>	<b>Recuperación mínima</b>	<b>Recuperación máxima</b>
2°	15 %	5,62 kg	8,65 %	-
3°	20 %	7,5 kg	-	98,31 %

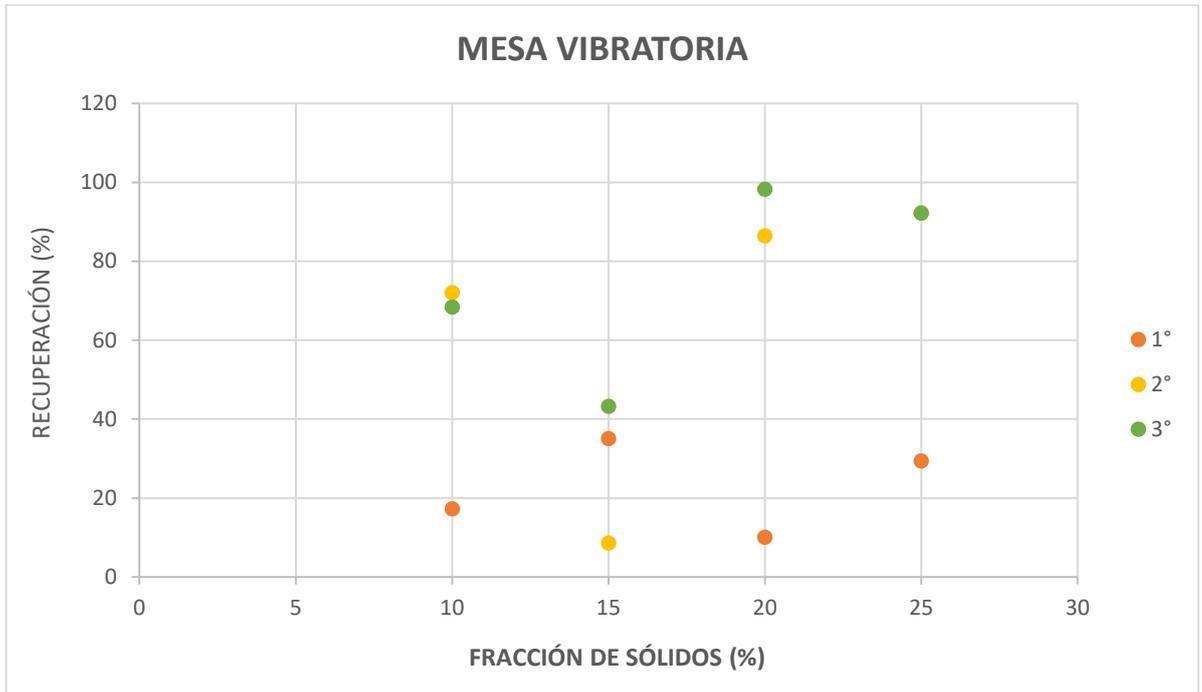
**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 3.2** Mínima y máxima recuperación en la espiral

<b>Espiral</b>				
<b>Caudal</b>	<b>Fracción de sólidos</b>	<b>Peso de alimento</b>	<b>Recuperación mínima</b>	<b>Recuperación máxima</b>
20 litros	25 %	9,37 kg	16,42 %	-
40 litros	15 %	5,62 kg	-	99,06 %

**Fuente:** Elaboración propia

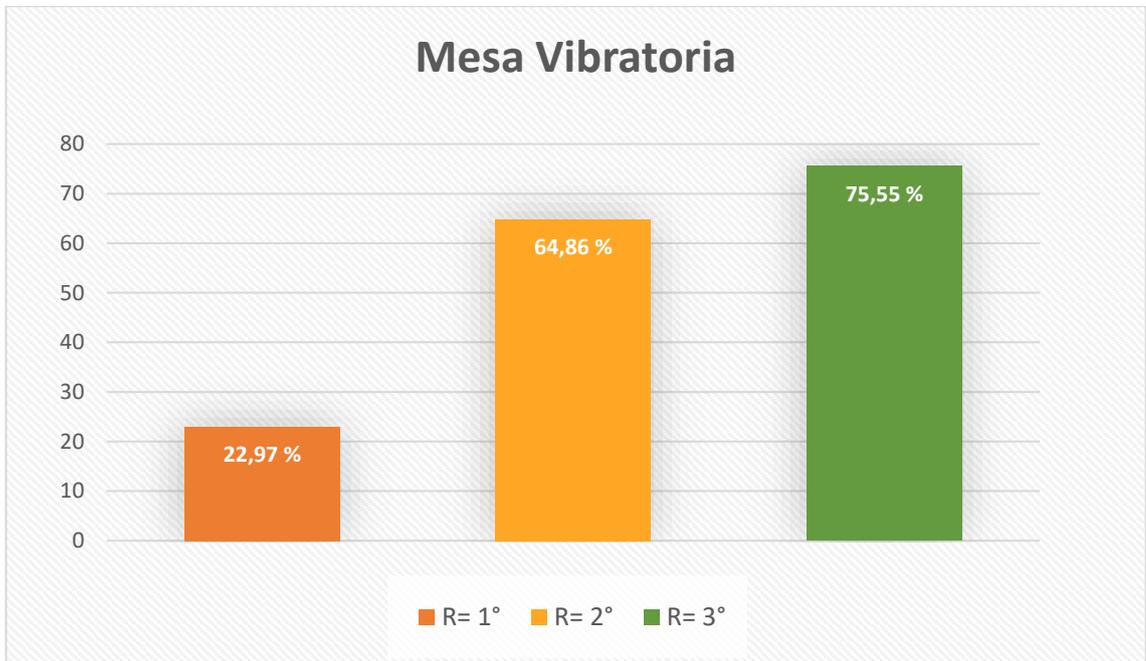
### 3.5 Gráficas de los resultados



**Gráfica 3.1** Recuperación en mesa vibratoria

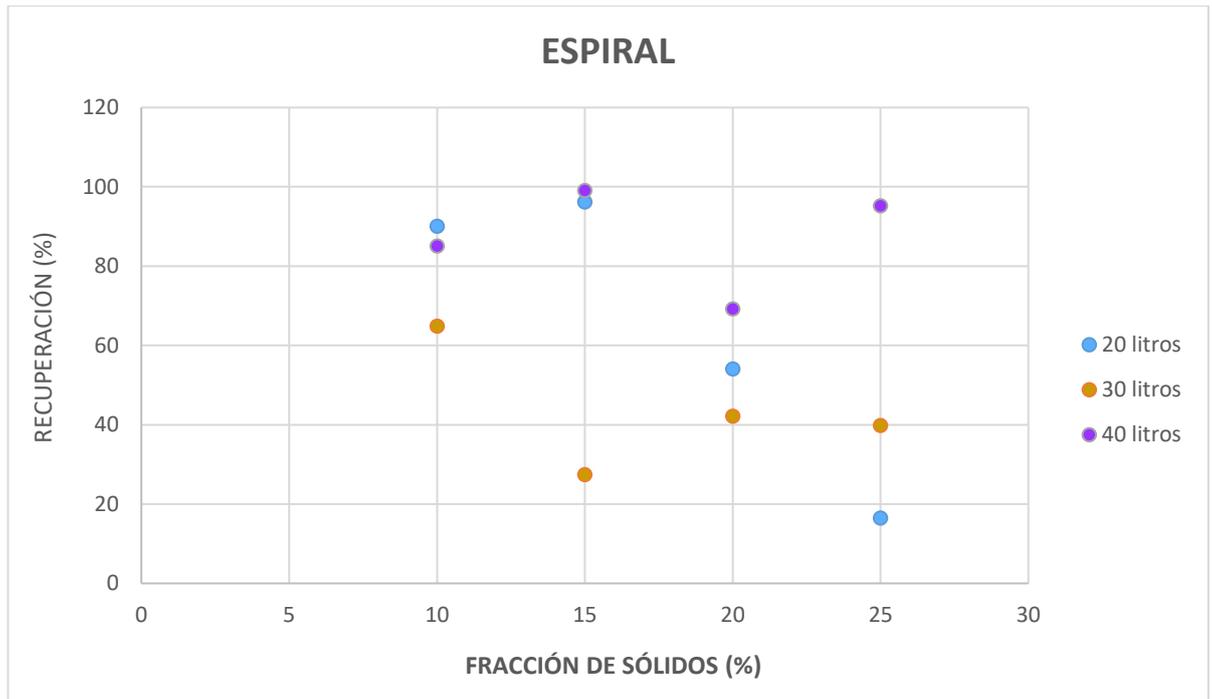
**Fuente:** Elaboración propia

### 3.6 Recuperación promedio



**Gráfica 3.2** Recuperaciones promedio resultado de los ensayos en la mesa vibratoria

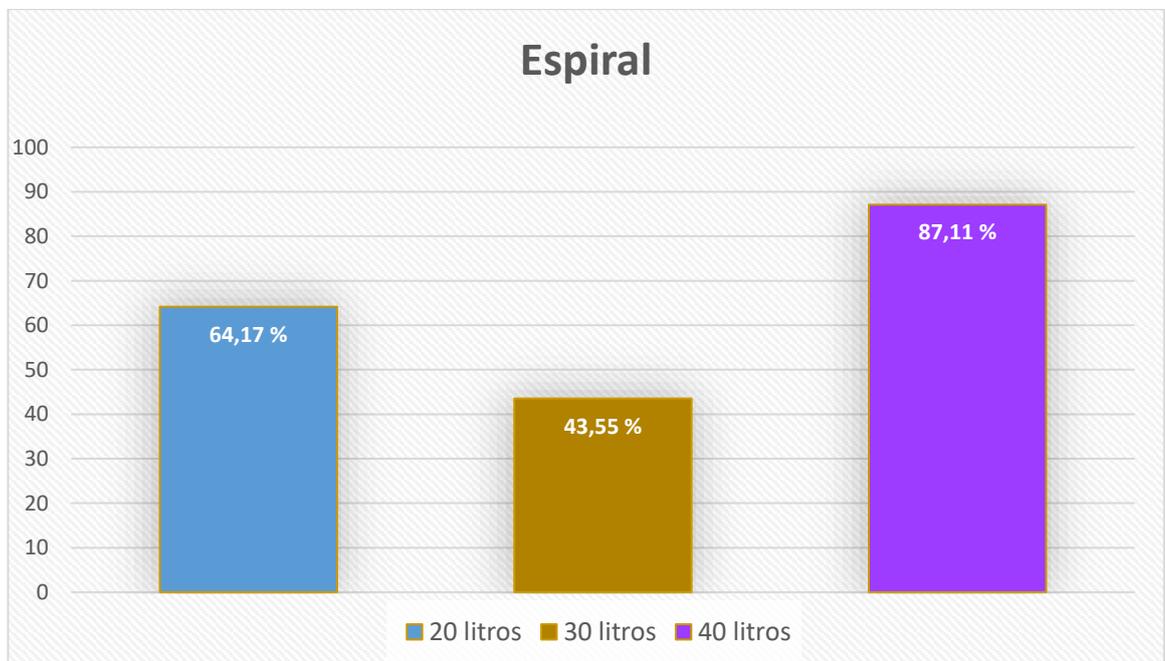
**Fuente:** Elaboración propia



**Gráfica 3.3** Recuperación en la espiral

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.7 Recuperación promedio



**Gráfica 3.4** Recuperaciones promedio resultado de los ensayos en la espiral

**Fuente:** Elaboración propia

### **3.8 Discusión de resultados**

#### **Mesa vibratoria**

Luego de haber realizado la totalidad de los ensayos experimentales en el laboratorio y conociendo los resultados de cada recuperación, se puede analizar y discutir la calidad de cada uno de los valores de concentración obtenidos y de esta manera poder elegir los parámetros operacionales óptimos con los cuales se obtuvo la mejor recuperación.

En cuanto a la mesa vibratoria, los valores de recuperación más bajos se obtuvieron cuando el equipo fue configurado a 1° de inclinación, en el cual, se pudo observar una deficiente separación de materiales y por consiguiente una recuperación muy baja, la cual en promedio fue del 22,97 %.

Con la mesa calibrada a 2° de inclinación, se alcanzó una recuperación relativamente buena, en donde en el momento de la separación ya se podía evidenciar el mineral de interés del resto de material, con este ángulo se obtuvo un valor promedio de 64,86 %

Por otro lado, la recuperación más alta obtenida en este equipo se logró al configurar la mesa con un ángulo de inclinación de 3° el cual dio como resultado, un valor máximo de 98,31 % y en promedio una recuperación del 75,55 %.

Como ya se indicó anteriormente, la densidad del óxido de hierro es de 5,24 g/cm<sup>3</sup> mientras que la densidad de la sílice (que es lo que contiene la arena de río casi en su totalidad) es de 2,65 g/cm<sup>3</sup>. Esta notable diferencia de densidades fue aprovechada por la mesa vibratoria en la cual el material más liviano se dirige al depósito final del relave, mientras que las partículas más pesadas quedan atrapadas entre los rifles y son llevadas por la corriente de agua al lugar de depósito del concentrado.

#### **Espiral**

En lo que concierne a este equipo el valor más bajo en cuanto a recuperación se obtuvo con un consumo de agua de 30 litros, dando como resultado una recuperación promedio de 43,55 %, en este caso, al igual que en la mesa, la recuperación fue deficiente y el material de interés se depositó en las 3 salidas de los productos finales.

Con un consumo de agua de 20 litros la recuperación mostró un aumento, con un valor del 64,17 %, pero se pudo evidenciar que la cantidad de agua no era la indicada, pues la pulpa presentó algo de dificultad para descender por las canaletas.

De la misma forma la mayor cantidad de recuperación obtenida se dio con un consumo de agua de 40 litros, dando un valor máximo de recuperación de 99,06 % y en valor promedio 87,11 %. Se debe resaltar que se pudo evidenciar durante el proceso que el producto final de densidad alta o material de interés salía mucho más limpio que en la mesa vibratoria (ver figura 3.4).



**Figura 3.4** Pureza del material de alta densidad que obtuvo la mejor recuperación

**Fuente:** Elaboración propia

Nuevamente, la diferencia de densidades jugó un papel muy importante en la obtención de los resultados favorables en la espiral, una vez que el material empezó a descender por los canales helicoidales la corriente de agua hacía, que los materiales de la pulpa se empiecen a separar.

De acuerdo a lo expuesto, existen resultados que varían mucho con relación a los demás, es el caso del ensayo en la mesa vibratoria a 2° con 15% de fracción de sólidos en el cual se obtuvo una recuperación del 8,65 % siendo este un valor incongruente en relación a los otros tres ensayos con esta inclinación, los cuales no varían de forma significativa entre sí.

Así mismo, en la espiral, con un consumo de agua de 20 litros y una fracción de sólidos al 25% se obtuvo una recuperación del 16,42 %, cantidad que no tiene relación con los demás resultados obtenidos bajo estos parámetros.

Los demás resultados obtenidos, independientemente de si son altos o bajos, se consideran coherentes tomando en cuenta la tendencia de recuperación en cada grupo de experimentos tanto en la mesa vibratoria como en la espiral.

### 3.9 Equipo y variable óptima para la recuperación gravimétrica

Como punto final, y en consecuencia del análisis de los resultados producto del trabajo realizado en el laboratorio, en el cual se hizo una comparación de procesos entre dos equipos, los cuales son la mesa vibratoria y la espiral, mismos que utilizan la fuerza de la gravedad para realizar la separación mineral, se puede determinar con que equipo y bajo qué parámetros operacionales se obtuvo la mayor recuperación de Óxido de Hierro (FeO), resultado que se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 3.3** Características de la mejor recuperación obtenida

<b>MEJOR RECUPERACIÓN OBTENIDA</b>				
<b>Equipo</b>	<b>Parámetros operacionales</b>			<b>Recuperación</b>
Espiral	Consumo de agua (Q)	Fracción de sólidos ( $\phi$ s)	Alimento (kg)	<b>99,06 %</b>
	40 litros	15 %	5,62 kg	

**Fuente:** Elaboración propia

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

- Una de las principales propiedades del Óxido de Hierro (FeO), que fue el material de interés en el presente trabajo de tesis, es un mineral altamente paramagnético, lo cual significa que es influenciado o atraído por cualquier tipo de campo magnético, y esta fue la principal razón por la cual se hizo uso de un imán para extraer dicho mineral de los concentrados resultado del proceso, ya que al realizar esto se obtuvo únicamente el material que nos interesa concentrar, lo cual fue una gran ventaja, dando como resultado valores más confiables.
- La concentración gravimétrica se denota como un método aceptablemente eficaz para la obtención de minerales de interés, partiendo de la condición de que los materiales que conforman la mena, deben tener densidades con una diferencia considerable, esto con la finalidad de que los equipos puedan aprovechar la fuerza de la gravedad durante el proceso de separación.
- Para el caso de la mesa vibratoria, a 1° se evidenció que por la vibración del equipo el material no se separaba sino por el contrario se homogenizaba y de esta forma llegaba a los depósitos finales; luego de ser secado, se comprobó que el material de interés se encontraba en los 3 productos finales, por tal motivo se considera una concentración deficiente.
- A una inclinación de 3° se constató que la separación era muy efectiva, esto debido a que, con esta inclinación, el material de menor densidad o más liviano salta fácilmente los rifles de la mesa por acción del golpeteo y es llevado hacia un costado de la mesa hasta depositarse en los productos finales de densidad baja, mientras que el material de interés o de densidad alta, por ser más pesado queda atrapado entre los rifles y es arrastrado por el agua de lavado hasta los depósitos finales del concentrado.
- En cuanto a la espiral, con un consumo de agua de 40 litros se obtuvo la mayor recuperación de todos los experimentos realizados. En este equipo la velocidad de la corriente de agua que se produce, cuando esta empieza a descender por los

canales helicoidales, contribuye a que se produzca una mejor separación entre el material liviano y el pesado, lo cual explica que la mayoría de resultados obtenidos hayan sido favorables. La cantidad de agua también es un factor primordial en la espiral y estableciendo una relación, se determinó que una medida propicia entre peso y consumo sería de 1:8, esto significa que la mejor recuperación obtenida se consiguió con un consumo de 8 litros agua por cada kilogramo de alimentación.

- En el presente trabajo de tesis se ha realizado un análisis cualitativo, mediante un método físico en el cual se aprovechó una propiedad diferencial que es la susceptibilidad magnética del material.
- El uso de equipos de concentración gravimétrica abre la posibilidad de crecimiento a las pequeñas empresas mineras, pues se utilizan equipos de un valor económico accesible, los cuales no utilizan mucho espacio ni requieren el empleo de reactivos químicos, lo que además los hace ambientalmente amigables pues también el agua que se requiere para el proceso puede ser reutilizada.
- De acuerdo a la tesis de (Merchán & Monsalve, 2019), en concentración de oro aluvial, obtuvieron una recuperación del 99 % en mesa vibratoria y del 81,2 % en espiral, lo cual ratifica los resultados obtenidos en este trabajo, ya que las recuperaciones resultantes se asemejan en ambos casos, por lo cual se concluye que los equipos antes mencionados son válidos y eficaces como una opción para desarrollar procesos de concentración mineral.

## Recomendaciones

- La calibración y configuración de los equipos se debe realizar de la manera más exacta posible, de acuerdo a los parámetros planteados al principio del trabajo, con el fin de evitar resultados incongruentes luego de realizar los experimentos; también se sugiere realizar una o dos pruebas previas con cada uno de los equipos, antes de empezar con los ensayos, para constatar que estén funcionando de manera óptima.
- En el momento en el que los equipos estén en funcionamiento, se requiere una constante y estricta supervisión de los mismos, ya que se debe controlar el paso del agua de lavado para así no utilizar más de la necesaria y vigilar los recipientes en donde se depositarán los materiales finales, para así evitar pérdidas por derrames. Para el caso de la espiral es muy importante tener en cuenta que en el momento de vaciar el tanque de alimentación se debe estar pendiente de que este tanque no quede sin agua, ya que si esto ocurre la bomba de recirculación se tapa ocasionando posibles daños en el equipo.
- Como recomendación para futuros posibles trabajos, con características similares, se puede considerar la reutilización del agua para todos los experimentos y determinar si este factor influye de alguna manera en los resultados que se obtendrán debido a la presencia de algún tipo de partículas. También se puede tener en cuenta la variación de otros parámetros como la frecuencia de golpeteo en el caso de la mesa vibratoria o la presión de agua en la espiral, esto disminuyendo o aumentando las unidades del manómetro.
- La alimentación constante sugerida para los ensayos es difícil de lograr, esto se debe principalmente al propio peso del material, sumado a que además de alimentar el equipo se debe vigilar los demás parámetros, por lo cual es necesario la implementación de una tolva la cual facilitaría la distribución correcta del alimento cuando este ingrese al equipo y así obtener resultados aún más exactos.

- Se recomienda un análisis más a fondo de los valores obtenidos que presentaron una variación al ser considerablemente bajos, y en qué medida pueden afectar o beneficiar a los resultados el realizar la toma de muestras en diferentes puntos; pues se presume que dichos resultados con valores bajos se pueden deber a que al realizar los ensayos de laboratorio, estas muestras correspondían a un sitio en donde la presencia de mineral de interés es mínima.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 911, C. M. (2012). Mesa Wilfley De Laboratorio Por Concentración Gravimétrica. Obtenido de [www.911metallurgist.com](http://www.911metallurgist.com)
- Aguilar, K. d. (2014). Mejoramiento y simulación de una planta de recuperación de oro por concentración gravimétrica, flotación y cianuración. Repositorio digital EPN - Escuela Politécnica Nacional. Obtenido de: [bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/7394/1/CD-5550.pdf](http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/7394/1/CD-5550.pdf)
- Alcalá Cruz, E. B., Flores Corrales, A., & Beltrán Alfonso, A. (2012). Manual de entrenamiento en concentración de minerales. Obtenido de: [es.scribd.com/document/35058579/MANUAL-DE-ENTRENAMIENTO-EN-CONCENTRACION-DE-MINERALES-I](https://es.scribd.com/document/35058579/MANUAL-DE-ENTRENAMIENTO-EN-CONCENTRACION-DE-MINERALES-I)
- Auris, N., Mesa, G., Londoña, L., Núñez, B., Ore, C., Rondon, M., & Vargas, W. (2013). Concentración De Minerlas En Espirales Humphrey .
- Barco Ríos, H., Rojas Calderón, E., & Restrepo Parra, E. (2012). Principios de Electricidad y Magnetismo. Obtenido de: <http://www.bdigital.unal.edu.co/45116/1/9789587612837.pdf>
- Bustamante, O., Gaviria, C., & Restrepo, O. (2008). Concentración De Minerales . Medellín: CIMEX.
- Carvajal, D., & Chávez, A. (2015). Estudio Del Concentrador Gravimétrico Helicoidal Hecho Con Fibra De Vidrio Y Sus Parámetros De Funcionamiento. Arequipa. Obtenido de <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/122/B2-M-18187.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Corp, 9. M. (2012). Mesa Wilfley De Laboratorio Por Concentración Gravimétrica. Obtenido de [www.911metallurgist.com](http://www.911metallurgist.com)
- Fueyo, L., Gómez, D., & Rodríguez, A. (2012). Separación Hidráulica Mediante Equipos De Aceleración Diferencial Aplicada Al Sector De Los Residuos De

Construcción Y Demolición (RCD). Boletín Geológico Y Minero , 10.  
Obtenido de [http://web.igme.es/Boletin/2012/123\\_2/7\\_ARTICULO%206.pdf](http://web.igme.es/Boletin/2012/123_2/7_ARTICULO%206.pdf)

Kelly, E. G., & Spottiswood, D. J. (1990). Introducción al procesamiento de minerales.  
México: Limusa.

Maistri. (1993).

Merchán, F., & Monsalve, F. (2019). Flujograma Para Concentración De Oro Aluvial,  
Mediante Utilización De Jig, Espiral Y Mesa Vibratoria. Cuenca-Ecuador.  
Obtenido de <http://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/8955/1/14600.pdf>

Pavez, O. (2005). Concentración Gravimétrica De Minerales. Atacama-Chile.  
Obtenido de <https://es.scribd.com/document/369403675/01-Concentracion-Gravimetrica-pdf>

Rivera, C. (2017). Optimización De Concentración Gravimétrica De Oro En La Mesa  
Vibratoria De La Mina "Vicentina". Cuenca-Ecuador .

Shubert, H. (1987). Tratado De Procesamiento De Minerales I. La Paz-Bolivia :  
Ministerio De Enseñanza Superior Y Especializada .

Spottiswood, R. (1990). Introducción Al Procesamiento De Minerales . México D.F:  
LIMUSA.

Valdivieso, A. L., Amaya Ibarra, A., Olivia Rangel, S., & Reyes Bahena, J. L. (1999).  
Concentración Gravimétrica Centrífuga. Obtenido de:  
[http://www.metsoendress.com/miningandconstruction/mct\\_service.nsf/WebWID/WTB-120118-22576-3D956/\\$File/166.pdf](http://www.metsoendress.com/miningandconstruction/mct_service.nsf/WebWID/WTB-120118-22576-3D956/$File/166.pdf)

Vilcapoma, J., & Chávez, Z. (2012). Pruebas Experimentales A Nivel De Laboratorio  
De Concentración Gravimétrica Y Flotación De Minerales De Oro En La  
Planta Concentradora "Caselita". Huancayo-Perú.

## ANEXOS

### Anexo 1. Fórmulas de recuperación de los ensayos en la mesa vibratoria.

Para el cálculo de todas las recuperaciones se hizo uso de la siguiente fórmula:

$$R = \frac{C * Tc}{A * Ta}$$

Tenor del Alimento = 3,7 (constante)

### 1° DE INCLINACIÓN

10% - 3,75 kg

δ baja	δ media	δ alta (concentrado)	Cantidad de FeO en concentrado
2,98 kg	0,73 kg	0,040 kg	0,024 kg

$$R = \frac{(0,040)(60)}{(3,75)(3,7)} \times 100$$

$$R = 17,29 \%$$

15% - 5,62 kg

δ baja	δ alta (concentrado)	Cantidad de FeO en concentrado
5,49 kg	0,13 kg	0,073 kg

$$R = \frac{(0,13)(56,15)}{(5,62)(3,7)} \times 100$$

$$R = 35,10 \%$$

20% - 7,5 kg

$\delta$ baja	$\delta$ alta (concentrado)	Cantidad de FeO en concentrado
7,44 kg	0,060 kg	0,028 kg

$$R = \frac{(0,060)(46,66)}{(7,5)(3,7)} \times 100$$

$$R = 10,08 \%$$

25% - 9,37 kg

$\delta$ baja	$\delta$ alta (concentrado)	Cantidad de FeO en concentrado
9,06 kg	0,310 kg	0,102 kg

$$R = \frac{(0,310)(32,90)}{(9,37)(3,7)} \times 100$$

$$R = 29,41 \%$$

## 2° DE INCLINACIÓN

10% - 3,75 kg

$\delta$ baja	$\delta$ media	$\delta$ alta (concentrado)	Cantidad de FeO en concentrado
2,8 kg	0,64 kg	0,31 kg	0,10 kg

$$R = \frac{(0,31)(32,25)}{(3,75)(3,7)} \times 100$$

$$R = 72,05 \%$$

15% - 5,62 kg

$\delta$ baja	$\delta$ media	$\delta$ alta (concentrado)	Cantidad de FeO en concentrado
5,4 kg	0,14 kg	0,080 kg	0,018 kg

$$R = \frac{(0,080)(22,5)}{(5,62)(3,7)} \times 100$$

$$R = 8,65 \%$$

20% - 7,5 kg

$\delta$ baja	$\delta$ media	$\delta$ alta (concentrado)	Cantidad de FeO en concentrado
5,32 kg	1,88 kg	0,30 kg	0,24 kg

$$R = \frac{(0,30)(80)}{(7,5)(3,7)} \times 100$$

$$R = 86,48 \%$$

25% - 9,37 kg

$\delta$ baja	$\delta$ media	$\delta$ alta (concentrado)	Cantidad de FeO en concentrado
6,32 kg	1,92 kg	1,13 kg	0,32 kg

$$R = \frac{(1,13)(28,31)}{(9,37)(3,7)} \times 100$$

$$R = 92,27 \%$$

**3° DE INCLINACIÓN**

10% - 3,75 kg

$\delta$ baja	$\delta$ media	$\delta$ alta (concentrado)	Cantidad de FeO en concentrado
1,77 kg	0,41 kg	1,57 kg	0,095 kg

$$R = \frac{(1,57)(6,05)}{(3,75)(3,7)} \times 100$$

$$R = 68,45\%$$

15% - 5,62 kg

$\delta$ baja	$\delta$ media	$\delta$ alta (concentrado)	Cantidad de FeO en concentrado
2,85 kg	2,23 kg	0,54 kg	0,09 kg

$$R = \frac{(0,54)(16,66)}{(5,62)(3,7)} \times 100$$

$$R = 43,26 \%$$

20% - 7,5 kg

$\delta$ baja	$\delta$ media	$\delta$ alta (concentrado)	Cantidad de FeO en concentrado
4,02 kg	1,02 kg	2,46 kg	0,273 kg

$$R = \frac{(2,46)(11,09)}{(7,5)(3,7)} \times 100$$

$$R = 98,31 \%$$

25% - 9,37 kg

$\delta$ baja	$\delta$ media	$\delta$ alta (concentrado)	Cantidad de FeO en concentrado
4,69 kg	1,06 kg	3,62 kg	0,32 kg

$$R = \frac{(3,62)(8,83)}{(9,37)(3,7)} \times 100$$

$$R = 92,19 \%$$

**Anexo 2. Fórmulas de recuperación de los ensayos en la espiral****20 LITROS DE CONSUMO DE H<sub>2</sub>O**

10% - 3,75 kg

δ baja	δ media	δ alta (concentrado)	Cantidad de FeO en concentrado
2,51 kg	0,89 kg	0,35 kg	0,125 kg

$$R = \frac{(0,35)(35,71)}{(3,75)(3,7)} \times 100$$

$$R = 90,07 \%$$

15% - 5,62 kg

δ baja	δ media	δ alta (concentrado)	Cantidad de FeO en concentrado
3,82 kg	1,32 kg	0,48 kg	0,20 kg

$$R = \frac{(0,48)(41,66)}{(5,62)(3,7)} \times 100$$

$$R = 96,16 \%$$

20% - 7,5 kg

$\delta$ baja	$\delta$ media	$\delta$ alta (concentrado)	Cantidad de FeO en concentrado
5,06 kg	1,87 kg	0,57 kg	0,15 kg

$$R = \frac{(0,57)(26,31)}{(7,5)(3,7)} \times 100$$

$$R = 54,04 \%$$

25% - 9,37 kg

$\delta$ baja	$\delta$ media	$\delta$ alta (concentrado)	Cantidad de FeO en concentrado
6,10 kg	2,60 kg	0,67 kg	0,057 kg

$$R = \frac{(0,67)(8,50)}{(9,37)(3,7)} \times 100$$

$$R = 16,42 \%$$

### 30 LITROS DE CONSUMO DE H<sub>2</sub>O

10% - 3,75 kg

$\delta$ baja	$\delta$ media	$\delta$ alta (concentrado)	Cantidad de FeO en concentrado
2,47 kg	1,17 kg	0,11 kg	0,09 kg

$$R = \frac{(0,11)(81,81)}{(3,75)(3,7)} \times 100$$

$$R = 64,85 \%$$

15% - 5,62 kg

$\delta$ baja	$\delta$ media	$\delta$ alta (concentrado)	Cantidad de FeO en concentrado
4,17 kg	1,37 kg	0,080 kg	0,057 kg

$$R = \frac{(0,080)(71,25)}{(5,62)(3,7)} \times 100$$

$$R = 27,41 \%$$

20% - 7,5 kg

$\delta$ baja	$\delta$ media	$\delta$ alta (concentrado)	Cantidad de FeO en concentrado
4,9 kg	2,46 kg	0,14 kg	0,117 kg

$$R = \frac{(0,14)(83,57)}{(7,5)(3,7)} \times 100$$

$$R = 42,16 \%$$

25% - 9,37 kg

$\delta$ baja	$\delta$ media	$\delta$ alta (concentrado)	Cantidad de FeO en concentrado
6,51 kg	2,71 kg	0,15 kg	0,138 kg

$$R = \frac{(0,15)(92)}{(9,37)(3,7)} \times 100$$

$$R = 39,80$$

**40 LITROS DE CONSUMO DE H<sub>2</sub>O**

10% - 3,75 kg

δ baja	δ media	δ alta (concentrado)	Cantidad de FeO en concentrado
2,6 kg	1,02 kg	0,13 kg	0,118 kg

$$R = \frac{(0,13)(90,76)}{(3,75)(3,7)} \times 100$$

$$R = 85,03 \%$$

15% - 5,62 kg

δ baja	δ media	δ alta (concentrado)	Cantidad de FeO en concentrado
3,69 kg	1,64 kg	0,29 kg	0,206 kg

$$R = \frac{(0,29)(71,03)}{(5,62)(3,7)} \times 100$$

$$R = 99,06 \%$$

20% - 7,5 kg

δ baja	δ media	δ alta (concentrado)	Cantidad de FeO en concentrado
4,98 kg	2,19 kg	0,33 kg	0,192 kg

$$R = \frac{(0,33)(58,18)}{(7,5)(3,7)} \times 100$$

$$R = 69,18 \%$$

25% - 9,37 kg

$\delta$ baja	$\delta$ media	$\delta$ alta (concentrado)	Cantidad de FeO en concentrado
6,47 kg	2,54 kg	0,36 kg	0,33 kg

$$R = \frac{(0,36)(91,66)}{(9,37)(3,7)} \times 100$$

$$R = 95,17 \%$$