



**UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA**

*La Universidad Católica de Loja*

**FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA**

**CARRERA DE GEOLOGÍA**

**Evaluación de la recuperación por métodos  
gravimétricos de arenas ferrotitaníferas de la ciudad de  
Pedernales**

Trabajo de integración curricular previo a la obtención del título de:

**INGENIERO EN GEOLOGÍA**

**Autor:** Jiménez Pardo, Dennis Anderson

**Director:** Navas Jaramillo, Santiago José

LOJA

2024



*Esta versión digital, ha sido acreditada bajo la licencia Creative Commons 4.0, CC BY-NC-SA: Reconocimiento-No comercial-Compartir igual; la cual permite copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, mientras se reconozca la autoría original, no se utilice con fines comerciales y se permiten obras derivadas, siempre que mantenga la misma licencia al ser divulgada. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>*

2024

## **Aprobación del director del trabajo de integración curricular**

Loja, 03 de octubre del 2024

Doctor

José Arturo Guartán Medina.

Director de la carrera de Geología

Ciudad. - Loja

De mi consideración:

Me permito comunicar que, en calidad de director del presente Trabajo de Integración Curricular denominado: Evaluación de la recuperación por métodos gravimétricos de arenas ferrotitaníferas de la ciudad de Pedernales realizado por Dennis Anderson Jiménez Pardo, ha sido orientado y revisado durante su ejecución, así mismo ha sido verificado a través de la herramienta de similitud académica institucional, y cuenta con un porcentaje de coincidencia aceptable. En virtud de ello, y por considerar que el mismo cumple con todos los parámetros establecidos por la Universidad, doy mi aprobación a fin de continuar con el proceso académico correspondiente.

Particular que comunico para los fines pertinentes.

Atentamente,

Director: Msc. Santiago José Navas Jaramillo

C.I.: 1105043507

Correo electrónico: [sjnavas1@utpl.edu.ec](mailto:sjnavas1@utpl.edu.ec)

### **Declaración de autoría y cesión de derechos**

Yo, Dennis Anderson Jiménez Pardo, declaro y acepto en forma expresa lo siguiente: Ser autor (a) del Trabajo de Integración Curricular denominado: Evaluación de la recuperación por métodos gravimétricos de arenas ferrotitaníferas de la ciudad de Pedernales, de la carrera de Ingeniería en Geología, específicamente de los contenidos comprendidos en: generalidades, marco teórico, metodología, resultados y discusión , siendo Santiago José Navas Jaramillo, director del presente trabajo; también declaro que la presente investigación no vulnera derechos de terceros ni utiliza fraudulentamente obras preexistentes. Además, ratifico que las ideas, criterios, opiniones, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad. Eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones judiciales o administrativas, en relación con la propiedad intelectual de este trabajo.

Que la presente obra, producto de mis actividades académicas y de investigación, forma parte del patrimonio de la Universidad Técnica Particular de Loja, de conformidad con el artículo 20, literal j, de la Ley Orgánica de Educación Superior; y, artículo 91 del Estatuto Orgánico de la UTPL, que establece: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado que se realicen a través, o con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”, en tal virtud, cedo a favor de la Universidad Técnica Particular de Loja la titularidad de los derechos patrimoniales que me corresponden en calidad de autor/a, de forma incondicional, completa, exclusiva y por todo el tiempo de su vigencia.

La Universidad Técnica Particular de Loja puede ingresar el trabajo al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública, en cumplimiento del artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Autor: Dennis Anderson Jiménez Pardo

C.I.: 1104776933

Correo electrónico: [denng@outlook.es](mailto:denng@outlook.es)

## **Dedicatoria**

Este trabajo es el resultado de años de esfuerzo, dedicación y sacrificio, y no hubiera sido posible sin el amor y el apoyo incondicional de mis papás, la Lic. Yonny Matilde Pardo Romero y el Sr. Ricardo Patricio Jiménez Sánchez. Gracias por enseñarme la importancia de la perseverancia y por creer en mí incluso cuando yo dudaba. Sus palabras de aliento y su ejemplo de vida han sido mi mayor inspiración. Papá, mamá, este logro es tan suyo como mío. Les debo todo y siempre estaré agradecido por todo lo que han hecho por mí. Esta tesis es un pequeño homenaje a su amor y a su fe en mí.

## **Agradecimiento**

Quiero expresar mi agradecimiento a todas las personas que posibilitaron la realización de esta tesis. En primer lugar, a mis padres, por su amor incondicional, apoyo constante y por ser mi mayor fuente de motivación. Gracias por sus sacrificios, por enseñarme a ser perseverante y por creer en mí en cada paso de este camino. A mi tutor de tesis, MSc. Santiago José Navas Jaramillo por su valiosa orientación, paciencia y por compartir su vasto conocimiento. Sus consejos y apoyo fueron fundamentales para la culminación de este trabajo. A mis profesores y compañeros de la Universidad Técnica Partica de Loja, por todos los aprendizajes compartidos y por los momentos inolvidables a lo largo de esta etapa académica. A mis amigos, por su comprensión y apoyo incondicional durante los momentos difíciles, y por las risas y alegrías compartidas que hicieron este viaje más llevadero. Finalmente, a quienes, de manera directa o indirecta, contribuyeron a la realización de esta tesis. A todos, mi más profundo agradecimiento.

## Índice de contenido

Aprobación del director del Trabajo de Integración Curricular .....	II
Declaración de autoría y cesión de derechos.....	III
Dedicatoria.....	V
Agradecimiento .....	VI
Índice de contenido .....	VII
Índice de figuras.....	X
Índice de tablas.....	XII
Abstract.....	2
Introducción .....	3
Capítulo uno .....	5
Generalidades.....	5
1.1 Características físico-geográficas de la zona .....	5
1.1.1 Ubicación.....	5
1.1.2 Acceso .....	5
1.1.3 Hidrografía .....	6
1.1.4 Geomorfología.....	6
1.2 Geología regional .....	7
Capítulo dos.....	8
Marco teórico .....	8
2.1. Arenas Ferrotitaníferas. ....	8
2.1.1 Minerales que contienen las arenas ferrotitaníferas.....	10
2.2 Procesos gravimétricos. ....	19
2.2.1. Mesa vibratoria.....	19
2.2.2. Concentrador centrífugo Knelson.....	20
2.3. Caracterización química y mineralógica de arenas ferrotitaníferas .....	21
2.3.1 Microscopio petrográfico.....	21
2.3.2. Fluorescencia de rayos - X.....	22
2.3.3. Difracción de rayos - X.....	22
2.3.4 ICP - OES .....	22
Capítulo tres .....	23
Metodología .....	23
3.1. Muestreo .....	24
3.2 Molino de discos.....	25

3.3. Caracterización química .....	26
3.3.1. Espectrometría de masas de plasma (ICP) .....	26
3.3.2. Difracción de rayos X (DRX) .....	26
3.3.3. Fluorescencia de rayos X (FRX).....	26
3.4. Caracterización mineralógica .....	27
3.4.1. Lámina pulida .....	27
3.5. Caracterización física .....	27
3.5.1. Peso específico del material .....	27
3.5.2. Análisis granulométrico .....	27
3.6. Molino de bolas .....	28
3.7. Mesa Vibratoria (concentración gravimétrica) .....	29
3.8. Concentrado Gravimétrico Knelson .....	30
3.9. Combinación de procesos .....	31
3.10 Balance metalúrgico .....	31
Capitulo cuatro .....	32
Resultados y Discusión .....	32
4.1. Caracterización Química.....	32
4.1.1. Difracción de rayos X (DRX) .....	32
4.1.2. Fluorescencia de rayos X (FRX).....	32
4.2. Caracterización mineralógica .....	33
4.2.1. Lámina Pulida.....	33
4.3. Caracterización Física .....	34
4.3.1. Gravedad específica .....	34
4.3.2. Análisis Granulométrico .....	35
5.1. Mesa vibratoria .....	36
5.2. Knelson .....	38
5.3. Combinación de ensayos.....	40
Conclusiones.....	42
Recomendaciones.....	43
Referencias bibliográficas.....	44
Apéndice .....	48
Apéndice A. Gravedad específica. ....	48
Apéndice B. Análisis Granulométrico.....	56
Apéndice C. Mesa vibratoria .....	58
Apéndice D. Knelson.....	59
Apéndice E. Combinación de procesos Mesa vibratoria y Knelson.....	59

<b>Apéndice F. ICP (Balances metalúrgicos y rendimientos).....</b>	<b>60</b>
--	-----------

## Índice de figuras

Figura 1 .....	5
Mapa del Cantón Pedernales.....	5
Figura 2 .....	6
Mapa del Cantón Pedernales (acceso) .....	6
Figura 3 .....	8
Mapa Geológico del Cantón Pedernales.....	8
Figura 4 .....	10
Arenas negras.....	10
Figura 5 .....	12
Mineral Magnetita .....	12
Figura 6 .....	13
Mineral Ilmenita .....	13
Figura 7 .....	14
Mineral Rutilo.....	14
Figura 8 .....	15
Mineral Hematita.....	15
Figura 9 .....	17
Mineral Cromita.....	17
Figura 10.....	18
Mineral Wolgramita.....	18
Figura 12.....	23
Flujograma de la metodología del trabajo.....	23
Figura 13.....	24
Lugar de muestreo .....	24
Figura 14.....	25
Material cuarteado .....	25
Figura 15.....	26
Molienda de discos ferrotitanífera.....	26
Figura 16.....	28
Análisis granulométrico.....	28
Figura 17.....	29
Funcionalidad del Molino de bolas .....	29
Figura 18.....	30
Partes y funcionalidad de la mesa vibratoria.....	30

**Figura 19..... 31**

**Partes y funcionalidad del concentrador Knelson..... 31**

**Figura 20..... 33**

**Histograma de concentración ..... 33**

**Figura 21..... 34**

**Fotos de la sección pulida..... 34**

**Figura 22..... 36**

**Resultados granulométricos ..... 36**

**Figura 23..... 38**

**Histograma de rendimientos ..... 38**

**Figura 24..... 39**

**Histograma de rendimientos ..... 39**

**Figura 25..... 41**

**Histograma de rendimientos para métodos combinados..... 41**

**Índice de tablas**

<b>Tabla 1.....</b>	<b>25</b>
<b>Pesos iniciales del trabajo .....</b>	<b>25</b>
<b>Tabla 2.....</b>	<b>32</b>
<b>Concentración mineral de las arenas .....</b>	<b>32</b>
<b>Tabla 3.....</b>	<b>34</b>
<b>Resultados de gravedad específica .....</b>	<b>34</b>
<b>Tabla 4.....</b>	<b>35</b>
<b>Resultados granulométricos de 0, 5 y 10 minutos de molienda.....</b>	<b>35</b>
<b>Tabla 5.....</b>	<b>36</b>
<b>Resultados mesa vibratoria Fe.....</b>	<b>36</b>
<b>Tabla 6.....</b>	<b>37</b>
<b>Resultados mesa vibratoria Ti.....</b>	<b>37</b>
<b>Tabla 7.....</b>	<b>38</b>
<b>Resultados de la concentración gravimétrica Fe .....</b>	<b>38</b>
<b>Tabla 8.....</b>	<b>39</b>
<b>Resultados de la concentración gravimétrica Ti.....</b>	<b>39</b>
<b>Tabla 9.....</b>	<b>40</b>
<b>Resultados de la combinación de mesa a Knelson Ti.....</b>	<b>40</b>
<b>Tabla 10.....</b>	<b>41</b>
<b>Resultados de la combinación de mesa a Knelson Fe.....</b>	<b>41</b>

## Resumen

El material proveniente de la ciudad de Pedernales (zona costera) fue sometido a los procesos gravimétricos como mesa vibratoria y knelson, también se desarrolló una combinación de estos. Los mejores resultados para mesa vibratoria tienen un tamaño de grano correspondiente a la malla 171 ASTM con un 31 % de recuperación para Fe y para Ti se experimentó con una malla 140 ASTM, obteniéndose 41 % de recuperación, los demás parámetros operacionales fueron una amplitud de 25 mm, una velocidad de 1.22 impactos/min, una velocidad del fluido de 9.09 mm/seg y un grado de inclinación 3.2/5.8 (longitudinal / transversal). Para knelson el mejor resultado fue la malla 140 ASTM, con un 61 % de recuperación para Fe y un 68 % de recuperación con una malla 140 ASTM para Ti. En la combinación se alcanzó como mejor resultado a una malla 169 ASTM con una recuperación del 56 % para Fe y un 53 % de recuperación con una malla 174 ASTM para Ti, los demás parámetros fueron dos, Presión y fuerza G, una presión de 2 Psi y 49 fuerzas G para Knelson y su combinación.

Palabras clave: Knelson, Mesa vibratoria, Arenas ferrotitaníferas.

### **Abstract**

The material from the city of Pedernales (coastal area) was subjected to gravimetric processes such as the shaking table and Knelson concentrator, and a combination of these methods was also developed. The best results for the shaking table were obtained with a grain size corresponding to 171 ASTM mesh, achieving a 31% recovery for Fe, and for Ti, a 140 ASTM mesh with a 41% recovery. The other operational parameters included an amplitude of 25 mm, a speed of 1.22 strokes/min, a fluid velocity of 9.09 mm/sec, and an inclination angle of 3.2/5.8 (longitudinal/transverse). For the Knelson concentrator, the best result was achieved with a 140 ASTM mesh, yielding a 61% recovery for Fe and a 68% recovery for Ti with the same mesh. In the combination process, the best result was obtained with a 169 ASTM mesh, achieving a 56% recovery for Fe, and a 174 ASTM mesh with a 53% recovery for Ti. The other parameters included pressure and G-force, with a pressure of 2 Psi and 49 G-forces for the Knelson concentrator and its combination.

*Keywords:* Knelson, Shaking table, Ferrotitaniferous sands.

## Introducción

La minería es muy esencial en Ecuador y el mundo entero para las necesidades cotidianas del individuo, por ende, el aumento de interés en el desarrollo de nuevos materiales ha estimulado la búsqueda de nuevas materias primas minerales. Mediante su explotación y procesamiento, estas materias primas pueden proporcionar los elementos o compuestos esenciales para la elaboración de dichos materiales (Gutiérrez, 2004).

Materias primas minerales que podemos encontrar en depósitos o yacimientos, para la definición de estos se necesita información detallada sobre la geología económica y características de estos depósitos que puede facilitar la verificación y evaluación precisa de los recursos minerales presentes.

Los minerales han despertado un gran interés, lo que ha generado la necesidad de explorarlos, por consiguiente, a medida que se identifican estos depósitos, se vuelve esencial desarrollar nuevas técnicas de procesamiento que permitan extraer los apreciados elementos presentes en estos recursos minerales (Gutiérrez, 2004).

Técnicas, como los métodos gravimétricos que desempeñan un papel importante en la obtención segura de los minerales. Estas proporcionan herramientas que ayudan con mayor precisión a distribuir los minerales en diferentes secciones del artefacto.

En minería, se identifican diversos tipos de yacimientos, una muestra notable son las llamadas arenas negras o ferrotitaníferas, las cuales son una combinación de minerales que se ubican en lugares costeros y en áreas cercanas a canales naturales (Gutiérrez, 2004).

En la zona costera de la ciudad de Pedernales hay arenas negras con importantes concentraciones de minerales como magnetita e ilmenita y los elementos como el Ti y Fe, los minerales tienen una alta densidad permitiéndonos separarlos de las arenas de playa.

En el estudio científico sobre las arenas negras de la isla ubicada en Portete, provincia Esmeraldas, como fuente de dióxido de titanio, se recomienda investigar el impacto de una

pulverización ultrafina en la separación magnética de las arenas, así como explorar otros métodos de concentración para obtener un concentrado óptimo de ilmenita (Flores, 2017).

La finalidad del presente estudio mediante trabajo técnico es el evaluar las arenas negras o arenas ferrotitaníferas para la obtención de las mismas y verificación de minerales y elementos presentes. Esta evaluación se la realizó mediante Frx (Fluorescencia de rayos X), DRX (Difracción de rayos X), ICP (Plasma acoplado inductivamente), mesa vibratoria (método gravimétrico) y Knelson (método gravimétrico).

Este estudio se desarrolla en 4 capítulos los cuales se describe de forma breve a continuación: El capítulo uno, generalidades, consta de ubicación, acceso, geomorfología y la geología, en el capítulo dos se desarrolla el marco teórico, en el capítulo tres se describe la metodología y en el capítulo cuatro los resultados y su discusión.

La investigación tiene una gran importancia porque los minerales que pertenecen a las arenas ferrotitaníferas como la magnetita es de gran índole por ser una mena de hierro, el cual es utilizado ampliamente en diversos procesos industriales. Otras aplicaciones son como catalizador en el proceso para fabricar amoniaco, como pigmento para pinturas y cerámicas. Además, sirve como micro y nanopartículas magnéticas para una variedad de procesos y materiales. En el caso de la ilmenita, como mena principal de titanio, se emplea para aleaciones con relación a la industria aeroespacial.

## Capítulo uno

### Generalidades

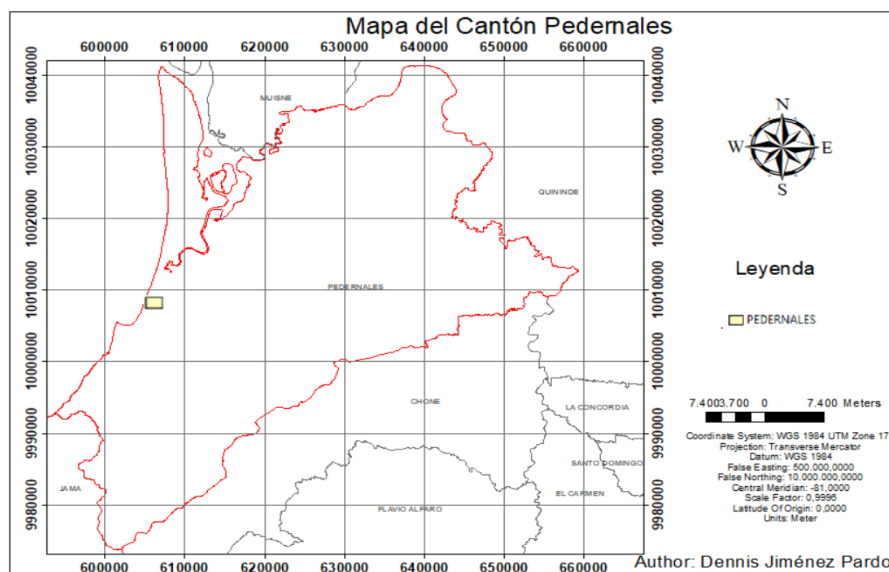
#### 1.1 Características físico-geográficas de la zona

##### 1.1.1 Ubicación

La ciudad de Pedernales con una población de 155.487 individuos aproximados es la cabecera cantonal del cantón Pedernales (Figura1). Este se encuentra rodeado de los cantones Muisne al norte, Quinde al nort – este, Chone al sur - este y Jama al sur - oeste. La ciudad de Pedernales tiene como coordenadas UTM WGS84 aproximadas X: 600789 y en Y: 1000981. Se localiza al centro – norte de la región litoral del Ecuador con un relieve semiplano casi a unos 22 msnm de altitud.

**Figura 1**

*Mapa del Cantón Pedernales*



*Nota:* Ubicación de la ciudad de pedernales desde el cantón Pedernales.

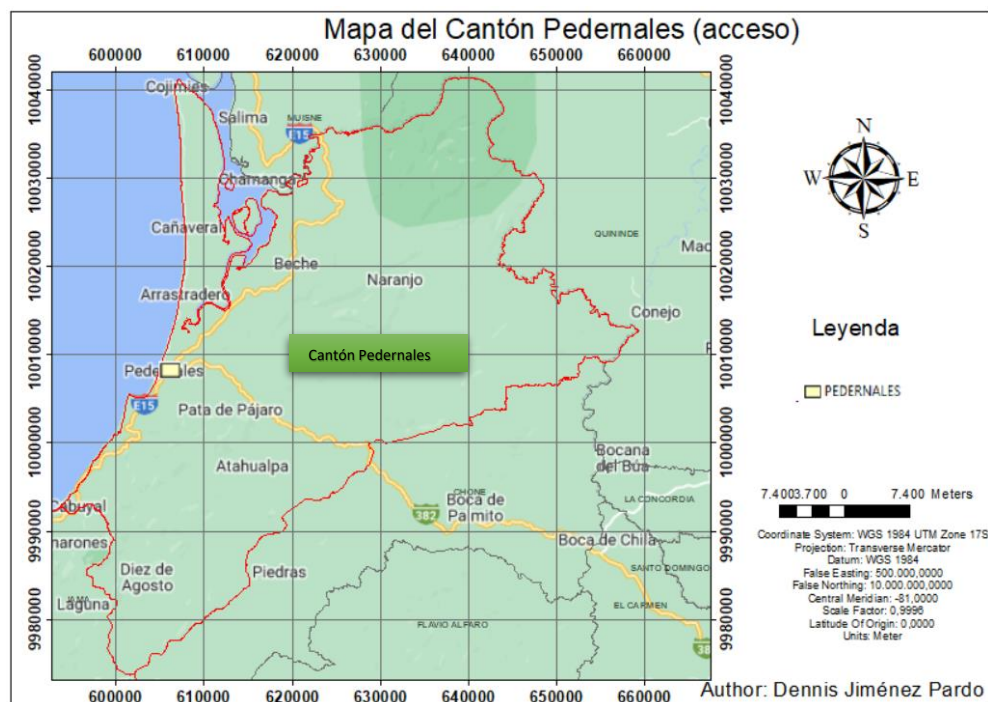
##### 1.1.2 Acceso

El acceso a la ciudad de Pedernales se la puede realizar por las vías principales, en el norte por el cantón Muisne en la vía que se encuentran por Salima – Beche (E-15) hasta llegar al destino. En cambio, por el sur – este por el cantón Chone, en las vías que se

encuentra por Boca de Pamito – Pata de pájaro (382) o también se puede ingresar por el sur – oeste por el cantón Jama por las vías que se encuentran por Cabuyal (E-15), (Figura 2).

**Figura 2**

*Mapa del Cantón Pedernales (acceso)*



*Nota:* Acceso por las vías principales del cantón pedernales hasta la ciudad de Pedernales.

### 1.1.3 Hidrografía

Pedernales tiene un sistema hidrográfico dominado por el río Tachina y varias quebradas. El río Tachina inicia en el Bosque Protector Cerro Pata de Pájaro, al este de la ciudad, y recorre aproximadamente 16 kilómetros a lo largo del cantón, de los cuales 1,3 kilómetros atraviesan el área urbana, desembocando en el Océano Pacífico al sur. Este río es fundamental para la ciudad, ya que su agua es la principal fuente de abastecimiento para el sistema de suministro actual (GADMP, 2016).

### 1.1.4 Geomorfología

En el norte de Pedernales, se pueden ver colinas bajas que llegan hasta la playa recta. Cerca de la ciudad, las colinas son más altas (superan los 10 metros) y forman acantilados

casi verticales, con pequeñas cuevas en la base debido a la erosión del oleaje. Entre la playa y las colinas, hay frecuentes depósitos coluviales, que son materiales desgastados y transportados por la gravedad. Las marcas de antiguos deslizamientos de tierra son comunes. Las corrientes de resaca son notables en la desembocadura del río Pedernales, donde se observan barreras litorales que delimitan un ambiente lagunar. En la parte sur de Pedernales, se encuentran acantilados de diferentes alturas y con baja inclinación. Las colinas tierra adentro varían de bajas a medianas, compuestas por areniscas-arcillosas, limolitas y microconglomerados blandos, lo que hace que los acantilados sean muy inestables (PMRC, 1988).

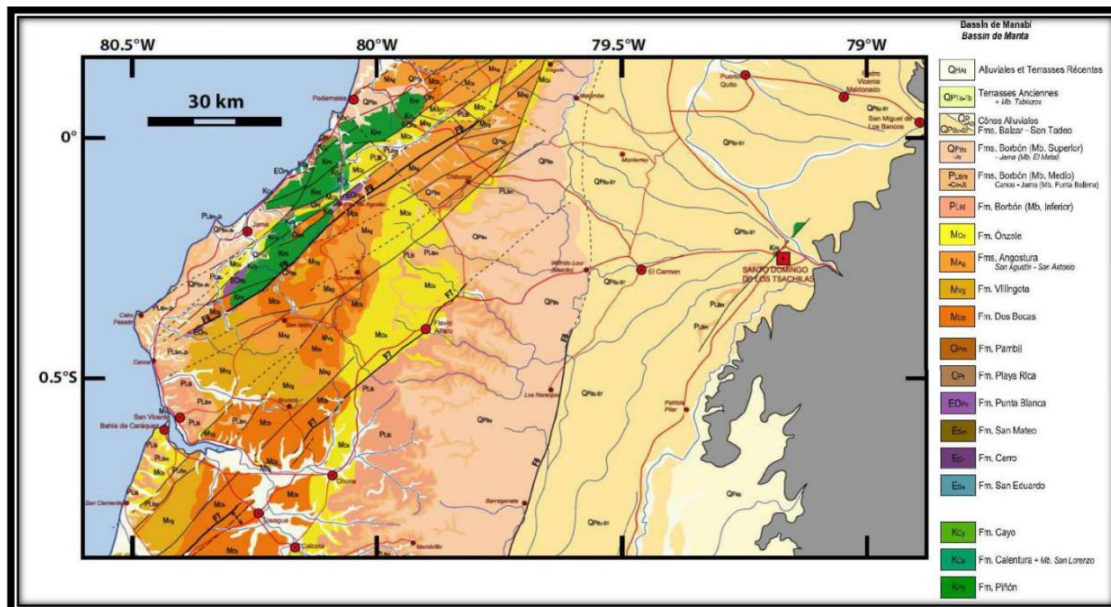
## **1.2 Geología regional**

La Formación Borbón (Figura 3) se compone principalmente de areniscas calcáreas de color azul grisáceo, acompañadas de un conglomerado basal. Esta formación se divide en tres miembros: un miembro clástico inferior, un miembro volcanoclástico medio y un miembro volcánico superior. Estos tres miembros pueden observarse en concordancia solo en una meseta estratificada y plana, situada entre las localidades de Portoviejo y Pichincha, en la cuenca de Manabí, con un grosor que puede alcanzar hasta los 600 metros (Reyes y Michaud, 2012).

En el Pleistoceno Inferior, se deposita el Miembro Volcánico Superior de la Formación Borbón (QPBS), compuesto por capas de brechas y tobas volcánicas que han sido re TRABAJADAS. Estas capas se intercalan localmente con areniscas con muchos componentes volcánicos. Este miembro se asienta de manera discordante sobre los miembros inferior y medio de la Formación Borbón (Reyes y Michaud, 2012).

Figura 3

Mapa Geológico del Cantón Pedernales



Nota: Adoptado de Tectono-estratigrafía del borde centro - Occidental de la cuenca de Manabí entre Bahía de Caráquez y Pedernales [Fotografía], 2019. (<https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20305>).

## Capítulo dos

### Marco teórico

#### 2.1. Arenas Ferrotitaníferas.

Las arenas negras o también conocidas como arenas ferrotitaníferas suelen tener minerales como magnetita e ilmenita principalmente, estas arenas suelen ser caracterizadas como material pesado, esto se debe a que contiene minerales con un alto peso específico. En Ecuador estas arenas se las puede encontrar en casi toda la playa costera, así que las arenas están libres en su mayoría para su obtención.

Los minerales pesados tienen la densidad principal de  $2,9 \text{ g/cm}^3$  o más. Entre los minerales más comunes se encuentran la  $\text{FeTiO}_3$ ,  $\text{ZrSiO}_4$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $3\text{B}_2(\text{SiO}_4)_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{AB}_2\text{O}_4$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{F})_2$ ,  $\text{CaTiSiO}_5$ , entre algunos más. Los minerales de titanio, como la ilmenita, leucoxeno y rutilo, nos ayudan a la producción de  $\text{TiO}_2$  de calidad pigmento y también en la recuperación del titanio metálico. Los minerales opacos (minerales pesados) están en concentraciones bajas en las rocas ígneas y metamórficas, su

deposición se la puede observar de mejor manera a lo largo de las costas y en el lecho de los ríos. La mayor concentración se encuentra en las arenas de la playa y se estas están asociadas con minerales silicatados, siendo el cuarzo el mineral principal, considerado como impureza en este contexto (Department of Primary Industries, 2006).

En la figura 4 se observa la concentración natural de los minerales por las olas y las mareas, transportan a las costas tanto los minerales pesados como los silicatos resultantes de la descomposición de rocas volcánicas. Al mismo tiempo, los silicatos más ligeros son llevados de vuelta al mar mediante el arrastre de la marea (Department of Primary Industries, 2006).

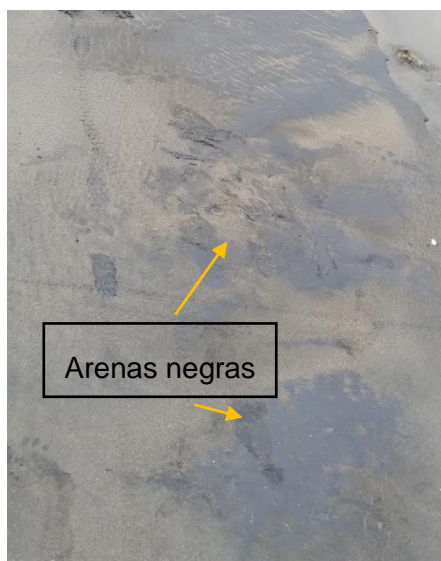
En Ecuador, los minerales mencionados provienen principalmente de formaciones de la Cordillera de los Andes y de la Costa Ecuatoriana. Las corrientes costeras acumulan materiales en el litoral, desplazando los más livianos a mayores distancias y velocidades que los más pesados, resultando en su concentración. Al mismo tiempo, las olas arrojan materiales a las playas; el retroceso del agua y la resaca transportan los más finos y ligeros a lo largo de las costas, mientras que los materiales más grandes y pesados se concentran en las playas abiertas. Un ejemplo de este proceso son las playas de grava o cantos rodados donde se eliminó la arena. Si hay minerales pesados presentes en la playa, también se concentrarán de manera similar. La contribución de minerales de placer para su concentración en las playas puede tener diversas fuentes, como ríos que desembocan en la costa, la acción erosiva de las olas en terrazas o planicies de gravas, y la intersección de corrientes sobre antiguas terrazas fluviales cercanas a la costa (Chuquirima y Cortez, 2015).

De acuerdo con la investigación de Maritza Gabriela Chuquirima Ramos (2015), a nivel global, las reservas totales de ilmenita en yacimientos primarios y secundarios alcanzan los 600 millones de toneladas. Los 300 millones de toneladas de yacimientos o depósitos, con óxido de titanio ( $TiO_2$ ) del 40%, se ubican en su mayoría en Canadá y Noruega. Por otro lado, los yacimientos que son secundarios en el país de Australia y también EE. UU. juntan más de 100.000.000 de toneladas, con un 20% de  $TiO_2$ . En relación con el rutilo, restringido

a tres yacimientos secundarios, las reservas alcanzan los 11,8.000.000 de toneladas, con un contenido de  $TiO_2$  del 90 al 96%, siendo más de 7.000.000 encontrados en Australia y más de 2.000.000 en Montaña Leona. Actualmente, la explotación de yacimientos primarios de ilmenita se realiza en el país de EE. UU., Noruega, Canadá y Finlandia. Brasil también posee depósitos potencialmente significativos del mineral anatasa, un polimorfo del rutilo con la misma fórmula química. La extracción de minerales de titanio se ha desde más de 50 años, principalmente a partir de las arenas negras en las costas y terrazas marinas, gravas y arenas. En términos de extracción, se emplean maquinaria como dragas en algunos casos, mientras que en otros se utiliza una combinación de bulldozer, entre otros. En lo que respecta al tratamiento, este se limita a procesos de separación gravitacional, magnética o eléctrica (Chuquirima y Cortez, 2015).

#### **Figura 4**

Arenas negras



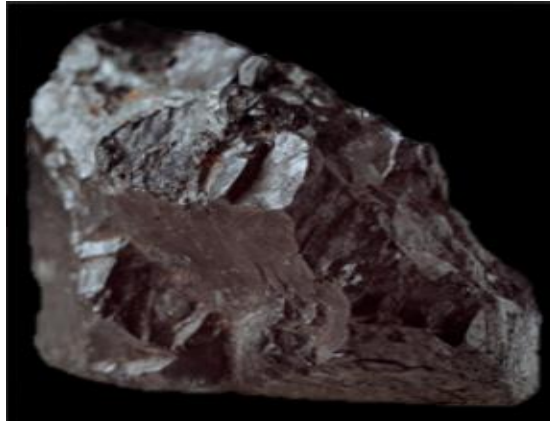
*Nota:* Se observar la sedimentación natural de las arenas ferrotitaníferas.

#### **2.1.1 Minerales que contienen las arenas ferrotitaníferas.**

Las arenas ferrotitaníferas se encuentran conformadas esencialmente por ilmenita y magnetita. Estas arenas negras tienen una alta densidad y su mineralogía también conocida como minerales opacos, compuestas principalmente por minerales de óxido de hierro, óxido

de titanio, óxido de manganeso, sílice y óxido de aluminio, estos dos últimos los podemos encontrar en bajas cantidades.

**2.1.1.1 Magnetita (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>).** La magnetita (Figura 5), en su composición podemos encontrar 72,4% de hierro y 27,6% de oxígeno. El hierro puede ser sustituido por elementos como aluminio, cromo, magnesio, manganeso, titanio, vanadio o zinc. Forma una solución sólida con la ulvoespinela (Fe<sub>2</sub>TiO<sub>4</sub>), tiene dos propiedades, las propiedades físicas: como el color negro de hierro opaco y una raya de color negro. Su brillo puede ser metálico esplendente o submetálico. No presenta clivaje, aunque algunos ejemplares tienen partición octaédrica. La densidad es de 5,2 g/cm<sup>3</sup> y su dureza varía entre 5,5 y 6,5 en la escala de Mohs y las propiedades ópticas: Se presenta un color gris con tinte café en aire, que se vuelve menos intenso en aceite, variando en presencia de otros minerales. No exhibe birrefringencia y es isotrópico, aunque puede mostrar anisotropía anómala debido a tensiones internas y deformaciones causadas por maclas o zonaciones. No tiene reflexiones internas, excepto en muestras con alto contenido de manganeso, y su reflectancia en aire es del 20,0% al 21,1%. Las texturas idiomórficas son comunes, apareciendo como láminas de exsolución en ilmenita y pudiendo ser pseudomorfo de hematita o reemplazada por ella a lo largo de planos de clivaje. La zonación es frecuente en magnetitas pirometasomáticas. Es un mineral magnético, reconocido por su dureza absoluta y relativa, y su color variable. Puede alterarse a hematita y goethita, y posee un fuerte magnetismo (Sámano, 2014).

**Figura 5***Mineral Magnetita*

Nota: Adoptado de Casa abierta al tiempo Universidad Autónoma Metropolitana. [Fotografía], 2024. (<http://materialoteca.azc.uam.mx/index.php/catalogo-de-materiales/item/41-de-origen-mineral/3942-mineral-magnetita>)

**2.1.1.2 Ilmenita (FeTiO<sub>3</sub>).** La ilmenita (Figura 6) en su composición tiene 36.8% de hierro, un 31.6% de titanio y un 31.6% de oxígeno. A menudo, también contiene magnesio y manganeso. Las propiedades son dos, propiedades físicas como el color que es negro de hierro, también es opaco y su raya varía de negra a rojo castaño. Su brillo es metálico a submetálico y no presenta clivaje. Tiene una densidad que oscila entre 4.05 g/cm<sup>3</sup> y 4.7 g/cm<sup>3</sup> y una dureza de 5 a 6 en la escala de Mohs, las propiedades ópticas con un color que, varía de café claro a oscuro con tintes grises, mientras que en aceite se muestra como un café de menor intensidad, variando con la orientación. Este color puede cambiar en presencia de otros minerales. Su birrefringencia es clara, mostrando un café rosáceo claro en secciones transversales y un café muy oscuro en secciones longitudinales. La anisotropía es fuerte, con colores que oscilan entre gris verdoso y gris castaño. Las reflexiones internas son raras, pero cuando aparecen, son de color café oscuro. Su reflectancia en aire varía del 17.0% al 21.1%. Las texturas típicas incluyen maclas de presión laminares, y las variedades ricas en hierro presentan cuerpos de exsolución, apareciendo frecuentemente como láminas de exsolución en magnetita. Los agregados granulares son comunes. Diagnósticamente, el mineral se

reconoce por su baja reflectancia, color gris castaño (más café que la magnetita) y fuerte anisotropía, con maclas polisintéticas comunes. Es más duro que la magnetita, pero más blando que la hematita, y se diferencia del rutilo por la ausencia de reflexiones internas. Además, puede ser usado como un geotermómetro imperfecto (Sámano, 2014).

**Figura 6**

*Mineral Ilmenita*



*Nota:* Adoptado de asturnatura. [Fotografía], 2017. (<https://www.asturnatura.com/fotografia/minerales/ilmenita-1/28049.html>)

**2.1.1.3 Rutilo (TiO<sub>2</sub>).** El rutilo (Figura 7), un mineral con una composición del 60% de titanio y del 40% de oxígeno. Además, puede incluir pequeñas cantidades de hierro, tántalo, niobio, estaño y cromo en solución sólida. Su sistema cristalino es tetragonal. Tiene dos propiedades, las propiedades físicas como: El color del mineral, va de tono marrón pardo a verde, púrpura, negro o incoloro. Es subtranslúcido y puede presentar transparencia. La raya es de castaño pálido, mientras que el brillo varía de adamantino a submetálico. Tiene clivaje bueno, una densidad que se encuentra entre 4,18 y 4,40 g/cm<sup>3</sup>, y una dureza que va de 6 a 6,5 en la escala de Mohs, en cambio las propiedades ópticas podemos encontrar un color en una muestra monomineral es gris con matices azulados al aire y gris pálido en aceite, aunque puede variar al estar en presencia de otros minerales. La birrefringencia es clara, especialmente en aceite, y en secciones transversales se observa un color más claro. La anisotropía es fuerte, con colores frecuentemente enmascarados por reflejos internos (el rutilo

con Nb muestra una anisotropía débil). Las reflexiones internas son abundantes y presentan una gama de colores, como blanco, amarillo, marrón, marrón rojizo, violeta, y verde, dependiendo de los elementos presentes, siendo mejor visibles en aceite. La reflectancia en aire varía entre 20,0 y 24,6%. El mineral muestra texturas de zonación que pueden parecer maclas y estructuras cataclásticas frecuentes. Puede ser idiomórfico si se forma temprano en la secuencia paragenética, o idioblástico si es tardío. En cuanto al diagnóstico, las maclas polisintéticas, las texturas cataclásticas y las zonadas son comunes y se aprecian mejor en secciones delgadas que en muestras pulidas, mostrando una tendencia idiomórfica (Sámano y Vargas, 2014).

**Figura 7**

*Mineral Rutilo*



*Nota:* Adoptado de asturnatura.  
[Fotografía], 2017.  
(<https://acortar.link/gPS8EZ>)

**2.1.1.4 Hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).** El mineral mejor observado en la figura 8, tiene un 70% de hierro y del 30% de oxígeno, con la posibilidad de contener trazas de titanio o manganeso. Su sistema cristalino es trigonal. Basándonos en las propiedades tenemos dos tipos, las propiedades físicas, colores que varían desde castaño rojizo hasta gris acero oscuro o negro de hierro. Es translúcido y su raya va de rojo indio claro a oscuro, volviéndose negra al ser calentada. Exhibe un brillo metálico brillante en los cristales y es opaco en las variedades

terrosas. Tiene un clivaje perfecto y casi cúbico, una densidad que varía entre 4,9 y 5,3 g/cm<sup>3</sup>, y una dureza que oscila entre 5,5 y 6,5 en la escala de Mohs, las últimas propiedades las cuales son ópticas como el color del mineral blanco grisáceo con matices azules al aire y se torna gris azulado de menor intensidad en aceite. Su color puede cambiar en presencia de otros minerales. La birrefringencia es débil, mientras que la anisotropía es muy clara, especialmente en los bordes de las maclas, donde se observan colores que van del azul grisáceo al amarillo grisáceo, y presenta una extinción súbita. Las reflexiones internas del mineral son de color rojo oscuro, a menudo se encuentran más visibles en especímenes poco pulidos. La reflectancia en el aire varía entre 24,0% y 30,6%. Se observan muchas texturas laminares, maclas y láminas de exsolución en ilmenita, y el mineral puede reemplazar a la magnetita a lo largo de planos de clivaje, formando martita. Se identifica por su reflectancia moderada y anisotropía, así como por su dificultad para pulirse y sus reflexiones internas rojizas. Es relevante en formaciones con hierro que se encuentra bandeado, se crean por fases secundarios (Sámano y Vargas, 2014).

### Figura 8

#### *Mineral Hematita*



*Nota:* Obtenido de geoaprendo  
[Fotografía], 2017.

(<https://acortar.link/9uTTyP>)

**2.1.1.5 Cromita (FeCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>).** La mineral cromita (Figura 9) tiene en su composición un 32% de FeO y un 68% de Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Habitualmente, se encuentra una pequeña cantidad de

Mg sustituyendo al Fe, y puede haber Al y Fe reemplazando al Cr. Este material pertenece al sistema cristalino isométrico. En sus propiedades físicas podemos encontrar un color que varía desde negro de hierro a pardo negro, pudiendo aparecer rojo amarillento en secciones delgadas. Su raya también presenta estos tonos, y en secciones delgadas puede ser rojo amarillento. Es subtranslúcida con un tono pardo oscuro y tiene un brillo que va de metálico a submetálico, con frecuencia presentando un aspecto grasoso. No tiene clivaje y su densidad oscila entre 4,32 y 4,6 g/cm<sup>3</sup>. Su dureza es de 5,5. En cambio en sus propiedades ópticas tenemos un color de una muestra monomineral, en aire varía de blanco grisáceo a café claro, mientras que en aceite es café oscuro, y puede variar con la presencia de otros minerales. No presenta birrefringencia y es isotrópica, aunque puede mostrar anisotropía débil en cristales zonados, cromitas ricas en Zn y cromitas deformadas tectónicamente. Las reflexiones internas son comunes en aceite, con tonos pardos a rojizos en variedades ricas en Mg y Al, mientras que las cromitas puras en Fe son opacas. La reflectancia en aire varía entre 12,0 y 14,0%. Las texturas muestran granos euhedrales comunes, intercrecimientos mirmetíticos con minerales de ganga y exoluciones laminares de ilmenita y/o rutilo. El diagnóstico se basa en fracturas concoidales, baja reflectancia, dureza, isotropismo y reflexiones internas, siendo común en rocas ultramáficas y teniendo una gran diferencia de la magnetita por su menor reflectancia y la presencia de reflexiones internas. Además, puede ser débilmente magnética (Sámano y Vargas, 2014).

**Figura 9***Mineral Cromita*

*Nota:* Adoptado de asturnatura. [Fotografía], 2017. (<https://www.asturnatura.com/mineral/cromita/890.html>)

**2.1.1.6 Wolframita (Fe, Mn) WO<sub>4</sub>.** La Wolframita (Figura 10) en su composición de solución sólida en la que el hierro y el manganeso, pueden intercambiarse en todas las proporciones posibles. El mineral presenta un sistema cristalino monoclinico. En sus propiedades físicas el color varía de negro a marrón, con una raya casi negra a parda y un brillo que oscila entre submetálico y resinoso. Tiene un clivaje perfecto y una densidad que va de 7 a 7,5 g/cm<sup>3</sup>, con una dureza de 4 a 4,5. En las propiedades ópticas tenemos que en el en aire, el color de la muestra monomineral varía de gris a blanco grisáceo, mientras que en aceite presenta tonos grises con matices pardos o amarillos. El color puede cambiar en presencia de otros minerales. La birrefringencia es débil pero perceptible, especialmente en los bordes de los granos, y es más visible en secciones longitudinales, con variaciones entre grises y pardos. La anisotropía también es débil pero notable, siendo más evidente en aire que en aceite (lo cual es inusual). Se pueden observar matices amarillos, grises oscuros, violetas o verdes, y presenta una extinción oblicua. Las reflexiones internas, de tonos rojizos, son más visibles en aceite, con un porcentaje de reflectancia en aire de entre 15 y 20.2. Las texturas comunes incluyen cristales tabulares idiomórficos asociados con scheelita, además de maclas y agregados de grano grueso. Se puede identificar por su forma laminar, las reflexiones internas y su baja reflectancia (Sámano y Vargas, 2014).

**Figura 10***Mineral Wolframita*

*Nota: Adoptado de [mineriaenlinea](https://mineriaenlinea.com/rocas_y_minerales/wolframita/).  
[Fotografía], 2019.  
([https://mineriaenlinea.com/rocas\\_y\\_minerales/wolframita/](https://mineriaenlinea.com/rocas_y_minerales/wolframita/))*

**2.1.1.7 Limonita (FeO. OH. Nh<sub>2</sub>O).** El mineral (Figura 11), tiene en su composición óxidos de hierro que están hidratados de forma natural y cuyo carácter es incierto. Aunque no se considera un mineral en sí mismo, su relevancia radica en su contenido de hierro y sus asociaciones. En cuanto a su sistema cristalino, estos óxidos son amorfos. Sus propiedades físicas son el color que varía desde un tono pardo amarillento hasta un pardo oscuro. El mineral es subtranslúcido, con una raya de color pardo amarillento y un brillo que puede ser adamantino o mate. No presenta clivaje y su densidad varía entre 3,3 y 4,3 g/cm<sup>3</sup>, mientras que su dureza está en el rango de 5 a 5,5. En cambio las propiedades ópticas son el color de la muestra mono mineral que es gris en aire, pero su intensidad disminuye notablemente en aceite. Este color puede variar dependiendo de la presencia de otros minerales. La birrefringencia es débil y se observa mejor en aceite, aunque a menudo se oculta debido a reflexiones internas. La anisotropía permite ver tintes azules más claros bajo polarizadores paralelos, aunque los colores pueden estar enmascarados por las reflexiones internas. Algunas variedades colofórmicas pueden ser isotrópicas. Las reflexiones internas son débiles y pueden aparecer en formas criptocristalinas, con colores que van desde amarillos pardos hasta cafés rojizos. El porcentaje de reflectancia en aire varía entre 16,1 y 18,5. Las texturas del mineral incluyen masas botroidales y mamiloformes, así como formas esferulíticas y zonadas formadas a partir de un gel. Se puede identificar por sus texturas y anisotropía azul.

Es común encontrar pseudomorfos que imitan a la pirita, con áreas centrales frecuentemente reemplazadas por otros minerales (Sámano y Vargas, 2014).

**Figura 11.**

Mineral Limonita



*Nota: Adoptado de astumatura. [Fotografía], 2017. (<https://www.astumatura.com/mineral/limonita/812.html>)*

## **2.2 Procesos gravimétricos.**

El proceso de separación gravimétrica se encarga de dividir minerales que contienen varias densidades, influenciados por el movimiento, la fuerza de gravedad y otros factores como la viscosidad del fluido, que representa la última resistencia al desplazamiento. La sedimentación libre de todas las partículas tiene lugar en un fluido con un volumen considerable que se encuentra superior al volumen de las partículas, dando como resultado una acumulación de las partículas insignificante (Carvajal y Chávez, 2015).

### **2.2.1. Mesa vibratoria**

La mesa vibratoria permite ajustar diversos parámetros durante su funcionamiento, adaptándose así al material de entrada específico. La concentración se realiza visualmente sobre la superficie de la mesa, por lo que cualquier modificación en parámetros, como la inclinación o la cantidad de agua, influye en el comportamiento del material y puede ser observado al instante. Durante la operación, es posible tomar muestras directamente,

utilizando herramientas como bateas para oro. En consecuencia, la optimización de esta tarea se simplifica y puede ser realizada por operadores en fase de aprendizaje (Medmin, 2000).

Esta máquina brinda diversas ventajas para mejorar nuestra experiencia. Entre ellas se incluyen la descarga continua de productos, la posibilidad de obtener una variedad de productos como concentrados, mezclas y colas, la visualización clara de su rendimiento en el tablero, un costo relativamente bajo al ser producida localmente, así como un manejo y supervisión sencillos en términos de toneladas por hora. Además, puede recuperar otros minerales valiosos que puedan acompañar al central. Sin embargo, presenta desventajas que se detallan a continuación: un precio relativamente alto en relación con su capacidad, la necesidad de una alimentación constante, requerimientos de supervisión continua y la dependencia de un motor para su funcionamiento (Cabrera, 2014).

Las variables de operacionales y las más importantes son granulometría de la alimentación, longitud de golpe amplitud, frecuencia de golpe, inclinación de la mesa, cantidad de agua de lavado, posición de los cortadores de productos (Cabrera, 2014).

### **2.2.2. Concentrador centrífugo Knelson**

El dispositivo está concebido para concentrar minerales pesados basándose en las diferencias de peso específico. Al girar a gran velocidad, genera una fuerza centrífuga cercana a 60 g, que impulsa las partículas hacia la periferia. En este proceso, las partículas más pesadas tienden a quedar atrapadas entre las rifas, mientras que las más ligeras son arrastradas hacia la parte superior externa. Se utiliza la presión del agua (lecho fluidizado) para crear una competencia de fuerzas. La configuración de los equipos asegura que solo los materiales más pesados queden retenidos en la canastilla de concentración. Al concluir un período de operación del concentrador Knelson, se recoge el concentrado que se encuentra en los anillos y se extrae por la parte inferior del cono. La duración del ciclo de concentración varía según la aplicación específica que se esté llevando a cabo (Miqueles, 2009).

Este método presenta diversas ventajas significativas. En primer lugar, destaca por su alta eficiencia en la recuperación, asegurando resultados consistentes. Además, su

enfoque amigable con el medio ambiente privado de la necesidad de químicos o reactivos, promoviendo prácticas sostenibles. El bajo consumo de electricidad y agua añade otro aspecto positivo, contribuyendo a la eficiencia energética. Por último, pero no menos importante, los bajos costos de producción hacen que este enfoque sea económicamente viable y atractivo (Cabrera, 2014).

Una desventaja de este método que utiliza inyección de agua es su elevado costo. En diversas plantas de beneficio en la minería de pequeña escala, se ha comprobado que proveer la cantidad adecuada de agua a la presión necesaria puede ser un gran reto. A veces, es necesario emplear una bomba para alcanzar la presión de agua requerida, lo que conlleva un costo adicional de inversión. Aunque el agua puede reciclarse, esto requiere la instalación de sistemas adicionales para su purificación. (Medmin, 2000).

### **2.3. Caracterización química y mineralógica de arenas ferrotitaníferas**

#### **2.3.1 Microscopio petrográfico**

En un microscopio polarizante o petrográfico, la luz atraviesa el nícol inferior o polarizador, donde se difracta y emerge como un único haz que vibra en un solo plano. Este haz de luz polarizada pasa a través de una lámina delgada y se divide en dos haces de rayos que vibran en planos perpendiculares: el rayo ordinario y el extraordinario, con velocidades diferentes específicas de cada mineral. Observar las rocas bajo estas condiciones, con nicoles paralelos (NP o LPP = luz polarizada paralela), permite determinar ciertas características de los minerales, como su color, pleocroísmo, relieve, etc. Al introducir el analizador, la observación se realiza con nicoles cruzados (NC o LPX = luz polarizada cruzada), y los dos haces de la lámina delgada vibran en un mismo plano, manteniendo la diferencia de velocidad inicial. Esta diferencia provoca un desfase al llegar al observador, causando propiedades adicionales como los colores de interferencia, característicos de cada mineral. Con lentes accesorias, se pueden determinar otras características ópticas de los minerales, a veces necesarias para su identificación (Franco y Gonzalo, 2000).

### **2.3.2. Fluorescencia de rayos - X**

La fluorescencia de rayos X es una técnica analítica muy precisa que facilita la determinación rápida de las concentraciones de elementos químicos en distintos tipos de muestras. Además, es un método no destructivo y requiere una preparación de muestras bastante sencilla (Valentinuzzi, 2008).

### **2.3.3. Difracción de rayos - X**

La difracción de rayos X es una técnica eficaz que se usa para identificar, cuantitativa o cualitativamente, la composición mineralógica de muestras cristalinas, de materiales sintéticos y naturales. Se utiliza para analizar minerales, cerámicas, plásticos, entre otros. Además, permite determinar el tamaño de los cristales, realizar cálculos sobre la simetría del cristal, evaluar el grado de orden, obtener parámetros de la red cristalina y medir los coeficientes de dilatación térmica (Servicios Tecnicos de Investigación, 2017)

### **2.3.4 ICP - OES**

La espectroscopía atómica, una técnica fundamental en el Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP), se utiliza para identificar la composición elemental de una muestra a partir de su espectro electromagnético. En el proceso de ICP, se introduce un flujo de argón en un campo de radiofrecuencia, generando temperaturas extremadamente altas de hasta 9000°C gracias a la energía cinética de los iones Ar+. Esto permite una atomización completa de los elementos de la muestra y reduce las posibles interferencias químicas. Esta técnica permite analizar la mayoría de los elementos de la tabla periódica transformando los elementos en átomos o iones mediante atomización. A las altas temperaturas generadas, los elementos en la muestra se ionizan, excitan y emiten radiación. La medición de esta radiación en el plasma resulta en la espectrometría de emisión óptica por plasma acoplado inductivamente (ICP-OES). En la configuración ICP-OES, la luz emitida por el plasma se puede observar radialmente (Figura 17), dando un rango lineal superior. Alternativamente, la luz emitida puede ser observada axialmente, dirigiendo la luz hacia abajo, lo que reduce el fondo continuo del ICP y maximiza la trayectoria de la muestra, permitiendo mejores límites de detección comparado con la observación radial (PerkinElmer, 2017).

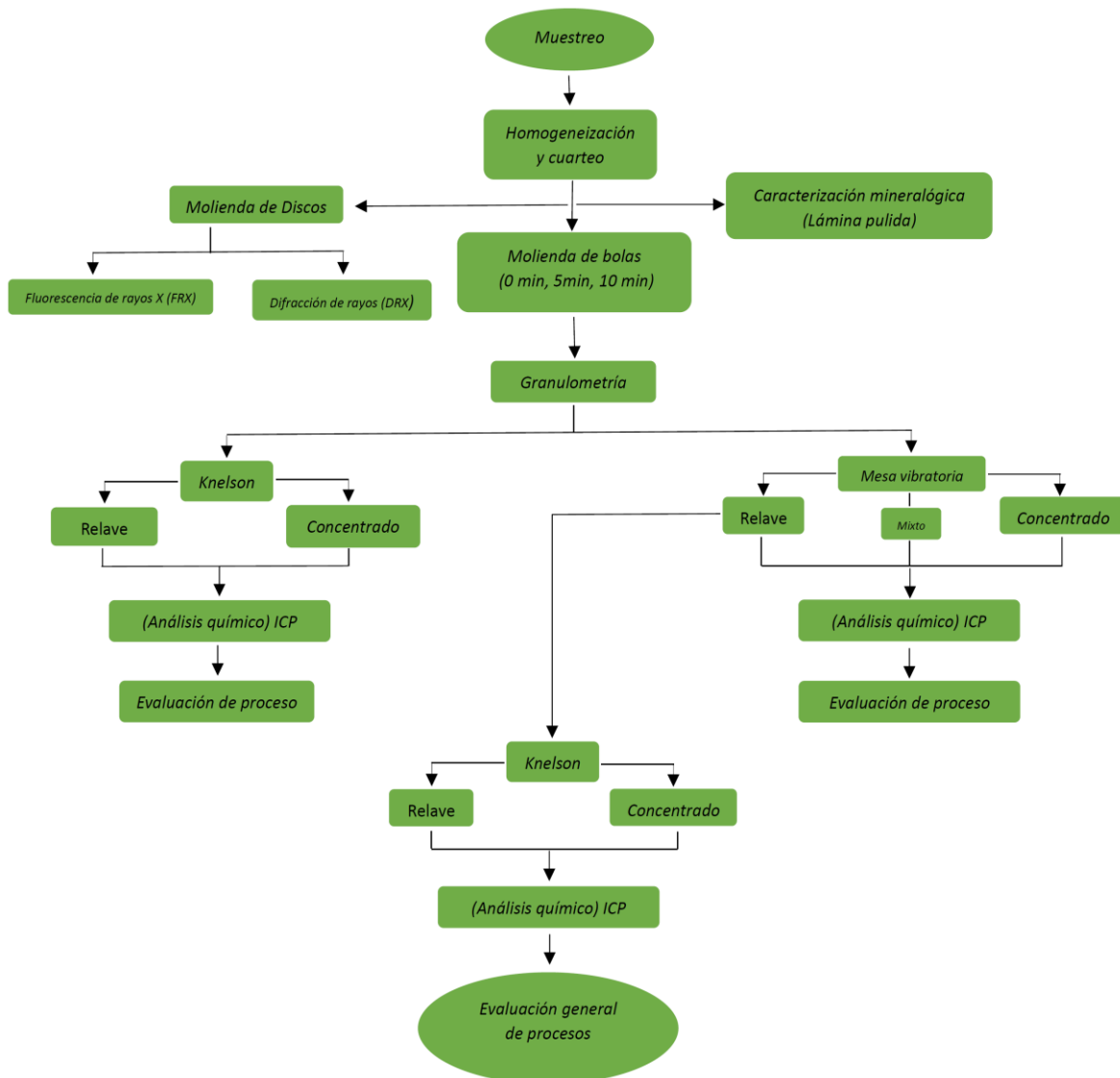
## Capítulo tres

### Metodología

En este apartado podrá encontrar el desglose metodológico del trabajo, basado en 3 tiempos de molienda inicial para luego usar los métodos gravimétricos que ayudaran a la obtención de nuestros minerales, caracterizados como óptimos en base a porcentaje de recuperación (Figura 12).

**Figura 12**

*Flujograma de la metodología del trabajo*



### 3.1. Muestreo

El material se la obtuvo en los límites de la playa en la ciudad de Pedernales en la provincia de Manabí, ubicada al occidente del país en la zona geográfica denominada Región Litoral.

La recolección del material fue realizada a una elevación de 5 metros sobre el nivel del mar, se la realizó en recipientes de muestreo, estos recipientes están estructurados con un material denominado polipropileno, fueron 8 recipientes de muestro en total que utilizamos para el muestreo con un peso total de 35 kg.

#### Figura 13

*Lugar de muestreo*



*Nota:* Lugar de la muestra con coordenadas Este (x): 6966.34 y Norte (y):604130.27.

En la zona donde se recolectó el material ferrotitanífero, se puede observar arenas de grano fino negro y marrón, estas arenas afloran en casi toda el área de la playa recorrida (Figura 13).

#### 3.1.1. Preparación de la muestra

El material se lo preparó en los laboratorios de Geología en la Universidad Técnica Particular de Loja, y se hizo un primer tamizado para poder separ las arenas de residuos presentes en la playa para luego realizar diferentes estudios de análisis.

Del material acondicionado se obtuvo una alícuota de 9.115 kg, de esta alícuota se procedió a dividir para la sección del molino de bolas con una cantidad de 9.1 Kg y preparación de la lámina pulida con 15 g (Tabla 1).

**Tabla 1***Pesos iniciales del trabajo*

<b>Molino de discos (g)</b>	<b>Molino de bolas (Kg)</b>	<b>Lamina pulida (g)</b>
100	9	15

Al clasificar las diferentes cantidades del material se homogeneizó y cuarteo, colocamos el material acondicionado en un lamina flexible como el plástico, luego realizamos movimientos que nos permitan mezclar nuestro material, después cuarteamos el material de forma uniforme como se observa en la Figura 14. Este proceso se la realizo para Molinos de discos, Molino de bolas y Lamina pulida.

**Figura 14***Material cuarteado*

### 3.2 Molino de discos

Se procede a pesar 100 g de material ferrotitanífero para colocar en los discos de la pulverizadora Restsch (RS-200), los parámetros fueron un tiempo de 5 minutos y una velocidad de 700 rpm (Figura 15).

Figura 15

*Molienda de discos ferrotitanífera.*



Nota: A: Muestra sin pulverizar, B: Pulverizador marca *Retsch*, C: Muestra Pulverizada.

### 3.3. Caracterización química

#### 3.3.1. Espectrometría de masas de plasma (ICP)

De la muestra obtenida en los métodos gravimétricos como entrada, concentrado, mixto (mesa vibratoria) y relave, se toma una alícuota de 100 g de cada salida para proceder a su pulverización, de esta pulverización se procedió a la digestión ácida. Para la digestión se utilizaron 2 ml de HF, 6 ml de HCL, 2 ml de HNO<sub>3</sub>, un matraz de 10 ml y diferentes pesos de entre 0.1500 a 0.1507 g en cada muestra, en total se analizaron 48 muestras. Luego se procedió a un factor de dilución donde se utilizó una micropipeta de 100 microlitros y un matraz de 10 ml. Los parámetros para el digestor microondas fueron:  $t_1 = 25 \text{ min}$ -  $T_1 = 230^\circ\text{C}$ ,  $t_2 = 15 \text{ min}$  -  $T_2 = 230^\circ\text{C}$  y 800 MW.

#### 3.3.2. Difracción de rayos X (DRX)

Se seleccionó 3 g del total de la muestra pulverizada en el molino de discos, luego procedimos al laboratorio químico, lugar donde se procedió con el análisis respectivo.

#### 3.3.3. Fluorescencia de rayos X (FRX)

Para este apartado de igual manera que el DRX, tomamos una alícuota de 3 g de toda la muestra restante pulverizada para proceder a la entrega en laboratorio para su respectivo análisis.

### 3.4. Caracterización mineralógica

#### 3.4.1. Lámina pulida

Se separó la arena de playa y las arenas negras, esta obtención de las arenas negras se la realizó mediante un platón. Este material (sedimentos pesados) se lo ubicó en un recipiente de 3 cm por 9 cm de diámetro aproximados, posteriormente se colocó la resina y el endurecedor (1:4) para llevarlos a la cámara de vacío de marca BUEHLER. Después se lo traspasó al equipo BUEHLER METASERV para ser pulidas con lijas #120 y #800, para ser pasadas por un paño con suspensión de diamante. Por último, se utilizó el microscopio OLYMPUS BH-2 para su respectivo análisis.

### 3.5. Caracterización física

#### 3.5.1. Peso específico del material

Para la realización de este ensayo tenemos cuatro P#, P1 se pesa el picnómetro seco y sin material, P2 se coloca material hasta la cuarta parte del picnómetro para proceder a pesarlo, P4 se pesa el picnómetro con la muestra y el agua y P3 se pesa el picnómetro solo con agua. Para la realización de estos resultados utilizamos la siguiente formula:

$$\gamma = \frac{(P2 - P1)}{(P3 - P1) - (P4 - P2)}$$

Donde:

P1= Picnómetro seco y sin material

P2= Picnómetro + material

P4= Picnómetro + material + agua

P3= Picnómetro + agua

#### 3.5.2. Análisis granulométrico

Una vez obtenido el material que da como resultado el molino de bolas se procedió a realizar el análisis granulométrico, este nos permitirá obtener diferentes tamaños de las partículas. El tamaño de las diferentes partículas servirá como factor de guía para proceder con los para metros operacionales de los métodos gravimétricos.

Como primer punto se coloca 250 g de material en el tamiz superior unido a los diferentes tamices estandarizados ASTM, para modificar los parámetros, tiempo (min), y amplitud (mm/g). Para los 3 ensayos realizados se aplicaron los mismos parámetros: 8 min y 1.70 mm/g (Figura 16). Después se procedió a pesar los tamices con y sin la muestra para desarrollar la curva granulométrica.

**Figura 16**

*Análisis granulométrico.*



*Nota:* Tamizador Retsch - AS 20.

### **3.6. Molino de bolas**

El material de 9 kg homogenizado se lo separó para realizar 3 tiempos de molienda (0, 5 y 10 minutos), (Figura 17). El siguiente procedimiento se lo utilizó para las moliendas:

- Se ingresa las esferas de acero en el molino.
- Para la formación de la pulpa colocamos 2 kg de material con 1 L de agua en el tambor del molino.
- Ingresamos la pulpa para proceder a cerrar y asegurar el cilindro.
- Se ubica el cilindro en la sección giratoria para ejecutar la molienda y con un cronometro para medir el tiempo.
- Retiramos el material y procedimos a la sedimentación (24 h).

**Figura 17***Funcionalidad del Molino de bolas*

*Nota:* A: Molino de Bolas, B: Limpieza del tambor, C: Arenas negras en el tambor con bolas de acero.

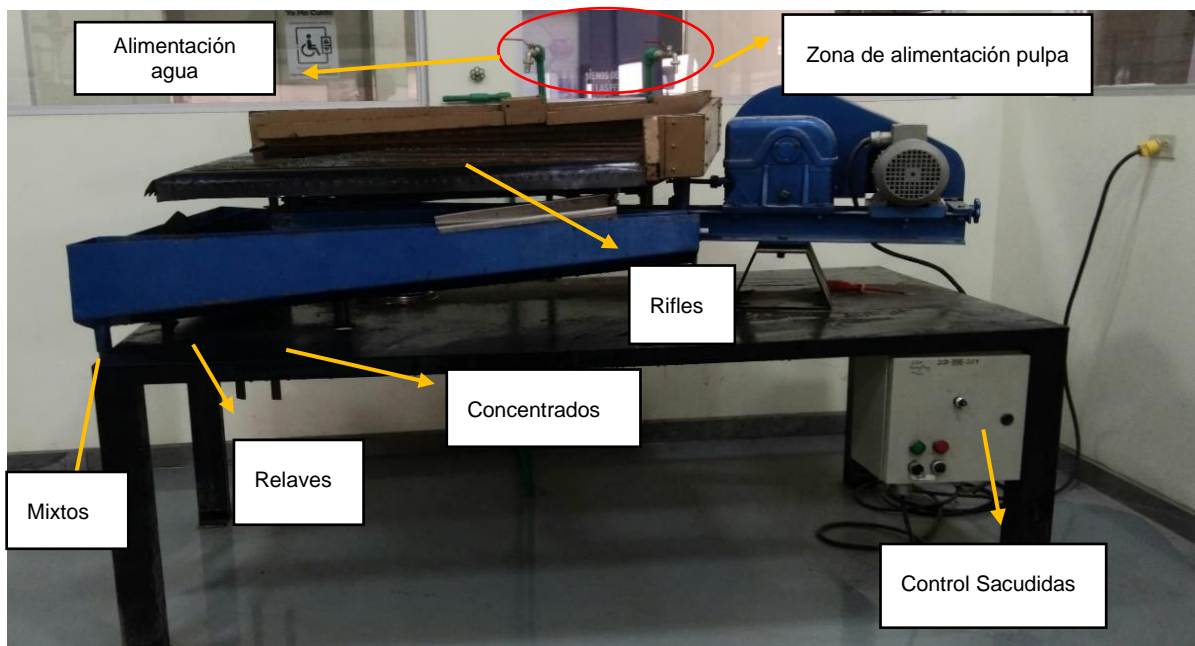
### 3.7. Mesa Vibratoria (concentración gravimétrica)

Este método gravimétrico (Figura 18), se caracteriza por tener una lámina de agua en su superficie, esta superficie puede tener diferentes grados que pueden ser operados con facilidad. Los parámetros operacionales de la mesa vibratoria son: amplitud (mm), velocidad (impactos/min), granulometría, grado de inclinación (transversal y longitudinal). El procedimiento se lo realizó para los 3 tiempos de molienda de bolas de la siguiente manera:

- La elaboración de la pulpa se la realizó con 2 kg de material y 3 L de agua, esta pulpa estuvo de forma constante en la zona de alimentación, esta parte se la realiza si los alimentadores de agua están activos con una frecuencia de sacudidas de 57 rpm.
- Cuando ingresó la pulpa se verificó que el material tome el rumbo correcto (concentrado, mixtos y relave).
- Se verificó que el material no se quede en los rifles y que se encuentre en sus respectivos lugares.
- El material obtenido se lo deja sedimentar por 24 h, luego se lo seca a 100 °C para proceder a pesarlo.

**Figura 18**

*Partes y funcionalidad de la mesa vibratoria*



*Nota: Concentrador gravimétrico.*

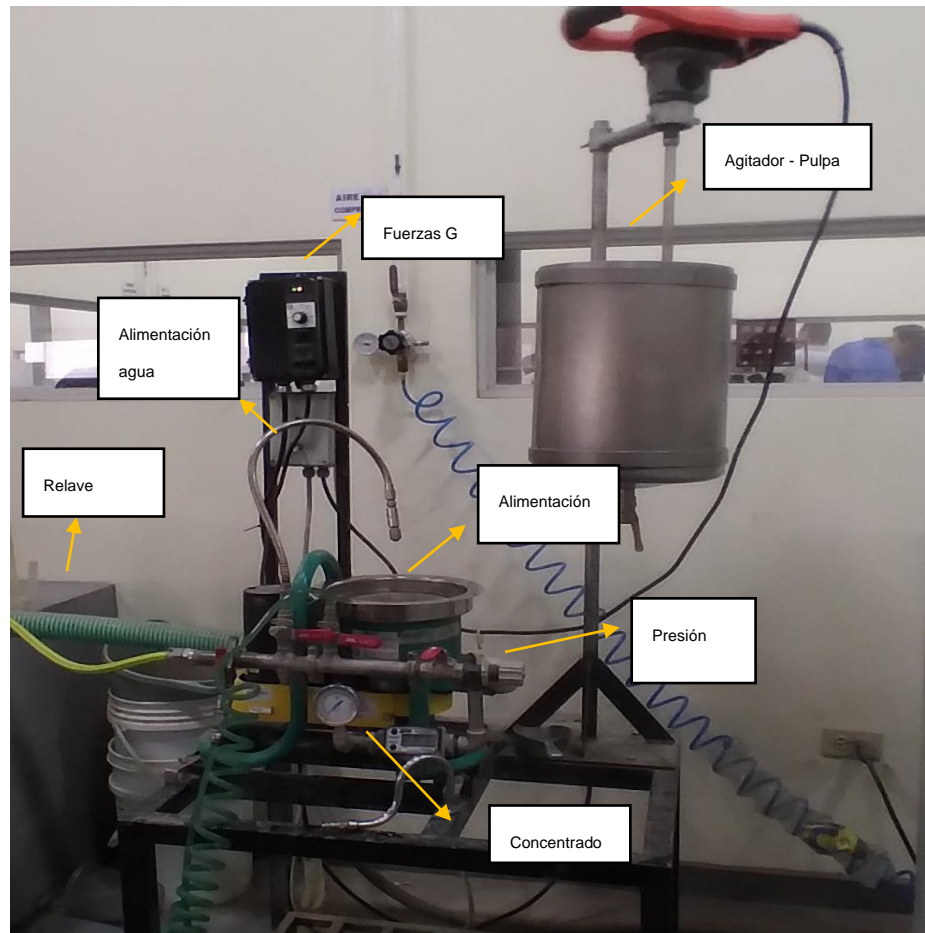
### 3.8. Concentrado Gravimétrico Knelson

Para el método gravimétrico Knelson se utilizó una pulpa de 1 kg de material y 1 L de agua. Esta pulpa es la encargada de alimentar a Knelson junto con agua que es aportada por el concentrador.

El material gracias a sus fuerzas G y su presión es colocado en el cono (material de interés), mientras el material de no interés es desechado por una salida que se encuentra al costado del concentrador. Posteriormente se sedimenta el material del concentrado y relave por 24 horas, evacuamos el agua para secar y pulverizar. Para los 3 resultados de molienda (0, 5 y 10 minutos) se utilizaron los mismos parámetros: 40 fuerzas G y 2 psi (Figura 19).

**Figura 19**

*Partes y funcionalidad del concentrador Knelson*



*Nota:* Concentrador gravimétrico.

### 3.9. Combinación de procesos

En este apartado tenemos que utilizar los 3 resultados obtenidos del relave de mesa vibratoria para proceder a utilizarlos en el concentrador Knelson empleando los mismos parámetros. Para esto se adjuntó el material con el mejor color (el color negro se lo utilizó como referencia), este material se utilizó como entrada para el método gravimétrico.

### 3.10 Balance metalúrgico

En esta etapa se utiliza los resultados obtenidos del ICP-OES, estos resultados sirven como referencia para conocer si el ensayo ha sido realizado correctamente. Luego se realizan los cálculos de entrada, concentrados, mixtos (mesa vibratoria) y relave para definir el balance

entre entrada y salida. En el apartado de rendimiento se divide el concentrado y la entrada, todo esto multiplicado por 100.

## Capítulo cuatro

### Resultados y discusión

#### 4.1. Caracterización Química

##### 4.1.1. Difracción de rayos X (DRX)

En este apartado se establecen los porcentajes o concentraciones de los minerales presentes en el material que se muestreo en la orilla del sector playero de la ciudad de Pedernales. Podemos observar en la Tabla 2 el mayor porcentaje correspondiente a la Ilmenita con un 52.3 % y en menor cantidad encontramos a la magnetita con un escaso 13.7 % de concentración mineral en nuestro material.

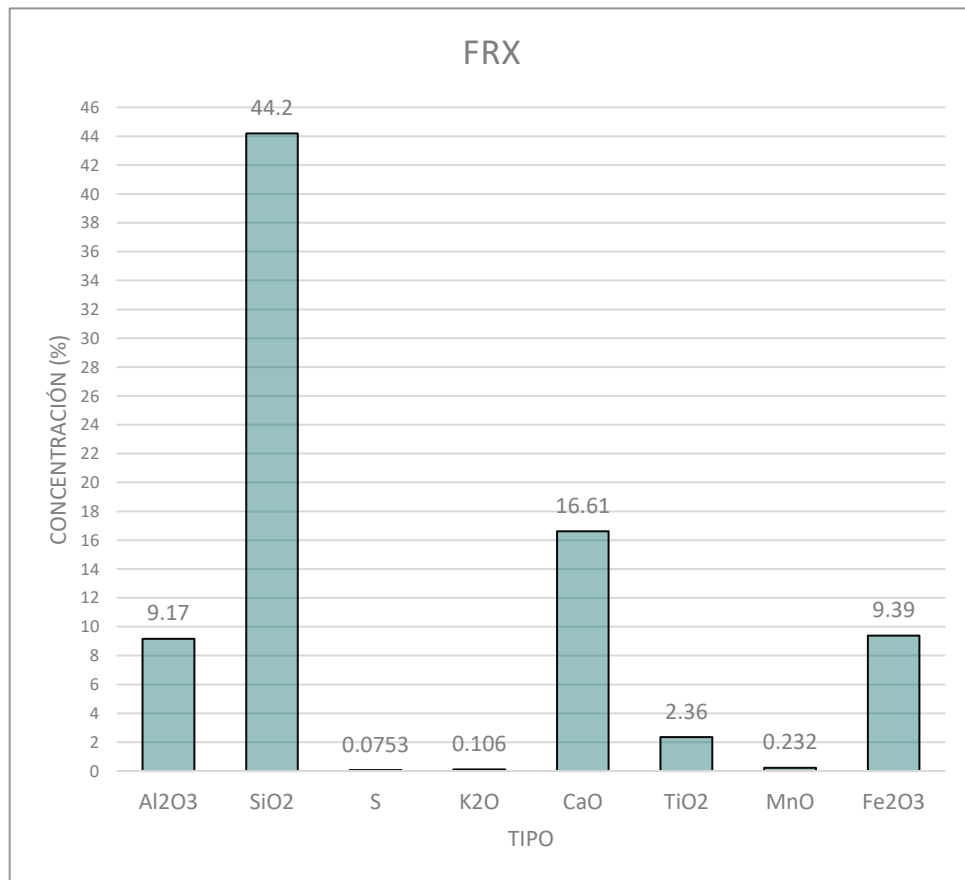
**Tabla 2.**

*Concentración mineral de las arenas*

Minerales	Magnetita	Ilmenita	Magnesioferrita
Concentración (%)	13,7	52.3	34

##### 4.1.2. Fluorescencia de rayos X (FRX)

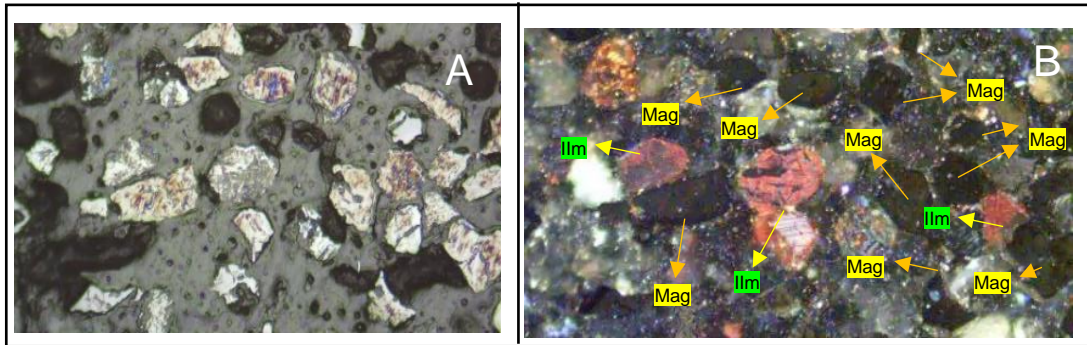
Se analizó principalmente el material proveniente de la playa, a esto se le hizo una sola caracterización de concentración elemental obteniéndose resultados mayoritarios en SiO<sub>2</sub> con 44.2 % y minoritarios de S con 0.0753 %. Es lógico suponer que existen valores considerables de hierro (9.39) y titanio (2.36) debido al material analizado (Figura 20).

**Figura 20.***Histograma de concentración*

## 4.2. Caracterización mineralógica

### 4.2.1. Lámina Pulida

En las fotografías de la Figura 21 se identificaron dos minerales que son muy comunes en las arenas ferrotitaníferas, estos son la magnetita y la ilmenita. La magnetita (Mag) en nicoles cruzados tiene un color gris, no tiene birrefringencia y su anisotropía es anisotrópica, no presenta reflexiones internas y tiene una textura automorfa. El segundo mineral denominado ilmenita (Ilm) es un mineral único, en nicoles cruzados presenta una birrefringencia y anisotropía fuerte, reflejos internos cafés, y su textura es laminar.

**Figura 21.***Fotos de la sección pulida*

*Nota:* La fotografía A esta en nicoles paralelos y la fotografía B está en cruzados donde podemos observar la magnetita (Mag) y la Ilmenita (Ilm).

### 4.3. Caracterización Física

#### 4.3.1. Gravedad específica

En la Tabla 3 se puede verificar los diferentes valores de los 3 ensayos que se realizaron en laboratorio, los cuales tienen resultados diferentes pero muy aproximados.

**Tabla 3.***Resultados de gravedad específica*

Ensayo #	(g/cm <sup>3</sup> )
1	2.93
2	3.03
3	3.04
Total	3.00

En los resultados de Macas Armijos (2023), se tiene como resultado una densidad de 4.27 g/cm<sup>3</sup>; sin embargo, cabe recalcar que el material analizado es de oro. En la presente investigación la gravedad específica es de 3.00 g/cm<sup>3</sup>, siendo más baja ya que el material estudiado en este trabajo corresponde a arenas ferrotitaníferas, este material suele contener densidades mucho más bajas que las del oro.

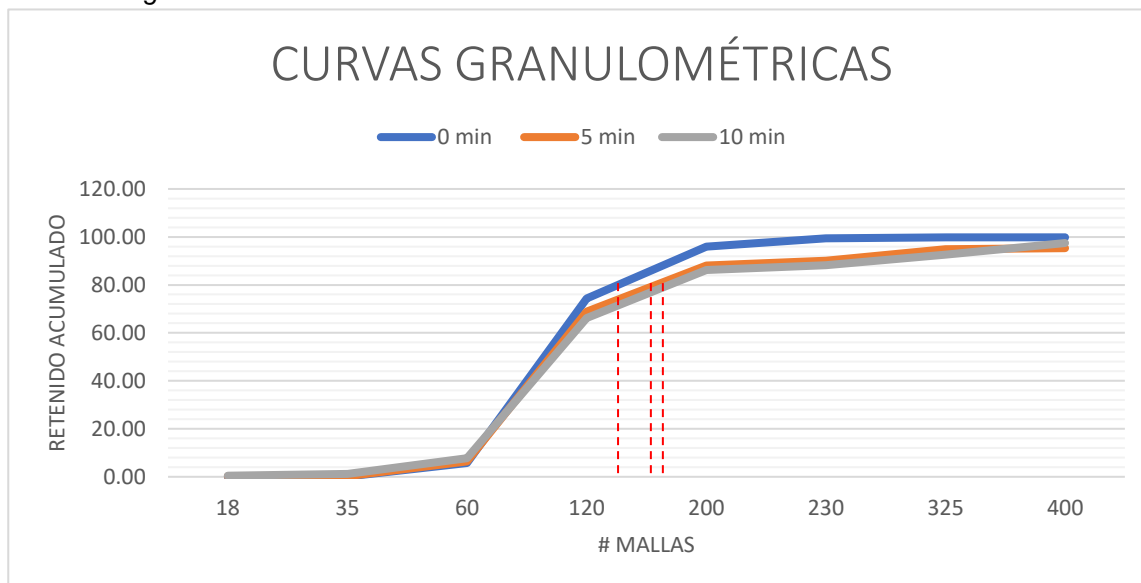
### 4.3.2. Análisis Granulométrico

En el análisis granulométrico se puede observar cómo se encuentra distribuido las partículas del material por tamaños y porcentajes. El material fue triturado en un molido de bolas, de este material se obtuvo diferentes porcentajes (Tabla 4), los cuales fueron necesarios para llegar a una malla #140 en el tiempo 0 min, malla #169 en un tiempo de 5 min y una malla #174 en 10 min, las cuales se encuentran entre la malla #120 y #200 con un pasante del 80 % en las tres moliendas (Figura 22).

**Tabla 4.**

*Resultados granulométricos de 0, 5 y 10 minutos de molienda.*

# Mallas	% R. acumulado – 0 min	% R. acumulado – 5 min	% R. acumulado - 10 min
18	0.00	0.22	0.48
35	0.13	0.34	1.22
60	5.78	6.42	7.70
120	74.32	68.88	66.16
200	95.91	88.10	86.22
230	99.46	90.06	88.18
325	99.81	94.89	92.62
400	99.83	95.32	97.44

**Figura 22***Resultados granulométricos*

### 5.1. Mesa vibratoria

En la Tabla 5 y en la Tabla 6 se puede observar que se tiene diferentes respuestas, estas respuestas son de 6 ensayos, a 0 min, 5 min y 10 min, estos a su vez están divididos para Fe y Ti. Estos ensayos en mesa vibratoria arrojaron diferentes balances y rendimientos que se establecieron con ayuda de los resultados del ICP-OES para saber las leyes de cada sección.

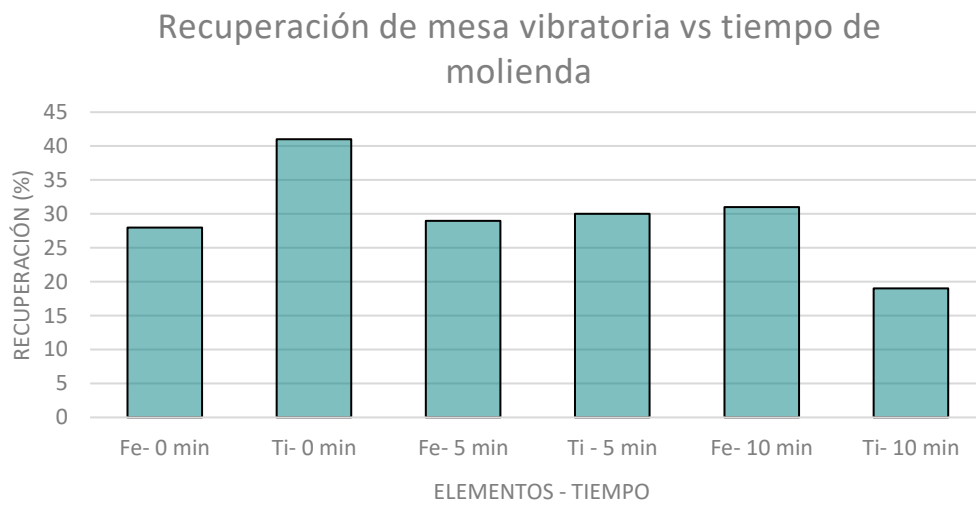
**Tabla 5***Resultados mesa vibratoria Fe*

Ensayo #	Elemento	Molino (min)	Malla #	Rendimiento %
1	Fe	0	140	28
2	Fe	5	169	29
3	Fe	10	174	31

**Tabla 6***Resultados mesa vibratoria Ti*

Ensayo #	Elemento	Molino (min)	Malla #	Rendimiento %
1	Ti	0	140	41
2	Ti	5	169	30
3	Ti	10	174	19

La Figura 23 se encuentran los rendimientos de recuperación de los ensayos, donde se observa que en el tiempo de 0 min para Ti a una malla #140 tiene el mayor rendimiento de 41 %, en segundo lugar, tenemos el tiempo de 10 min para Fe a una malla #174 con una recuperación del 31 %, en tercer lugar, podemos observar que se encuentra el tiempo 5 min para Ti a una malla #169 con una recuperación del 30 %, en cuarto lugar con un tiempo de 5 min para Fe a una malla #169 con una recuperación del 29%, en quinto lugar se encuentra el tiempo 0 para Fe a una malla #140 con una recuperación del 28 % y en último lugar se puede observar que se encuentra el tiempo 10 para Ti con un malla #174 y una recuperación del 19 %. En la investigación de (Castro, 2022) se observa que utilizaron el mismo método gravimétrico para óxido de hierro obteniendo resultados o rendimientos diferentes, la mejor recuperación es del 98.31 % a una malla #30 con una inclinación de 3 °, una velocidad de agua con 15 l/min y una fracción de sólidos del 20% (9.37 kg) y el menor rendimiento es de 8.65 % a una malla #30 con una inclinación de 2 ° una cantidad de agua de 15 l/min, y una fracción de sólidos con una 15 % (5,62 kg), dando resultados diferentes por las condiciones de operación que se realizaron como los parámetros operacionales, los cuales fueron aplicados por la densidad del material.

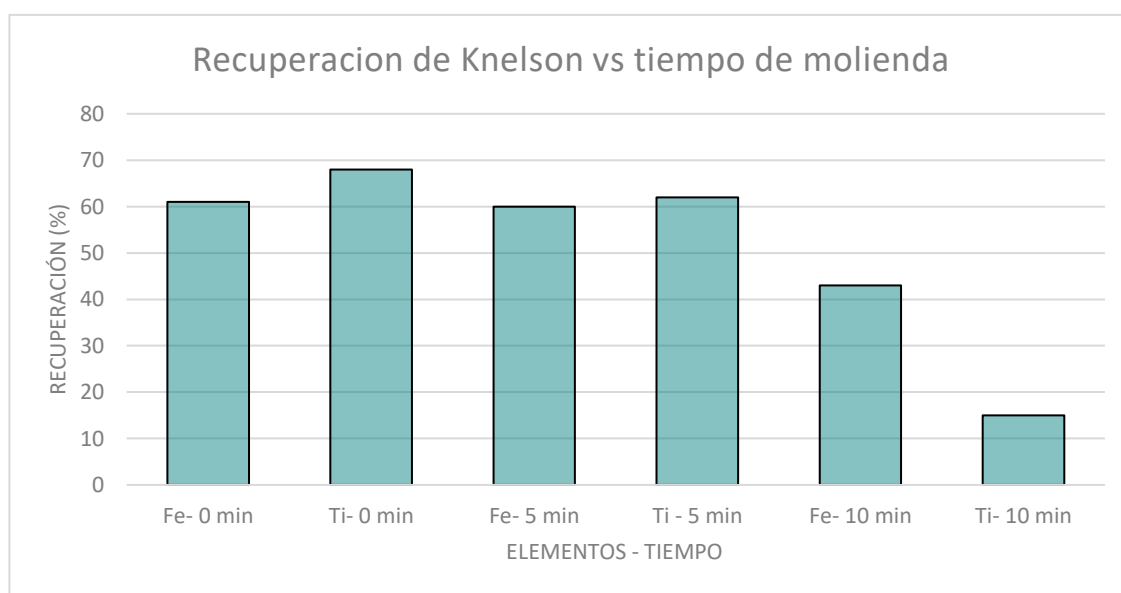
**Figura 23***Histograma de rendimientos***5.2. Knelson****Tabla 7***Resultados de la concentración gravimétrica Fe*

Ensayo #	Elemento	Molino (min)	#Malla	Rendimiento %
1	Fe	0	140	61
2	Fe	5	169	60
3	Fe	10	174	43

**Tabla 8***Resultados de la concentración gravimétrica Ti*

Ensayo #	Elemento	Molino (min)	# Malla	Rendimiento %
1	Ti	0	140	68
2	Ti	5	169	62
3	Ti	10	174	15

En la Figura 24 se encuentran los diferentes tiempos y elementos con su respectiva recuperación. Como primer o mayoritario porcentaje tenemos al tiempo 0 con su elemento el Ti a una malla #140 con una recuperación del 68 %, le sigue el tiempo de 5 min para el Ti a una malla #169 con una recuperación del 62 %, como tercer apartado tenemos el tiempo de 0 para el Fe a una malla #140 con una recuperación del 61 %, le sigue el tiempo 5 para Fe con una malla #169 con una recuperación del 60 %, el quinto y sexto resultado es el tiempo de 10 min para el Fe y Ti con una recuperación del 43 % y 15 % a una malla #174 respectivamente. Para los 3 tiempos de entrada se utilizaron 40 fuerzas G.

**Figura 24***Histograma de rendimientos*

El material proveniente de ilmenita es del municipio de Colombia denominado Barbacoas, ubicado en el departamento de Nariño para la investigación de (Córdoba, 2023) el cual utiliza el método gravimétrico Knelson para ilmenita pero teniendo recuperaciones diferentes, su recuperación más alta es del 94.73 % con una masa de alimentación de 70 g a una velocidad de giro de 40.2 G y la más baja es del 81.48 % con una masa de alimentación de 70 g a una velocidad de 67 G en la etapa 1, en la etapa 2 tienen una recuperación máxima del 94.05% con una alimentación de 100 g a una velocidad de 94 G, como rendimiento más bajo obtuvieron un 88.54 % con una masa inicial de 100 g a una velocidad de 67 G y como tercera etapa tuvieron un porcentaje alto del 92.08% con una masa de alimentación de 130 g una velocidad de 40.2 G, como porcentaje más bajo un 81.91% con una masa de alimentación del 130 g a una velocidad de 67 G. Estos resultados varían porque hay diferencias entre los parámetros operacionales aplicados de manera experimental.

### 5.3. Combinación de ensayos.

Combinando los relaves del método gravimétrico denominado mesa vibratoria y el inicio del funcionamiento del método gravimétrico Knelson se obtuvieron diferentes rendimientos que varían desde el 56 % hasta el 35 % (Tabla 9 y Tabla 10).

**Tabla 9**

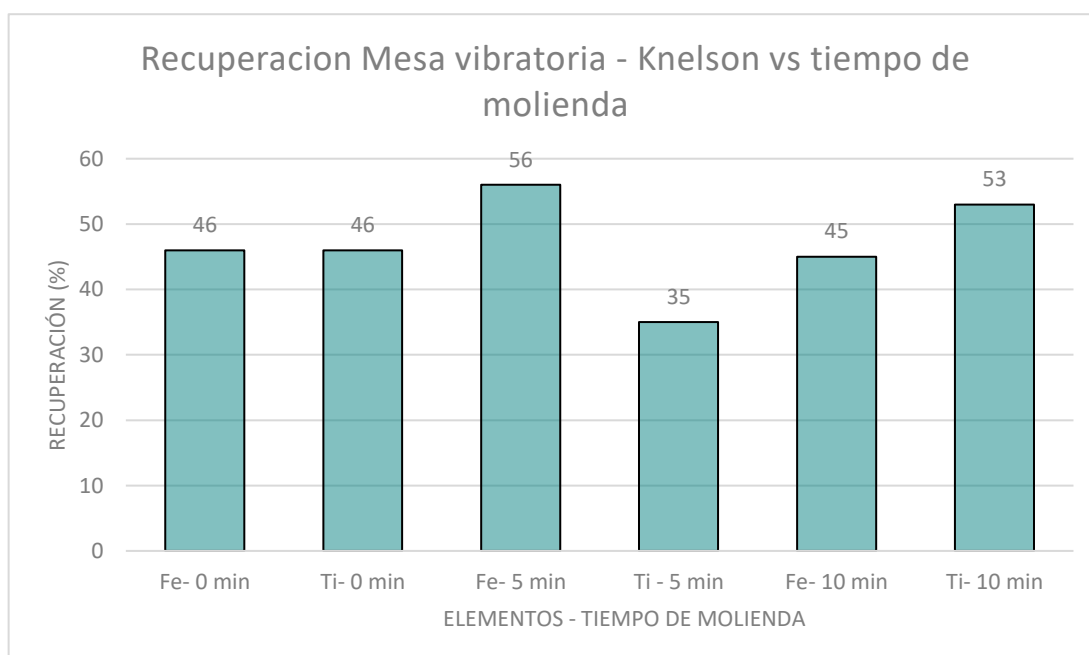
*Resultados de la combinación de mesa a Knelson Ti*

Ensayo #	Elemento	Molino (min)	# Malla	Rendimiento %
1	Ti	0	140	46
2	Ti	5	169	35
3	Ti	10	174	53

**Tabla 10***Resultados de la combinación de mesa a Knelson Fe*

Ensayo #	Elemento	Molino (min)	# Malla	Rendimiento (%)
1	Fe	0	140	46
2	Fe	5	169	56
3	Fe	10	174	45

En la Figura 25 se muestran de mejor manera las recuperaciones, siendo la más alta el tiempo de 5 min para el Fe con un 56 % a una malla #169, en segundo lugar, tenemos al tiempo de 10 min con una malla #174 y una recuperación del 53 %, consecutivamente se encuentra el tiempo de 0 min a una malla # 140 con una recuperación del 46 % para el Fe. Para el Ti con tiempo de 10 min, a una malla # 174, con una recuperación del 45 % y por último se encuentra el tiempo de 5 min con una malla # 169, y una recuperación del 35 %.

**Figura 25***Histograma de rendimientos para métodos combinados*

## Conclusiones

El peso específico de nuestra muestra ferrotitanífera obtenida en la ciudad de Pedernales es de  $3.00 \text{ g/cm}^3$ .

El análisis químico de FRX nos da una concentración de 9.17 % para el  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , de 44.2 % para el S, de 0.106 % para el  $\text{K}_2\text{O}$ , de 16.61 % para el  $\text{CaO}$ , de 2.36 % para el  $\text{TiO}_2$ , de 0.232 % para el  $\text{MnO}$  y de 9.39 % para el  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

El análisis mineralógico en la sección pulida se obtuvieron los siguientes resultados: magnetita e Ilmenita y en el DRX tenemos un 13.7 % de magnetita, 52.3 % de ilmenita y un 34 % de Magnesioferrite.

Para la granulometría inicial del material con 0 min de molienda se obtuvo un  $D_{80}$  140, mientras que para los 5 min un  $D_{80}$  169, y para un tiempo de molienda de 10 min un  $D_{80}$  174.

En mesa vibratoria el mejor rendimiento es para el Ti con una recuperación del 41 % a una malla #140, de 0 min de molienda, mientras que el mejor rendimiento para el Fe en el tiempo 10 min de molienda a una malla #174, con una recuperación del 31 %.

Para el concentrador gravimétrico Knelson el mejor rendimiento para Fe es el tiempo 0 min con una malla #140 y una recuperación del 61 %, y la del Ti en el tiempo 0 min con una malla #140 con una recuperación del 68 %.

En la combinación de métodos gravimétricos el mejor rendimiento para Fe es el tiempo de molienda de 5 min y con una malla #169 se recuperó el 56 %, mientras que para el Ti es el tiempo de 10 min a una malla #174 con una recuperación del 53 %.

## Recomendaciones

Durante el proceso de molienda con bolas, se recomienda no extender los tiempos de operación más allá de los normalmente utilizados en este trabajo para optimizar la separación del material, por los resultados que en su mayoría bajan de rendimiento al momento de operar con un tiempo de molienda superior.

Para los métodos gravimétricos, como la mesa vibratoria, es recomendable utilizar una malla #30, con una inclinación de 3°. Estos parámetros son cruciales para lograr una recuperación significativa de los minerales. Al modificar estos valores, ya sea aumentando el número de malla o alterando la inclinación, es probable que la eficiencia de la recuperación disminuya notablemente, lo que podría afectar negativamente el rendimiento del proceso.

Por otro lado, en el método Knelson, se puede utilizar los parámetros similares a este trabajo como la malla #140 y #169, pero es esencial operar a velocidades superiores a 80 G para maximizar la eficiencia de separación y recuperación. Este ajuste en la velocidad centrífuga permite mejorar la concentración de partículas valiosas, lo que hace que el método sea altamente efectivo para la recuperación de minerales finos y de alta densidad.

En la combinación de los métodos gravimétricos se recomienda trabajar con una malla #140, #169 y #174 con una fuerza de 40 G a una presión de 2 psi para obtener resultados aceptables.

### Referencias bibliográficas

- Bravo Cerro, F. I. (2023). Rutilo como mineral indicador resistente para depósitos de Cu - Mo. *Título de Geólogo*. [Universidad de Concepción], [Concepción].
- Cabrera Carrión, S. (2014). *Recuperación de oro por gravimetría de mineral proveniente del Distrito Minero Nambija "Condominio sur"*. [Universidad Técnica Particular de Loja], [Loja].
- Carvajal Martínez, C., & Chávez Basurco, A. (2015). *Estudio del concentrador gravimétrico helicoidal hecho con fibra de vidrio y sus parámetros de funcionamiento*.
- Castro, R. R. (2022). *Comparación de procesos de concentración gravimétrica entre mesa vibratoria y espiral para la obtención de un concentrado de óxido de hierro (FeO)*. [Universidad del Azuay], [Cuenca].
- Chuquirima Ramos, M. G., & Cortez Chulde, L. P. (2015). Estudio y obtención de metal de hierro a partir de arenas ferruginosas. *Ingeniero Mecánico*. Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- Córdoba, E. M. (2023). *Purificación de ilmenita contenida en arenas negras colombianas*. [Universidad Industrial de Santander], [Bucaramanga].
- Department of Primary Industries. (2006). *Heavy Minerals*. Fuente: [http://www.pir.sa.gov.au/minerals/geological\\_survey\\_of\\_sa/commodities/](http://www.pir.sa.gov.au/minerals/geological_survey_of_sa/commodities/)
- Flores Bustamante, A. (2017). Arenas ferrotitaníferas de la isla de Portete, Esmeraldas, como fuente de obtención de Dióxido de Titanio (TiO<sub>2</sub>). *Ingeniero Químico*. [Universidad Técnica Particular de Loja], [Loja].

- Franco , M., & Gonzalo , J. (2000). Taller de petrología: enseñanza de la petrología. Salamanca : Enseñanza de las Ciencias de la Tierra. Fonte: <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://core.ac.uk/download/pdf/39077889.pdf&ved=2ahUKEwizi5CCldyHAXuRjABHepmAAQQFnoECBwQAQ&usg=AOvVaw2jDoVPtUcDiw0Y9QvH-hYV>
- GADMP. (2016). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial 2014-2019*. Pedernales: Municipalidad del Cantón.
- Gracia, V. P. (2001). *Evaluación para aplicaciones en arqueología y en patrimonio histórico - artístico*. Radar de suelo. [Universidad de Politécnica de Cataluña], [Barcelona].
- Gutiérrez Pérez, D. (2004). *Disolución de la ilmenita (FeTiO<sub>3</sub>) proveniente de arenas negras, inducida por molienda de alta energía*. [Universidad Industrial de Santander], [Bucaramanga].<https://noesis.uis.edu.co/items/6ae1a2ab-a53e-41ce-be96-c1333677e30b>.
- Gutiérrez, & Ranz. (2010). *Utilización del equipo portátil de fluorescencia de rayos x para el estudio de metales pesados en suelos: puesta a punto y aplicación*. [Universidad de Alcalá], [Madrid].
- Gutiérrez, D. (s.d.). *Disolución de la ilmenita (FeTiO<sub>3</sub>) proveniente de arenas negras, inducida por molienda de alta energía*. Fonte:<https://noesis.uis.edu.co/items/6ae1a2ab-a53e-41ce-be96-c1333677e30b>
- Higueras Higueras, P. L., García Noguero, E., Esbrí Víctor, J. M., & Burkhalter, E. (2018). La monacita, mena de "tierras raras" y su polémica posibilidad de explotación en Ciudad Real. Em *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*. Fonte: La monacita, mena de "tierras raras" y su polémica posibilidad de explotación en Ciudad Real: <https://www.raco.cat/index.php/ECT/article/view/343208>

- Macas Armijos, A. A. (2023). *Caracterización geometalúrgica de la mena del sector Tierrero-Nambija de la Empresa Minera Macas, para el proceso de recuperación de oro mediante procesos gravimétricos y metalúrgicos*. [Universidad Técnica Particular de Loja], [Loja].
- Medmin. (2000). Implementación de tecnologías dirigidas a la reducción de impactos ambientales negativos causados por operadores mineras y adecuación ambiental. Em *Concentración Gravimétrica* .
- Miqueles, O. (2009). *Apuntes de Concentración de Minerales II*.
- Navas Jaramillo, S. (2014). Recuperación de oro por gravimetría centrífuga y flotación de los realces provenientes de la industria minera artesanal de La Pangui - Chinapintza. *Ingeniero en Geología y Minas*. [Universidad Técnica Particular de Loja], [Loja].
- PerkinElmer, I. (2017). *Espectroscopia atómica - Una guía para seleccionar la técnica y un sistema apropiado*. Fonte: [www.perkinelmer.com/atomicspectroscopy](http://www.perkinelmer.com/atomicspectroscopy)
- PMRC. (1988). *Grandes Rasgos Geomorfológicos de la costa ecuatoriana*.
- Reyes, P., & Michaud, F. (2012). Mapa Geológico de la Margen Costera Ecuatoriana (1:500000). [Quito, Ecuador]: EP PetroEcuador - IRD (Eds).
- Romero, L. (31 de Mayo de 2021). *Revista Ciencias de la Tierra*. Fonte: <https://revistacienciasdelatierra.com/geociencias/mineralogia/el-zircon-un-extraordinario-mineral-aprende-como-se-identifica/9071/>
- Sámano Tirado, A., & Vargas Gutiérrez, V. (2014). *“minerales opacos y sus características al microscopio*. [Hermosillo]. Fonde: [https://www.academia.edu/31991260/UNIVERSIDAD\\_DE\\_SONORA\\_TABLAS\\_DE\\_MINERALES\\_OPACOS\\_AL\\_MICROSCOPIO](https://www.academia.edu/31991260/UNIVERSIDAD_DE_SONORA_TABLAS_DE_MINERALES_OPACOS_AL_MICROSCOPIO)

Servicios Tecnicos de Investigación, s. (2017). *Difracción de rayos x*. Universidad de Alicante.

Fonte: <https://ssti.ua.es/es/instrumentacion-cientifica/unidad-de-rayos-x/difraccion-de-rayos-x.html>

Trujillo Regalado, D. A. (2015). Desarrollo en un proceso de recuperacion de dióxido de titanio a partir de ilmenita presente en las arenas ferrotitaníferas de la zona de Monpiche.

*Ingeniero Químico*. [Escuela Politécnica Nacional], [Quito]. Fonte: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/10597/1/CD-6275.pdf>

Valentinuzzi, M. C. (2008, Marzo). *Analisis por fluorescencia de rayos x: implementacion de*

*guias de haces en reflexion total*. Fonte: [http://www2.famaf.unc.edu.ar/publicaciones/documents/serie\\_d/DFis130.pdf](http://www2.famaf.unc.edu.ar/publicaciones/documents/serie_d/DFis130.pdf)

## Apéndice

### Apéndice A. Gravedad específica.

**Tabla A1**

*Cálculos para la gravedad específica*

# Ensayo	Peso del picnómetro (g)	Picnómetro + muestra (g)	Picnómetro + muestra + agua (g)	Picnómetro + agua (g)	Peso específico (g/cm <sup>3</sup> )
1	16.83	23.64	31.26	26.77	2.94
2	16.91	22.94	30.81	26.77	3.03
3	16.98	22.24	30.34	26.81	3.04
Total					3.00

*Nota:* Se observa cómo se obtuvieron los resultados de los 3 ensayos.

#### Ecuación

$$Pe = \frac{P2 - P1}{(P3 - P1) - (P4 - P2)}$$

#### Ensayo 1

$$Pe = \frac{23.64 - 16.83}{(26.77 - 16.83) - (31.26 - 23.64)} = 2.94 \text{ g/cm}^3$$

#### Ensayo 2

$$Pe = \frac{22.94 - 16.91}{(26.77 - 16.91) - (30.81 - 22.94)} = 3.03 \text{ g/cm}^3$$

#### Ensayo 3

$$Pe = \frac{22.24 - 16.98}{(26.81 - 16.98) - (30.34 - 22.24)} = 3.04 \text{ g/cm}^3$$

## Apéndice B. Análisis Granulométrico.

Tabla B1

Tabla de molienda de bola

# Malla	Molienda 0 min					Molienda 5 min					Molienda 10 min				
	Pesos tamices (g)	Pesos con muestras (g)	Peso muestra (g)	Peso (%)	% de peso retenido acumulado	Pesos tamices (g)	Pesos con muestras (g)	Peso muestra (g)	Peso (%)	% de peso retenido acumulado	Pesos tamices (g)	Pesos con muestras (g)	Peso muestra (g)	Peso (%)	% de peso retenido acumulado
18	288.65	288.66	0.01	0.00	0.00	288.65	0.56	0.56	0.22	0.22	288.65	289.84	1.19	0.48	0.48
35	314.95	315.27	0.32	0.13	0.13	314.95	0.29	0.29	0.12	0.34	314.95	316.81	1.86	0.74	1.22
60	238.70	252.82	14.12	5.65	5.78	238.70	15.20	15.20	6.08	6.42	238.70	254.9	16.20	6.48	7.70
120	280.75	452.11	171.36	68.54	74.32	280.75	156.15	156.15	62.46	68.88	280.75	426.9	146.15	58.46	66.16
200	266.15	320.13	53.98	21.59	95.92	266.15	48.05	48.05	19.22	88.10	266.15	316.3	50.15	20.06	86.22
230	275.00	283.87	8.87	3.55	99.46	275.00	4.89	4.89	1.96	90.06	275.00	279.9	4.90	1.96	88.18
325	267.25	268.13	0.88	0.35	99.82	267.25	12.09	12.09	4.84	94.89	267.25	278.34	11.09	4.44	92.62
400	264.95	265	0.05	0.02	99.84	264.95	1.06	1.06	0.42	95.32	264.95	277.02	12.07	4.83	97.44
Fondo	358.65	358.66	0.01	0.00	99.84	358.65	11.33	11.33	4.53	99.85	358.65	364.27	5.62	2.25	99.69
Total			249.59					249.62					249.23		

Nota: Se puede observar resultados de las tres moliendas para los métodos gravimétricos

## Apéndice C. Mesa vibratoria

**Tabla C1**

Parámetros operacionales

Ensayo#	Elemento	Amplitud (mm)	Velocidad (impactos/mi)	Velocidad mm/Seg	Grado de inclinación (Longitudinal/Transversal)
1	Fe	25	122	9.09	3.2/5.8
2	Ti	25	122	9.09	3.2/5.8
3	Fe	25	122	9.09	3.2/5.8
4	Ti	25	122	9.09	3.2/5.8
5	Fe	25	122	9.09	3.2/5.8
6	Ti	25	122	9.09	3.2/5.8

*Nota:* Parámetros operacionales adicionales.

### Ecuación 1

**Velocidad del agua.**

**En donde:**

Q= Caudal

V= volumen

t= tiempo

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{100 \text{ mm}}{11 \text{ seg}} = 9.09 \text{ mm/seg.}$$

## Apéndice D. Knelson

**Tabla D1**

*Parámetros operaciones*

Ensayo #	Elemento	Tiempo del molino (min)	Fuerzas G	Presión Psi
1	Fe	0	40	2
2	Ti	0	40	2
3	Fe	5	40	2
4	Ti	5	40	2
5	Fe	10	40	2
6	Ti	10	40	2

*Nota:* Información adicional sobre los parámetros operacionales.

## Apéndice E. Combinación de procesos Mesa vibratoria y Knelson

**Tabla E1.**

*Parámetros operaciones*

Ensayo #	Elemento	Tiempo del molino (min)	Fuerzas G	Presión Psi
1	Fe	0	40	2
2	Ti	0	40	2
3	Fe	5	40	2
4	Ti	5	40	2
5	Fe	10	40	2
6	Ti	10	40	2

*Nota:* Parámetros operacionales adicionales.

**Apéndice F. ICP (Balances metalúrgicos y rendimientos)****Tabla F1**

Concentración real de Fe ICP

<b>ID Muestra</b>	<b>Fe (ppm)</b>
1	53374
2	122691
3	148116
4	341143
5	152995
6	236711
7	61344
8	42546
9	152366
10	152482
11	231642
12	257014
13	206430
14	123777
15	131850
16	124972
17	131573
18	282455
19	98251
20	118056
21	115685
22	194226
23	175243
24	233349

Nota: Resultados para nuestro balance.

**Tabla F2**

Concentración real de Ti ICP	
ID Muestra	Concentración real Ti (ppm)
1	79246
2	118837
3	116686
4	97186
5	169541
6	255775
7	61344
8	50336
9	171110
10	166457
11	300858
12	398497
13	295432
14	128335
15	127733
16	124848
17	105928
18	381727
19	71018
20	107012
21	124897
22	247163
23	169989
24	328515

**Mesa vibratoria.**

**Resultados 0 min Fe.**

**Ecuación 1**

**Cálculo de sólidos para 0 min.**

$$\% = \frac{S}{S + L} * 100 = \frac{2 \text{ Kg}}{2 \text{ Kg} + 1L} * 100 = 66.66 \%$$

**Ecuación 2****Balance Metalúrgico.**

$$E=S$$

$$E=C+M+R$$

$$E = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 2 * 122691 = 245382 \text{ mg}$$

$$C = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 0.292 * 231642 = 67639 \text{ mg}$$

$$M = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 0.656 * 98251 = 64452 \text{ mg}$$

$$R = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 0.841 * 124972 = 105101 \text{ mg}$$

$$E = S = 245382 = 237194$$

**Ecuación 3****Rendimiento**

$$R = \frac{C}{E} * 100 = \frac{67639}{245382} * 100 = 28\%$$

**Resultados de 5 min Fe.****Ecuación 1****Cálculo de solidos**

$$\% = \frac{S}{S + L} * 100 = \frac{2 \text{ Kg}}{2 \text{ Kg} + 1L} * 100 = 66.66 \%$$

**Ecuación 2****Balance metalúrgico**

$$E=S$$

$$E=C+M+R$$

$$E = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 2 * 53374 = 106748 \text{ mg}$$

$$C = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 0.121 * 257014 = 31098 \text{ mg}$$

$$M = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 0.212 * 152482 = 32326 \text{ mg}$$

$$R = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 0.326 * 123777 = 40351 \text{ mg}$$

$$E = S = 106748 = 103776$$

**Ecuación 3****Rendimiento**

$$R = \frac{C}{E} * 100 = \frac{31098}{106748} * 100 = 29\%$$

**Resultados de 10 min para Fe.****Ecuación 1****Cálculo de solidos**

$$\% = \frac{S}{S + L} * 100 = \frac{2 \text{ Kg}}{2 \text{ Kg} + 1L} * 100 = 66.66 \%$$

**Ecuación 2****Balance metalúrgico**

$$E=S$$

$$E=C+M+R$$

$$E = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 2 * 148116 = 296232 \text{ mg}$$

$$C = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 0.454 * 206430 = 93719.22 \text{ mg}$$

$$M = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 0.513 * 175243 = 89899 \text{ mg}$$

$$R = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 0.814 * 131850 = 107325 \text{ mg}$$

$$E = S = 296232 = 290945$$

**Ecuación 3****Rendimiento**

$$R = \frac{C}{E} * 100 = \frac{93719.22}{296232} * 100 = 31\%$$

**Resultados de 0 min para Ti.****Ecuación 1****Cálculo de solidos**

$$\% = \frac{S}{S + L} * 100 = \frac{2 \text{ Kg}}{2 \text{ Kg} + 1L} * 100 = 66.66 \%$$

**Ecuación 2****Balance metalúrgico**

$$E=S$$

$$E=C+M+R$$

$$E = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 2 * 118837 = 237674 \text{ mg}$$

$$C = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 0.321 * 300858 = 96575 \text{ mg}$$

$$M = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 0.498 * 71018 = 35366 \text{ mg}$$

$$R = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 0.789 * 124848 = 98505 \text{ mg}$$

$$E = S = 237674 = 230447$$

**Ecuación 3****Rendimiento**

$$R = \frac{C}{E} * 100 = \frac{96575}{237674} * 100 = 41\%$$

**Resultados de 5 min para Ti.****Ecuación 1****Cálculo de solidos**

$$\% = \frac{S}{S+L} * 100 = \frac{2 \text{ Kg}}{2 \text{ Kg} + 1L} * 100 = 66.66 \%$$

**Ecuación 2****Balance metalúrgico**

$$E=S$$

$$E=C+M+R$$

$$E = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 2 * 79246 = 158492 \text{ mg}$$

$$C = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 0.121 * 398497 = 48218 \text{ mg}$$

$$M = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 0.212 * 166457 = 35366 \text{ mg}$$

$$R = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 0.554 * 128335 = 71097 \text{ mg}$$

$$E = S = 158492 = 154605$$

**Ecuación 3****Rendimiento**

$$R = \frac{C}{E} * 100 = \frac{48218}{158492} * 100 = 30\%$$

**Resultados de 10 min para Ti.****Ecuación 1****Cálculo de solidos**

$$\% = \frac{S}{S + L} * 100 = \frac{2 \text{ Kg}}{2 \text{ Kg} + 1L} * 100 = 66.66 \%$$

**Ecuación 2****Balance metalúrgico**

$$E=S$$

$$E=C+M+R$$

$$E = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 2 * 116686 = 233372 \text{ mg}$$

$$C = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 0.154 * 295432 = 45496 \text{ mg}$$

$$M = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 0.413 * 169989 = 70205 \text{ mg}$$

$$R = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 0.911 * 127733 = 116364 \text{ mg}$$

$$E = S = 233372 = 232067$$

**Ecuación 3****Rendimiento**

$$R = \frac{C}{E} * 100 = \frac{45496}{233372} * 100 = 19\%$$

**Knelson****Resultados de 0 min para Fe.****Ecuación 1****Cálculo de solidos**

$$\% = \frac{S}{S + L} * 100 = \frac{1 \text{ Kg}}{1 \text{ Kg} + 1L} * 100 = 50 \%$$

**Ecuación 2****Balance metalúrgico**

$$E=S$$

$$E=C+R$$

$$E = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 1 * 122691 = 122691 \text{ mg}$$

$$C = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 0.315 * 236711 = 74563 \text{ mg}$$

$$R = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 0.674 * 61344 = 41345 \text{ mg}$$

$$E = S = 122691 = 115910$$

**Ecuación 3****Rendimiento**

$$R = \frac{C}{E} * 100 = \frac{74563}{122691} * 100 = 61\%$$

**Resultados de 5 min para Fe.****Ecuación 1****Cálculo de solidos**

$$\% = \frac{S}{S + L} * 100 = \frac{1 \text{ Kg}}{1 \text{ Kg} + 1L} * 100 = 50 \%$$

**Ecuación 2****Balance metalúrgico**

$$E=S$$

$$E=C+R$$

$$E = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 1 * 53374 = 53374 \text{ mg}$$

$$C = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 0.211 * 152995 = 32281 \text{ mg}$$

$$R = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 0.432 * 42546 = 18379 \text{ mg}$$

$$E = S = 53374 = 50662$$

### Ecuación 3

#### Rendimiento

$$R = \frac{C}{E} * 100 = \frac{32281}{53374} * 100 = 60\%$$

#### Resultados de 10 min para Fe.

### Ecuación 1

#### Cálculo de solidos

$$\% = \frac{S}{S + L} * 100 = \frac{1 \text{ Kg}}{1 \text{ Kg} + 1L} * 100 = 50 \%$$

### Ecuación 2

#### Balance metalúrgico

$$E=S$$

$$E=C+R$$

$$E = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 1 * 148116 = 148116 \text{ mg}$$

$$C = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 0.188 * 341143 = 64134 \text{ mg}$$

$$R = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 0.549 * 152366 = 83648 \text{ mg}$$

$$E = S = 148116 = 147784$$

### Ecuación 3

#### Rendimiento

$$R = \frac{C}{E} * 100 = \frac{64134}{148116} * 100 = 43\%$$

#### Resultados de 0 min para Ti.

### Ecuación 1

#### Cálculo de solidos

$$\% = \frac{S}{S + L} * 100 = \frac{1 \text{ Kg}}{1 \text{ Kg} + 1L} * 100 = 50 \%$$

### Ecuación 2

#### Balance metalúrgico

$$E=S$$

$$E=C+R$$

$$E = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 1 * 118837 = 118837 \text{ mg}$$

$$C = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 0.315 * 255775 = 80569 \text{ mg}$$

$$R = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 0.578 * 67344 = 35456 \text{ mg}$$

$$E = S = 118837 = 116026$$

### Ecuación 3

#### Rendimiento

$$R = \frac{C}{E} * 100 = \frac{80569}{118837} * 100 = 68\%$$

#### Resultados de 5 min para Ti.

### Ecuación 1

#### Cálculo de solidos

$$\% = \frac{S}{S + L} * 100 = \frac{1 \text{ Kg}}{1 \text{ Kg} + 1L} * 100 = 50 \%$$

### Ecuación 2

#### Balance metalúrgico

$$E=S$$

$$E=C+R$$

$$E = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 1 * 79246 = 79246 \text{ mg}$$

$$C = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 0.29 * 169541 = 49166 \text{ mg}$$

$$R = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 0.58 * 50336 = 29194 \text{ mg}$$

$$E = S = 79246 = 78362$$

**Ecuación 3****Rendimiento**

$$R = \frac{C}{E} * 100 = \frac{49166}{79246} * 100 = 62\%$$

**Resultados de 10 min para Ti.****Ecuación 1****Cálculo de solidos**

$$\% = \frac{S}{S + L} * 100 = \frac{1 \text{ Kg}}{1 \text{ Kg} + 1L} * 100 = 50 \%$$

**Ecuación 2****Balance metalúrgico**

$$E=S$$

$$E=C+R$$

$$E = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 1 * 116686 = 116686 \text{ mg}$$

$$C = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 0.188 * 97186 = 18270 \text{ mg}$$

$$R = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 0.549 * 171110 = 93939 \text{ mg}$$

$$E = S = 116686 = 112210$$

**Ecuación 3****Rendimiento**

$$R = \frac{C}{E} * 100 = \frac{18270}{116686} * 100 = 15\%$$

### Mesa vibratoria - Knelson

### Resultados de 0 min para Fe.

### Ecuación 1

### Cálculo de solidos

$$\% = \frac{S}{S + L} * 100 = \frac{1 \text{ Kg}}{1 \text{ Kg} + 1L} * 100 = 50 \%$$

### Ecuación 2

### Balance metalúrgico

$$E=S$$

$$E=C+R$$

$$E = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 0.841 * 124972 = 105101 \text{ mg}$$

$$C = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 0.251 * 194226 = 48750 \text{ mg}$$

$$R = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 0.424 * 131573 = 55786 \text{ mg}$$

$$E = S = 105101 = 104537$$

### Ecuación 3

### Rendimiento

$$R = \frac{C}{E} * 100 = \frac{48750}{105101} * 100 = 46\%$$

**Resultados de 5 min para Fe.****Ecuación 1****Cálculo de solidos**

$$\% = \frac{S}{S + L} * 100 = \frac{1 \text{ Kg}}{1 \text{ Kg} + 1L} * 100 = 50 \%$$

**Ecuación 2****Balance metalúrgico**

$$E=S$$

$$E=C+R$$

$$E = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 0.326 * 123777 = 40351 \text{ mg}$$

$$C = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 0.098 * 233349 = 22868 \text{ mg}$$

$$R = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 0.147 * 118056 = 17354 \text{ mg}$$

$$E = S = 40351 = 40222$$

**Ecuación 3****Rendimiento**

$$R = \frac{C}{E} * 100 = \frac{22868}{40351} * 100 = 56\%$$

**Resultados de 10 min para Fe.****Ecuación 1**

**Cálculo de solidos**

$$\% = \frac{S}{S + L} * 100 = \frac{1 \text{ Kg}}{1 \text{ Kg} + 1L} * 100 = 50 \%$$

**Ecuación 2****Balance metalúrgico**

$$E=S$$

$$E=C+R$$

$$E = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 0.814 * 131850 = 107325 \text{ mg}$$

$$C = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 0.172 * 282455 = 48582 \text{ mg}$$

$$R = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 0.489 * 115685 = 56569 \text{ mg}$$

$$E = S = 107326 = 105152$$

**Ecuación 3****Rendimiento**

$$R = \frac{C}{E} * 100 = \frac{48582}{107326} * 100 = 45\%$$

**Resultados de 0 min para Ti.****Ecuación 1****Cálculo de solidos**

$$\% = \frac{S}{S + L} * 100 = \frac{1 \text{ Kg}}{1 \text{ Kg} + 1L} * 100 = 50 \%$$

**Ecuación 2****Balance metalúrgico**

$$E=S$$

$$E=C+R$$

$$E = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 0.789 * 124848 = 98505 \text{ mg}$$

$$C = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 0.187 * 247163 = 46219 \text{ mg}$$

$$R = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 0.489 * 105928 = 51798 \text{ mg}$$

$$E = S = 98505 = 98018$$

**Ecuación 3****Rendimiento**

$$R = \frac{C}{E} * 100 = \frac{46219}{98505} * 100 = 46\%$$

**Resultados de 5 min para Ti.****Ecuación 1****Cálculo de solidos**

$$\% = \frac{S}{S + L} * 100 = \frac{1 \text{ Kg}}{1 \text{ Kg} + 1L} * 100 = 50 \%$$

**Ecuación 2****Balance metalúrgico**

$$E=S$$

$$E=C+R$$

$$E = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 0.554 * 128335 = 71097 \text{ mg}$$

$$C = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 0.077 * 328515 = 25295 \text{ mg}$$

$$R = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 0.411 * 105928 = 107012 \text{ mg}$$

$$E = S = 71098 = 69278$$

### Ecuación 3

#### Rendimiento

$$R = \frac{C}{E} * 100 = \frac{25295}{71098} * 100 = 35\%$$

#### Resultados de 10 min para Ti.

### Ecuación 1

#### Cálculo de solidos

$$\% = \frac{S}{S + L} * 100 = \frac{1 \text{ Kg}}{1 \text{ Kg} + 1L} * 100 = 50 \%$$

### Ecuación 2

#### Balance metalúrgico

$$E=S$$

$$E=C+R$$

$$E = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 0.991 * 127733 = 116364 \text{ mg}$$

$$C = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 0.162 * 381727 = 61839 \text{ mg}$$

$$R = \text{Peso Relave (Kg)} * \text{Ley de cabeza(mg/Kg)} = 0.431 * 124897 = 53830 \text{ mg}$$

$$E = S = 116365 = 115670$$

### **Ecuación 3**

### **Rendimiento**

$$R = \frac{C}{E} * 100 = \frac{61839}{116365} * 100 = 53\%$$