

PURIFICACIÓN DE ILMENITA CONTENIDA EN ARENAS NEGRAS COLOMBIANAS  
PARA SU POTENCIAL APLICACIÓN EN PROCESOS FOTOCATALÍTICOS

Juan Esteban Arrieta Ospino

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Metalúrgico

Director

Ph.D. Elcy María Córdoba Tuta

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales

Bucaramanga

2023

**Dedicatoria**

*A mis padres Luis Enrique Arrieta y Rosiris Ospino Duran.*

*Gracias por todo el amor y el apoyo*

*Los amo.*

### **Agradecimientos**

A Dios todopoderoso por el don de la vida y la sabiduría, cada respiro es un milagro.

A mis padres y familia, por todo el tiempo, paciencia y sobre todo por el gran amor brindado. Los amo con todo mi ser y los admiro.

A la profesora Eley María Córdoba Tuta por su guía, orientación y paciencia.

Al grupo de Investigación de Hidrometalurgia y ambiente por la disposición de sus equipos, instalaciones y talento humano.

A mis niñas que me acompañaron por toda la carrera y logramos culminar nuestros estudios juntos: Ángela Torres, Natalia Chacón y Vivian Arrieta. Muchas gracias y un abrazo fraterno.

A los mejores seres que he podido conocer y Dios me ha dado el privilegio de que permanezcan en mi vida por un gran periodo de tiempo: Juan Diego Nocua Paba, Diana Camila Flórez Espinoza, Manuela Franco Mateus y Adrián Ricardo Cárdenas Flórez.

A Diana Cañas, Edith y Nadia Ardila por su tiempo, tutoría y disposición para el cumplimiento de este trabajo.

A todas las personas que en ayudaron de manera indirecto o directa con mi vida académica y personal, a veces la ayuda puede venir únicamente de una sonrisa o unas palabras de apoyo.

A todos ellos, gracias...

A Minciencias, por la financiación del presente trabajo de grado, a través del proyecto de investigación titulado PRODUCCION DE COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS MEDIANTE LA REDUCCION FOTOACTIVADA DE CO2 EMPLEANDO ILMENITA OBTENIDA DE ARENAS NEGRAS COLOMBIANAS Y VALORIZACION DE LOS RESIUDOS MINERALES.

**Tabla de Contenido**

Introducción.....	12
2.Objetivos.....	14
2.1 Objetivo General: .....	14
2.2 Objetivos específicos:.....	14
3.Marco Teórico .....	15
3.1Ilmenita.....	15
3.2 Concentración gravimétrica.....	16
3.2.1 Mesa Wilfley. ....	17
3.2.2 concentrador Knelson:.....	19
3.3 Concentración magnética. ....	20
3.3.1 concentrador magnético en seco.....	21
3.3.2 concentrador magnético en húmedo.....	22
4. Estado del arte: .....	23
4.Metodología.....	25
4.1 Caracterización de las arenas negras. ....	25
4.2 Evaluación del tamizado como método de purificación de la ilmenita.....	25
4.3 Pruebas de purificación por concentración gravimétrica. ....	25
4.4 Pruebas de purificación por concentración magnética .....	26
5.Resultados y Discusión.....	28
5.1 Caracterización de las arenas negras. ....	28
5.2 Evaluación del tamizado como método de purificación de la ilmenita.....	30

5.3 Purificación de ilmenita por métodos de concentración gravimétrica. ....	33
5.3.1 Purificación en mesa Wilfley. ....	34
5.3.2 Purificación en concentrador Knelson.....	41
5.4 Purificación de ilmenita por métodos de concentración magnética. ....	43
5.4.1 Purificación por concentración magnética en seco. ....	43
5.4.2 Purificación por concentración magnética en húmedo.....	45
5.4.3 Circuito de Concentración magnética. ....	47
Conclusiones.....	50
Recomendaciones .....	51

**Lista de Tablas**

	<b>Pag.</b>
Tabla 1. Relación entre CC y el tamaño de partícula. (Gupta, Ashok, 2006) .....	16
Tabla 2. Parámetros operacionales mesa vibradora. Adaptado de: (Gupta, Ashok, 2006) .....	18
Tabla 3. Caracterización mineralógica obtenida por DRX de la arena negra recibida. ....	27
Tabla 4. Composición química obtenida por FRX de la arena negra recibida .....	28
Tabla 5. Índices metalúrgicos por fracción granulométrica. ....	31
Tabla 6. Caracterización mineralógica de la fracción granulométrica -70#/+100#. ....	31
Tabla 7. Distribución porcentual másica de colas, medios y concentrados para cada ensayo de concentración en mesa Wilfley. ....	34
Tabla 8. Índices metalúrgicos de los ensayos de concentración realizados en mesa Wilfley. ....	37
Tabla 9. Composición mineralógica, obtenida por DRX, de los productos de purificación del mineral en mesa Wilfley relacionados con los ensayos números 12, 17 y 18. ....	39
Tabla 10. Resultados de los ensayos de purificación de la ilmenita en concentrador Knelson. ...	40
Tabla 11. Composición mineralógica obtenida por DRX del mejor concentrado del proceso de purificación de la ilmenita mediante el concentrador Knelson .....	42
Tabla 12. Resultados de los ensayos de purificación de la ilmenita por concentración magnética en seco.....	43
Tabla 13. Composición mineralógica obtenida por DRX del concentrado del proceso de purificación de ilmenita mediante concentración magnética en seco. ....	44
Tabla 14. Resultados de los ensayos de purificación de la ilmenita por concentración magnética en humedo .....	45
Tabla 15. Resultados de los ensayos del circuito de purificación de la ilmenita por concentración	

magnética..... 47

Tabla 16. Composición mineralógica obtenida por DRX de los productos de cada etapa del circuito

de purificación de ilmenita mediante concentración magnética. .... 48

**Lista de Figuras.**

	<b>Pag.</b>
Figura 1. Estructura Cristalográfica de la Ilmenita (Patricia, 2017) .....	14
Figura 2. Zonas de separación de los minerales en la Mesa Wilfey. (Barry, 2015) .....	17
Figura 3. Concentrador Knelson. Extraída de (Barry, 2015) .....	19
Figura 4. Concentrador magnético seco. Adaptado de: (Wills & Napier-Munn, 2015) .....	21
Figura 5. Concentrador de alta intensidad húmedo. (Fujita, 2006) .....	22
Figura 6. Distribución Granulométrica de la arena de ilmenita recibida. ....	29
Ilustración 7. Distribución por fracciones granulométricas de los óxidos presentes en la arena negra. ....	30
Figura 8. Fotografías de las muestras de las diferentes fracciones granulométricas. ....	32
Figura 9 Efecto de las variables de estudio: Frecuencia de vibración (a, b), ángulo de inclinación (c, d y e) y caudal de agua (f, g y h) en la distribución de las partículas en los productos de concentración de ilmenita en mesa Wilfley. ....	36
Figura 10 Micrografías de concentrados y colas de los ensayos de purificación por concentración magnética en seco .....	44
Figura 11. Micrografías de los concentrados de los ensayos de purificación por concentración magnética en húmedo. ....	45

**Lista de Apéndices**

	<b>pág.</b>
Apéndice A. Micrografías concentrados, medios y colas mesa Wilfley.....	53
Apéndice B. Micrografías concentrador Knelson.....	57
Apéndice C. Micrografías concentracion magnetica en húmedo.....	58
Apéndice D. Micrografías circuito de concentración.....	58

### Resumen

**Título:** Purificación de ilmenita contenida en arenas negras colombianas para su potencial aplicación en procesos fotocatalíticos<sup>1</sup>

**Autor:** Juan Esteban Arrieta Ospino<sup>2</sup>

**Palabras Clave:** Ilmenita, concentración gravimétrica, concentración magnética, fotocátalisis.

La ilmenita es un semiconductor con potencialidades demostradas para diversas aplicaciones fotocatalíticas, en tal sentido en el presente trabajo de grado se llevó a cabo un estudio de purificación de una arena negra pre-concentrada, a través de métodos de concentración gravimétrica (mesa Wilfley y concentrador Knelson) y concentración magnética en seco y en húmedo. Adicionalmente, se evaluó la posibilidad de purificar la arena a través de un simple tamizado. Los resultados demostraron en primer lugar que el mineral de estudio contenía aproximadamente un 90% de diversos titanatos, de Fe, Mg, Mn, Ni y Zn, acompañados de las especies ganga, hematita, circón y cuarzo. Así mismo, se encontró que los métodos de concentración gravimétrica no son efectivos para la purificación del pre-concentrado. Por su parte, con la concentración magnética en seco se logró enriquecer el mineral hasta un valor de 94,8% de minerales ricos en Ti, pero con una recuperación muy baja, cercana al 10%. El mejor resultado de purificación se logró mediante tamizado de la arena, alcanzándose un 97,55% de fases ricas en Ti en la fracción granulométrica -70#/+100#, con una recuperación del 53,52%.

---

<sup>1</sup> Trabajo de Grado

<sup>2</sup> Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los materiales. Director: Dr. Elcy María Córdoba Tuta.

**Abstract**

**Title:** Purification of ilmenite contained in Colombian black sands for its portencial application in photocatalyc processes<sup>1</sup>

**Autor:** Juan Esteban Arrieta Ospino<sup>2</sup>

**Keywords:** Ilmenite, gravity concentration, magnetic concentration, photcatalysis.

The ilmenite is a semiconductor with demonstrated potential for various photocatalytic applications. In this thesis work, a purification study of a pre-concentrated black sand was conducted usign gravity concentration methods (as Wilfley table and Knelson concentrator) and dry and wet magnetic concentration. Additionally, the possibility of purifying the sand through simple sieving was evaluated. The results showed that the studied mineral contained approximately 90% of various titanates, including Fe, Mg, Mn, Ni and Zn, along with gangue species such as hematite, zircon and quartz. It was also found that the gravity concentration methods were not effective for purifying the pre-concentrate. On the Other hand, dry magnetic concentration achieved mineral enrichment up to 94,8% of Ti-rich minerals, but with a very low recovery rate, close to 10%. The best purification result was obtained through sand sieving, reaching 95,77% of Ti-rich phases in the particle size fraction of -70#/+100#, with a recovery of 53,52%.

<sup>1</sup> Thesis Work.

<sup>2</sup> Faculty of Physicochemical Engineering. School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Director: Dr. Elcy María Córdoba Tuta.

## Introducción

Actividades como la producción energética a base de la combustión de carbón, petróleo y gas natural, la industria del cemento, el venteo, la quema de gases procedentes de la extracción y refinación del petróleo, entre otras, son las principales actividades de desarrollo humano que se aplican para satisfacer la constante demanda energética y aumento poblacional a nivel mundial (Oswaldo 2007). Estas actividades son las principales responsables de emanar a la atmósfera los gases efecto invernadero (GEI) principales causantes del cambio climático en el planeta y alteración de procesos naturales. Uno de los principales constituyentes de los GEI es el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), de hecho, para el año 2021 las emisiones anuales de dicho gas estaban alrededor de los 36.300 millones de toneladas al año, con tendencia a aumentar en 45 toneladas anualmente, según la Organización de las Naciones Unidas (Naciones Unidas 2023). Por la misma generación de  $\text{CO}_2$  resulta de vital importancia el desarrollo de nuevos métodos de abastecimiento energético al tiempo en que se trata al  $\text{CO}_2$ . En este sentido, se han llevado a cabo investigaciones sobre la reducción y aprovechamiento del  $\text{CO}_2$ , convirtiéndolo en combustibles alternativos por medio de procesos fotocatalíticos con minerales que contengan en su estructura  $\text{TiO}_2$  (Edelmannová F et al., 2022). La fotocatalisis es un fenómeno de superficie que se da en sólidos semiconductores, una vez estos son irradiados con luz visible o ultravioleta sus electrones pasan de la banda de valencia a la banda de conducción, generando lo que se conoce como par electro/hueco, agentes fundamentales para las reacciones de tipo redox (Fujishima et al., 2008). En la actualidad Colombia es un país que posee depósitos de arenas negras, una de las materias primas en la extracción de ilmenita  $\text{FeTiO}_3$  (Arias A, 2017); la ilmenita es un mineral semiconductor que por su bajo ancho de banda prohibida ( $E_g$ ) de 2,8 eV ha llamado la atención de diversos investigadores (Guan et al., 2021), demostrándose el carácter fotoactivo de la ilmenita tanto en procesos de

oxidación como de reducción, degradando a modo de prueba la molécula de naranja de metilo (Cañas Martínez, 2015).

Para que dicha reacción sea lo más efectiva posible es imperativo alcanzar un alto grado de pureza en el mineral, ya que la presencia de minerales asociados a las arenas negras como la sílice, el circón, óxidos de hierro, entre otros reduce su potencial fotocatalítico (Shang et al., 2020). Por fortuna se han llevado investigaciones que exponen la capacidad de concentración efectiva de la ilmenita por medio de beneficio tanto gravimétrico como magnético, elevando así su concentración y mejorando sus propiedades. En 2008 Valderrama, por medio de mesas Wilfley, logró recuperaciones de hasta el 65% con una concentración de  $\text{TiO}_2$  cercana al 46% (Valderrama, 2008); Jovanis Comas en 2007 empalmado métodos gravimétricos con magnéticos obtuvo concentrados de ilmenita con purezas superiores al 90% (Becerra A, 2014). Para la efectividad de todo este proceso es necesario así mismo un diseño que tenga en cuenta las propiedades físicas y granulométricas de las arenas negras, como son: su distribución de tamaños de partícula y el estado inicial de asociación de la ilmenita con otros elementos.

Con base en lo anterior, el alcance del presente trabajo de grado fue la caracterización física, química y mineralógica de arenas negras procedentes de Barbacoas-Nariño y la obtención de un concentrado de alta pureza de ilmenita ( $\text{FeTiO}_3$ ) por medio de procesos gravimétricos y magnéticos. Tal concentrado será utilizado para el desarrollo del macroproyecto de investigación titulado “Producción de combustibles alternativos mediante la reducción fotoactivada de  $\text{CO}_2$  empleando ilmenita obtenida de arenas negras colombianas y valorización de los residuos minerales”, financiado por Minciencias.

## **2.Objetivos**

### **2.1 Objetivo General:**

Identificar las etapas de concentración gravimétrica y magnética requeridas para la purificación de ilmenita contenida en arenas negras colombianas para su potencial aplicación en procesos fotocatalíticos.

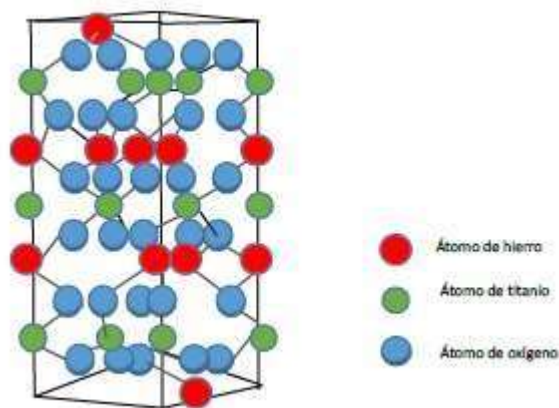
### **2.2 Objetivos específicos:**

- Determinar las características físicas, químicas y mineralógicas de las arenas negras a purificar provenientes del municipio de Barbacoas (Nariño).
- Llevar a cabo pruebas de concentración gravimétrica y magnética de ilmenita contenida en las arenas negras con miras a obtener un concentrado con la mayor pureza y recuperación posible.
- Evaluar la posibilidad de implementar el proceso de tamizado como método de purificación del mineral de ilmenita.

### 3.Marco Teórico

#### 3.1Ilmenita.

La ilmenita es un óxido de hierro y titanio cuya fórmula química corresponde a  $\text{FeTiO}_3$ , se caracteriza por poseer un color negro metálico, una densidad de  $4,7 \text{ g/cm}^3$  y una estructura cristalina que corresponde a su mismo nombre en donde el hierro y el titanio se presentan de manera alterna entre capas (ver figura 1), por el mismo motivo de su organización atómica existe un grupo de minerales con su nombre de tipo  $\text{MTiO}_3$ , en donde M puede significar presencia de hierro u otros metales sustitucionales tales como magnesio o manganeso (García-Muñoz et al., 2017). Desde otro punto de vista, la ilmenita se puede considerar como rutilo dopado de manera natural con óxido de hierro, cuyo ancho de banda prohibida corresponde a valores de 2,58-2.90 eV lo cual se ha demostrado es útil para procesos de remoción de contaminantes tanto con luz ultravioleta como luz visible, de igual manera la ilmenita es un mineral débilmente magnético (Cuervo K, 2019).



**Figura 1.** Estructura Cristalográfica de la Ilmenita (Patricia, 2017)

Dadas sus propiedades fisicoquímicas, la ilmenita puede ser concentrada de manera efectiva por medios gravimétricos, dado que su gravedad específica es mayor que la de sus principales impurezas presentes, como lo es el circón y la sílice, con rangos de densidad entre los 2,6-2,7 g/cm<sup>3</sup>. Métodos de concentración magnética en seco y húmedo también pueden ser aplicados en la recuperación de dicho mineral dada su susceptibilidad magnética de 2.18x10<sup>-6</sup> m<sup>3</sup>\*kg<sup>-1</sup> (Cui et al., 2002). La ilmenita en Colombia se encuentra presente en arenas negras procedentes de la deposición de minerales pesados en zonas costeras, tales arenas negras están presentes en la Guainía, la costa pacífica, costa atlántica y Vaupés (González, 2000).

### 3.2 Concentración gravimétrica.

La concentración gravimétrica es la separación de minerales en medio de un fluido gracias a la diferencia de densidad entre el mineral de interés y el mineral con el cual se encuentra asociado (ganga), para efectos prácticos se ha desarrollado un indicador que expone la facilidad de concentración teniendo en cuenta los agentes involucrados anteriormente, conocido como criterio de concentración (CC) (Barry, 2015).

Tal como lo señala la ecuación (1), el criterio de concentración expone la diferencia de gravedades específicas entre los minerales involucrados en el sistema y el fluido en el cual se encuentran inmersos, un mayor CC indica mayor diferencia de densidades y por consiguiente más facilidad en términos de separación.

$$CC = \frac{(Ge \text{ mineral pesado} - Ge \text{ del fluido})}{(Ge \text{ mineral liviano} - Ge \text{ del fluido})} \quad (1) *$$

**Ecuación 1.** Formula criterio de concentración.

\*Ge = Gravedad específica.

La concentración gravimétrica no está únicamente ligada al CC, sino que también se debe tener presente el tamaño de partícula de la muestra a tratar, ya que, es bien sabido que dependiendo

de su diámetro la susceptibilidad de la separación puede darse de manera efectiva o no, la tabla 1 resume la relación entre el CC y el tamaño de las partículas del mineral.

<b>Criterio de Concentración (CC)</b>	<b>Susceptibilidad de separación gravimétrica</b>
CC>2.5	Fácil bajo tamaños de 75 micras
1.75<CC<2.5	Posible bajo tamaños de 150 micras
1.5<CC<1.75	Difícil bajo tamaños 1.7 mm
1.25<CC<1.5	Muy difícil bajo tamaños de 6.35 mm
CC<1.25	Imposible sin importar el tamaño de las partículas

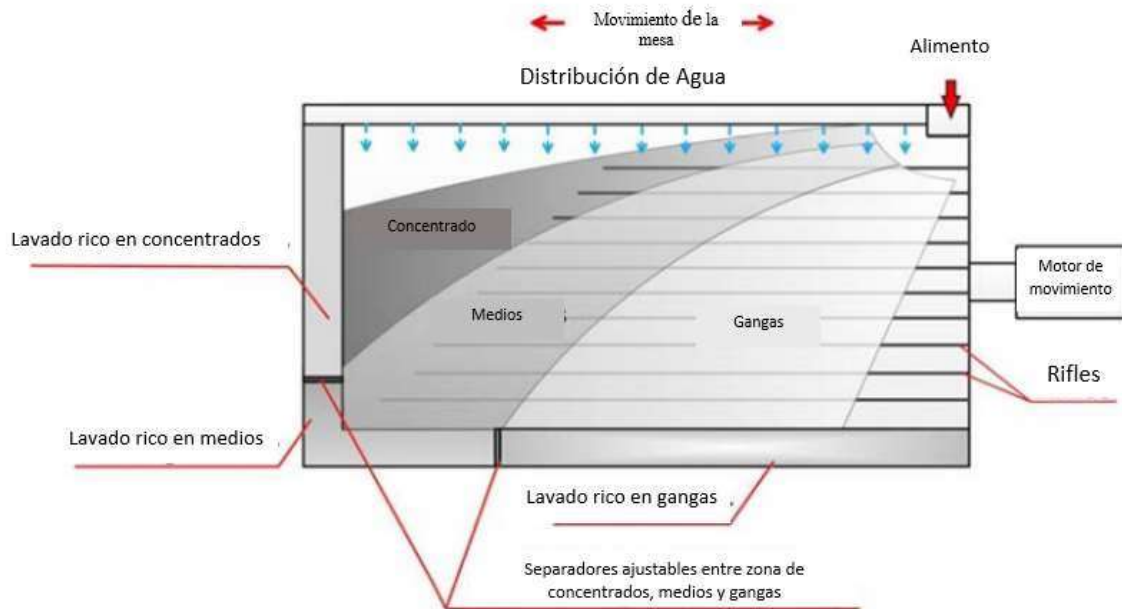
**Tabla 1.** Relación entre CC y el tamaño de partícula. (Gupta, Ashok, 2006)

Se puede evidenciar que entre mayor sea el CC el proceso de separación admite tamaños de partículas menores, mientras que, si las densidades de los minerales que se espera separar son muy parecidas, o casi idénticas, sin importar su diámetro, la dispersión de sólidos nunca tendrá cabida. Dicho de otra manera, entre mayor sean las diferencias físicas de los minerales a concentrar más fácil será su separación y tratamiento (Gupta, Ashok, 2006).

### 3.2.1 Mesa Wilfley.

La mesa Wilfley (ver figura 2) es un dispositivo que tiene como objetivo la concentración mineral usando la gravedad como fuerza motora. Su principio de separación se fundamenta en dos características físicas ya mencionadas: el peso específico y el tamaño de partícula. El agua de lavado fluye como una película a través de la mesa mientras las partículas se mueven por efecto de la vibración suministrada sobre la mesa inclinada, los rifles de la mesa retienen las partículas más densas mientras que las más ligeras pueden pasar sobre estos sin mayor dificultad dejándose llevar por la corriente del fluido. Todos estos sucesos en conjunto hacen que las partículas de elevado peso específico se dirijan hacia la zona inferior izquierda de la mesa, mientras que las partículas de bajo peso específico sean llevadas por la corriente de agua y, dada la poca retención en los rifles, se facilita el depósito en zonas más próximas desde el punto en el que fueron

alimentadas; generando así tres zonas importantes en la mesa: zona de concentrados, zona de medios y zona de gangas. (Dunne Robert, Honaker Rick, 2019).



**Figura 2.** Zonas de separación de los minerales en la Mesa Wilfey. (Barry, 2015)

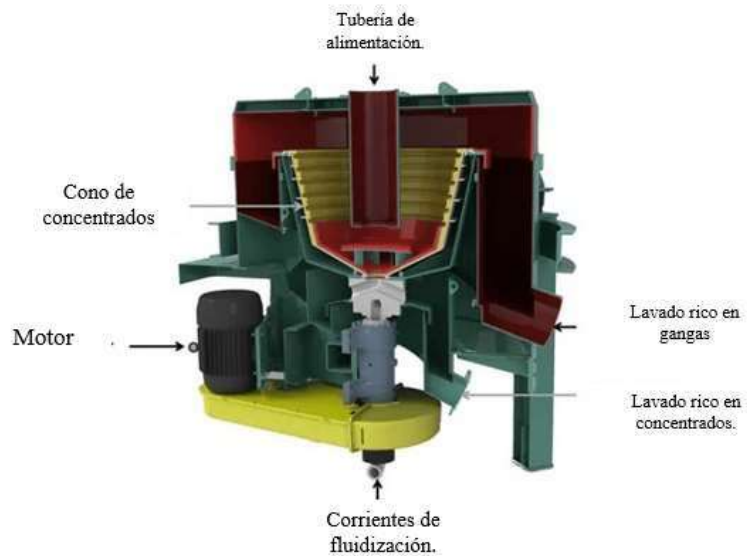
Para la separación de los minerales se han establecido rangos operativos adecuados para los principales parámetros que se encuentran involucrados: ángulo de la mesa, caudal de agua, frecuencia de vibración, pulpa de alimentación, entre otros. La tabla 2 (Fuerstenau, Maurice C, 2003) resume los valores recomendados según los estudios previos y mejores resultados presentados en la práctica para la mesa concentradora.

variable	valor	Característica del mineral
frecuencia de vibración (golpes por minuto)	260-300	mineral grueso
	280-320	mineral fino
	260-285	carbón
pendiente (mm/m)	11-25	arena gruesa
	9-15	arena media
	2-9	arena fina
	1-7	Limos
pulpa de alimentación (% sólido)	20-25%	Minerales
	33-40%	carbón
tasa de alimentación (t/h)	2	arenas de 1.5 mm
	0.5	arenas -150 $\mu$ m
	15	carbón sobre 15 mm

**Tabla 2.** Parámetros operacionales mesa vibradora. Adaptado de: (Gupta, Ashok, 2006)

### 3.2.2 concentrador Knelson:

El concentrador Knelson es un separador gravimétrico-centrífugo (ver figura 3). Los minerales son sometidos a una corriente de agua mientras el dispositivo gira a fuerzas 60 veces por encima de la gravedad, las partículas con mayor peso específico quedan atrapadas en los anillos o rifles, mientras que las más “ligeras” se mantienen en la corriente y eventualmente salen expulsadas. Dependiendo del equipo, los concentradores Knelson pueden procesar cantidades minerales a escala de laboratorio o a niveles industriales de hasta 150 t/h. Los rangos de tamaños de partícula recomendables van desde las 10 micras hasta un máximo de 6 mm. Su uso es aconsejable cuando el mineral a recuperar es muy denso y su fracción es poca respecto a la cantidad alimentada inicial, de más o menos un 0,05% en peso (Dunne Robert, Honaker Rick, 2019).



**Figura 3.** Concentrador Knelson. Extraída de (Barry, 2015)

Como indica la figura 3, se introduce la arena de alimentación a través del cono de alimentación hasta llegar al fondo del cono, una vez allí la pulpa por fuerza centrífuga sube a través del concentrador y es empujado hacia afuera; las partículas de alta gravedad especifican quedan en los rifles hasta rellenarlos, mientras que las de baja densidad van saliendo por medio del agua de lavado, una vez terminado el proceso los concentrados se extraen de los anillos. Las principales variables del proceso son: velocidad de giro, la masa de alimentación y el caudal de agua de lavado. (Barry, 2015)

### 3.3 Concentración magnética.

El principio de la concentración magnética radica en la capacidad que se tenga de magnetizar un mineral para su posterior recolección. Para que dicho proceso pueda ser llevado a cabo se debe tener presente el concepto de susceptibilidad magnética, la cual es una propiedad inherente al mineral y se puede definir como la interacción proporcional del mineral una vez se ha expuesto a un campo magnético. Según la susceptibilidad del mineral se puede clasificar en tres grupos: ferromagnéticos, los cuales son los de mayor susceptibilidad y son fuertemente atraídos

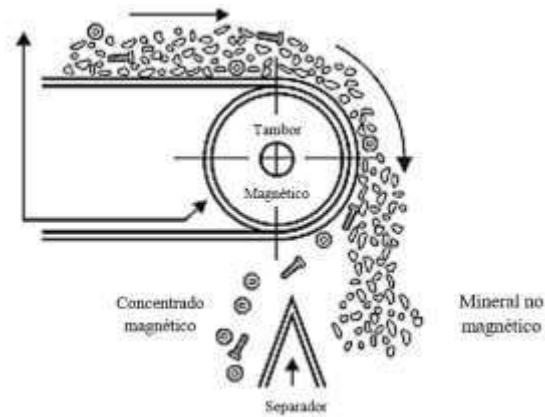
por los campos magnéticos, los paramagnéticos, los cuales tienen una reacción de campo leve y se necesita de mayor estímulo para su retención, por último, los diamagnéticos, los cuales bajo ningún campo demuestran interacción o en términos prácticos son no magnéticos. (Fujita, 2006)

La principal variable que influye en el proceso de separación es el campo magnético. Los separadores magnéticos de alta intensidad suelen operar regiones que superan el orden de las 0,5 T, por su parte para susceptibilidades magnéticas más elevadas no se requieren campos tan potentes, por consiguiente, se utilizan concentradores de baja intensidad con campos magnéticos inferiores o iguales a 0,2 T.

### **3.3.1 concentrador magnético en seco.**

Los minerales ferromagnéticos poseen una alta sensibilidad magnética a bajas intensidades de campo aplicadas, por lo mismo pueden concentrarse en concentradores magnéticos con intensidades de campo iguales o menores a las 0,3 T (clasificados como de baja intensidad). La separación magnética en seco de baja intensidad se limita únicamente a arenas gruesas y se utiliza un concentrador de tambor, el cual tiene un diseño bastante simple, consiste en un tambor giratorio hueco y no magnético que posee varios imanes estacionarios de polaridad alterna; este mismo utiliza varios bloques magnéticos pequeños el cual hace cambiar el sentido de magnetización en pequeños pasos, generando un campo magnético uniforme y estable. (Wills & Napier-Munn, 2015)

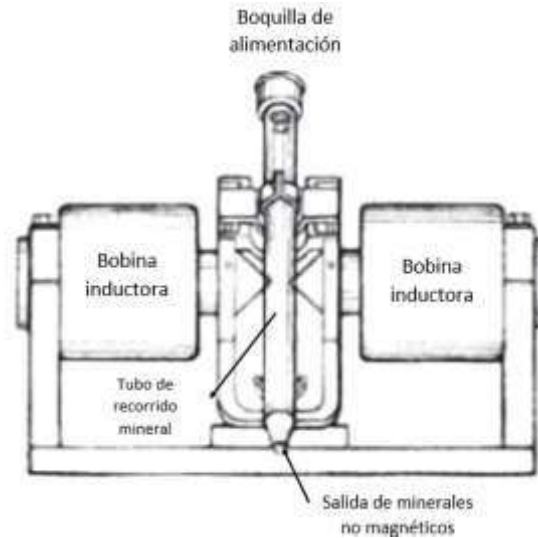
Como indica la figura 4, en la concentración magnética en seco solo se presentan dos productos: los concentrados, los cuales son ferromagnéticos y son retenidos en la banda por acción del campo generado por el tambor hasta caer por gravedad, mientras que las colas continúan por su nula interacción al campo e inmediatamente son separadas.



**Figura 4.** Concentrador magnético seco. Adaptado de: (Wills & Napier-Munn, 2015)

### 3.3.2 concentrador magnético en húmedo.

Existen dos tipos de separación magnética en húmedo. Los separadores magnéticos de alta intensidad, o WHIMS, y los separadores magnéticos de alto gradiente, HGMS, por sus siglas en inglés, ambos emplean electroimanes de alta intensidad y una matriz convertidora de flujo de campo. Su principal uso es en la recolección de minerales paramagnéticos de granulometría fina. Existen dos diferencias entre un HGMS y un WHIMS, la primera es que la dirección de flujo magnético del WHIMS es perpendicular en lugar de paralela como lo es en el HGMS y la segunda es que el HGMS se asocia a un concentrador en húmedo tipo bidón que funciona por lotes, mientras que el WHIMS es un concentrador tipo carrusel de alimentación continua. (Fujita, 2006). La figura 5 expone un concentrador tipo Davis, el cual posee una bobina electromagnética a cada lado del tubo. En este dispositivo la pulpa mineral es alimentada en la parte superior del tubo, a medida en que caen por acción de la gravedad interactúan por el campo magnético generado por las bobinas en sus extremos, las partículas con cualidades magnéticas son retenidas en esta zona mientras que las nulas son arrastradas por gravedad y el caudal de agua. Las variables que se pueden considerar en este proceso de concentración son: intensidad de campo magnético y el volumen de agua de lavado. (Wills & Napier-Munn, 2015)



**Figura 5.** Concentrador de alta intensidad húmedo. (Fujita, 2006)

#### 4. Estado del arte:

Estudios previos han mostrado la capacidad que tienen las arenas negras para poder ser concentrada por métodos gravimétricos como magnéticos, Valderrama en 2008 evaluó la concentración de las arenas negras contenidas en el desierto de la Atacama chilena, varió ángulos de  $2,5^{\circ}$  a  $4,0^{\circ}$  manteniendo los demás factores como caudal y vibración constante en una mesa Wilfley, logrando valores de recuperación mayores al 92% de minerales ricos en Ti (Valderrama, 2008). Trujillo en 2015 concentró arenas negras por medio de un concentrador magnético en seco con intensidad variable, obtuvo fracciones de retención de masa del 59% para 1000 Gauss y del 92% para 2300 Gauss (Trujillo, 2015).

Comas y Becerra en el 2014, concentraron ilmenita por mesa Wilfley a ángulos de  $11^{\circ}$ ,  $12^{\circ}$ ,  $13^{\circ}$  y  $14^{\circ}$ ; también usaron un concentrador en seco tipo tambor y concentración magnética en húmedo de alta intensidad, los resultados obtenidos indican una concentración favorable de ilmenita con el empalme de sistema de pre concentración gravimétrica a  $14^{\circ}$  para posteriormente tratar el concentrado con un concentrador magnético seco, en tal investigación obtuvieron enriquecimiento de 1.05 a 1.33 (Becerra A, 2014). En otro trabajo, se estudió el tratamiento de

ilmenita mediante un circuito que incluía concentración por espiral seguido de procesos como mesa Wilfley, concentrador magnética vía seca y concentrador húmedo de alta intensidad, llegándose a leyes del 92,78% de ilmenita, en condiciones de espiral con 10% de pulpa de alimentación, 5 minutos de operación y seguido de concentración en húmedo a 400 Gauss de potencia (Arias A, 2017).

#### **4. Metodología.**

A continuación, se describen las etapas experimentales llevadas a cabo para el cumplimiento de los objetivos propuestos.

##### **4.1 Caracterización de las arenas negras.**

Para el desarrollo del presente trabajo de grado se obtuvieron arenas negras provenientes de Barbacoas, Nariño. En primer lugar, se determinó la distribución granulométrica de las arenas recibidas, para ello se sometieron a tamizaje por medio de mallas Taylor números 20, 30, 50, 70, 100, 140 y 200. La composición química y mineralógica de las arenas recibidas fue determinada mediante las técnicas de fluorescencia de rayos X (FRX) y difracción de rayos X (DRX), respectivamente.

##### **4.2 Evaluación del tamizado como método de purificación de la ilmenita.**

La idea de que el proceso de tamizado podría servir como método de purificación de la ilmenita surgió de la observación macroscópica de las fracciones granulométricas de la arena, dado que se evidenciaron diferencias en la coloración de tales muestras. Los ensayos de esta parte de la investigación consistieron en la determinación de la distribución de fases mineralógicas por mallas, para ello los retenidos en cada malla fueron analizados por FRX y DRX. Se obtuvieron micrografías ópticas a 100X de las partículas minerales retenidas en cada malla, esto con el fin de respaldar de manera visual los resultados de la caracterización composicional.

##### **4.3 Pruebas de purificación por concentración gravimétrica.**

Las arenas fueron purificadas gravimétricamente por medio de dos procesos: mesa Wilfley y concentrador Knelson. Se utilizó la mesa concentradora marca Holman-Wilfley, modelo 800, para los ensayos en tal equipo se tuvieron en cuenta tres variables operativas: caudal de lavado, con valores de 109 mL/s y 250 mL/s; variación de ángulos de inclinación de 7°, 9° y 11° y la

frecuencia de vibración de mesa a 42 Hz, 48 Hz y 54 Hz. Por su parte, para las pruebas con el concentrador Knelson se utilizó el equipo marca FLSMIDTH, modelo MD3 evaluando dos parámetros operativos: masa de alimentación y velocidad de giro; las masas correspondieron a valores de 70 g, 100 g y 130 g y las velocidades de giro medidas en fuerza centrífuga relativa (G's) fueron 40,2

G's, 67 G's y 94 G's.

#### **4.4 Pruebas de purificación por concentración magnética**

Se llevaron a cabo pruebas de purificación de ilmenita por concentración magnética tanto en seco como en húmedo, para lo cual se utilizaron los equipos WEDAG y DANGER modelo WH-IMS3X4L respectivamente. Además de las pruebas por separado en cada uno de los equipos, también se estableció un circuito que empalma ambos procesos de concentración magnética. El equipo de separación magnética en seco no tenía la opción de variar el campo magnético, por lo que en los ensayos con dicho equipo sólo se evaluó el efecto de la cantidad de mineral alimentado, para cada ensayo el concentrado se recirculó por el equipo hasta obtener una masa invariable. Las masas de alimentación utilizadas fueron de 100 g, 120 g y 200 g.

Por su parte, para los ensayos de concentración en húmedo, la masa de alimentación fue de 150 g y se evaluó el efecto del voltaje aplicado en la retención de las arenas; los voltajes de estudio fueron 30, 50, 70 y 90 V. Finalmente, el circuito de empalme de los dos procesos se alimentó con 400 g de arena, la cual ingresó al concentrador en seco, mientras que las colas de esta etapa alimentaron la primera etapa de concentración en húmedo, funcionando con voltaje de 30 V, las colas de esta etapa alimentaron la segunda etapa de concentración en húmedo a 50 V; tal procedimiento se repitió con la etapa de concentración a 70 y 90 V.

Los ensayos de concentración descritos anteriormente se evaluaron mediante el pesaje de los productos y su posterior caracterización (conteo de partículas pesadas/oscuras y claras desde las micrografías ópticas y análisis DRX y FRX en las muestras más representativas). A partir de tales resultados se calcularon los índices metalúrgicos (recuperación y razón de enriquecimiento) para evaluar la eficiencia de las pruebas.

## 5.Resultados y Discusión.

### 5.1 Caracterización de las arenas negras.

En primer lugar, se presentan los resultados relacionados con la composición mineralógica y química elemental de la arena negra recibida, los cuales fueron obtenidos por medio de las técnicas DRX y FRX, respectivamente.

En la tabla 3 se relaciona la distribución de fases mineralógicas en la arena, se observa que aproximadamente el 90% de esta corresponde a compuestos ricos en titanio, incluyendo rutilo y ferrotitanatos, o minerales de ilmenita, en su estructura de tipo  $MFeTiO_3$  (como ha sido expuesto con anterioridad en el presente documento). El porcentaje restante (10%) de la arena corresponde a las impurezas: hematita, cuarzo y circón. El alto contenido de minerales de ilmenita en la arena se relaciona con el hecho de que el mineral recibido fue previamente procesado o pre concentrado por el proveedor, por tal motivo los posteriores ensayos de concentración de esta arena corresponden realmente a la limpieza o purificación del pre concentrado recibido.

NOMBRE	FORMULA QUÍMICA	%PORCENTAJE
Ilmenita	$Fe(TiO_3)$	29,80
Oxido de Fe y Ti	$(FeTiO_3)_{0,9}(Fe_2O_3)_{0,1}$	25,80
Hematita (Ti)	$(Fe_{1,831}Ti_{0,169})O_3$	11,53
Ilmenita (Ni)	$(Ni_{0,5}Mg_{0,5})TiO_3$	9,20
Titanato de Mg y Zn	$(Mg_{0,7}Zn_{0,3})(TiO_3)$	8,20
Pyrophanita	$(Mn_{0,8}Mg_{0,2})(TiO_3)$	3,90
Rutilo	$TiO_2$	2,00
Hematita	$Fe_2O_3$	6,25
Circón	$ZrSiO_4$	2,70
Cuarzo	$SiO_2$	0,62
TOTAL		100

**Tabla 3.** Caracterización mineralógica obtenida por DRX de la arena negra recibida.

Por otro lado, el análisis químico obtenido por FRX respalda el análisis mineralógico, ya que como se muestra en la tabla 4, más del 90% de los óxidos metálicos que conforman las fases

minerales corresponden a los constituyentes de los minerales asociados al grupo de la ilmenita (Ti, Fe, Mn, Mg), por su parte, los óxidos que componen a las impurezas identificadas (exceptuando el  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , quien hace parte de la ilmenita) suman alrededor del 4% siendo esto coherente con los resultados obtenidos por DRX.

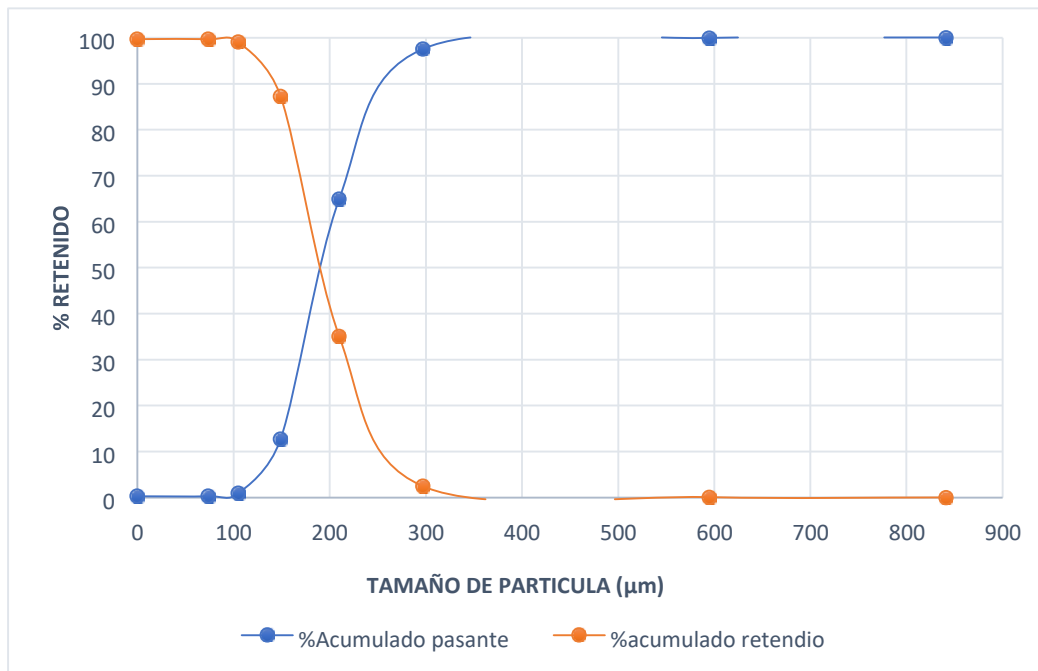
ÓXIDO	CONTENIDO %
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	46,16
$\text{TiO}_2$	44,77
$\text{MnO}$	3,33
$\text{SiO}_2$	2,49
$\text{ZrO}_2$	0,68
$\text{CaO}$	0,69
$\text{Al}_2\text{O}_3$	0,64
$\text{MgO}$	0,29

**Tabla 4.** Composición química obtenida por FRX de la arena negra recibida

En la figura 6 se presenta la gráfica de distribución granulométrica de la arena negra recibida, obtenida mediante tamizaje. Se observa que el rango de tamaño de partículas está entre 75 y 600  $\mu\text{m}$ , y el tamaño medio es de 190  $\mu\text{m}$ . También se evidencia que el 96% de la arena tiene un tamaño de partículas en el rango de 106 a 212  $\mu\text{m}$ , retenidas en tres mallas (#70, #100 y #140); en los tamices superiores como inferiores la retención de masa no es muy significativa. Esto quiere decir que la arena tiene una distribución granulométrica estrecha, lo cual podría favorecer los procesos de separación gravimétrica de las fases pesadas y livianas si estas estuviesen completamente liberadas.

Considerando que la gravedad específica de la ilmenita es alta (alrededor de 4,7) a diferencia de la ganga asociada, como la sílice con gravedad específica de 2,65, es posible establecer el criterio de concentración mencionado en la ecuación 1. Para tales condiciones se obtiene un valor aproximado de Criterio de Concentración (CC) de 2,24 y, de acuerdo con lo

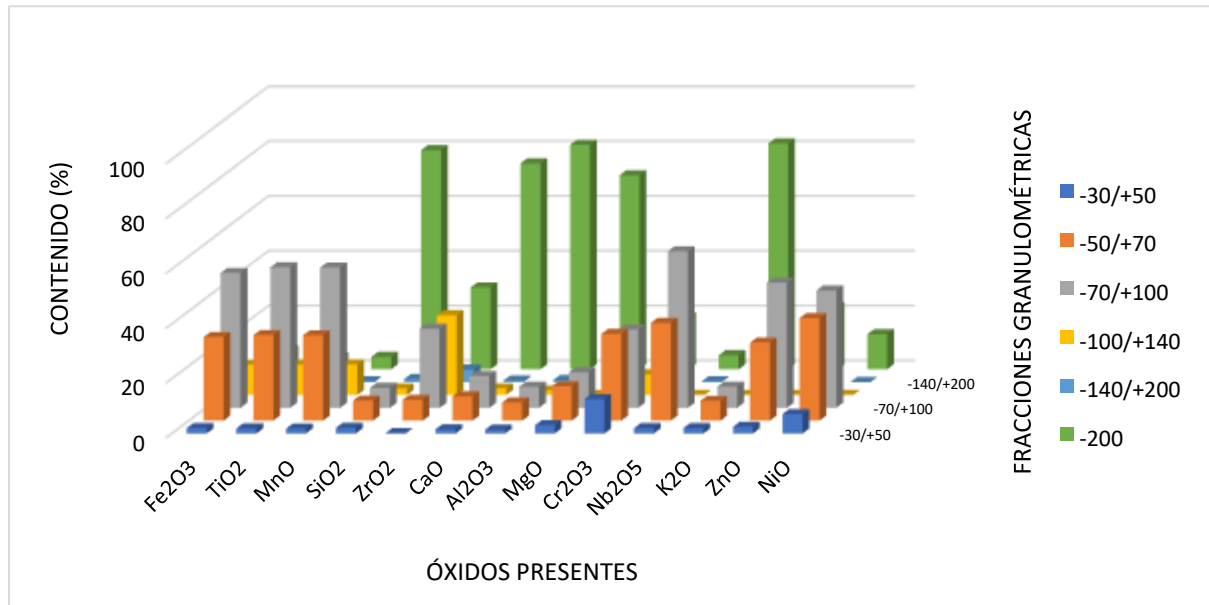
indicado en la tabla 1, para tal valor de CC, la separación de partículas es posible siempre y cuando su tamaño de partículas sea de por lo menos 150  $\mu\text{m}$ ; teniendo en cuenta que el tamaño promedio de las arenas caracterizadas está alrededor de los 190  $\mu\text{m}$ , se puede concluir que la separación entre la ilmenita y la sílice de la arena debería ser posible.



**Figura 6.** Distribución Granulométrica de la arena de ilmenita recibida.

## 5.2 Evaluación del tamizado como método de purificación de la ilmenita.

Con el fin de analizar si las fases mineralógicas de interés (grupo de la ilmenita) se concentraban en un rango granulométrico específico, se decidió analizar químicamente los retenidos en cada una de las mallas. En la figura 7 se resumen los resultados. Para la obtención de este gráfico (distribución de óxidos por fracciones granulométricas) se realizaron balances de masa teniendo en cuenta la masa de mineral retenida en cada tamiz y los análisis químicos de cada fracción granulométrica.



**Figura 7.** Distribución por fracciones granulométricas de los óxidos presentes en la arena negra.

De acuerdo con la figura 7, el 93% del dióxido de titanio se concentra en tres fracciones granulométricas: -50/+70, -70/+100 y -100/+140, es decir en partículas con tamaños entre 106 y 300  $\mu\text{m}$ ; comportamiento similar se observa para los óxidos de hierro y de manganeso, lo cual es lógico dado que tales óxidos son los principales constituyentes de los minerales de ilmenita. Por su parte, el 80% de la sílice ( $\text{SiO}_2$ ) se concentra en la fracción granulométrica -200, o en partículas con tamaño menor a 75  $\mu\text{m}$ . Situación similar se observa para los óxidos de calcio, aluminio y potasio. Estos resultados podrían indicar que es posible aumentar la pureza de las arenas negras a través de una etapa de clasificación del mineral por tamaño de partículas. Al hacer el balance de masa respectivo para la clasificación de la arena entre las mallas 50 y 140 (específicamente 50/+140) se obtienen los siguientes índices de recuperación y razón de enriquecimiento por cada fracción granulométrica observables en la tabla (5):

Fracción granulométrica	% másico	Tenor (% TiO <sub>2</sub> )	Recuperación (%)	Razón de enriquecimiento
-30#/+50#	2,45	35,8	1,97	0,802
-50#/+70#	32,6	44,6	32,59	1,000
-70#/+100#	52,22	45,73	53,52	1,025
-100#/+140#	11,8	43,45	11,49	0,974
-140#/+200#	0,64	26,63	0,38	0,597
-200#	0,29	7,75	0,05	0,174

**Tabla 5.** Índices metalúrgicos por fracción granulométrica.

Como indica la tabla 5, y en concordancia a la caracterización realizada, la mayoría de impurezas se encuentran contenidas en los tamices externos (superiores e inferiores) en donde la “razón de enriquecimiento” es menor a 1, lo que indica que en tales fracciones granulométricas hubo enriquecimiento, pero de los minerales constituyentes de la ganga. Por su parte, en la fracción granulométrica -70#/+100# se obtuvo el mayor enriquecimiento, (1,025) y una recuperación del 53,52%, aumentándose el tenor (% TiO<sub>2</sub>) de la arena de 44,77% a 45,73%. Por otro lado, la caracterización mineralógica de tal fracción granulométrica, la cual se presenta en la tabla 6, señala que el contenido de especies ricas en Ti es del 97,55%, lo cual implica un aumento del 7.12% con respecto al contenido de dichas fases en la muestra global (90.43%). Estos resultados permiten concluir que es viable aprovechar la diferencia en el tamaño de las partículas de las diferentes fases minerales para enriquecer la arena pre-concentrada.

Nombre del compuesto	Fórmula química	Contenido (%)
Ilmenita	FeTiO <sub>3</sub>	28.35
Ilmenita*	Fe <sub>1.10</sub> Ti <sub>0.90</sub> O <sub>3</sub>	28.22
Titanato de Mg y Zn	(Mg <sub>0.7</sub> Zn <sub>0.3</sub> )(TiO <sub>3</sub> )	21.72
Hematita (Ti)	(Fe <sub>1.831</sub> Ti <sub>0.169</sub> )O <sub>3</sub>	12.29
Pyrophanita	(Mn <sub>0.8</sub> Mg <sub>0.2</sub> )(TiO <sub>3</sub> )	6.97
Circón	ZrSiO <sub>4</sub>	2.45
<b>Total</b>		<b>100</b>

**Tabla 6.** Caracterización mineralógica de la fracción granulométrica -70#/+100#.

En la figura 8 se comparan las fotografías tomadas a las muestras de las diferentes fracciones granulométricas, donde se pueden observar las diferencias en la coloración de tales muestras. Es evidente el color más oscuro para la muestra de la fracción -70#/+100#, lo cual es coherente con los análisis químicos y mineralógicos de dicha muestra, la cual está enriquecida en ilmenita. Tanto los resultados por caracterización, sus índices metalúrgicos y las imágenes analizadas indican que el tamaño de partícula con mejor recuperación y pureza corresponde a retenido en el tamiz #70.



**Figura 8.** Fotografías de las muestras de las diferentes fracciones granulométricas.

### 5.3 Purificación de ilmenita por métodos de concentración gravimétrica.

Se evaluó el potencial de enriquecimiento y recuperación de los minerales obtenidos por métodos gravimétricos tanto por mesa vibradora Wilfley como por concentrador centrífugo Knelson. Los productos de concentración fueron analizados por microscopía óptica a 100X con el fin de identificar las fases presentes y su grado de separación; mediante conteo de partículas oscuras (pesadas o de ilmenita) y claras (livianas o silíceas), se calculó el % en volumen (%v/v)

aproximado de ilmenita en cada muestra. Tales valores se convirtieron a % en masa o tenor (% ilmenita) utilizando la siguiente relación:

$$\text{Tenor (\% másico ilmenita)} = \frac{100}{\left[ 1 + \frac{\rho_{\text{silíce}}}{\rho_{\text{ilmenita}}} \left( \frac{100}{\% \frac{v}{v} \text{ ilmenita}} - 1 \right) \right]} \quad (8)$$

El efecto de cada variable de se analizó a través de los índices metalúrgicos: Recuperación (R) y Razón de enriquecimiento (Re), los cuales se definen de la siguiente manera:

$$R = \frac{C * t_c}{F * t_a} \quad (9)$$

$$Re = \frac{t_c}{t_a} \quad (10)$$

Dónde: C = Masa del concentrado en gramos.

F = Masa de alimentación en gramos.  $t_c$  = Tenor del concentrado (% ilmenita).

$t_a$  = Tenor de la alimentación (% ilmenita).

Finalmente, los productos de concentración que se consideraron más importantes se analizaron por las técnicas FRX y DRX con el fin de determinar su composición química y mineralógica.

### 5.3.1 Purificación en mesa Wilfley.

Las arenas fueron concentradas por medio de una mesa vibradora Wilfley, se alimentaron 200 g por cada ensayo en donde las variables operativas a tener en cuenta fueron: ángulo de inclinación de la mesa con valores de 7°, 9° y 11°, caudal de agua total de la mesa de 109 ml/s y 250 mL/s y frecuencias de vibración de 42 Hz, 48 y 54 Hz.

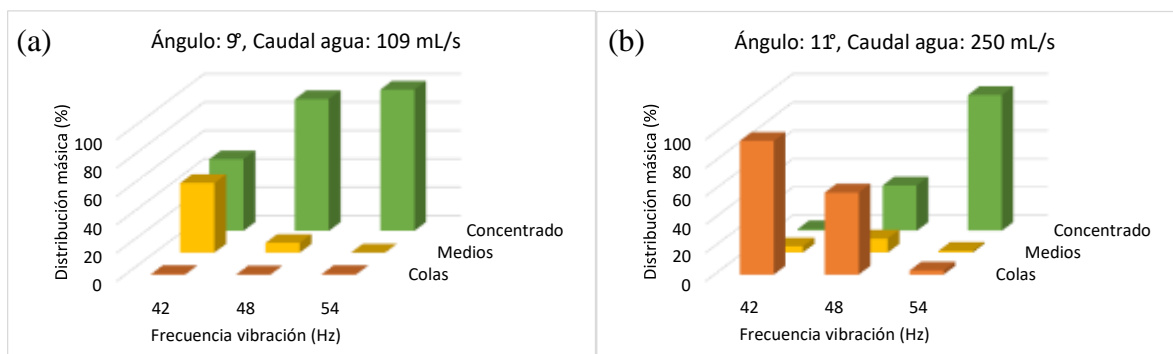
La tabla 7 resume los porcentajes de distribución másica que se obtuvieron por cada ensayo en las diferentes zonas de la mesa: colas, medios y concentrados.

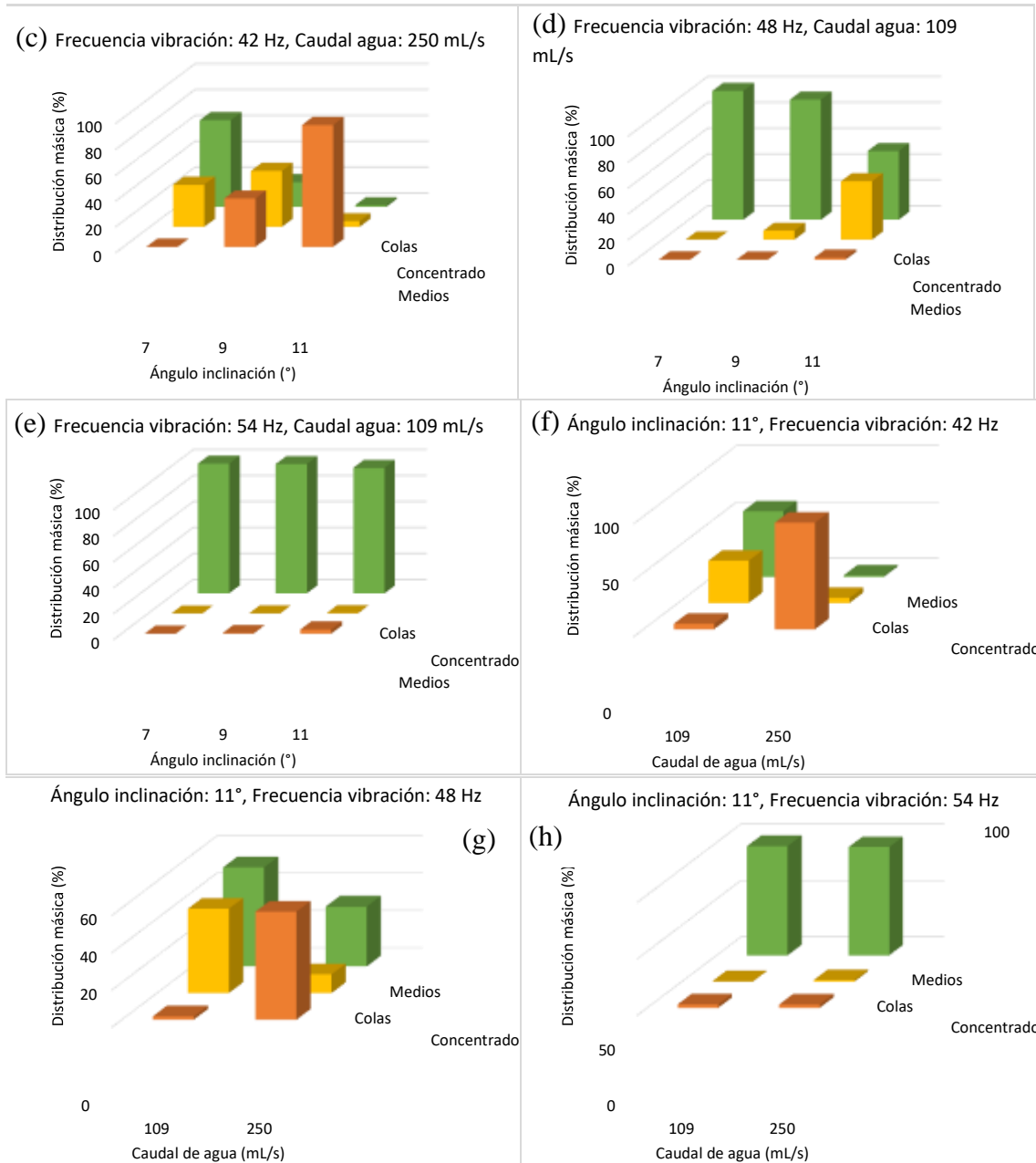
Variables de estudio			Distribución másica de los productos		
Ángulo de inclinación (°)	Caudal de agua (mL/s)	Frecuencia de vibración (Hz)	Colas (%)	Medios (%)	Concentrado (%)
7	109	42	0,3	25,6	74,1
		48	0,2	0,1	99,7
		54	0,0	0,0	100,0
	250	42	0,2	32,7	67,1
		48	0,1	24,1	75,8
		54	0,0	0,0	100,0
9	109	42	0,30	49,14	50,56
		48	0,10	6,90	93,00
		54	0,30	0,05	99,65
	250	42	37,49	43,35	19,16
		48	28,82	25,38	45,80
		54	1,63	67,11	31,26
11	109	42	4,76	37,37	57,87
		48	1,69	45,21	53,09
		54	3,00	0,25	96,75
	250	42	94,37	4,45	1,18
		48	57,93	10,00	32,07
		54	2,85	1,35	95,80

**Tabla 7.** Distribución porcentual másica de colas, medios y concentrados para cada ensayo de concentración en mesa Wilfley.

A priori los resultados presentados en la tabla 7 no indican una tendencia o conducta predecible en cuanto al efecto de cada variable, dado que ellas se correlacionan entre sí; sin embargo al analizar por separado cada variable se puede concluir lo siguiente:

- El aumento de la frecuencia de vibración de la mesa de 42 a 54 Hz favorece el movimiento de las partículas a lo largo de la tabla (Abaka-Wood et al., 2019), lo que se traduce en una mayor cantidad de concentrado, tal como se muestra en las figuras 9 (a) y 9(b).
- Por su parte, el aumento del ángulo de inclinación de la mesa concentradora, de 7 a 11°, ralentiza el movimiento de las partículas a lo largo de la tabla, mientras que se favorece su arrastre por el flujo de agua hacia abajo (Yıldırım Gülsoy & Gülcan, 2019), recuperándose sobre la zona de colas y medios, ver figuras 9(c) y 9(d). No obstante, esta tendencia es afectada por la variable frecuencia de vibración de la mesa, ya que, como se observa en la figura 9(e) una alta frecuencia de vibración (54 Hz) promueve el movimiento de las partículas hacia la zona del concentrado, independientemente del ángulo de inclinación de la mesa.
- En cuanto al efecto de la variable caudal de agua, la tendencia general es que al aumentar el caudal se acelera el movimiento de las partículas hacia abajo (Gupta, Ashok, 2006) recuperándose principalmente en la zona de colas (ver figuras 9(f) y 9(g)). Sin embargo, dicha tendencia es afectada por un alto valor (54 Hz) de la variable frecuencia de vibración, para tal situación se favorece el movimiento de las partículas a lo largo de la mesa, recuperándose en el concentrado, tal como lo indica la figura 9(h).





**Figura 9** Efecto de las variables de estudio: Frecuencia de vibración (a, b), ángulo de inclinación (c, d y e) y caudal de agua (f, g y h) en la distribución de las partículas en los productos de concentración de ilmenita en mesa Wilfley.

En el Apéndice A se muestran las micrografías de las partículas de los productos (colas, medios y concentrado) obtenidos en cada ensayo. Tal como se mencionó anteriormente, a partir del conteo de partículas oscuras y claras en cada una de las muestras se obtuvo un valor

aproximado del tenor (% ilmenita) de las mismas; con tal información se procedió a calcular los índices metalúrgicos de calidad (recuperación y razón de enriquecimiento), los cuales se relacionan en la tabla 8.

Número de ensayo	Variables			Tenor del concentrado (% ilmenita)	Índices metalúrgicos	
	Ángulo (°)	Frecuencia (Hz)	Caudal (mL/s)		Recuperación (%)	Razón de enriquecimiento
1	7	42	109	95,70	75,09	1,013
2	7	48	250	96,73	75,86	1,001
3	7	54	109	93,86	100,00	1,000
4	7	42	250	94,33	67,67	1,008
5	7	48	109	94,46	99,76	1,000
6	7	54	250	95,58	100,00	1,000
7	9	42	109	95,37	50,70	1,003
8	9	48	250	98,50	47,00	1,026
9	9	54	109	95,99	99,70	1,001
10	9	42	250	97,20	19,19	1,002
11	9	48	109	95,19	93,17	1,002
12	9	54	250	94,61	31,36	1,003
13	11	42	109	95,97	57,93	1,001
14	11	48	250	95,51	32,83	1,024
15	11	54	109	91,88	96,86	1,001
16	11	42	250	97,41	1,19	1,011
17	11	48	109	99,07	54,98	1,036
18	11	54	250	91,88	96,08	1,003

**Tabla 8.** Índices metalúrgicos de los ensayos de concentración realizados en mesa Wilfley.

Al observar las razones de enriquecimiento se aprecia que, pese a ser mayores a la unidad, su aumento respecto a este valor no es muy significativo, lo que se traduce en un leve aumento de enriquecimiento del mineral de interés en los concentrados. Tal resultado se explica por el hecho de que el mineral alimentado a la mesa concentradora era un pre-concentrado, motivo por el cual los estudios realizados en la presente investigación corresponden a la purificación de tal mineral pre-concentrado y no a la concentración de un mineral de cabeza.

Ahora bien, el mayor enriquecimiento (1.036) se obtuvo en el ensayo 17, llevado a cabo con el mayor nivel de ángulo de inclinación ( $11^\circ$ ), el valor intermedio de frecuencia de vibración (48 Hz) y el menor nivel de caudal de agua (109 mL/s). No obstante, el logro de tal enriquecimiento del concentrado involucró un bajo nivel de recuperación del mineral de interés (55%). Por otro lado, en las pruebas que se alcanzó un alto valor de recuperación (ensayos 3, 6, 9, 11, 15 y 18), el enriquecimiento fue muy bajo (prácticamente igual a 1), es decir que en ellas la separación de partículas fue prácticamente nula. Tal situación permite concluir que la mesa Wilfley no es el método de concentración más eficiente para purificar el pre-concentrado de ilmenita, pues no se logra aumentar la concentración de ilmenita y alcanzar simultáneamente un alto valor de recuperación.

Teniendo en cuenta que los valores de tenor, recuperación y enriquecimiento reportados en la tabla 7 son aproximaciones, dado que fueron obtenidos a través de un método simple (cualitativo) de conteo de partículas, se procedió a determinar la composición mineralógica, por DRX, de las colas, medios y los concentrados obtenidos de tres de los ensayos realizados, específicamente de aquellos que tuvieron los mayores tenores (aproximados) de ilmenita, o partículas oscuras, y que corresponden a los ensayos números 12, 17 y 18. Tales resultados se presentan en la tabla 9.

PRODUCTOS DE CONCENTRACIÓN	No. Ensayo		
	17	18	12
CONCENTRADOS			
Contenido (%)			
Ilmenita (óxido de titanio, Fe)	64,15	68,52	74,34
Ilmenita (óxido de titanio, Mn y Mg)	24,83	20,70	16,76
Hematita, syn	6,28	6,04	4,59
Ortoclasa	3,20	3,35	2,93
Zircón	1,54	1,39	1,38
MEDIOS			
Contenido (%)			
Ilmenita (óxido de titanio, Fe)	71,11	55,74	53,70
Ilmenita (óxido de titanio, Mn y Mg)	17,50	26,30	32,92
Hematita, syn	4,92	10,84	6,41
Ortoclasa	3,29	4,33	4,38
Zircón	2,57	2,79	1,83
Cuarzo	0,61	-	0,76
COLAS			
Contenido (%)			
Ilmenita (óxido de titanio, Mn y Mg)	35,84	39,37	39,98
Ilmenita (óxido de titanio, Ni, Mn, Zn y Mg)	22,07	17,73	22,66
Cuarzo	14,73	15,73	8,77
Ilmenita (óxido de titanio, Fe)	10,90	4,12	14,07
Ferro-actinolita	2,83	8,64	2,35
Hematita	4,71	3,16	4,80
Ortoclasa	4,36	4,60	3,23
Albita	3,39	5,87	2,16
Zircón	1,16	1,16	1,98

**Tabla 9.** Composición mineralógica, obtenida por DRX, de los productos de purificación del mineral en mesa Wilfley relacionados con los ensayos números 12, 17 y 18.

Al analizar los resultados presentados en la tabla 9, se evidencia que cerca del 95% de la masa de los concentrados corresponde a las fases minerales más pesadas o de mayor gravedad específica (minerales con hierro y titanio), mientras que en las colas dichos minerales suman un máximo del 70%, lo cual indicaría que la mesa sí es un método adecuado para la concentración y/o limpieza de arenas negras. No obstante, para alcanzar una alta eficiencia en el proceso se deberían optimizar las condiciones de preparación del mineral, específicamente en cuanto a la

distribución de tamaño de partículas y su liberación. Esto para que el comportamiento de las partículas densas sea el mismo y puedan recuperarse en el concentrado y las livianas en colas y medios, y de esta forma aumentar la recuperación.

Con base en los resultados obtenidos, el mejor resultado caracterizado fue para el ensayo No 12 con variables operacionales de 9°, 54 Hz y 250 mL/s; su tenor de ilmenita corresponde a un valor del 91% respecto a los resultados de la tabla 8, pese a considerarse el mejor resultado su recuperación no supera el 32% y su razón de enriquecimiento apenas supera la unidad con un valor de 1,003, lo que indica que efectivamente la limpieza o aumento de pureza no se presentó de manera significativa.

### 5.3.2 Purificación en concentrador Knelson.

Para estos ensayos de purificación de la ilmenita se estudiaron las variables masa de alimentación (70 g, 100 g y 130 g) y velocidad de giro (40,2 G's, 67 G's y 94 G's). En la tabla 10 se resumen los resultados obtenidos.

Variables de estudio		Distribución másica de productos		Tenor del concentrado (% ilmenita)	Índices metalúrgicos de concentración	
Masa alimentada (g)	Velocidad de giro (G's)	Concentrado (%)	Colas (%)		Recuperación	Razón de enriquecimiento
70	40,2	94,7	5,3	96,06	94,73	1,000
	67	81,0	19,0	97,55	81,48	1,006
	94	84,1	15,9	97,35	84,20	1,001
100	40,2	89,9	10,1	96,17	90,00	1,001
	67	88,5	11,5	96,76	88,54	1,000
	94	94,0	6,0	95,94	94,05	1,001
130	40,2	91,9	8,1	97,12	92,08	1,002
	67	81,9	18,1	94,66	81,91	1,000
	94	91,6	8,4	98,22	91,79	1,002

**Tabla 10.** Resultados de los ensayos de purificación de la ilmenita en concentrador Knelson.

Los resultados obtenidos, presentados en la tabla 10, indican claramente que bajo ninguna condición de las variables estudiadas hubo una separación significativa de las partículas pesadas y ligeras en el concentrador Knelson, pues se observa que las razones de enriquecimiento para todos los ensayos fueron prácticamente igual a la unidad, sin importar que se aumentara o disminuyera la recuperación. No obstante, se podría decir que el mejor resultado se obtuvo para las condiciones operacionales de 70 g de alimentación (menor valor estudiado) y velocidad de giro de 67 G's (valor intermedio). Para tales condiciones se obtuvo el mayor tenor del concentrado (97,55% ilmenita) y la mayor razón de enriquecimiento (1.006), esto a costa de un menor grado de recuperación (81.48%).

En el Apéndice B se pueden apreciar las micrografías tomadas a muestras representativas de las colas y los concentrados obtenidos. Es evidente que no hay diferencias apreciables en la distribución de partículas claras (livianas) y oscuras (pesadas) entre las muestras, lo cual se refleja en los bajos valores de la razón de concentración relacionados en la tabla 10.

Para tener evidencia cuantitativa de lo observado, se procedió a analizar por la técnica DRX el concentrado del ensayo con el que se obtuvo la mayor razón de enriquecimiento, mencionado anteriormente; como indica el análisis (Tabla 11), la cantidad de minerales de ferrotitanatos en el concentrado es de aproximadamente 90%, mientras que el restante 10% corresponde a minerales tales como hematita, cuarzo y circón.

La baja separación de especies se puede deber al estado inicial de la arena, ya que este método de concentración es recomendado principalmente para minerales de alta gravedad específica y cuidando su tasas de alimentación, ya que la fracción de alimentación debe ser similar a la de descarga, cuando el material de alta densidad específica se va acumulando en las paredes del concentrador y no existe la circulación efectiva dicha acumulación promoverá que los

minerales pesados se pierdan con los ligeros, en el presente caso la gran mayoría del alimentado era de gran densidad, dificultando así que los minerales ligeros puedan suspenderse libremente y lográndose separar. En tal sentido, los resultados obtenidos permiten concluir que el concentrador Knelson tiene baja eficiencia en la limpieza o purificación de pre-concentrados de ilmenita.

Mineral	Contenido (%)
Ilmenita (óxido de titanio, Fe)	66,96
Ilmenita (óxido de titanio, Mn y Mg)	23,70
Hematite, syn	7,00
Zircon	1,50
Cuarzo	0,84

**Tabla 11.** Composición mineralógica obtenida por DRX del mejor concentrado del proceso de purificación de la ilmenita mediante el concentrador Knelson

#### 5.4 Purificación de ilmenita por métodos de concentración magnética.

Para esta parte de la investigación se sometieron las arenas negras a procesos de concentración magnética en seco de baja intensidad de campo, de alta intensidad en húmedo y posteriormente se diseñó un circuito de concentración que empalma ambos procesos.

##### 5.4.1 Purificación por concentración magnética en seco.

Se estudió la variable masa de arena alimentada al separador magnético en seco, en los siguientes niveles: 100 g, 120 g y 200 g; por cada pasada del alimento se obtuvieron dos productos: uno con minerales de alta susceptibilidad magnética y el segundo con los minerales de bajo carácter magnético; el producto magnético fue recirculado en el concentrador con el fin de garantizar la no inclusión de impurezas por arrastre o retención del proceso.

En la tabla 12 se relacionan los resultados obtenidos para los ensayos de concentración magnética en seco. El volumen de masa mineral que tiene gran susceptibilidad magnética no es más del 10% de la muestra alimentada inicial, sin importar su masa de alimentación, sin embargo

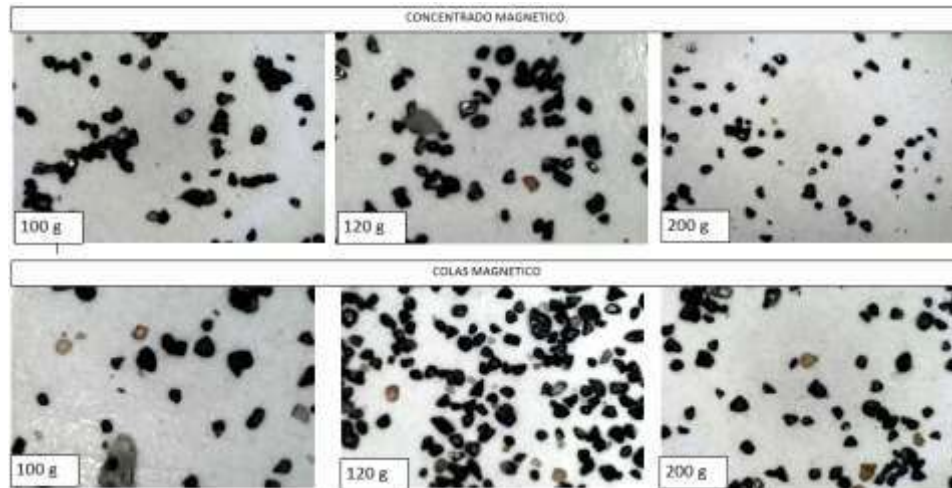
como se puede observar por medio de los índices metalúrgicos su enriquecimiento ha sido del resultado más prometedor en comparación a los demás procesos de limpieza, su tenor caracterizado tanto por micrografía como por DRX indican un concentrado como gran cantidad de minerales con alta coloración oscura y de gran presencia de elementos de composición como el titanio y el hierro.

Variable de estudio	Distribución másica de productos		Tenor del concentrado (% ilmenita)	Índices metalúrgicos de concentración	
	Concentrado (%)	Colas (%)		Recuperación (%)	Razón de enriquecimiento
Masa alimentada (g)					
100	9,17	90,53	100	10,47	1,141
120	8,14	91,69	100	9,10	1,118
200	9,54	90,31	100	10,31	1,080

**Tabla 12.** Resultados de los ensayos de purificación de la ilmenita por concentración magnética en seco.

En la figura 10, se comparan las micrografías de las colas y los concentrados de cada ensayo; es evidente la gran presencia de partículas oscuras (pesadas), lo cual es un indicador de presencia de ferrotitanatos de gran pureza. En cambio, en las colas del proceso se logra observar un aumento de partículas claras. El concentrado de mayor pureza, obtenido con 100 g de alimentación, fue analizado mediante DRX con el fin de determinar su composición mineralógica, la cual se presenta en la tabla 13. Tal análisis corrobora la alta pureza del concentrado, con 94.8% de ferrotitanatos, 61.68% para la ilmenita tipo  $\text{FeTiO}_3$  y 33.12% para la ilmenita del grupo  $\text{MFeTiO}_3$  (de Mn y Mg), y un 5.2% de hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Tales resultados permiten concluir que la separación magnética en seco es un proceso apropiado para la purificación de los minerales de ilmenita, especialmente permite eliminar las partículas de cuarzo y circón. No obstante, la hematita

permanece en el concentrado. Otra limitación de este método de purificación es que la recuperación es baja, tal como se discutió anteriormente.



**Figura 10** Micrografías de concentrados y colas de los ensayos de purificación por concentración magnética en seco

Mineral	Contenido (%)
Ilmenita (óxido de titanio, Fe)	61,68
Ilmenita (óxido de titanio, Mn y Mg)	33,12
Hematita, syn	5,2

**Tabla 13.** Composición mineralógica obtenida por DRX del concentrado del proceso de purificación de ilmenita mediante concentración magnética en seco.

#### 5.4.2 Purificación por concentración magnética en húmedo.

Para esta etapa de la investigación, se estudió la variable voltaje en los niveles: 30, 50, 70 y 90 V. Tal voltaje corresponde a aquel que el equipo suministra a las bobinas, es decir que entre mayor es el voltaje aplicado, mayor es el campo magnético generado. Para todos los ensayos se trabajó con una alimentación de 150 g de arena.

En la tabla 14 se presentan los resultados obtenidos para los ensayos de concentración magnética en húmedo. Tal como era de esperarse, a medida que se aumenta el voltaje se aumenta

la masa de del concentrado (ver anexo C), dado que con un campo magnético mayor se pueden recuperar partículas con menor susceptibilidad magnética. No obstante, para todos los casos la recuperación fue baja (menor al 40%), así mismo las razones de enriquecimiento fueron bajas (cercanas a la unidad), siendo significativa sólo la obtenida para el ensayo realizado a 70 V (1.040).

Variable de estudio	Distribución másica de productos		Tenor del concentrado (% ilmenita)	Índices metalúrgicos de concentración	
	Concentrado (%)	Colas (%)		Recuperación (%)	Razón de enriquecimiento
30	12,06	87,94	93,85	12,11	1,004
50	26,34	73,66	95,96	26,34	1,000
70	34,03	65,97	97,02	35,37	1,040
90	38,04	61,96	95,04	38,24	1,005

**Tabla 14.** Resultados de los ensayos de purificación de la ilmenita por concentración magnética en húmedo.

En la figura 11, se comparan las micrografías de los concentrados de cada ensayo; es evidente que a medida que se aumenta el voltaje, el concentrado obtenido contiene mayor cantidad de partículas claras (impurezas), lo cual es coherente con los tenores relacionados en la tabla 13.



**Figura 11.** Micrografías de los concentrados de los ensayos de purificación por concentración magnética en húmedo.

### 5.4.3 Circuito de Concentración magnética.

Con el fin de analizar si al separar secuencialmente los minerales con diferentes susceptibilidades magnéticas se puede obtener un concentrado de mayor pureza, se diseñó un circuito de separación magnética empalmado la concentración magnética en seco con la húmeda. Para tal ensayo se alimentaron 400 g de arena negra al concentrador magnético en seco, el producto no magnético fue la alimentación del concentrador magnético en húmedo, trabajando a 30 V, este procedimiento de circulación del producto no magnético, como alimento al siguiente nivel de campo magnético, se repitió hasta llegar a los 90 V.

En la tabla 15 se resumen los resultados obtenidos para el circuito de purificación por concentración magnética. Es observable que a medida en que se aumenta la potencia suministrada por el equipo, también se incrementa el porcentaje de masa retenida, pero no implica directamente un aumento de pureza mineral, de hecho, al haber mayor intensidad de campo aumentan las posibilidades de captación de mineral débilmente magnéticos pero impuros. En la tabla 15 se encuentran evidenciados tanto la recuperación como el enriquecimiento mineral de cada potencia establecida en el circuito, en ella se puede observar que la recuperación es muy baja para todos los casos, máxima recuperación de 16,25% para un voltaje de 90 V. En cuanto a la razón de enriquecimiento, se alcanzaron los máximos valores para la separación en seco (1,047) y con 70 V (1,042), mientras que el menor valor se obtuvo para 90 V (0,997), para este último caso la arena se enriqueció en minerales de ganga.

Etapa de purificación magnética	Distribución másica de productos		Tenor del concentrado (% ilmenita)	Índices metalúrgicos de concentración	
	Concentrado (%)	Colas (%)		Recuperación (%)	Razón de enriquecimiento
Magnético seco	9,4	90,6	100,00	9,84	1,047
30 V	8,5	81,9	95,07	8,42	0,991
50 V	12,3	69,9	96,03	12,55	1,020
70 V	11,3	58,2	93,86	11,77	1,042
90 V	16,3	41,9	92,02	16,25	0,997

**Tabla 15.** Resultados de los ensayos del circuito de purificación de la ilmenita por concentración magnética.

En el Apéndice D se recogen las micrográficas de los diferentes productos del circuito de purificación magnética del mineral. Se observa el mismo comportamiento descrito anteriormente para los ensayos simples de separación magnética, es decir que a medida que se aumenta el campo magnético, se aumenta la retención de partículas de menor susceptibilidad magnética.

En la tabla 16 se presenta la composición mineralógica obtenida por DRX de los diferentes productos del circuito, así mismo se señala la distribución másica de cada corriente. Llama la atención que el 42.1% de toda la arena no responde a ningún nivel de campo magnético de los evaluados. Así mismo, se puede inferir que la variación del campo magnético no favorece la recuperación de alguna fase de ilmenita en particular. Finalmente, se observa que el tenor real del mejor concentrado, separación en seco, es 94,8% de minerales ricos en Ti.

Mineral	Contenido (%)					
	Magnético seco	30 V	50 V	70 V	90 V	Colas finales
Ilmenita (óxido de titanio, Fe)	61.68	65.32	62.95	65.07	56.16	63.68
Ilmenita (óxido de titanio, Mn y Mg)	33.12	26.85	27.96	26.21	27.96	25.81
Hematita, syn	5.2	6.78	7.02	6.75	13.67	6.83
Zircón	0	0	1.14	1.15	1.36	2.63
Cuarzo	0	1.05	0.93	0.82	0.85	1.05
Distribución másica de mineral retenido (%)	9.5	8.5	12.3	11.3	16.3	42.1
Total fases de ilmenita	94.8	92.17	90.91	91.28	84.12	89.49

**Tabla 16.** Composición mineralógica obtenida por DRX de los productos de cada etapa del

circuito de purificación de ilmenita mediante concentración magnética.

Por otro lado, se concluye que, entre los métodos estudiados, la concentración magnética en seco sería el más adecuado para la purificación del pre-concentrado de ilmenita. Bajo tal condición se separan impurezas como zircón y cuarzo, pero no la hematita, alcanzándose una pureza de la ilmenita del 94.8%, no obstante, la recuperación es muy baja, tan sólo del 10%, aproximadamente. También se concluye que para la arena pre-concentrada que fue objeto de estudio en el presente trabajo de grado, es factible el enriquecimiento de la ilmenita mediante el tamizado de la arena, dado que el contenido de fases ricas en Ti en la fracción granulométrica - 70#/+100# es del 97,55%, no obstante, la recuperación sería solo del 53,52%.

Estos resultados son claros indicadores de la complejidad de la purificación del pre-concentrado por métodos no químicos, como los planteados en el presente proyecto, dado que se logró enriquecer el mineral de ilmenita, pero no se alcanzaron altos valores de recuperación.

### Conclusiones.

- La caracterización del mineral objeto de estudio (arena negra) demostró que este está compuesto de aproximadamente un 90% de diversos titanatos, de Fe, Mg, Mn, Ni y Zn, acompañados de las especies ganga, hematita, circón y cuarzo.
- Las pruebas de purificación de la arena negra mediante concentración gravimétrica en mesa Wilfley y concentrador Knelson demostraron que estos métodos no son efectivos para tal fin, ya que el enriquecimiento del mineral fue bajo, alcanzándose, en el mejor de los casos, contenidos de ilmenita de 91% y 90%, respectivamente.
- Los ensayos de purificación por concentración magnética indicaron que el mayor grado de enriquecimiento de la arena se alcanza con el separador en seco, obteniéndose un concentrado con 94,8% de minerales ricos en Ti, pero con una recuperación muy baja, cercana al 10%.
- Finalmente, se concluye que para la arena pre-concentrada que fue objeto de estudio en el presente trabajo de grado, es factible el enriquecimiento de la ilmenita mediante el tamizado de la arena, dado que se pudo determinar que el contenido de fases ricas en Ti en la fracción granulométrica -70#/+100# es del 97,55%, no obstante, la recuperación sería solo del 53,52%.

### **Recomendaciones**

- Analizar más a detalle la correlación entre las variables de la mesa Wilfley y su influencia de una respecto a la otra, generar un diseño factorial de procesos de 3k que tenga como variables de operación: ángulo, caudal y frecuencia y realizar un estudio estadístico de tales resultados.
- Evaluar la limpieza y purificación de la ilmenita por medio de métodos que impliquen reacciones químicas, de tal manera que se logre eliminar de forma selectiva la hematita como principal mineral impuro y asociado a las arenas negras.
- Evaluar la influencia de la composición química y mineralógica de los concentrados obtenidos en su respuesta fotocatalítica.

**Referencias Bibliográficas**

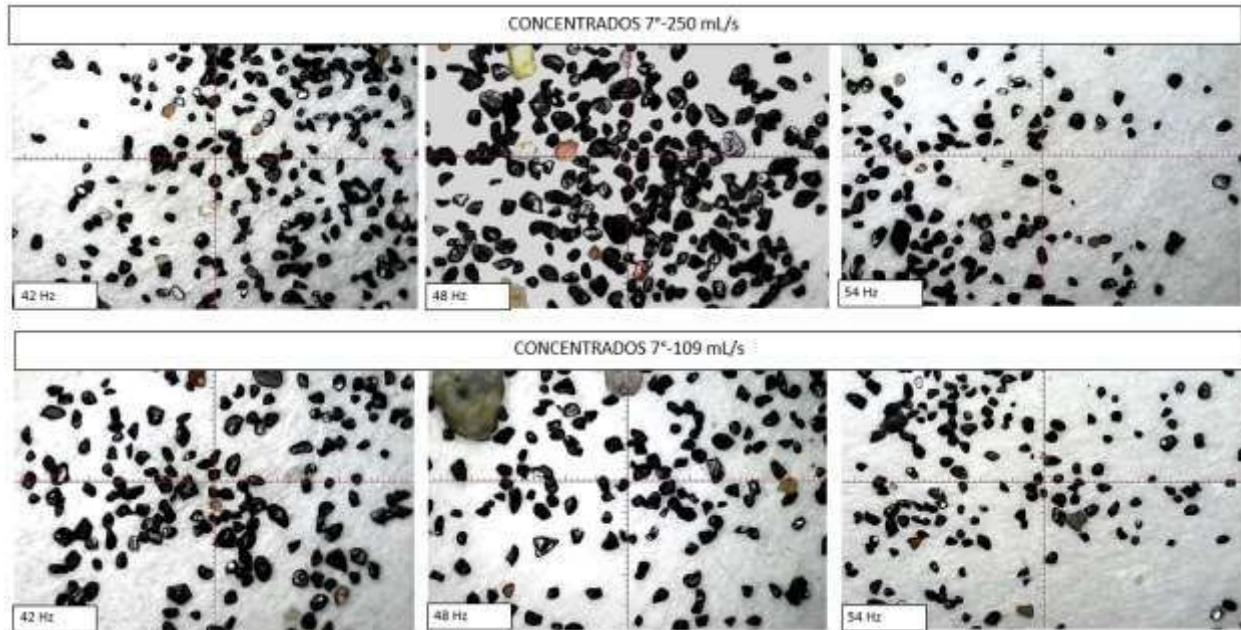
- Abaka-wood, g. b., quast, k., zanin, m., addai-mensah, j., & skinner, w. (2019). a study of the feasibility of upgrading rare earth elements minerals from iron-oxide-silicate rich tailings using knelson concentrator and wilfley shaking table. *powder technology*, 344, 897–913. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.12.005>
- Arias a, c. h. (2017). concentracion de arenas negras provenientes de barbacoas (nariño) y evaluacion de su procesamiento por molienda de alta enrgia para la obtencion de ilmenita de tamaño nanometrico. *uinversidad indutrial de santander*, 1–14.
- Barry, et al. w. (2015). gravity concentration. in *mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery* (pp. 223–242). <http://ebookcentral.proquest.com/lib/bibliouis-ebooks/detail.action?docid=4003232>
- Becerra a, c. j. (2014). identificacion electroquimica de ilmenita fetio<sub>3</sub> en concentrados y colas producto del beneficio de arenas negras. *universidad indutrial de santander*.
- Benavides, h. o. (2007). información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático. *ideam*, 1–102. <https://doi.org/ideam-meteo/008-2007>
- Cañas martínez, d. m. (2015). *evaluación de las capacidades fotocatalíticas de oxidación y reducción de concentrados de ilmenita obtenidos de arenas negras de barbacoas (nariño)*.
- Cuervo k, r. c. (2019). evaluacion del efecto de proporción de ilmenita/carbón activado sobre la remoción de azul de metileno en un fotorreactor a escala laboratorio. in *fundación universidad de américa-facultad de ingenierias*. (issue 3). fundación universidad de américa.
- Cui, z., liu, q., & etsell, t. h. (2002). magnetic properties of ilmenite, hematite and oilsand minerals after roasting. *minerals engineering*, 15(12), 1121–1129. [https://doi.org/10.1016/s0892-6875\(02\)00260-1](https://doi.org/10.1016/s0892-6875(02)00260-1)

- Dunne robert, honaker rick, g. a. (2019). gravity concentration. in *society for mining, metallurgy & exploration*. (pp. 787–811). <https://doi.org/10.1201/b11327-15>
- Edelmannová f, m., reli, m., nadrah, p., rozman, n., ricka, r., sever škapin, a., nosan, m., lavrenčič štangar, u., & kočí, k. (2022). a comparative study of tio<sub>2</sub> preparation method on their photocatalytic activity for co<sub>2</sub> reduction. *catalysis today, october*, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2022.11.005>
- Fuerstenau, maurice c, k. n. (2003). gravity concentration. in *society for mining, metallurgy & exploration*. (pp. 185–218). 2009. <https://doi.org/10.1201/b11327-15>
- Fujishima, a., zhang, x., & tryk, d. a. (2008). tio<sub>2</sub> photocatalysis and related surface phenomena. *surface science reports*, 63(12), 515–582. <https://doi.org/10.1016/j.surfrep.2008.10.001>
- Fujita, t. (2006). magnetic separation. *powder technology handbook, third edition*, 661–671. <https://doi.org/10.1201/9781439831885-59>
- García-muñoz, p., pliego, g., zazo, j. a., barbero, b., bahamonde, a., & casas, j. a. (2017). modified ilmenite as catalyst for cwpo-photoassisted process under led light. *chemical engineering journal*, 318, 89–94. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.05.093>
- Gonzáles, l. (2000). *analisis financiero para la mineralizaciones de ilmenita (titanio) en la sierra nevada de santa marta*.
- Guan, s. h., zhao, k. f., tong, q., rao, q. x., cheng, l., song, w., zhang, q. c., wang, x. l., & song, w. g. (2021). a review of photocatalytic materials application on nonylphenol degradation. *environmental challenges*, 4(march), 100172. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100172>
- Gupta, ashok, d. s. (2006). gravity separation. in *mineral processing design and operations: an introduction* (pp. 494–553). <http://ebookcentral.proquest.com/lib/bibliouisebooks/detail.action?docid=269888>

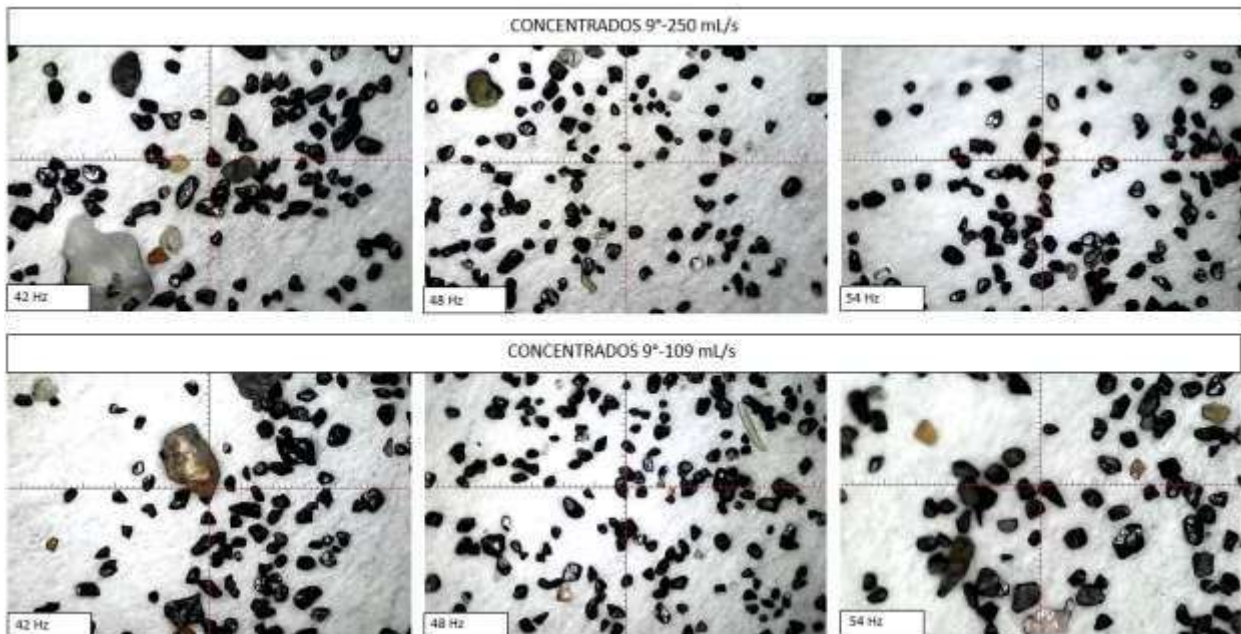
- Patricia, g. (2017). *ilmenita como catalizador para procesos fotoasistidos en tratamientos de aguas*. universidad autónoma de madrid.
- Shang, y., li, x., yang, y., wang, n., zhuang, x., & zhou, z. (2020). optimized photocatalytic regeneration of adsorption-photocatalysis bifunctional composite saturated with methyl orange. *journal of environmental sciences (china)*, 94, 40–51.  
<https://doi.org/10.1016/j.jes.2020.03.044>
- Trujillo, d. (2015). *desarrollo de un proceso de recuperación de dióxido de titanio a partir de ilmenita presente en las arenas ferrotitaníferas de la zona de mopinche*. 193.
- Valderrama, l. (2008). *concentración de minerales de titanio contenidos en las arenas de playa de la region de atacama-chile. I*, 119–130.
- Wills, b. a., & napier-munn, t. (2015). magnetic and electrical separation. in *mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery* (pp. 381–406). <https://doi.org/10.1016/b978-075064450-1/50015-1>
- Yıldırım gülsoy, ö., & gülcan, e. (2019). a new method for gravity separation: vibrating table gravity concentrator. *separation and purification technology*, 211(april 2018), 124–134.  
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.09.074>

Apéndices

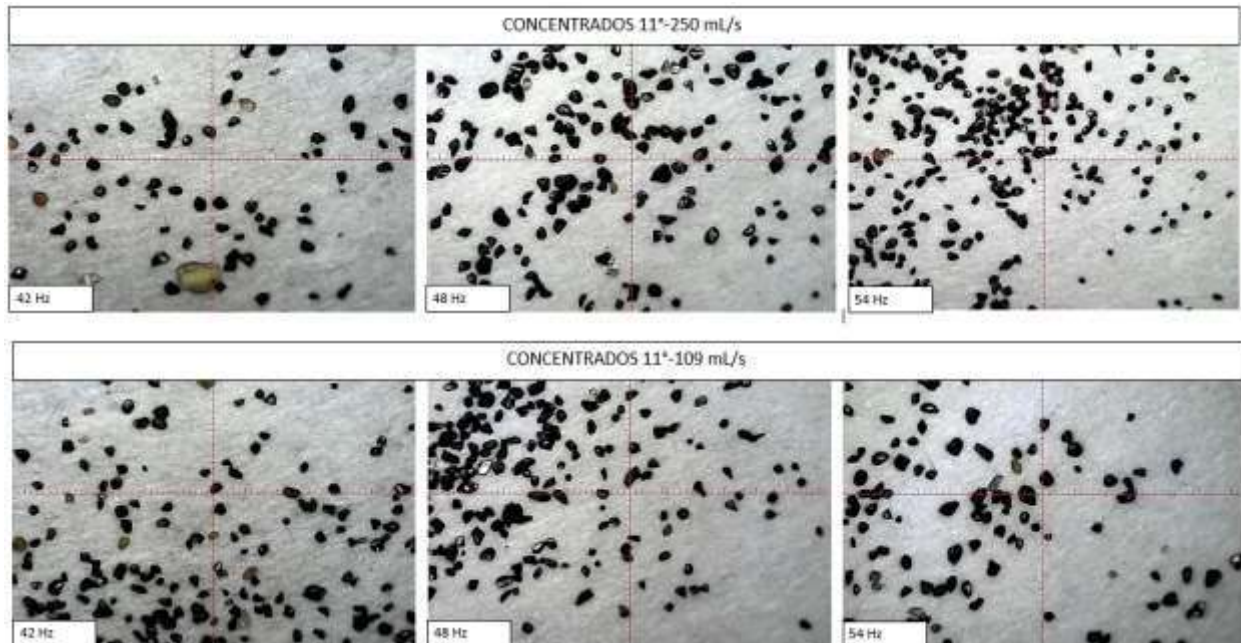
Apéndice A. micrografías concentradas, medios y colas mesa Wilfley.



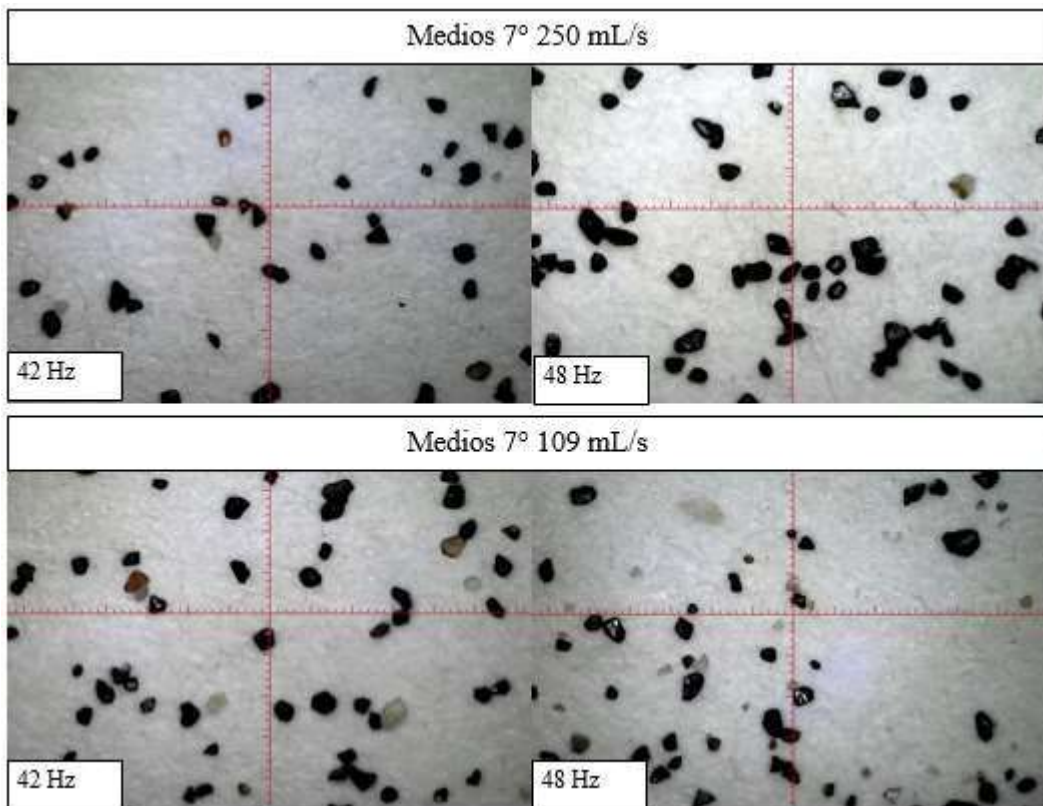
Concentrados 7° mesa Wilfley



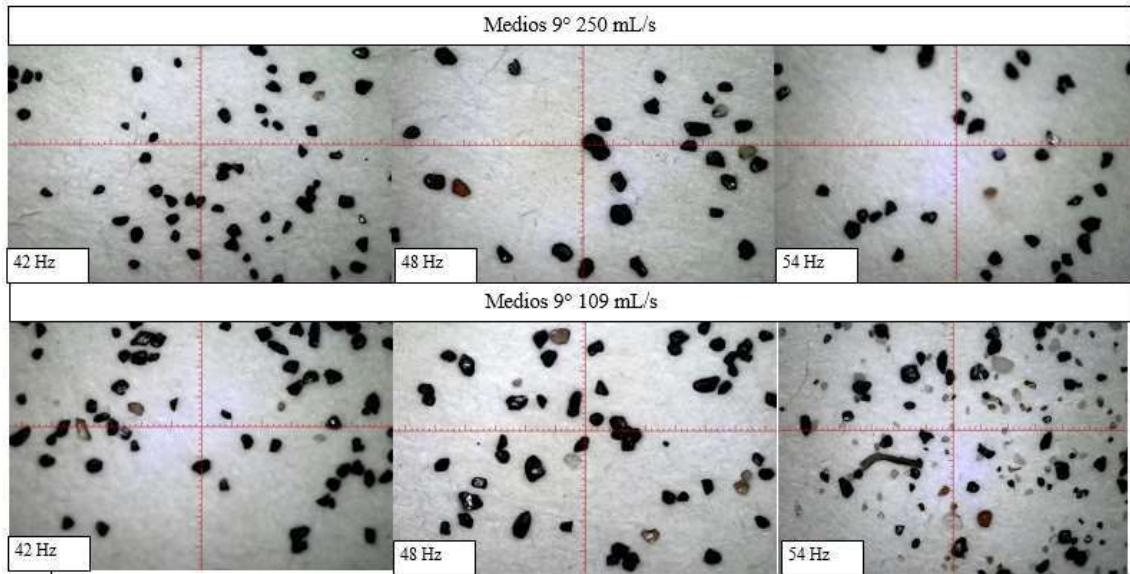
Concentrados 9° mesa Wilfley.



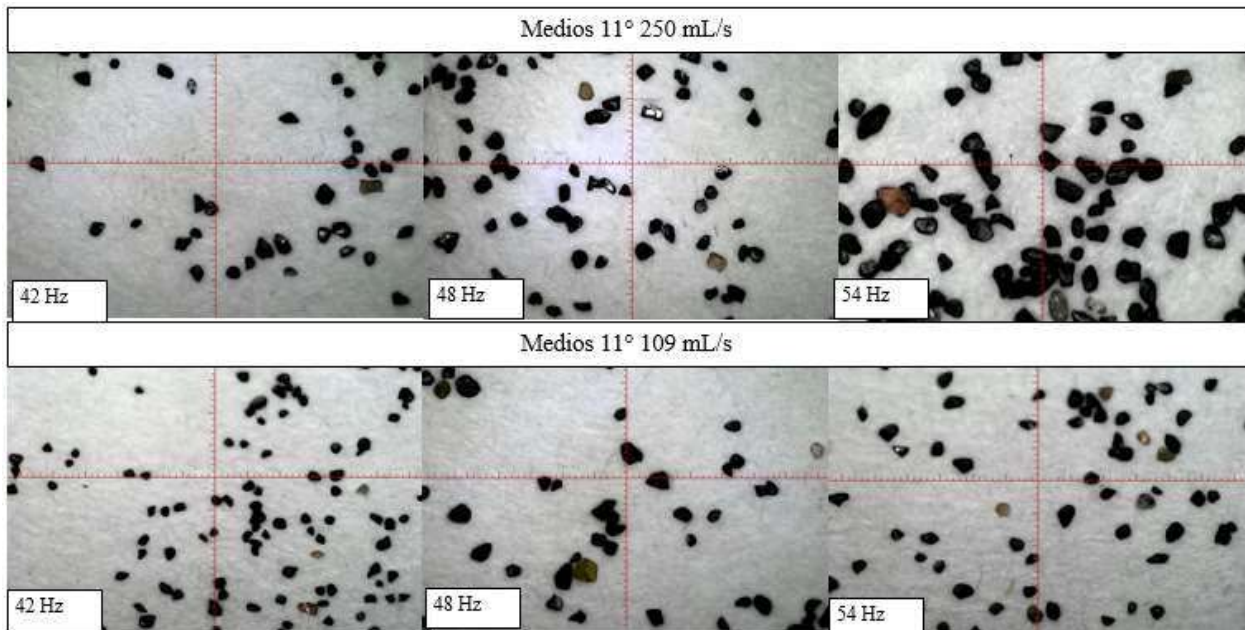
**Concentrados 11° mesa Wilfley.**



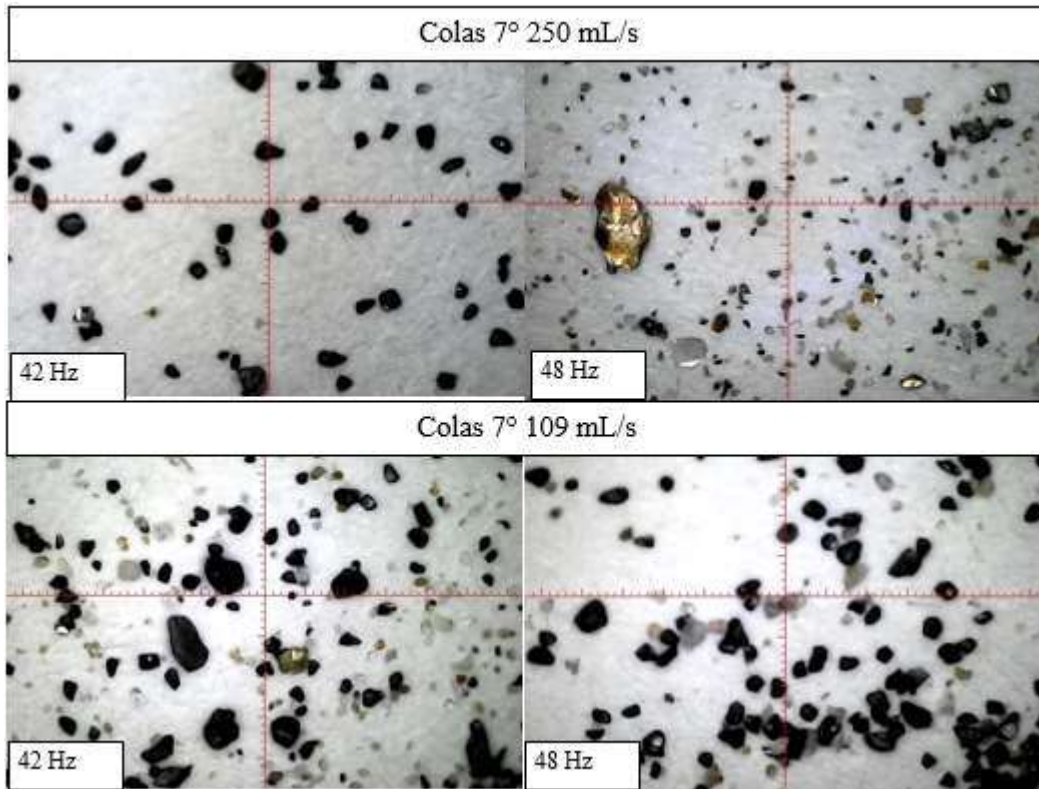
**Medios ángulo 7° mesa Wilfley.**



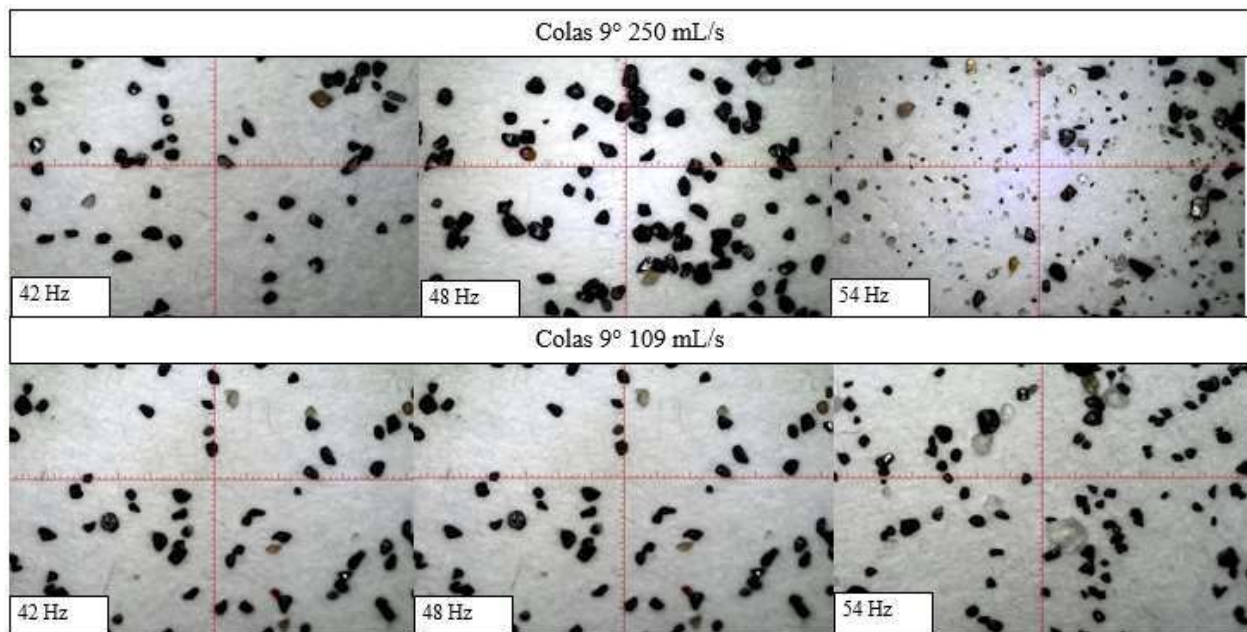
**Medios ángulo 9° mesa Wilfley.**



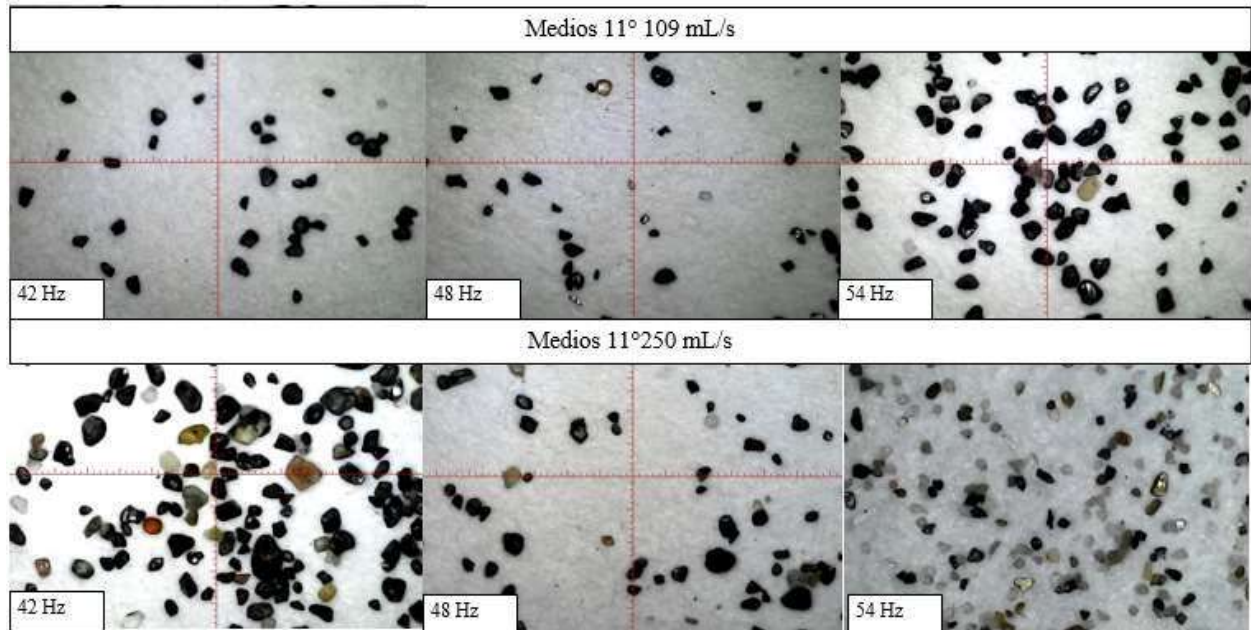
**Medios ángulo 11° mesa Wilfley.**



Colas ángulo 7° mesa wilfley.

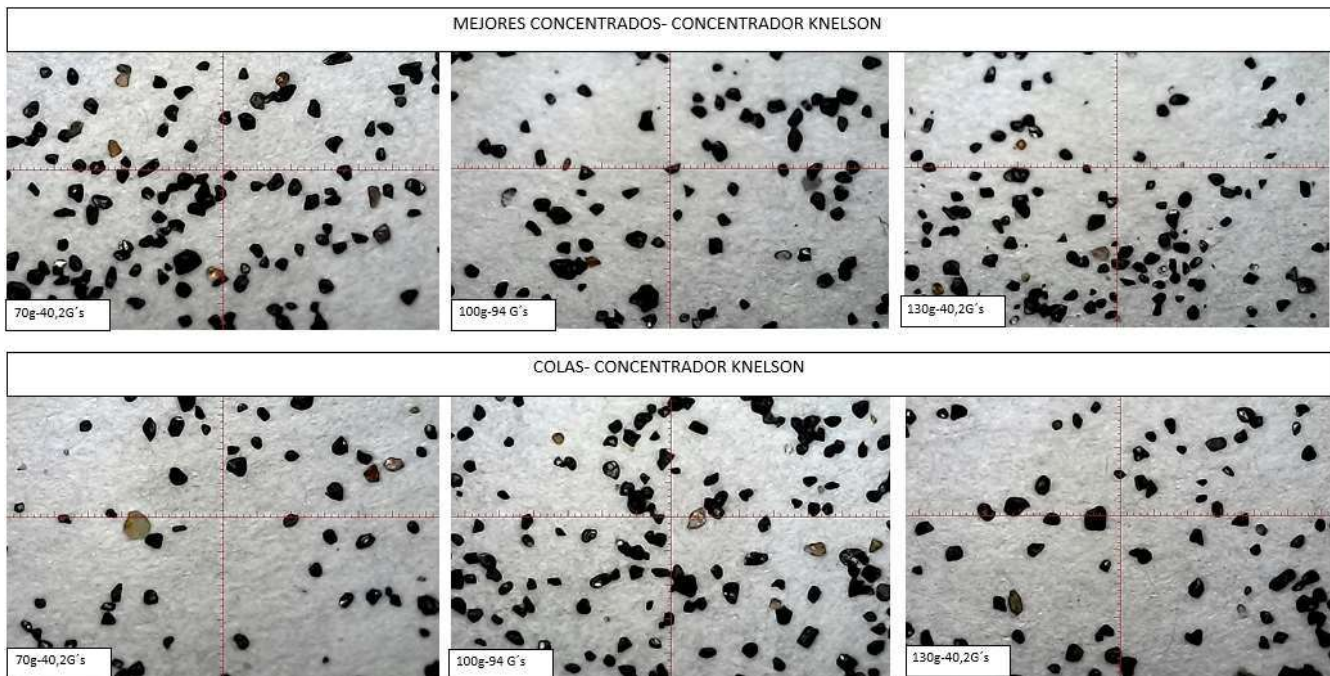


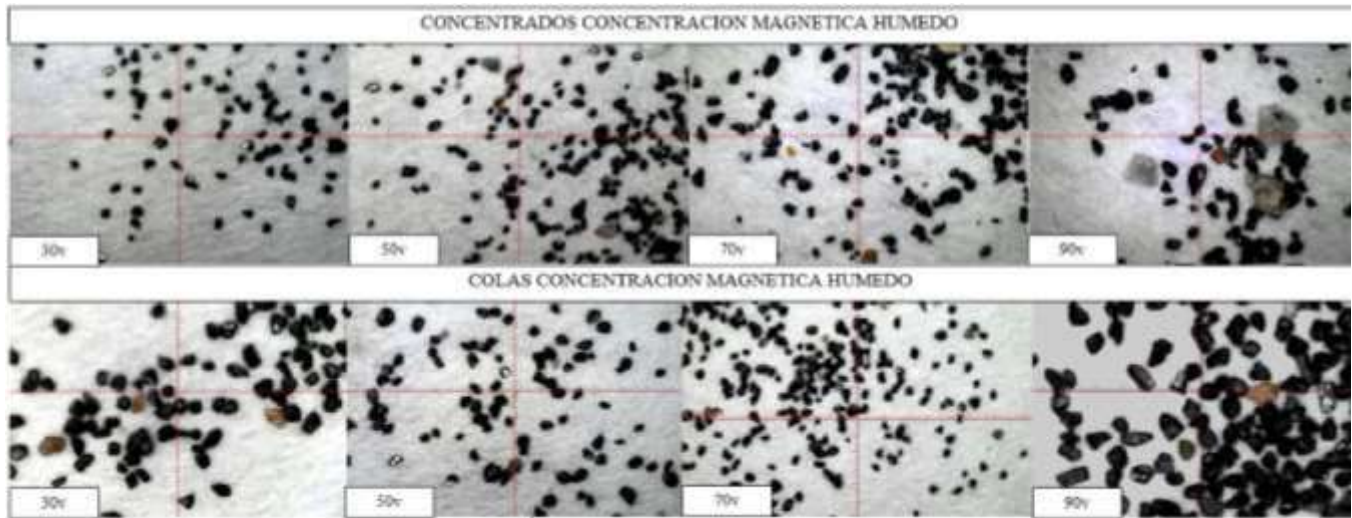
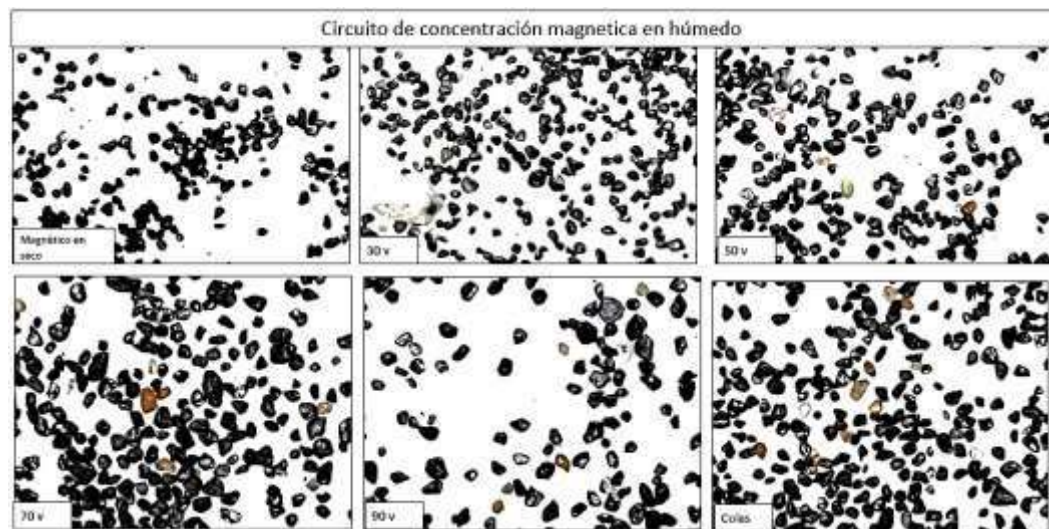
Colas ángulo 9° mesa Wilfley.



Colas ángulo 11° mesa Wilfley.

**Apéndice B. micrografías concentrador Knelson.**



**Apéndice C. micrografías concentración magnética en húmedo.****Concentrados y colas concentración magnética en húmedo.****Apéndice D. micrografías circuito de concentración.****Micrografía circuitos de concentración magnético en húmedo.**