



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

TESIS

**“CONCENTRACIÓN DE MENAS DE ILMENITA-MAGNETITA A
TRAVÉS DE UN SISTEMA HÍBRIDO MESA WILFLEY-CONCENTRADOR
MAGNÉTICO DE BAJA INTENSIDAD”**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO**

PRESENTA:

ERIKA ANAI DURÁN URRUTIA

DIRECTOR DE TESIS:

M. EN C. ANTONIO HUERTA CERDÁN



CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Profesor: Antonio Huerta Cerdán
VOCAL: Profesor: Juan Manuel De La Rosa Canales
SECRETARIO: Profesor: Samuel Kuperstein Apórtela
1er. SUPLENTE: Profesor: Juan Carlos Contreras Guzmán
2° SUPLENTE: Profesor: Andrés Vela Avitua

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: FACULTAD DE QUÍMICA, EDIFICIO D, CIRCUITO DE LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA, S/N, CIUDAD UNIVERSITARIA, COYOACÁN, MÉXICO 04510 D.F.

ASESOR DEL TEMA:

Antonio Huerta Cerdán

SUSTENTANTE:

Erika Anai Durán Urrutia

Índice

Resumen	1
Introducción	3
Hipótesis.....	4
Objetivos.....	4
Capítulo 1. Marco teórico.....	5
1.1 Concentración de minerales	6
1.1 Principios de la concentración gravimétrica.....	7
1.2 Mesas de sacudidas o mesas vibratorias	9
1.3 Separación magnética.....	11
1.4 Diseños de separadores magnéticos	13
1.5 Optimización de la recuperación de concentrados de mesa de sacudidas y separación magnética en seco usando la técnica de diseño experimental	15
1.6 Concentración de minerales de playa a través de separación gravimétrica.....	18
1.7 Concentración magnética de baja intensidad para magnetita en minerales de playa.	20
1.8 Justificación de fundamentación teórica	22
Capítulo 2. Desarrollo experimental	23
2.1 Descripción del mineral y caracterización del tamaño de partícula.....	24
2.2 Determinación de las condiciones iniciales de concentración de proceso en Mesa Wilfley.....	25
2.3 Construcción del dispositivo de separación magnética de baja intensidad.....	28
2.4 Determinación de sistema de magnetos permanentes en ductos de plástico.....	31
2.5 Acoplamiento de proceso híbrido Mesa Wilfley-concentrador magnético de baja intensidad.....	32
2.6 Pruebas de separación híbrida gravimétrica-magnética de baja intensidad y balances metalúrgicos	33
Capítulo 3. Resultados y análisis de resultados	38
3.1 Descripción del mineral y caracterización del tamaño de partícula.....	38
3.2 Determinación de las condiciones iniciales de concentración de proceso en Mesa Wilfley.....	41
3.3 Construcción del dispositivo de separación magnética de baja intensidad.....	43
3.4 Determinación de sistema de magnetos permanentes en ductos de plástico.....	45
3.5 Acoplamiento de proceso híbrido Mesa Wilfley-concentrador magnético de baja intensidad.....	47

3.6 Pruebas de separación híbrida gravimétrica-magnética de baja intensidad y balances metalúrgicos	48
3.6.1 Prueba 1. Separación gravimétrica-magnética de baja intensidad con uso de las condiciones iniciales, 3.0° de ángulo de inclinación, 7.5 L/min y 367 rpm.....	49
3.6.2 Prueba 2. Separación gravimétrica-magnética de baja intensidad con uso de las condiciones iniciales, 3.0° de ángulo de inclinación, 7.5 L/min y 397 rpm.....	56
3.6.3 Prueba 3. Separación gravimétrica-magnética de baja intensidad con uso de las condiciones iniciales, 3.0° de ángulo de inclinación, 7.5 L/min y 337 rpm.....	61
3.3.4. Prueba 4. Separación gravimétrica-magnética de baja intensidad con uso de las condiciones, 3.0° de ángulo de inclinación, 367 rpm y 12.5 L/min.	67
3.3.5. Prueba 5. Separación gravimétrica-magnética de baja intensidad con uso de las condiciones, 3.0° de ángulo de inclinación, 367 rpm y 2.5 L/min.....	71
3.3.6. Comparación de leyes de hierro y titanio entre las cargas alimentadas en las diferentes pruebas.....	74
Capítulo 4. Conclusiones	77
Bibliografía y mesografía	78
Anexo A.....	79
Anexo B.....	80
Balances metalúrgicos de proceso global de concentración híbrida y balances en zona de medios	80
Prueba 1. Condiciones de operación: 367 rpm, 7.5 l/min y 3.0 °.....	80
Prueba 2.....	82
Prueba 2. Condiciones de operación: 397 rpm, 7.5 l/min y 3.0 °.....	82
Prueba 3.....	84
Prueba 3. Condiciones de operación: 337 rpm, 7.5 l/min, 3.0 °.....	84
Prueba 4. Condiciones: 367 rpm, 12.5 l/min y 3.0°	87
Prueba 5. Condiciones: 367 rpm, 2.5 l/min y 3.0°	89

Resumen

El desarrollo y estudio de procesos de concentración mixtos o híbridos en el beneficio de minerales, que permitan la obtención de concentrados con leyes y recuperaciones altas para sus procesos posteriores, a través de sistemas acoplados con diferentes principios de concentración, como; concentración gravimétrica, separación magnética, Flotación de minerales, etc., es un amplio campo de investigación mayoritariamente inexplorado y de suma importancia, ya que a través de la explotación de los cuerpos mineros, los contenidos de los valores disminuyen y su concentración se complica, por lo que este tipo de sistemas que aprovechan las diferentes propiedades de los minerales puede resolver o mejorar estas complicaciones, en comparación con los métodos tradicionales.

En el presente trabajo se realizó el acoplamiento de dos diferentes procesos de concentración, para un mineral de playa con contenido de valores de Fe y Ti (mena de magnetita-ilmenita) proveniente del estado de Sonora. Este sistema comprendió del estudio de una concentración gravimétrica primaria vía Mesa Wilfley, acoplada a un proceso de separación magnética de baja intensidad, el cual se denominó sistema híbrido; Mesa Wilfley-Concentrador magnético de baja intensidad in situ, que tuvo como objetivo obtener concentrados de magnetita e ilmenita, siendo este último de mayor interés debido a los valores de titanio. La factibilidad de su implementación estuvo basada en la diferencia en densidades y susceptibilidades magnéticas que posee cada mineral, para su separación.

En esta tesis se realizó la construcción de un equipo de separación magnética de baja intensidad el cual fue adaptado a la geometría del equipo Mesa Wilfley (M.W.) determinándose las condiciones favorables de operación para dicho sistema, en las cuales se obtienen concentrados de calidad con leyes y recuperaciones mayores al cincuenta por ciento. La determinación del valor de estas condiciones, se realizó con la experimentación individual de las variables correspondientes a los dos procesos (concentración gravimétrica y magnética de baja intensidad) y de manera posterior su acoplamiento.

Las variables de operación estudiadas para la concentración primaria del mineral (M.W.) fueron: pulsaciones suministradas (rpm) flujo de agua (L/min), ángulo de inclinación del equipo (°) y alimentación de flujo másico de sólidos (Kg/min). Estas variables fueron medidas a través de un sistema modular de arduinos de reciente construcción, desarrollado en una tesis anterior. Las variables para la separación magnética de baja intensidad fueron: intensidad de campo magnético (Gauss), distancia entre magnetos y el ángulo de inclinación (°) de ductos en donde se lleva a cabo la separación.

Con el proceso híbrido; Mesa Wilfley-Concentrador magnético de baja intensidad, se obtuvieron concentrados de magnetita con contenido de hierro e ilmenita con contenido de titanio, con leyes 60 y 22 por ciento siendo la eficiencia global de 88 por ciento.

Introducción

La concentración y beneficio de minerales de playa a través de diferentes técnicas y equipos, es una práctica de obtención de concentrados con contenido en valores usualmente de titanio, hierro, zirconio y elementos de tierras raras.

Indudablemente, los procesos de separación de concentración gravimétrica continúan siendo un foco de atención como procesos de bajo costo y de gran aplicación en minerales con marcada diferencia de densidades y que poseen tamaños de liberación adecuados para ser empleados en una Mesa Wilfley, los cuales operan normalmente con tamaños de alimentación de 3 mm a $100\mu\text{m}$ ^[1]. En fechas recientes se han incorporado las técnicas de concentración gravimétrica, en arenas de playa que poseen minerales de magnetita e ilmenita en donde se desea la separación de las mismas a partir de sus propiedades físicas, siendo la principal, la diferencia en sus densidades.

En cuanto a las propiedades magnéticas de menas de magnetita e ilmenita, la diferencia en la susceptibilidad hace posible usualmente su concentración a través de procesos de separación magnética de baja y alta intensidad respectivamente, sin embargo, esto repercute en costos de operación y equipamiento altos, comparados con otros sistemas de concentración.

Es por lo tanto importante realizar estudios y aplicación de procesos alternos que permitan obtener leyes y recuperaciones económicamente rentables. En esta investigación se estudia el resultado de los productos concentrados obtenidos a partir del acoplamiento de procesos distintos que se fundamentan las diferencias de densidades y susceptibilidad magnética del mineral de magnetita e ilmenita, siendo conformado por un proceso primario de concentración gravimétrica con separadores magnéticos de baja intensidad, formando así un proceso híbrido denominado, sistema híbrido Mesa Wilfley-separación magnética de baja intensidad, encontrando las condiciones favorables de operación, que repercutan en ahorros económicos y energéticos para el ingeniero, además su factibilidad al ser un proceso in situ.

Hipótesis

A través de la implementación de un equipo híbrido Mesa Wilfley-concentrador magnético de baja intensidad, será posible concentrar de mejor manera a una convencional, menas complejas de ilmenita-magnetita.

Objetivos

- a) Construir el sistema de concentración magnética acoplado a la concentradora Mesa Wilfley, que permita realizar en forma secuencial la separación de mineral con diferencia de densidades y a su vez con propiedades de baja susceptibilidad magnética.
- b) Obtener el comportamiento de concentración en un sistema de concentración híbrido mesa Wilfley - separación magnética, a partir de las propiedades del mineral en estudio y de las características de los equipos empleados a nivel laboratorio y con base a éste, definir las condiciones de operación del mineral.
- c) Obtener concentrados de por lo menos 50% en ley y recuperación a través del circuito de concentración propuesto.

Capítulo 1. Marco teórico.

El marco teórico que se desarrolla a continuación, permite conocer los conceptos básicos necesarios para el entendimiento del desarrollo del sistema híbrido.

En primera instancia se da un breve resumen enlistando los diferentes procesos de concentración en la industria, los cuales se dividen en dos diferentes fundamentos para su separación, siendo estos físicos y fisicoquímicos.

Posteriormente a manera de breve introducción a la concentración gravimétrica, se menciona el fundamento por el cual es posible la concentración de minerales y algunos de los equipos que son empleados en la industria.

Ya que el desarrollo de esta tesis se centra sólo en los procesos de concentración gravimétrica en el equipo Mesa Wilfley y la concentración magnética de baja intensidad, se aborda a continuación información específica de cada proceso.

Para el entendimiento de las variables del proceso de concentración magnética de baja intensidad, se aborda un estudio realizado acerca del efecto que tiene cada variable en las leyes y recuperaciones que se obtienen en un mineral de tierra raras, el estudio se denomina, optimización de la recuperación de concentrados de mesa de sacudidas y separación magnética en seco usando la técnica de diseño experimental ^[5].

Posteriormente se aborda el tema de concentración de minerales de playa a través de separación gravimétrica y su concentración magnética

1.1 Concentración de minerales

La concentración de minerales tiene como objetivo el enriquecimiento de valores de una mena o mineral determinado, lográndose a través de procesos en los cuales pueda ser separada la materia estéril (sin valor) obteniendo productos concentrados con leyes y recuperaciones económicamente rentables.

Los procesos de concentración de minerales se fundamentan en las diferencias de las propiedades de las especies de interés, generando así concentrados con buenas calidades. Los métodos globales de concentración se dividen en:

Métodos con fundamento en diferencias de propiedades físicas o volumétricas de las especies minerales.

Los procesos que usan como fundamento de separación la diferencia en estas propiedades, son característicos de tener una fuerte dependencia con el tamaño de partícula y las propiedades diferenciales que hacen posible su separación, algunos de estos procesos son:

- Concentración gravimétrica: El principio de separación entre partículas se fundamenta en la diferencia de velocidades de sedimentación, a través de la diferencia de la densidad de los sólidos.
- Concentración magnética de alta o baja intensidad: Su principio es la diferencia de movimiento en un campo magnético, producida por el valor de la susceptibilidad magnética de las especies minerales.
- Concentración eléctrica: Se basa en la separación de las partículas a través de su diferencia en la conductividad eléctrica.

Métodos con fundamento en las propiedades fisicoquímicas de superficie

- Flotación espumante: Se fundamenta en la diferencia de las propiedades de superficie de las partículas de valores y estériles, siendo la hidrofobia e hidrofilia de estas.

- Flotación selectiva: Se fundamenta en la capacidad de la partícula de adsorber un polímero específico para dar lugar a la formación de un floculo.

A continuación se encuentra información teórica para los procesos de concentración gravimétrica en Mesa Wilfley y separación magnética de baja intensidad.

1.1 Principios de la concentración gravimétrica.

Los métodos de concentración gravimétrica se basan en la diferencia de densidades entre partículas minerales, son procesos con costos bajos ya que usualmente el reactivo principal usado es agua y la contaminación producida es menor en comparación con otros métodos en los cuales se necesita el uso de otros reactivos. La separación de las partículas ocurre a través del movimiento relativo de estas en respuesta a la fuerza de la gravedad y la fuerza producida por un fluido.

Para tener una separación efectiva es indispensable que exista una marcada diferencia de densidad entre el mineral de interés y los estériles, por lo que la factibilidad de usar este método depende del criterio de concentración, el cual se define como la diferencia de la densidad relativa del mineral más denso y la densidad relativa del mineral más ligero, lo anterior dividido por la diferencia de densidad relativa del mineral más ligero y la densidad del fluido, como se puede ver en la **Ecuación 1**.

$$CR = \frac{Dh - Df}{Dl - Df} \quad (1) \text{ [1]}.$$

Donde:

- Dh =densidad relativa del mineral pesado
- Dl =densidad relativa del mineral ligero
- Df =densidad relativa del medio fluido
- CR = criterio de concentración

En términos generales, cuando el cociente obtenido es mayor a 2.5 unidades, ya sean positivas o negativas, la separación gravimétrica es relativamente sencilla. A medida que el valor del cociente disminuye, la eficiencia de separación disminuye; a un valor menor de 1.25 la concentración por gravedad por lo general no es viable, ya que no es comercialmente rentable ^[1].

El movimiento de una partícula dentro de un fluido también depende del tamaño de las partículas, ya que las partículas grandes serán más afectadas en comparación con las pequeñas. La eficiencia de los procesos gravimétricos aumenta con el tamaño de partícula y las partículas deben de ser suficientemente gruesas para moverse de acuerdo con la ley de Newton. Las partículas pequeñas, responden relativamente mal a los métodos gravimétricos comerciales de alta capacidad, ya que su movimiento es dominado principalmente por la fricción superficial. Por lo anterior es necesario el estrecho control de tamaño de partícula en la alimentación a los métodos gravimétricos, para reducir el efecto del tamaño y hacer que el movimiento relativo de las partículas dependa de la densidad relativa ^[2].

En general los métodos de separación gravimétrica se agrupan en tres categorías principales:

- a. Separación por medios densos: Las partículas se sumergen en un baño que contiene un líquido de densidad relativa intermedia, de tal manera que provoca el flote de algunas partículas y el hundimiento de otras.
- b. Separación por corrientes verticales: Se aprovecha la diferencia entre las diferentes velocidades de sedimentación de las partículas pesadas y livianas.
- c. Separación en corrientes superficiales de agua o clasificación en lámina delgada: Mesas concentradoras y separadores de espiral.

1.2 Mesas de sacudidas o mesas vibratorias

Las mesas vibratorias son equipamientos de concentración que actúan a través de superficies con movimientos acelerados asimétricos, combinados muchas veces con el principio de escurrimiento laminar. Cuando una capa fluyente de agua corre sobre una superficie plana inclinada, el agua más próxima a dicha superficie se retarda por la fricción del agua absorbida y la velocidad aumenta en dirección a la superficie del agua. Si se introducen partículas del mineral en el interior de la capa, las partículas pequeñas no se moverán tan rápidamente como las partículas grandes, puesto que estarán sumergidas en la porción de la capa de movimiento más lento. Las partículas de alta densidad relativa se mueven más lentamente que las partículas más ligeras y en esa forma se produce un desplazamiento lateral del material [3].

La capa que fluye separa efectivamente las partículas gruesas ligeras de las partículas pequeñas pesadas. La separación por película o capa fluyente se utiliza con el concentrador de mesa de sacudidas y desde el punto de vista metalúrgico es la forma más eficiente de concentrador por gravedad.

Este concentrador consiste de una cubierta ligeramente inclinada sobre la cual la alimentación con casi 25 % en peso de sólidos, se introduce en la caja de alimentación y distribuye a lo largo de la mesa; el agua de lavado recorre a lo largo del lado de alimentación desde un canal. La mesa se desplaza longitudinalmente, por medio de un mecanismo terminal de pulsaciones, usando carrera lenta hacia adelante y un rápido retorno, lo que causa que las partículas minerales se arrastren lentamente a lo largo de la cubierta paralela a la dirección del movimiento. De este modo los minerales están sujetos a dos fuerzas; la debida al movimiento de la mesa (pulsaciones) y otra perpendicular a la anterior, debida a la capa fluyente de agua. El efecto neto es que las partículas se mueven diagonalmente a través de la cubierta desde el extremo de la alimentación y como el efecto de la capa depende del tamaño y la densidad de las partículas, estas formarán un abanico sobre la mesa, las partículas más pequeñas y más pesadas viajan más alto hacia la artesa de concentrado en el extremo distante, mientras que las partículas más ligeras y

grandes se lavan dentro de la artesa de las colas, las cuales corren a lo largo de la longitud de la mesa, siendo lo anterior representado en el esquema de la **Figura 1**.

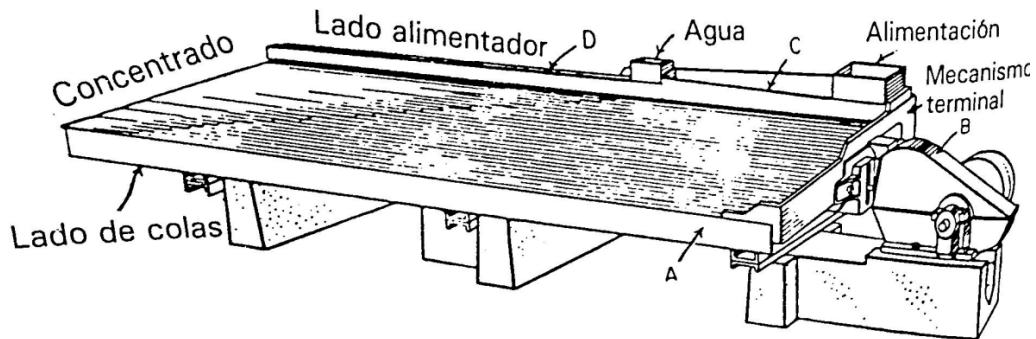


Figura 1. Mesa Wilfley. A: cubierta inclinada. B: Mecanismo vibratorio. C: Distribución de agua de lavado. D: Canal alimentador. [1]

La **Figura 2**, nos muestra un diagrama idealizado de la distribución de productos en la mesa. Frecuentemente se usa un separador ajustable para separar este producto en dos fracciones: un concentrado de alto grado y una fracción de medios.

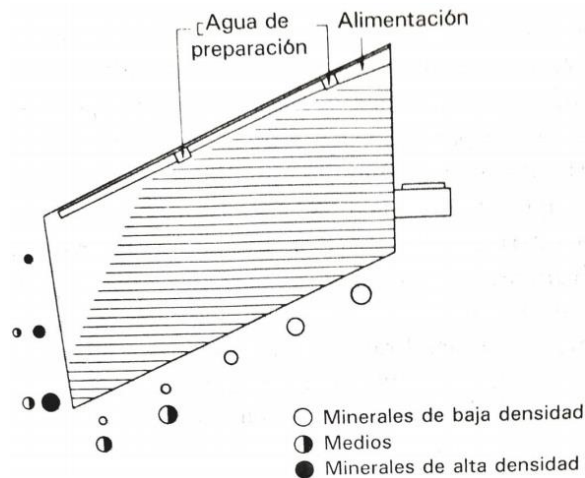


Figura 2. Esquema representativo de distribución de los productos de la mesa [1]

Muchos otros factores desempeñan una parte importante en las separaciones en mesa, incluyendo la forma de la partícula y el tipo de cubierta. El tamaño de partícula desempeña un papel muy importante en las separaciones en mesa: a medida que

aumenta la gama de tamaño en una alimentación de mesa, la eficiencia de la separación disminuye, además de que algunos de estos tamaños no se concentran eficientemente.

Puesto que la Mesa Wilfley separa efectivamente las partículas ligeras gruesas de las partículas densas finas, es práctica común clasificar la alimentación.

1.3 Separación magnética.

Los separadores magnéticos aprovechan la diferencia en las propiedades magnéticas entre los minerales componentes en la mena y se usan para separar los minerales valiosos de la ganga no magnética, por ejemplo, la magnetita del cuarzo, o los contaminantes magnéticos u otros minerales valiosos de los valores no magnéticos. Los materiales se clasifican en dos amplios grupos, según sea la naturaleza de atracción o repulsión a un magneto:

- **Diamagnéticos:** Se repelen a todo lo largo de las líneas de fuerza magnética hasta el punto donde la intensidad de campo ya es muy pequeña. Aquí las fuerzas que actúan son muy pequeñas y las sustancias diamagnéticas no se pueden concentrar magnéticamente.
- **Paramagnéticos:** Son atraídos a lo largo de las líneas de fuerza magnética hasta los puntos de mayor intensidad de campo. Los materiales paramagnéticos se pueden concentrar en los separadores magnéticos de alta intensidad. (FeTiO_3).
- **Ferromagnetismo:** Se considera un caso especial de paramagnetismo, que requiere de fuerzas muy altas. Los minerales ferromagnéticos tienen muy alta susceptibilidad magnética para las fuerzas magnéticas y retienen algún magnetismo cuando se alejan del campo (remanencia). Estos materiales se pueden concentrar en los separadores magnéticos de baja intensidad y el principal mineral ferromagnético, se separa de la magnetita (Fe_2O_3).

La unidad de medida de la densidad de flujo magnético o inducción magnética (número de líneas de fuerzas que pasan a través de la unidad de área del material) es el tesla. A pesar de que el sistema c.g.s. actualmente es obsoleto, la unidad más comúnmente usada es el Gauss (G), que equivale a 10^{-4} tesla.

La fuerza magnetizadora que induce las líneas de fuerzas a través de un material se llama intensidad de campo magnético y por conveniencia tiene la unidad oersted en el sistema (A/m) en unidades SI. 1 oersted = 1Gauss.

La capacidad de un magneto para elevar un mineral particular depende no solamente del valor de la intensidad del campo, sino también del gradiente de campo, es decir, la velocidad a la cual aumenta la intensidad de campo hacia la superficie magnética [4]

Por consiguiente, se puede mostrar en la **Ecuación 2** que:

$$F \propto H \frac{dH}{dl} \quad (2)$$

- F =Fuerza que actúa sobre la partícula.
- H =Intensidad de campo.
- dh/dl = Gradiente de campo.

Así para generar una fuerza de elevación dada, existe un número infinito de combinaciones de campo y gradiente que darán el mismo efecto. Por consiguiente, la producción de un alto gradiente de campo, así como una alta densidad es un aspecto importante en el diseño del separador.

1.4 Diseños de separadores magnéticos

Ciertos elementos de diseño se incorporan en todos los separadores magnéticos, ya sean de alta o baja intensidad, realizando su operación en seco o en húmedo. El primer requisito es el suministro de un campo de alta intensidad en el cual haya una resistencia muy alta en el gradiente de campo, en la **Figura 3** se muestra un esquema de la descripción siguiente.

- Campo de flujo uniforme: Las partículas magnéticas se orientan a sí mismas, pero no se mueven a lo largo de las líneas de flujo.
- Campo magnético convergente: Se genera al tener un polo en forma V sobre un polo plano. El ahusamiento del polo superior concentra el flujo magnético total distribuido sobre un área mayor, por consiguiente, hay un gradiente de campo muy alto a través del claro en virtud de los diferentes niveles de intensidad.

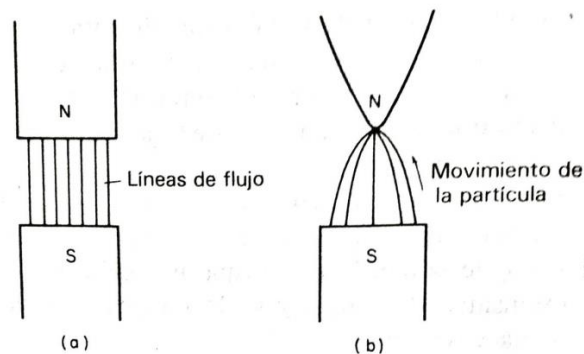


Figura 3. Diferentes tipos de campo de flujo magnético. a) Campo de flujo uniforme, b) Campo convergente. [1]

Los separadores magnéticos comerciales son máquinas de proceso continuo y la separación se lleva a cabo en una corriente móvil de partículas que pasan hacia el interior y a través del campo magnético. El control estrecho de la velocidad de paso de las partículas a través del campo es indispensable y descarta la caída libre como un medio de alimentación.

La introducción de las partículas altamente susceptibles dentro del campo magnético concentra las líneas de fuerza de manera que estas lo atraviesan.

Puesto que las líneas de flujo convergen en las partículas, se produce un alto gradiente de campo que hace que las mismas partículas se comporten como magnetos, atrayéndose de ese modo unas a otras. La floculación o aglomeración de las partículas puede ocurrir si estas son, pequeñas y altamente susceptibles y si el campo es intenso. Este aspecto es de gran importancia ya que estos flóculos magnéticos pueden arrastrar ganga y tender puentes entre los polos magnéticos reduciendo así la eficiencia de la separación. Muchas veces la floculación disminuye pasando el material a través de diversos campos magnéticos sucesivos, normalmente están dispuestos con inversión sucesiva de la polaridad. Esto hace que la partícula gire completamente 180° ; cada inversión tiene a liberar las partículas de ganga que arrastra.

1.5 Optimización de la recuperación de concentrados de mesa de sacudidas y separación magnética en seco usando la técnica de diseño experimental

El uso de un equipo Mesa Wilfley, consta del control de las diferentes variables de operación. En un estudio de optimización en el uso de mesas vibratorias (Rabie Sayed, 2009), realizó un análisis computacional acerca de los valores de las variables de; ángulo de inclinación, alimentación de sólidos, flujo de agua y distancia del mineral recorrida sobre la mesa, donde se obtuvieron los siguientes resultados mostrados en las **Figuras 4 y 5**.

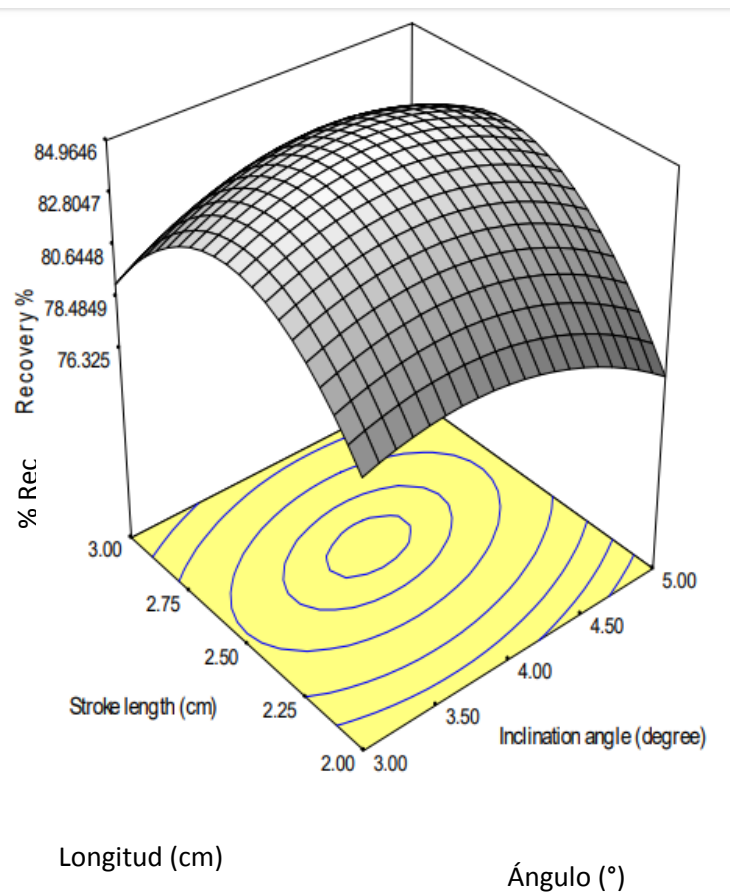


Figura 4. Respuesta en la superficie de mesa de sacudidas, del % recuperación del concentrado de caserita en función de las variables de operación. Dejando constantes, flujo de agua (20 L/min) y flujo de sólidos (250 g/min) ^[5].

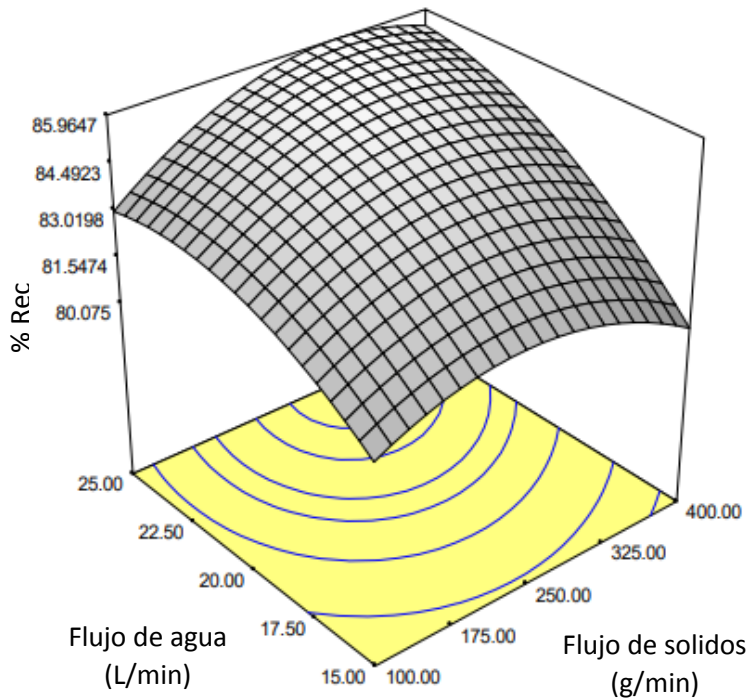


Figura 5. Respuesta en la superficie de mesa de sacudidas, del % recuperación del concentrado de caserita en función de las variables de operación. Dejando constantes, ángulo de inclinación (4°) y longitud (2.5 cm) [5].

De manera general los resultados del estudio arrojaron que, al elevar el ángulo de inclinación del equipo, incrementa la distancia recorrida del mineral y el porcentaje de recuperación del concentrado de casiterita. Lo anterior ocurre hasta llegar a un valor de 3.95° y 84.97 % de recuperación, a valores de ángulo mayores, el % de recuperación descende (ver **Figura 4**). A través de la **Figura 5**, se percibe que, el aumento en el flujo de agua y flujo de sólidos ocasiona un máximo valor de % Recuperación del 86 %, con una velocidad de alimentación de 311.15 g/min y 24.7 L/min de flujo de agua. Al incrementar estos valores se tiene de manera análoga una disminución en el % de recuperación de los valores.

Este estudio realizado, deja visible un comportamiento del equipo en general, ya que, al aumentar el ángulo de inclinación, los valores con mayor densidad van concentrándose en mayor medida y teniendo recuperaciones mayores, hasta llegar a un punto en el que esta inclinación ya no es favorable. Algo similar ocurre con las variables de flujo de alimentación de sólidos y agua, teniéndose así que los

parámetros de operación llegan a las condiciones óptimas o mejores condiciones y con base a estas los concentrados son alterados.

1.6 Concentración de minerales de playa a través de separación gravimétrica

Los procesos industriales de separación gravimétrica en minerales de playa hacen uso de diferentes equipos de concentración. En un estudio histórico (Walklate y Fourie, 2005) realizado a los procesos de separación gravimétrica llevados a cabo en la compañía Richards Bay Minerals (RBM) en el sur de África, se mencionan los primeros circuitos de concentración usados al comienzo de su operación en el año de 1977, donde se procesaban minerales de playa con contenidos en ilmenita, rutilo y zircón. El circuito consistía de la extracción por dragado, cribado, limpias, relimpias y el uso de conos Reichert, como se muestra en la **Figura 6**.

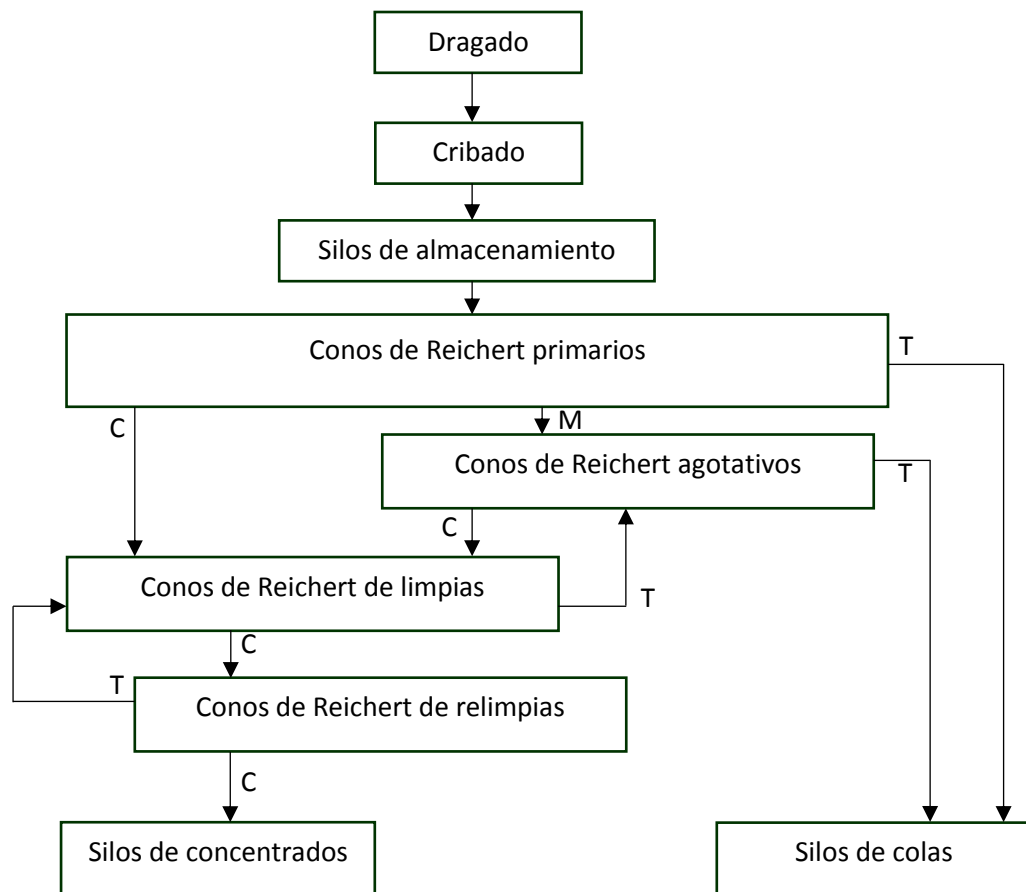


Figura 6. Diagrama representativo del circuito de concentración gravimétrica usado en los inicios de la empresa RBM ^[7]

El concentrado se llevó a un proceso de separación magnética de alta intensidad para la recuperación de ilmenita y un sucesivo proceso de fundición. La fracción no magnética pasó a un circuito formado por separadores gravimétricos en espiral y mesas de sacudidas Wilfley para uso de limpias. Lo anterior se representa en la **Figura 7**.

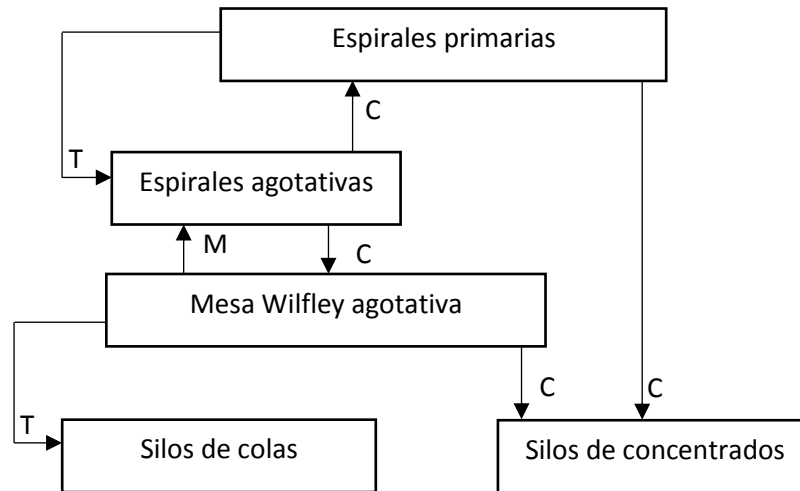


Figura 7. Esquema representativo del circuito de concentración para la fracción no magnética ^[7]

Para el desarrollo de futuros circuitos de concentración esta compañía, se esfuerza constantemente en agregar calidad a sus diferentes procesos, por lo que unidades de separación por gravedad han sido probadas en sus instalaciones piloto, siendo estas; un separador en espiral Carpco, un separador Floatex y un Jig Kelsey. Siendo considerado por los autores que estos equipos junto con el uso de la mesa de sacudidas Wilfley, representan las opciones básicas viables de los procesos de concentración gravimétrica a nivel industrial. En la **Tabla 1** se presentan las recuperaciones de los diferentes valores obtenidos, haciendo un comparativo entre estos tres equipos.

Tabla 1. Recuperaciones comparativas entre equipos para los diferentes valores.^[7]

Equipo	% Rec. ilmenita	% Rec. rutilio	% Rec. zircon	% Rec. cuarzo
W.W Espiral	84.5	72.3	81.4	12.3
Floatex	83.7	69.7	87.8	5.3
Jig Kelsey	98.8	92.0	99.6	3.6

De manera general se observa que se obtienen mayores recuperaciones haciendo uso del concentrador Jig Kelsey y las menores recuperaciones con el uso de Espirales con agua de lavado.

Todo el estudio citado es muy importante ya que comprende equipos que son usados en la actualidad en los procesos de concentración en arenas de playa, ofreciendo una comparativa entre estos y el dispositivo (M.W.) empleado en este proyecto.

1.7 Concentración magnética de baja intensidad para magnetita en minerales de playa.

La magnetita es el mineral con mayor susceptibilidad magnética, por lo que el aprovechamiento de esta propiedad a través del uso de procesos de separación magnética de baja intensidad para la obtención de sus concentrados, es una práctica usual a nivel industrial.

Los minerales de magnetita se encuentran de manera abundante en la mayoría de los países. Debido al alto contenido de hierro y la facilidad con la que se concentra, su tratamiento forma parte de uno de los campos más importantes de separación magnética.

La magnetita posee una gravedad específica de 5.0 – 5.1, por lo que su separación de la ganga por métodos gravimétricos es viable cuando esta no tiene diversas impurezas. Las gravedades específicas de los estériles asociados a los minerales de ilmenita que se presentan en playa, hacen que su separación gravimétrica sea

menos eficiente, por lo que se suelen incorporar los procesos de separación magnética de baja intensidad.

Los concentrados de hierro son tratados posteriormente en procesos de fundición, por lo que es importante que estos tengan un alto contenido de hierro y un mínimo de al menos 20 % - 25 % Fe, para que su procesamiento sea rentable^[8].

Al hacer uso de un equipo de separación magnética se obtienen dos diferentes productos que corresponden a los concentrados (magnético) y colas (no magnético). La eficiencia de los procesos de separación magnética de menas de magnetita e ilmenita, no es factible a ser evaluada a través de los contenidos de hierro en los concentrados, ya que el elemento diferencial entre estos es el titanio [8]

Los procesos de concentración estadounidense tienden al uso de separadores magnéticos en seco, obteniendo leyes y recuperaciones razonables. En Suecia se acostumbra el uso de separadores magnéticos en húmedo, recurriendo a la fabricación de briquetas para transformar el concentrado en un producto adecuado para el alto horno.

Cuando se tiene presencia de Ti (ilmenita) en los minerales de playa de hierro, se requiere su eliminación del concentrado, ya que el contenido de este elemento no es deseable para el proceso en alto horno, ya que tiene tendencia a formar acumulaciones y ante todo el valor del titano es mayor que el Fe. Su separación de los concentrados de hierro se realiza a expensas de una pérdida grave de este elemento en la corriente de colas; sin embargo, la obtención de concentrados de buenas calidades en Ti es de importancia para su aprovechamiento en la obtención del metal a través de diferentes procesos.

Los resultados de las pruebas realizadas para eliminar la ilmenita de la magnetita se encuentran en la **Tabla 2**, en la que los minerales se presentan como partículas libres, formando la materia prima para la separación:

Tabla 2. Separación de minerales de playa con contenido de Fe y Ti por separación magnética de baja intensidad.

Localidad	Producto	% Ley Fe	% Ley Ti
Cumberland R.I.	Arena cruda	32.4	6.25
	Concentrado	63.4	2.36
	Colas	11.7	8.76
Moise, Quebec	Arena cruda	58.25	8.46
	Concentrado	68.45	2.13
	Colas	33.3	11.16
Long island, N.Y.	Arena cruda	48.49	6.78
	Concentrado	69.77	---
	Colas	36.22	11.4

1.8 Justificación de fundamentación teórica

Los antecedentes bibliográficos establecen el funcionamiento de los equipos involucrados en el proyecto de sistema híbrido (Mesa Wilfley) por lo que es de gran interés comprender las variables de operación y el fundamento de las fuerzas involucradas en el proceso, así como de las propiedades de los minerales a concentrar. Todo ello con la finalidad de partir de bases sólidas en el trabajo experimental requerido. Así mismo se tienen descritos algunos de los equipos más relevantes que se usan en la industria para procesos de separación magnética de baja intensidad. Lo anterior en conjunto con el diseño de separadores magnéticos brinda un soporte importante para el desarrollo del equipo que conforma la parte de concentración magnética en el proceso del sistema híbrido. La revisión en la literatura de trabajos relacionados con estos equipos es otro punto importante a considerar, ya que se pueden establecer comparaciones entre estos y el trabajo desarrollado en este documento. De manera final todo lo anterior también es determinante para la realización de este proyecto.

Capítulo 2. Desarrollo experimental

Se desarrolló un sistema híbrido de separación gravimétrica-magnética, para el procesamiento de un mineral de playa que está compuesto por ilmenita y magnetita con contenidos de Fe y Ti, el cual consistió en una concentración gravimétrica primaria y el acoplamiento de un dispositivo de separación magnética de baja intensidad. Todas las etapas involucradas en dicho procesos se representan por medio de un diagrama de flujo mostrado en la **Figura 8**.

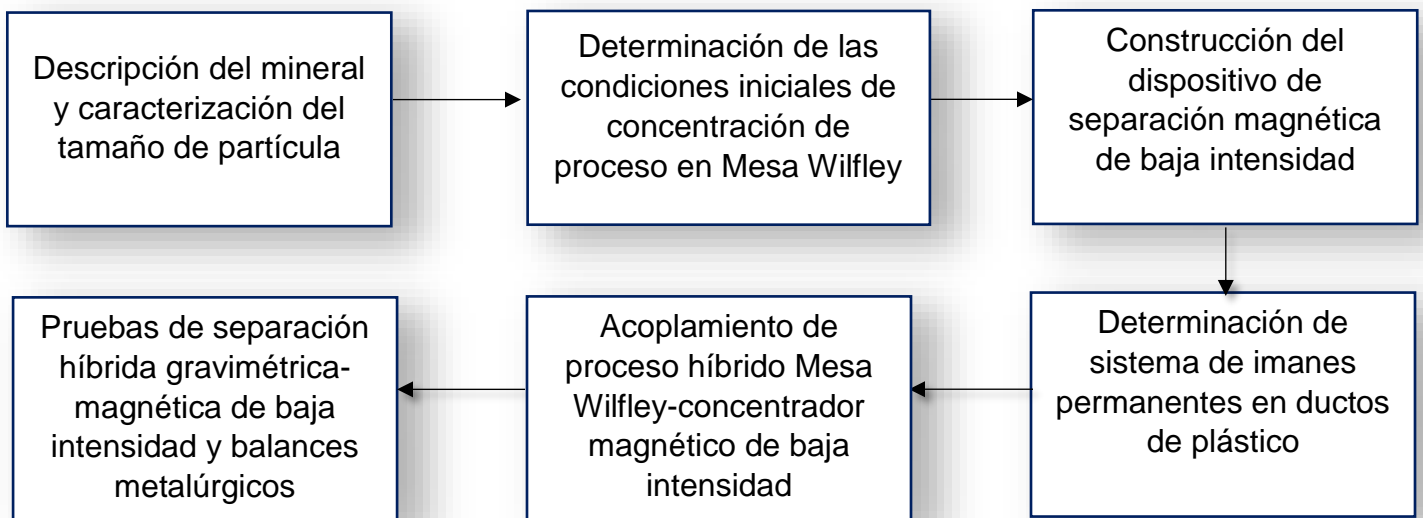


Figura 8. Diagrama de flujo del desarrollo experimental.

En el esquema anterior se muestran las diferentes etapas del desarrollo experimental llevadas a cabo en la realización de éste proyecto, las cuales se enlistan y describen a continuación.

2.1 Descripción del mineral y caracterización del tamaño de partícula

El mineral con el que se trabajó, pertenece a depósitos de dunas del estado de Sonora, está compuesto de minerales de ilmenita, magnetita, y arena sílice, como se verá de manera posterior, siendo un mineral de playa no es procesado para su conminución de tamaño, por lo que sólo se realizó una caracterización del tamaño de partícula.

La prueba realizada para determinar el tamaño de partícula del mineral de ilmenita-magnetita-sílice, consistió de un sistema de cuarteo-coneo con el uso del partidor de muestras Jones, en el que se obtuvo una muestra representativa de 99.5 g, seguido de un análisis granulométrico por el método de cribado en seco, con selección de tamices bajo la norma ASTM E-11 y con progresión de raíz cuadrada de 2, abarcando un tamaño de partícula desde los 380 a los 45 μm , con tiempo de cribado de 20 minutos en un sistema Ro-tap. Posteriormente, se registraron los pesos obtenidos en cada malla o tamiz, seguida de la representación gráfica de % retenido contra el tamaño de partícula y la interpretación de la misma.

2.2 Determinación de las condiciones iniciales de concentración de proceso en Mesa Wilfley

Con el objetivo de conocer las condiciones bajo las cuales se concentra el mineral de ilmenita-magnetita, a través de un proceso primario gravimétrico en el equipo denominado Mesa Wilfley, se realizaron un conjunto de pruebas cualitativas que consistieron en el procesamiento de una muestra del mineral de 7 kg, donde se establecieron diferentes valores sobre las principales variables que controlan el proceso, las cuales son; ángulo de inclinación de la mesa, flujo de agua y pulsaciones.

Cada una de éstas variables modifica el proceso de concentración a mayor o menor medida, por lo que a través de estas variaciones, se busca la mejor separación de los minerales sobre la superficie, obteniendo tres concentrados correspondientes a magnetita, ilmenita y arena sílice. Los rangos de los valores usados en las diferentes variables fueron propuestos como resultado de pruebas realizadas en trabajos en anteriores. Esto derivó en un diseño de experimentos (ver **Tabla 3**), para obtener las condiciones iniciales de concentración. Cada prueba tuvo una duración de 4 minutos, ya que a este tiempo se observó una distribución estable del mineral sobre la superficie de la mesa. Dichas variables fueron medidas y registradas en tiempo real a través de un sistema modular Arduino.

Tabla 3. Diseño de experimentos de concentración de proceso en Mesa Wilfley.

Número de prueba	Ángulo de inclinación (°)	Flujo de agua (L / min)	Pulsaciones (rpm)
1	2.0	2.5	337
2	2.5	2.5	337
3	3.0	2.5	337
4	3.5	2.5	337
5	4.0	2.5	337
6	2.0	7.5	337
7	2.5	7.5	337
8	3.0	7.5	337
9	3.5	7.5	337
10	4.0	7.5	337
11	2.0	12.5	337
12	2.5	12.5	337
13	3.0	12.5	337
14	3.5	12.5	337
15	4.0	12.5	337
16	2.0	2.5	367
17	2.5	2.5	367
18	3.0	2.5	367
19	3.5	2.5	367
20	4.0	2.5	367
21	2.0	7.5	367
22	2.5	7.5	367
23	3.0	7.5	367
24	3.5	7.5	367
25	4.0	7.5	367

26	2.0	12.5	367
27	2.5	12.5	367
28	3.0	12.5	367
29	3.5	12.5	367
30	4.0	12.5	367
31	2.0	2.5	397
32	2.5	2.5	397
33	3.0	2.5	397
34	3.5	2.5	397
35	4.0	2.5	397
36	2.0	7.5	397
37	2.5	7.5	397
38	3.0	7.5	397
39	3.5	7.5	397
40	4.0	7.5	397
41	2.0	12.5	397
42	2.5	12.5	397
43	3.0	12.5	397
44	3.5	12.5	397
45	4.0	12.5	397

2.3 Construcción del dispositivo de separación magnética de baja intensidad

El proceso primario de concentración gravimétrica a través de una Mesa Wilfley da como resultado tres corrientes correspondientes a concentrados, medios y colas; en donde el concentrado está constituido casi es su totalidad de mineral con alta susceptibilidad magnética (magnetita), los medios de mineral con baja susceptibilidad magnética (ilmenita) y las colas del proceso conformadas en su mayoría por arena sílice. Con el objetivo de separar la ilmenita de las partículas sobrantes de magnetita que no fueron separadas en la primera etapa de concentración, se buscó el ingreso de esta corriente al dispositivo de separación magnética de baja intensidad. El dispositivo de separación magnética fue colocado a partir de las longitudes de derrame de cada una de las corrientes de los productos, es decir; en la zona donde se tiene la caída de corriente de los medios, como se muestra en la **Figura 9**.

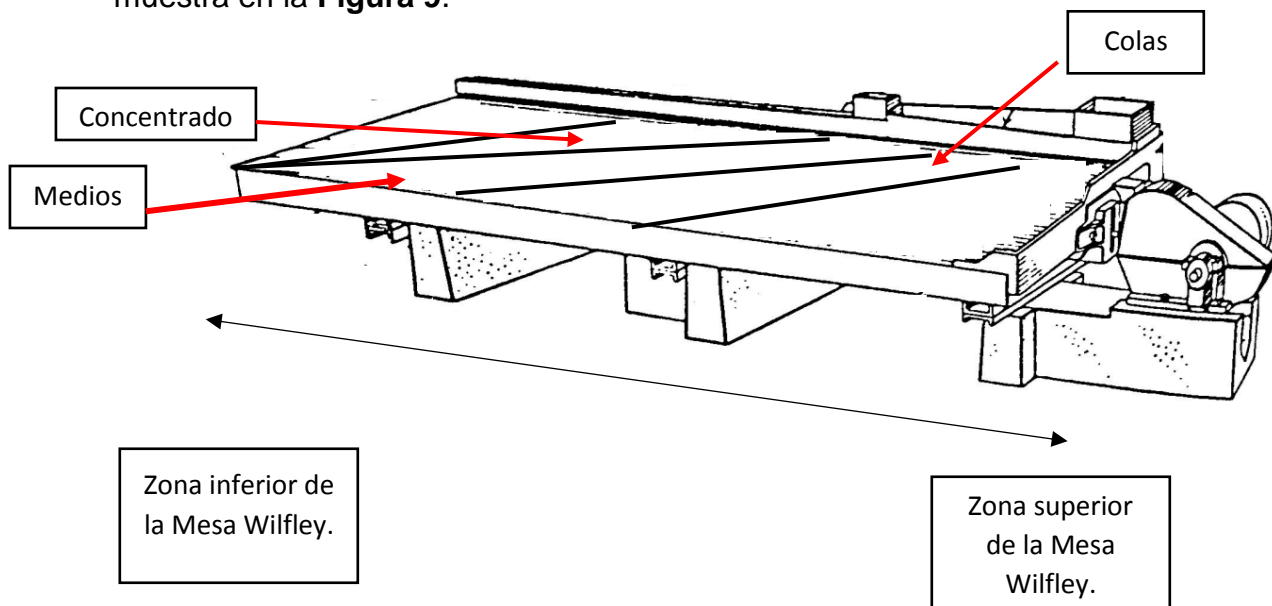


Figura 9. Zonas descendentes de los productos de concentración gravimétrica primaria en Mesa Wilfley

Se realizó la construcción del dispositivo de separación magnética de baja intensidad en dos partes; la primera consistió en la zona de recepción del concentrado proveniente del equipo Mesa Wilfley, para esta zona se posicionaron 7 campanas continuas de reducción de PVC con 5 cm de diámetro superior y 3.75 cm en el diámetro inferior, las cuales fueron montadas sobre una base de acrílico, posteriormente para el transporte de la carga desde la recepción del mineral a la zona de los ductos de separación magnética de baja intensidad a cada campana de reducción se le colocó un codo de ángulo de 90° de un diámetro de 3.75 cm, estos codos posteriormente fueron conectados de manera individual a una reducción de 3.75 cm a 2.5 cm. La siguiente parte consistió de la construcción de la zona en donde se llevó a cabo la separación magnética de baja intensidad a través de la conexión de 7 ductos de plástico transparentes de 2.5 cm de diámetro y 1 m de longitud, esto con la finalidad de tener visualización del proceso, en estos ductos de manera posterior se les colocó indivisamente a lo largo de estos un sistema de imanes permanentes de campo magnético de 580 G, como se explicará en el apartado posterior. El dispositivo en general tuvo una altura de 14 cm y una longitud total de 35 cm.

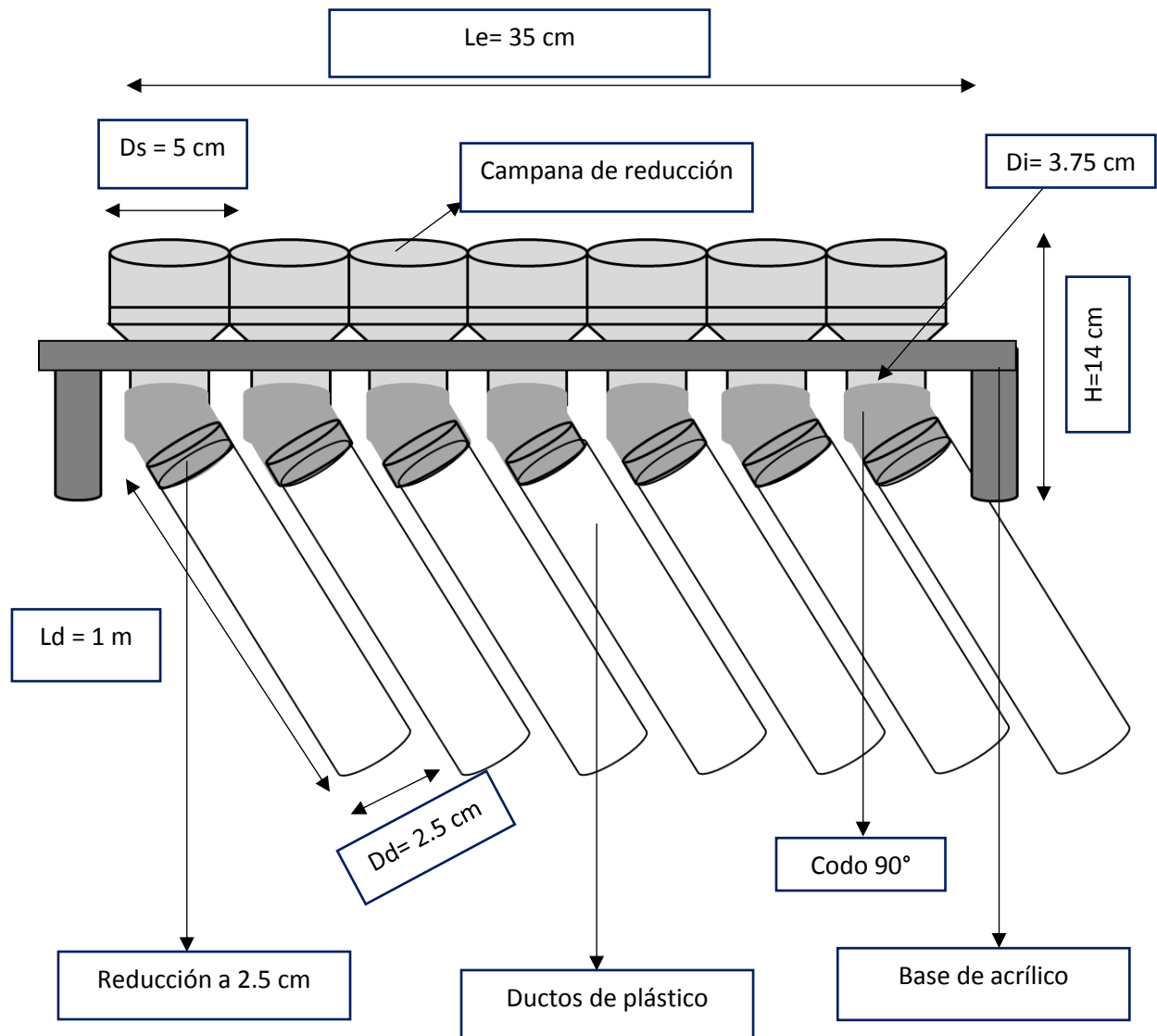


Figura 10. Esquema de dispositivo de separación magnética de baja intensidad

- L_e =Longitud del equipo
- L_d =Longitud de ductos de plástico
- D_s =Diámetro superior de campana de reducción
- D_i =Diámetro inferior de campana de reducción
- D_d =Diámetro de ductos de plástico
- H = Altura del dispositivo sin ductos de plástico

2.4 Determinación de sistema de magnetos permanentes en ductos de plástico

Se realizaron diferentes pruebas cualitativas en la zona de los ductos en donde se realiza el proceso de separación magnética de baja intensidad, colocando magnetos de ferrita de forma semicircular con un diámetro interno de 2.5 cm, con intensidad magnética de 580 G. Estas pruebas se realizaron con la introducción manual de flujo de pulpa proveniente a la corriente de medios de concentración gravimétrica en Mesa Wilfley, a través de un embudo a solo uno de los ductos de plástico con un ángulo de inclinación de aproximadamente 45° , ya que es el ángulo en el que los ductos se posicionan al acoplar el dispositivo a la Mesa Wilfley. La distancia entre imanes, forma de estos y su posicionamiento a lo largo del ducto de plástico, fueron variados hasta encontrar las mejores combinaciones de estas variables. Lo anterior se representa en el siguiente esquema de la **Figura 11**.

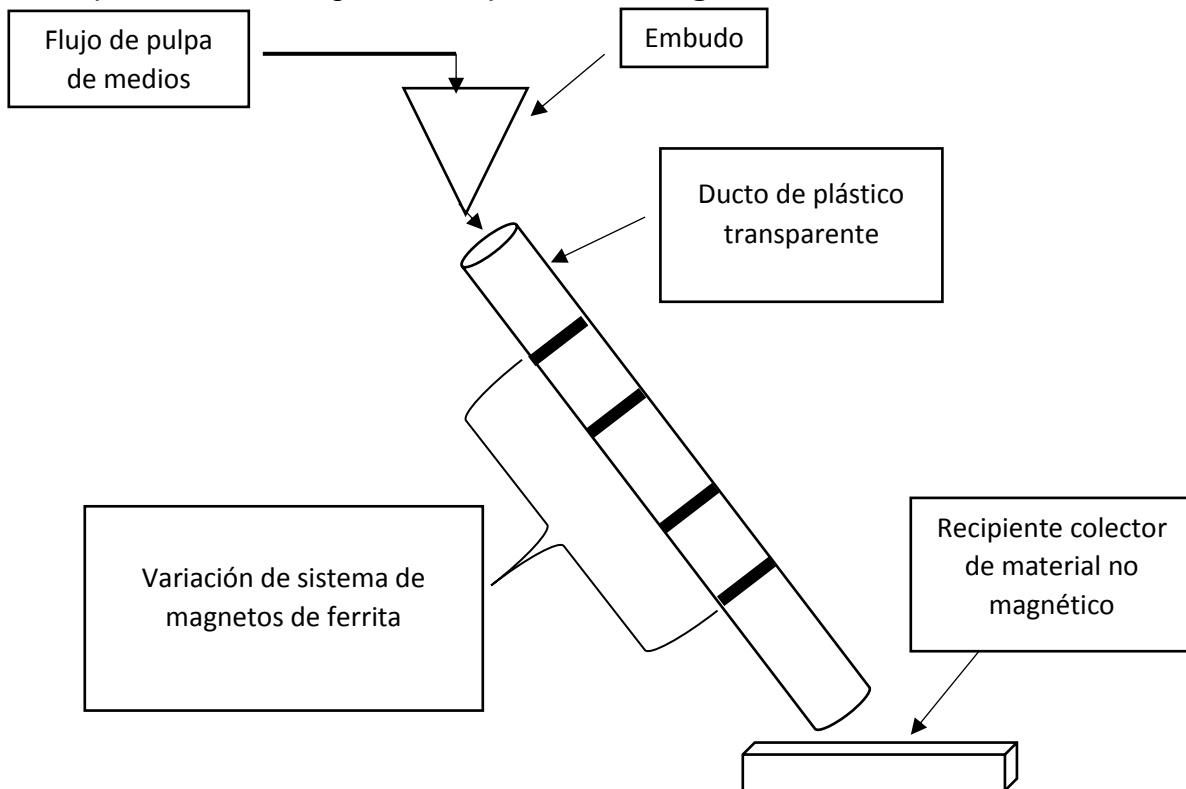


Figura 11. Representación esquemática de pruebas cualitativas con ducto y magnetos.

2.5 Acoplamiento de proceso híbrido Mesa Wilfley-concentrador magnético de baja intensidad

Al haber concluido los pasos anteriores, se realizó el acoplamiento de ambos procesos, el cual consistió, en una primera prueba de concentración gravimétrica-magnética usando las siguientes condiciones; ángulo de inclinación 3.0 °, flujo de agua 7.5 L/min y pulsaciones de 367 rpm, siendo estas las condiciones iniciales encontradas en pasos anteriores, el dispositivo construido de separación magnética de baja intensidad se posicionó en el equipo Mesa Wilfley y se inició el tiempo de proceso de esta prueba, el cual correspondió a 2 minutos, en este intervalo de tiempo se corrigieron los últimos detalles correspondientes al posicionamiento de ambos equipos para asegurar el ingreso de la carga al dispositivo y la altura de este, fueran acorde a lo establecido.

2.6 Pruebas de separación híbrida gravimétrica-magnética de baja intensidad y balances metalúrgicos

En esta etapa se realizaron pruebas de separación híbrida gravimétrica-magnética, variando las condiciones de concentración primaria en Mesa Wilfley. Se realizaron pruebas a partir de las mejores condiciones determinadas en pre concentración en este equipo, como se puede ver en la **Tabla 4**, en la etapa de determinación de condiciones iniciales de concentración de proceso en Mesa Wilfley, es decir; las condiciones a las cuales el concentrador magnético de baja intensidad fue acoplado. A partir de estas condiciones se realizó un barrido superior e inferior de las variables, haciendo variaciones únicamente en el valor del flujo de agua (± 5 unidades) y pulsaciones (± 30 unidades) y cambiando el valor de una variable por cada prueba, realizando así un total de 5 pruebas. Esto con el objetivo de estudiar cómo afecta el cambio de estas dos variables en la calidad de los concentrados. En las pruebas anteriores para determinar las mejores condiciones de concentración de proceso en Mesa Wilfley, se encontró que el ángulo de inclinación de la mesa es la variable más sensible, por lo tanto tiene mayor influencia en el proceso y los productos del mismo, por este motivo no se realizaron cambios en su valor, debido a que afectan de manera drástica la distribución del mineral sobre el equipo. Las condiciones globales de concentración para el sistema híbrido con las condiciones iniciales se muestran en la **Tabla 5** y las variaciones en las variables antes mencionadas se muestran en la **Tabla 6**, el tiempo de proceso de cada prueba fue de 2 minutos, cabe mencionar que no se realizaron cambios en las condiciones de separación magnética. Se colocaron 4 Kg de mineral en la tolva de alimentación del equipo Mesa Wilfley y posteriormente se realizaron las pruebas de manera consecutiva.

Tabla 5. Condiciones de operación para el proceso híbrido de separación gravimétrica-magnética con las condiciones iniciales.

Mejores condiciones de concentración primaria en Mesa Wilfley					
Prueba 1	Flujo de sólidos (kg/min)	Flujo másico de pulpa (kg/min)	Pulsaciones (rpm)	Flujo de agua (L/min)	Ángulo de inclinación. (°)
	0.3	8	367	7.5	3.1
Condiciones de operación en concentración magnética de baja intensidad					
Ángulo de inclinación de ductos de plástico (°)	Cantidad de magnetos por ducto	Distancia entre magnetos (cm)	Intensidad de campo magnético (G)	Tiempo de proceso (min)	
45	4	19	580	2	

Tabla 6. Valores de las variaciones en flujo y pulsaciones en concentración primaria en Mesa Wilfley

Variaciones en las condiciones de concentración primaria en Mesa Wilfley			
Número de prueba	Pulsaciones (rpm)	Flujo de agua (L/min)	Ángulo de inclinación (°)
2	397	7.5	3.1
3	337	7.5	3.1
4	367	12.5	3.1
5	367	2.5	3.1

En el siguiente esquema de la **Figura 12** se muestran las diferentes corrientes de los concentrados obtenidos en el proceso de separación híbrida gravimétrica-magnética de baja intensidad con las cuales se realizaron dos tipos de balances metalúrgicos de los elementos de interés de este proyecto, siendo Fe y Ti, por medio de análisis químico de las muestras, por los métodos instrumentales de la química analítica denominados, Espectroscopia de Absorción Atómica (EAA) para lectura de Fe y Emisión Atómica con Plasma Acoplado (EAPA) para lectura de Ti. Dichos balances corresponden al balance metalúrgico global del proceso de concentración híbrida y el balance de la corriente de medios.

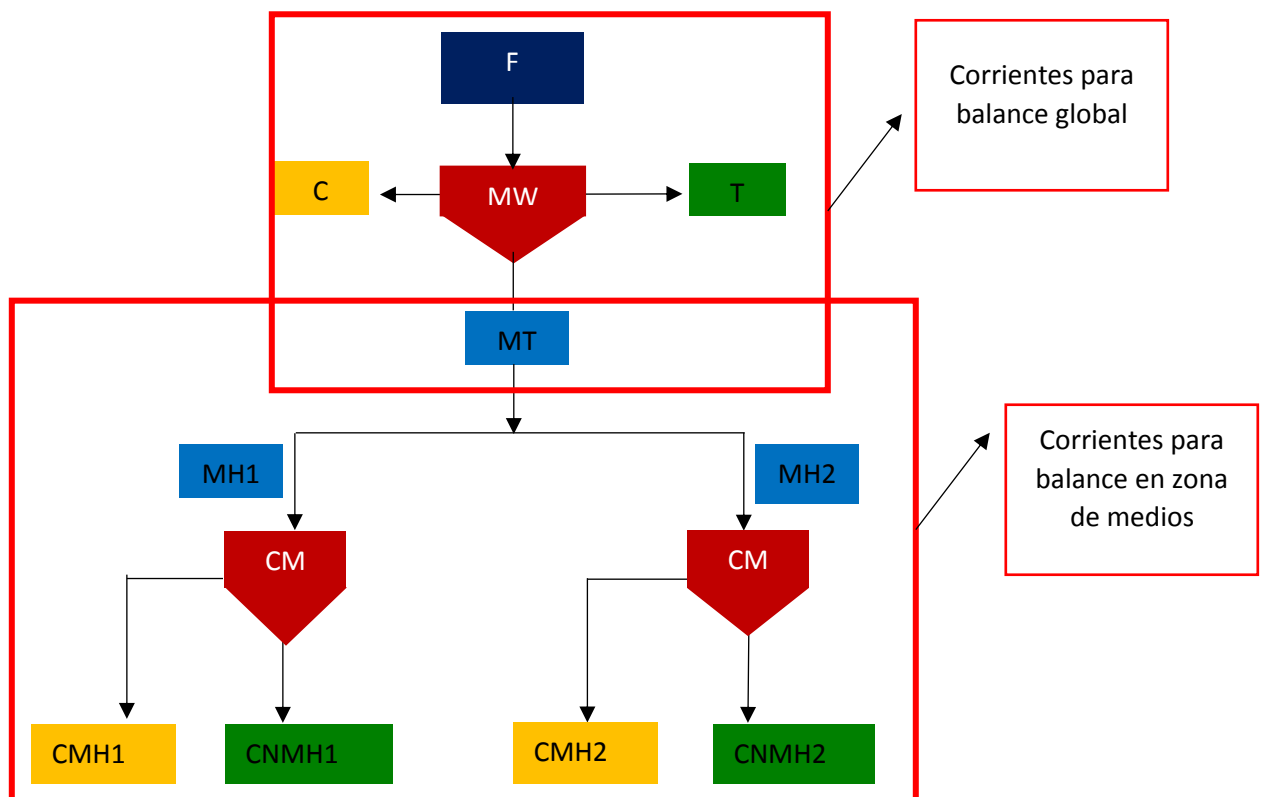


Figura 12. Balances metalúrgicos y sus respectivas corrientes.

En la **Tabla 7**, se tienen las diferentes nomenclaturas y sus denominaciones para las corrientes de los respectivos balances.

Tabla 7. Nomenclaturas y denominaciones para las diferentes corrientes.

Nomenclatura	Denominación	Nomenclatura	Denominación
F	Alimentación	C	Concentrado
M.W	Mesa Wilfley	M	Medios totales
C.M	Concentrador magnético	T	Colas
MH1	Medio híbrido 1	MH2	Medios híbrido 2
CMH1	Concentrado magnético medios 1	CMH2	Concentrado magnético medios 2
CNMH1	Concentrado no magnético medios 1	CNMH2	Concentrado no magnético medios 2

El balance metalúrgico global del proceso comprende a las corrientes de concentrado (C), medios (M) y colas (T), en cuanto al balance en la zona de medios, este compone de dos corrientes con las siglas MH1 y MH2, siendo denominados medio híbrido uno la corriente cercana a la zona del concentrado de magnetita en Mesa Wilfley y medio híbrido dos, la corriente cercana a los estériles de arena sílice. Esta división se hizo con la finalidad de observar la distribución de la ilmenita a través de las 7 tolvas de captación del mineral y su correspondiente proceso de concentración magnética de baja intensidad. De cada corriente MH1 y MH2 se obtiene dos tipos de concentrados diferentes, magnéticos y no magnéticos (magnetita e ilmenita correspondientemente) que se representan con las siglas

CMH1 y CNMH1 provenientes de MH1 y las siglas CMH2 y CNMH2 pertenecen a los concentrados obtenidos de la corriente MH2.

Al haber realizado las pruebas, se tomó una muestra de 1.2 g de dichas corrientes, se pulverizaron con la finalidad de tener una digestión de las muestras fácil y rápida. La digestión se llevó a cabo, colocando la muestra pulverizada en vasos de precipitados y con la adición de 10 mL de una mezcla de ácidos, guardando cada vaso con las muestras en una campana de calentamiento y extracción de gases por 24 horas, de manera posterior la solución obtenida se llevó a un aforo de 100 mL, y se realizaron las lecturas en los equipos del método correspondiente para elemento como se ha mencionado antes. Se tomó registro de las concentraciones en las muestras y se realizaron los balances metalúrgicos correspondientes a cada prueba.

Capítulo 3. Resultados y análisis de resultados

En este capítulo se da una pequeña descripción cualitativa del mineral con el que se trabajó en esta tesis, se analizan los resultados de las pruebas realizadas a éste, como son, caracterización del tamaño de partícula, condiciones iniciales de concentración gravimétrica en Mesa Wilfley, pruebas de separación híbrida gravimétrica-magnética, así como los resultados de la construcción del dispositivo de separación magnética de baja intensidad. Dichos resultados son mostrados en los siguientes apartados

3.1 Descripción del mineral y caracterización del tamaño de partícula

El mineral de playa con el que se trabajó en esta tesis, tiene procedencia de las dunas del estado de Sonora, presenta tres diferentes tonalidades de los granos por los cuales está conformado, siendo, grisáceas negras y cafés (ver **Figura 13**), estas diferencias indican presencia de minerales de magnetita, ilmenita y estériles respectivamente. Como se muestra en la **Figura 13b** a 15X se tiene una muestra de mineral de playa del parque estatal de los acantilados de Calvert con contenidos de magnetita, ilmenita y arena sílice, en donde la magnetita presenta granos con tonalidades grisáceas y la ilmenita con tonalidades negras [9]. Haciendo una comparativa cualitativa de las tonalidades de ambos minerales (ver **13a y 13b**), se puede apreciar su similitud, por lo que las especies minerales concuerdan.

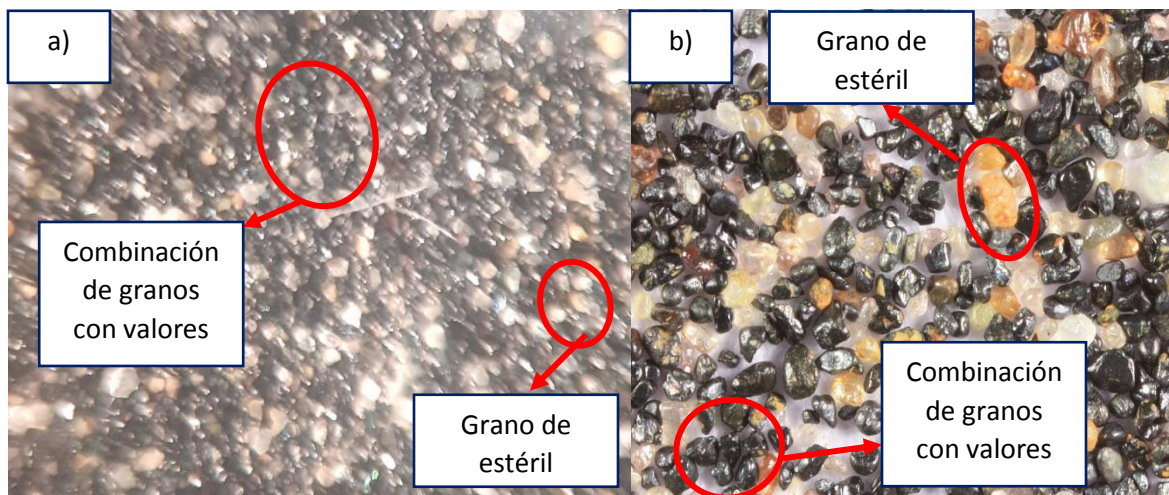


Figura 13. a) granos de mineral empleado en el proyecto proveniente del estado de Sonora 10x. b) mineral de playa ilmenita-magnetita 15x [9]

A continuación se muestra en la **Figura 14**, los resultados de la distribución del tamaño de partícula del mineral en la alimentación a las pruebas de concentración, en esta se puede ver el porcentaje de retenido contra el tamaño de partícula, donde la distribución granulométrica del mineral comprende tamaños que van desde los 300 μm a partículas finas de 45 μm , los porcentajes mayores de retenido corresponden a tamaños de 212 a 106 μm , con 26.8 y 28 % respectivamente.

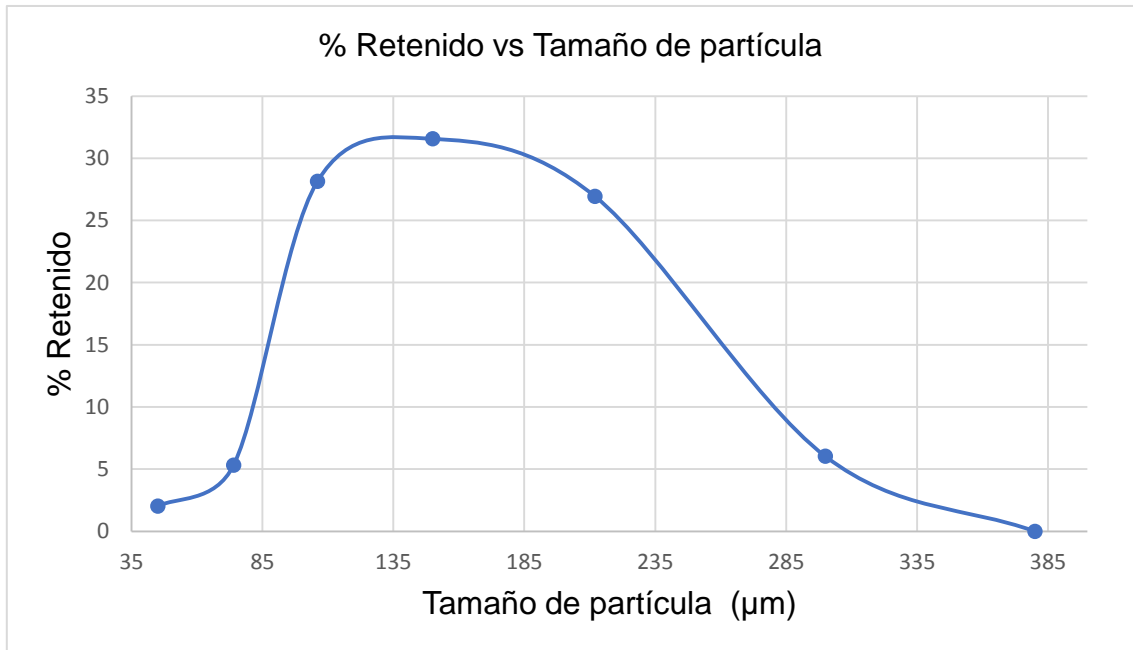


Figura 14. Gráfico de distribución granulométrica.

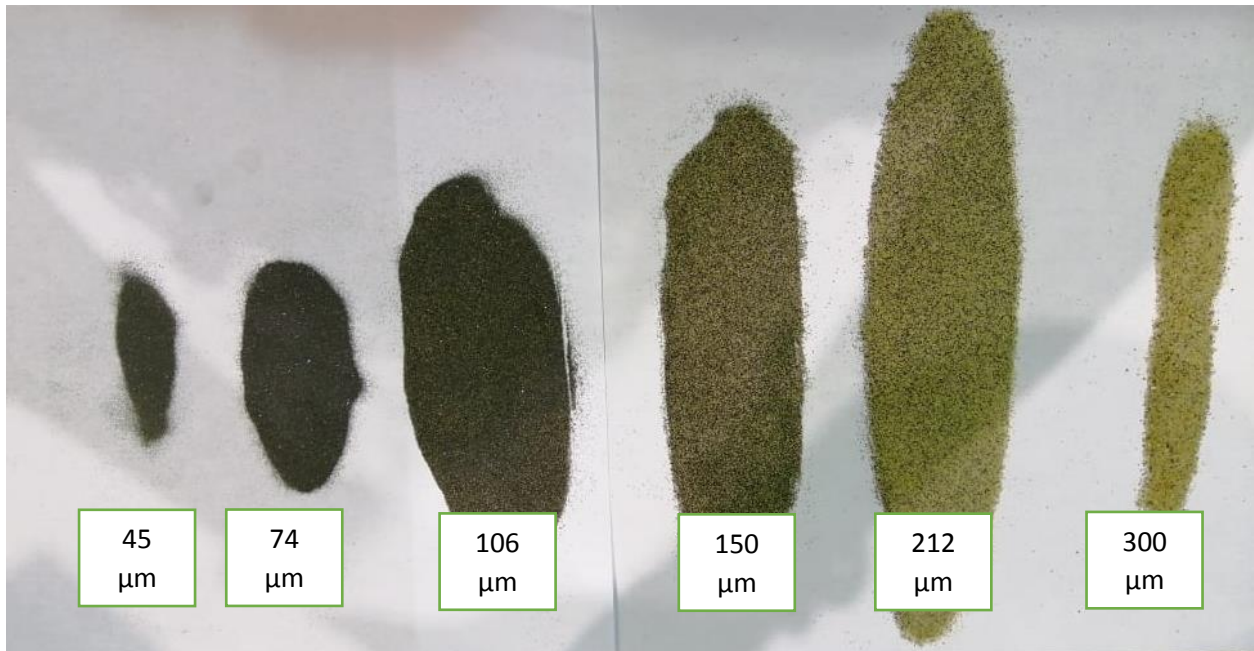


Figura 15. Distribución de tamaño del mineral de playa a partir de sus tonalidades

En la **Figura 15** se muestra la diferencia de tonalidades del mineral en función del tamaño de partícula, teniendo como resultado que partículas con tamaños de 300 a 212 μm presentan tonalidades en su mayoría de color café, con porcentajes de retenido de 6 y 26.9 % respectivamente (**Figura 14**) que pueden indicar ser casi en su totalidad partículas de sílice, a partículas con tamaños de 150 μm se tiene una mezcla de tonalidades cafés, grises y negras con un porcentaje de retenido de 31.4 de retenido, la coloración de estas partículas nos indican la presencia de partículas de sílice, magnetita e ilmenita, a partir de tamaños menores a 106 μm (28.1 % retenido) y que van hasta los 45 μm predominan las tonalidades negras y grisáceas.

Cabe mencionar que la diferencia de tamaños entre la mayoría de los valores (magnetita e ilmenita) y partículas estériles (arena sílice) es de al menos el doble, lo cual es un factor importante en el proceso de separación gravimétrica.

3.2 Determinación de las condiciones iniciales de concentración de proceso en Mesa Wilfley

Las variables del proceso de concentración gravimétrica en Mesa Wilfley son; pulsaciones (rpm), flujo de agua (l/min), ángulo de inclinación (°) y velocidad de alimentación del mineral (g/min), las mejores condiciones de operación fueron encontradas a través de pruebas cualitativas donde se observaron las mejores distribuciones de los concentrados, las cuales se encuentran en la **Tabla 8**.

Tabla 8. Mejores condiciones de operación en Mesa Wilfley, leídas a través del sistema modular Arduino uno.

Variable.	Valor de variable.
Pulsaciones (rpm)	367
Flujo de agua (l/min)	7.5
Ángulo de inclinación (°)	3.0
Velocidad de alimentación de mineral (g/min)	292

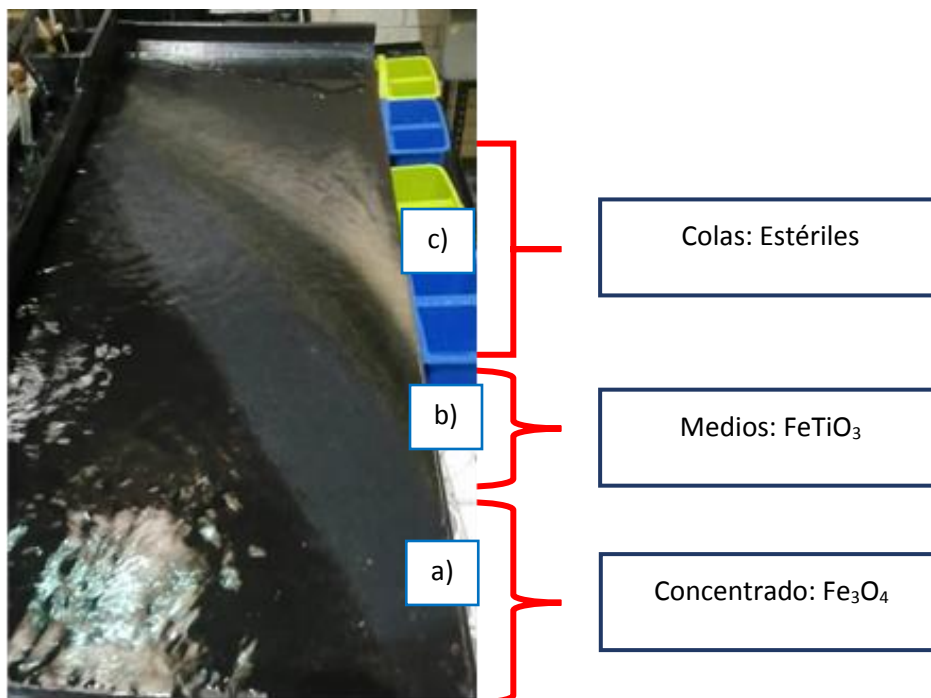


Figura 16. Distribución visual del mineral de playa en el proceso de concentración gravimétrica en Mesa Wilfley. a) Concentrado, b) Medios y c) Colas.

A partir de las mejores condiciones de las variables reportadas en la **Tabla 8** es posible observar el abanico de la distribución de los diferentes componentes del mineral sobre la superficie del equipo Mesa Wilfley que se observa en la **Figura 16**, donde es posible visualizar que el área de interés para el acoplamiento de ambos procesos (separación gravimétrica y separación magnética de baja intensidad) se encuentra en la zona de medios (**Figura 16 b**), donde está la división entre el mineral de magnetita (concentrado, **Figura 16 a**) e ilmenita, hasta la división entre el mineral de ilmenita y estériles (colas, **Figura 16 c**).

Estas condiciones dan como resultado un buen concentrado de magnetita, el cual, es recolectado de manera directa a través de un dispositivo recolector. La corriente de medios (ilmenita) contiene algunas partículas de magnetita, por lo que la separación de ambos minerales es de sumo interés para obtener productos concentrados con valores de titanio con buenas leyes y recuperaciones, por esta razón la franja de medios pasa de manera directa al dispositivo de concentración magnética de baja intensidad, la caída del mineral de a través de la acción de la gravedad y el flujo de agua. El concentrado y colas son recolectados en contenedores para cada corriente producto.

3.3 Construcción del dispositivo de separación magnética de baja intensidad

En las **Figuras 17 y 18**, es mostrado el dispositivo construido de separación magnética de baja intensidad, en las cuales se pueden apreciar dos zonas, la zona correspondiente a la captación de mineral de la corriente de medios, descendientes del proceso de concentración gravimétrica y la zona donde se lleva a cabo la separación magnética entre la magnetita e ilmenita. La primera zona tiene como ventaja el ingreso directo de la carga hacia el dispositivo y su almacenamiento, a través de las 7 campanas de reducción que actúan como tolvas de alimentación, teniendo un aprovechamiento de la caída del mineral por acción de las fuerzas de flujo, pulsaciones y gravedad, por lo que es eliminada la necesidad de otros sistemas de transporte de la pulpa, ya que en el caso de los concentradores magnéticos industriales, si se quisiera acoplar estos dos procesos de concentración (gravimétrica-magnética), sería necesaria la implementación de estos sistemas. Al ingreso del mineral hacia el dispositivo, la carga recorre a través de codos de PVC con ángulo de 90°, esto debido a la necesidad de trasladar la carga hacia las zonas de los ductos de plástico, los cuales se encuentran de manera externa a las dimensiones de la base de Mesa Wilfley. Al llegar a la zona de separación magnética, la carga desciende por los ductos, en donde el mineral de magnetita es concentrado por las líneas de campo producidas por un sistema de magnetos permanentes, de los cuales se hablará más adelante. Al ser separada la magnetita de las partículas de ilmenita, se obtienen dos concentrados, del tipo magnético (magnetita) y no magnético (ilmenita), en cada uno de los siete ductos con los que cuenta el dispositivo. El concentrado no magnético termina su recorrido en contenedores que están conectados a los ductos. La base de acrílico en la cual están montadas las campanas brinda soporte al peso que ejercen los concentrados magnéticos.



Figura 17. Dispositivo de separación magnética de baja intensidad. Campanas de captación de mineral y conexiones por donde el mineral es transportado.



Figura 18. Dispositivo de separación magnética de baja intensidad. Ductos de plástico donde se lleva cabo la separación.

3.4 Determinación de sistema de imanes permanentes en ductos de plástico

A partir de las pruebas realizadas en la zona de los ductos, se determinó que el sistema de imanes permanentes más favorable para el dispositivo, consistió de 4 imanes de ferrita de forma semicircular con un diámetro interno de 2.5 cm por ducto, distribuidos a lo largo de éste a una distancia de 19 cm entre cada imanes, en donde la posición de cada uno es contraria a la posición del imanes anterior, de tal manera que los polos de ambos sean opuestos, como se representa en los incisos a y b de la **Figura 19**.

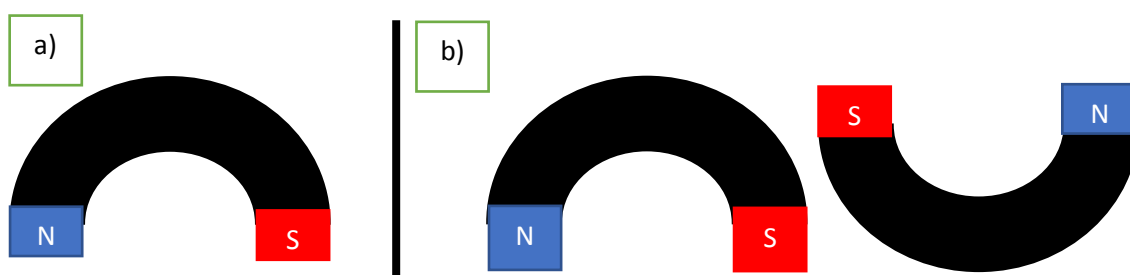


Figura 19. a) forma semicircular de imanes. b) posiciones opuestas entre imanes

Al tener en operación 4 imanes permanentes de ferrita, se observó de manera cualitativa una mejor retención de magnetita, debido a la separación dada entre imanes (19 cm), esto tuvo como resultados mayor cobertura en el recorrido que realiza la pulpa del mineral a través de los ductos, también se observó que a esta distancia se tiene una mejor distribución del material magnético retenido a través de las 4 posiciones de los imanes. En comparación con distancias menores se tuvo una sobreacumulación de material magnético, generando como consecuencia una interrupción en el flujo de pulpa.

En la **Figura 20**, se observa el dispositivo de separación magnética de baja intensidad, con el sistema de imanes colocados en los ductos de plástico de acuerdo con las especificaciones antes descritas, a través de un cintillo, en las posiciones en las cuales se retiene el mineral magnético.

Como se puede apreciar, los magnetos sostenidos por dichos cintillos propician que se mantengan estáticos, al no tener la factibilidad de un sistema que pueda proporcionarles fácil movimiento a lo largo de los ductos, por lo que limitan la opción de cambiar las longitudes entre ellos durante el proceso y la acción de descarga del concentrado magnético sólo se puede llevar a cabo al término de éste, en consecuencia el proceso global de separación híbrida es del en tipo batch, ya que la cantidad de mineral procesado está sujeto a la capacidad de la acumulación de la carga magnética relacionada a su vez por el diámetro de los ductos.



Figura 20. Dispositivo de separación magnética de baja intensidad con sistema de magnetos permanentes en ductos de plástico.

3.5 Acoplamiento de proceso híbrido Mesa Wilfley-concentrador magnético de baja intensidad

Se muestran ambos dispositivos trabajando en conjunto (M.W y Concentrador magnético) en la **Figura 21**, es decir, el acoplamiento de ambos procesos. En la parte superior se tiene la pantalla en la cual se muestran en tiempo real los valores y gráficos de las variables empleadas en la concentración gravimétrica medidas y capturadas a través del sistema modular Arduino Uno (**Figura 21a**). La alimentación del mineral ocurre a través del dispositivo alimentador mostrado en la **Figura 21b**, el cual consiste de una tolva en la que se vierte la masa del mineral seco y está lo suministra hacia el alimentador, donde se va acumulando la carga y por acción de vibraciones esta asciende hasta la parte final en la que desemboca hacia la apertura de alimentación del equipo M.W. Posteriormente se efectúa el proceso de concentración gravimétrica (**Figura 21c**), teniendo así el ingreso de la corriente de interés en el dispositivo de S.M (**Figura 21d**), para llevarse a cabo la separación de la magnetita de la ilmenita en las zonas donde se posicionan los magnetos en los ductos de plástico (**Figura 21e**), dando como resultado un proceso de separación híbrida gravimétrica-magnética in situ.

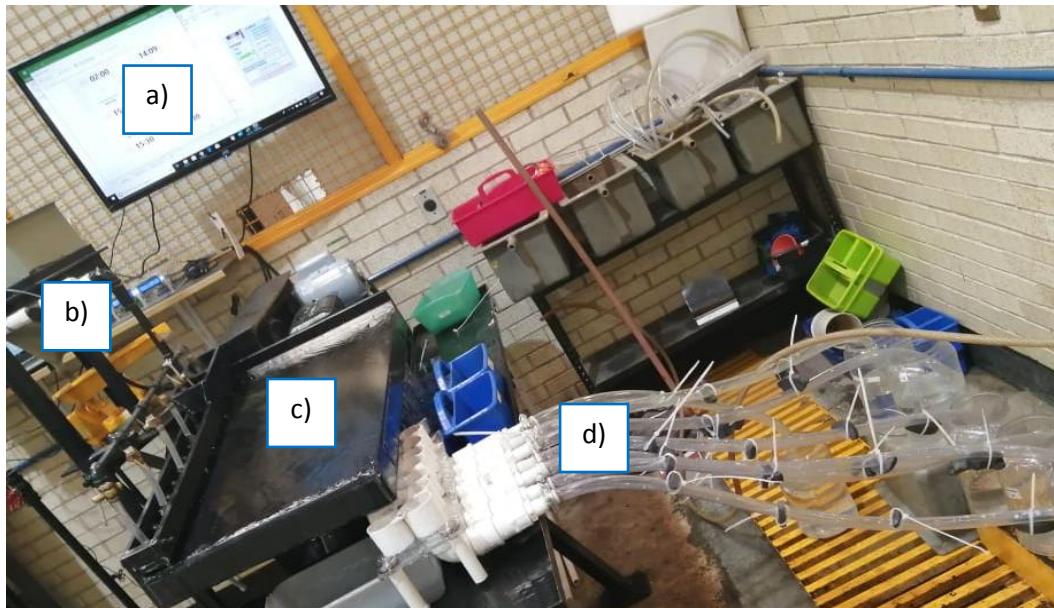


Figura 21. Acoplamiento de proceso híbrido Mesa Wilfley-concentrador magnético de baja intensidad.

3.6 Pruebas de separación híbrida gravimétrica-magnética de baja intensidad y balances metalúrgicos

En los siguientes apartados se muestran los resultados y análisis de resultados, de las pruebas de concentración híbrida a través del acoplamiento del proceso de concentración gravimétrica y concentración magnética de baja intensidad durante dos minutos, haciendo uso de las iniciales encontradas en el equipo M.W y las pruebas con las respectivas variaciones de las siguientes variables; pulsaciones y flujo de agua, como se ha mencionado con anterioridad en el desarrollo experimental, siendo visibles los valores usados en las **Tablas 5 y 6**. Los balances metalúrgicos de valores de hierro y titanio de los concentrados, son mostrados en diferentes gráficos, los cuales se dividen en el balance del proceso global y el balance en la zona de medios, esto con la finalidad de evaluar los procesos en conjunto y de forma separada. Las diferentes corrientes producto se mencionan en el desarrollo experimental a través del esquema de la **Figura 12** y la nomenclatura de la **Tabla 7**.

3.6.1 Prueba 1. Separación gravimétrica-magnética de baja intensidad con uso de las condiciones iniciales, 3.0° de ángulo de inclinación, 7.5 L/min y 367 rpm.

Balance Metalúrgico global

A continuación se muestran los gráficos correspondientes a las leyes y recuperaciones de Fe y Ti obtenidas en las corrientes F, C, M y T (Ver **Figura 12**) del balance global del proceso de concentración híbrida.

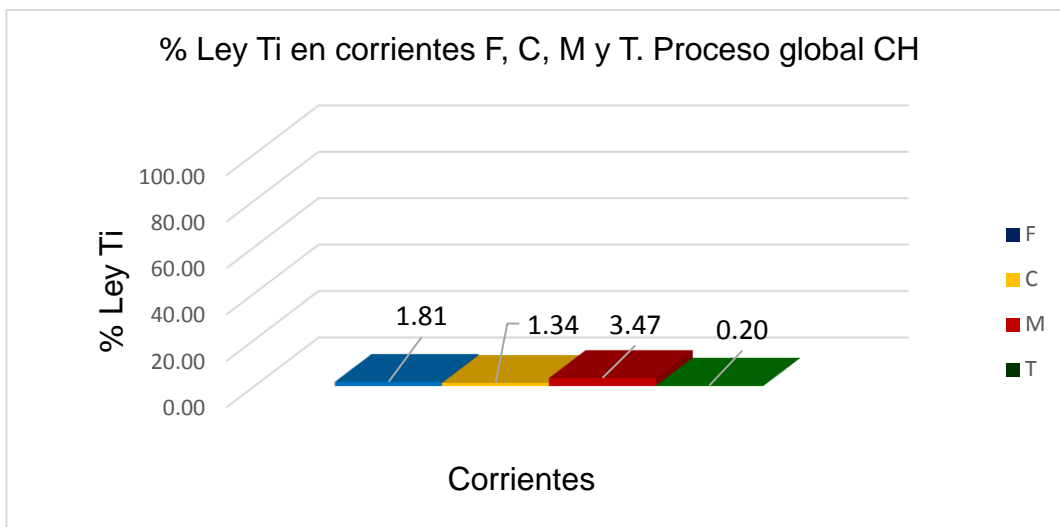


Figura 22. Porcentaje de ley de Ti en corrientes F, C, M y T. Concentración Híbrida gravimétrica-magnética de baja intensidad.

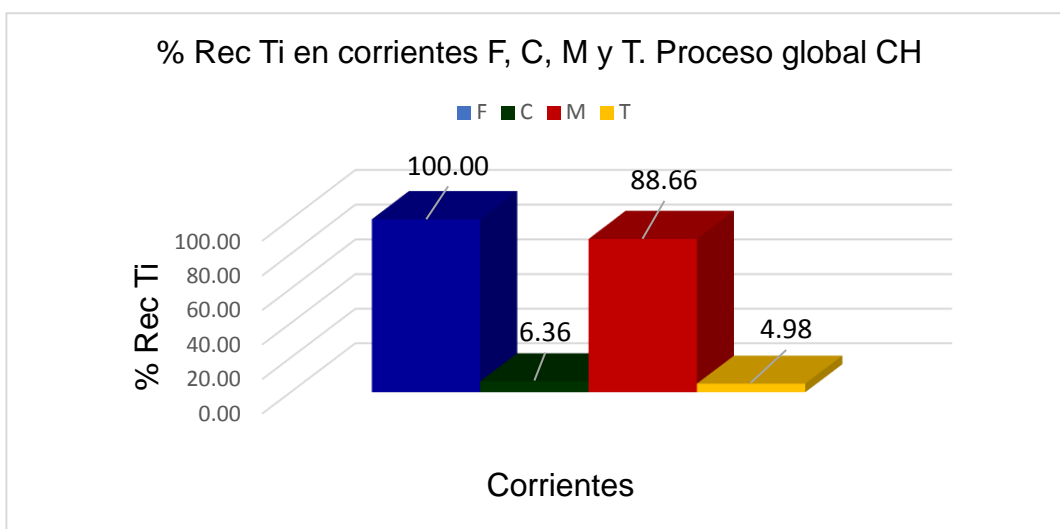


Figura 23. Porcentaje de recuperación de Ti en corrientes F, C, M y T. Concentración Híbrida gravimétrica-magnética de baja intensidad.

De acuerdo con la distribución de % ley de Ti en las diferentes corrientes (C, M y T) representada en la **Figura 22**, se observa un menor % de ley en el concentrado de 1.34 %, el mayor se encuentra en los medios con un 3.47 % y una mínima cantidad en las colas (0.20 %). Ya que la Ley de Ti es un indicativo de la cantidad de ilmenita, nos indica que hay mayor presencia de este mineral en la corriente de medios, lo cual era uno de los objetivos buscados en este proyecto. Respecto al % de recuperación de Ti, se obtuvo 80.97 % en los medios, lográndose la recuperación más alta en este producto, por lo que se puede afirmar que se obtuvieron buenas leyes y altas recuperaciones de Ti en el sistema propuesto.

En la zona de las colas se tuvo un % de recuperación de Ti del 4.55 % **Figura 23**. Esta desviación de las partículas de ilmenita hacia los estériles es debido a un fenómeno la similitud en la velocidad terminal que pudo darse entre las partículas de ilmenita y estériles, provocada ésta similitud por la variación de tamaño de partícula entre partículas de alta y baja densidad.

De manera general, de acuerdo con los resultados experimentales y el análisis antes descrito, se tiene una respuesta favorable del sistema de concentración híbrida para la obtención de concentrados de Ti (con altas leyes y recuperaciones) en la corriente deseada (zona de medios, CNMH1). La eficiencia del proceso se refleja en el % de recuperación de Ti, siendo este del 88.6 %

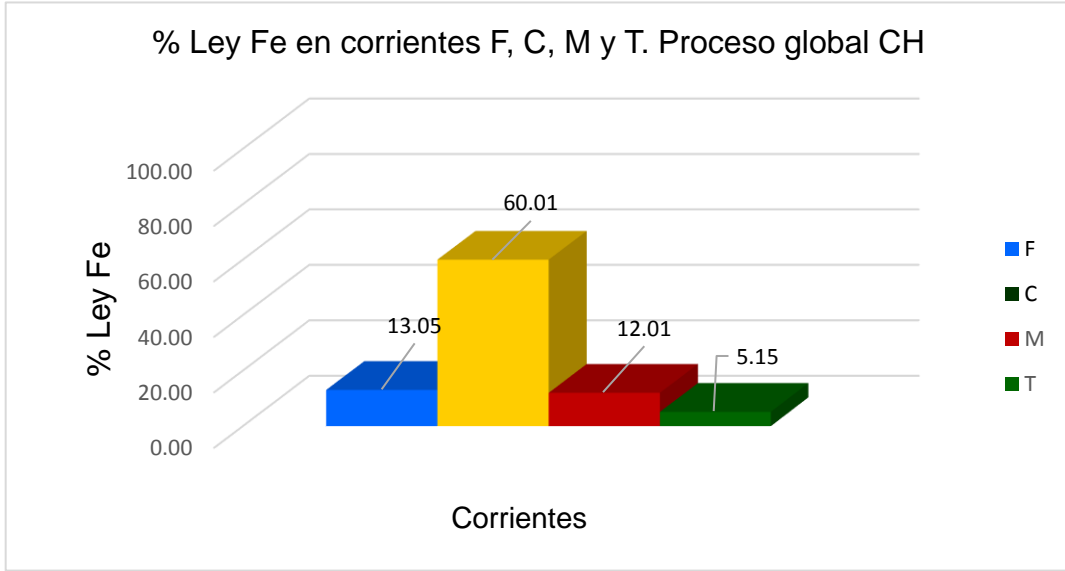


Figura 24. Porcentaje de ley de Fe en corrientes F, C, M y T. Concentración Híbrida gravimétrica-magnética de baja intensidad

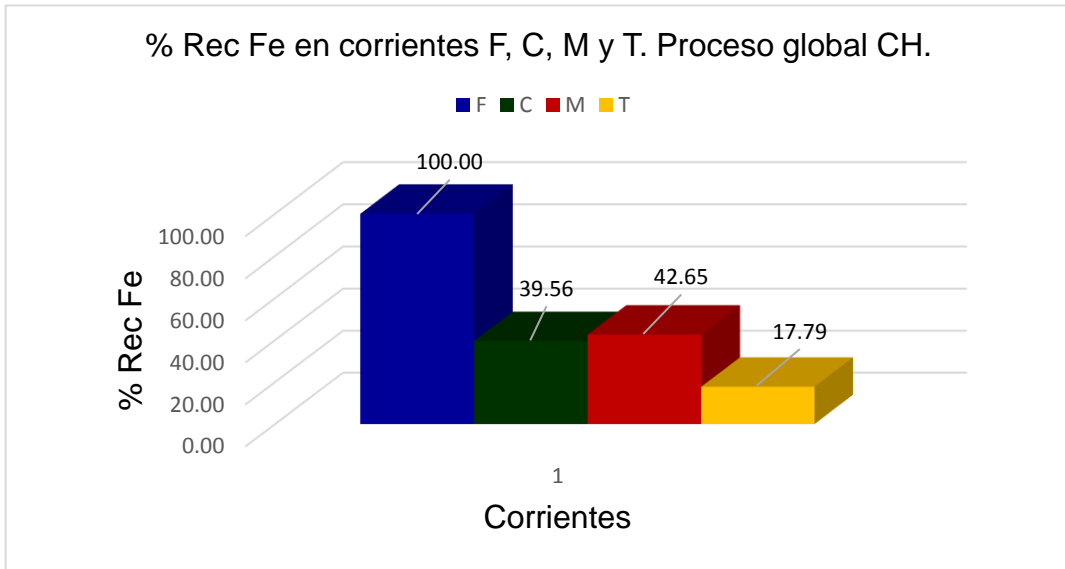


Figura 25. Porcentaje de recuperación de Fe en corrientes F, C, M y T. Concentración Híbrida gravimétrica-magnética de baja intensidad

En la **Figura 24**, se muestra la tendencia a disminuir del % Ley Fe en las diferentes corrientes, siendo el valor más alto obtenido en el concentrado del 60.01 % y el valor más bajo en las colas del proceso (5.15 %).

El porcentaje de recuperación de Fe como lo indica la **Figura 25**, es mayor en la corriente de medios, posteriormente en el concentrado y la menor recuperación se obtuvo en las colas. En el caso de esta última corriente, se tiene una pérdida de Fe del 17.79% en recuperación, debido a la presencia de partículas pequeñas de éste, respecto a los tamaños que tuvieron mayores porcentajes de retenido, esto fue causado al obtener velocidades terminales similares de partículas de magnetita y estériles de sílice en el proceso de concentración gravimétrica, siendo las partículas de estériles los tamaños más grandes de (212 μm a 300 μm , **Figura 15**), es probable que ocasionaran la desviación de las partículas de hierro hacia la corriente de colas.

Balance Metalúrgico en zona de medios. Dispositivo de separación magnética.

A continuación se muestran los gráficos correspondientes a las leyes y recuperaciones de Ti obtenidas en los concentrados magnéticos y no magnéticos de las diferentes corrientes de C.M.

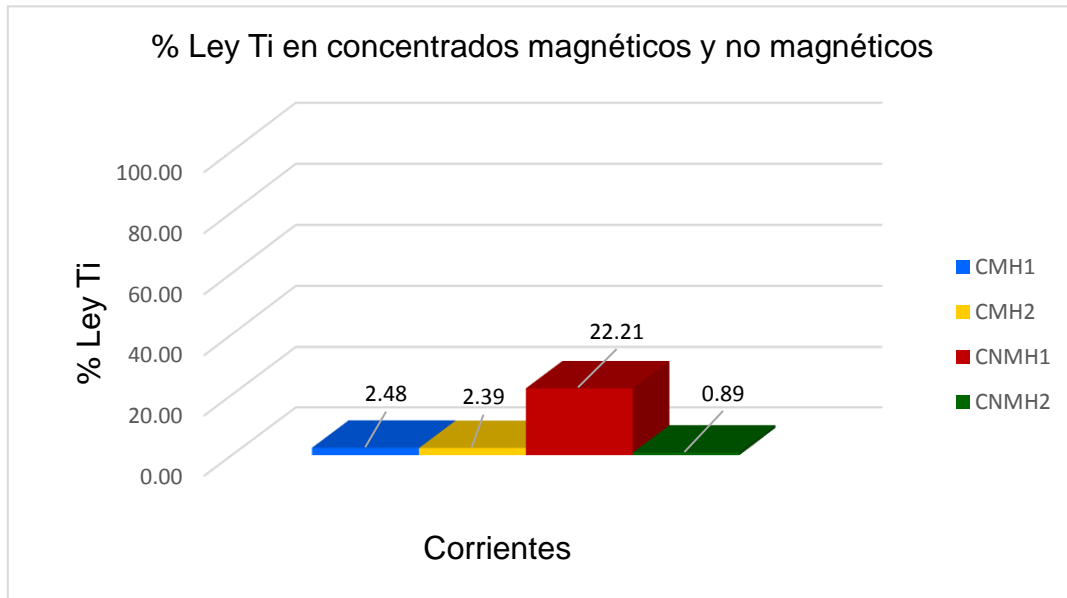


Figura 26. Porcentaje de ley de Ti en concentrados magnéticos y no magnéticos provenientes de las corrientes MH1 y MH2. Concentración Híbrida gravimétrica-magnética de baja intensidad.

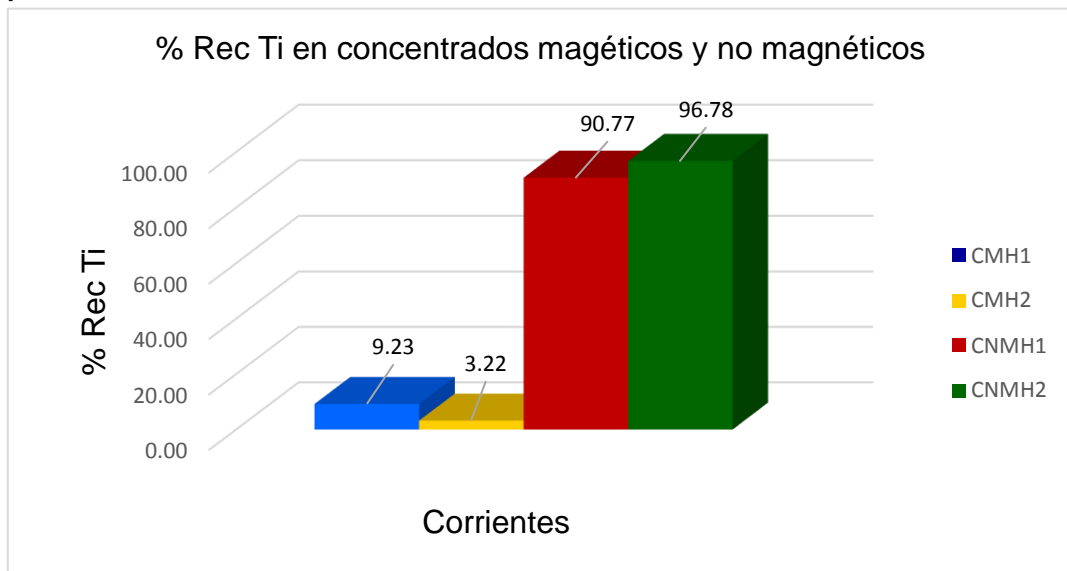


Figura 27. Porcentaje recuperación de Ti en concentrados magnéticos y no magnéticos provenientes de las corrientes MH1 y MH2. Concentración Híbrida gravimétrica-magnética de baja intensidad.

De acuerdo con los objetivos del proceso, se busca obtener leyes y recuperaciones bajas o nulas de Ti en el concentrado de magnetita, colas y los concentrados magnéticos, en cuanto a los concentrados no magnéticos se buscan altas leyes y recuperaciones, con las condiciones de concentración en Mesa Wilfley. Se observan en la **Figura 26** leyes bajas de titanio en los concentrados magnéticos, siendo éstas de 2.48 y 2.39 % para CMH1 y CMH2 respectivamente, la presencia de titanio en estos concentrados se debe al arrastre de las partículas de ilmenita al quedarse atrapadas entre las partículas de magnetita, esto aunado a la diferencia que se tiene en el tamaño de partícula, en donde las partículas atrapadas de ilmenita tienen un menor tamaño siendo recolectadas por el campo magnético inducido. Sin embargo; las leyes bajas también indican que la mayor cantidad de concentrado magnético que se obtuvo es magnetita. Se observa en la **Figura 27**, una diferencia en los valores de las recuperaciones obtenidas entre las corrientes CMH1 y CMH2 (9.23 y 3.22 % respectivamente), teniéndose una menor recuperación en CMH2, recordando que es la corriente cercana a los estériles. Lo anterior es indicativo de que la presencia de Ti, disminuye al posicionarnos en la zona más cercana a las colas.

En el caso de los concentrados no magnéticos (**Figura 26**) existen mayores leyes y recuperaciones, siendo la ley más importante obtenida en la corriente CNMH1 con 22 % y 90.77 % de recuperación (**Figura 27**), estos valores representan alta calidad del concentrado con una alta recuperación de Ti. En la corriente CNMH2 la ley disminuye de manera drástica al ser cercana a las colas por lo que la masa de mineral con valores de titanio es menor.

El tiempo de proceso fue de 2 minutos, ya que, a este valor se daba la saturación de concentrado magnético en los ductos de plástico, mencionada con anterioridad en este trabajo, ocasionando el deslave de las partículas. Lo anterior como ya se ha explicado está directamente ligado con el diámetro de los ductos (1 pulgada) y a su vez con el diámetro de los magnetos permanentes de ferrita en forma semicircular. Con lo antedicho se propone ampliar ambos diámetros para poder aumentar la carga de los concentrados en los ductos y de manera consecuente el tiempo de

proceso. Para saber en qué magnitud se debe de realizar esta ampliación se requiere de pruebas con distintos diámetros de imanes y ductos, de ser el caso de la continuación de este proyecto.

3.6.2 Prueba 2. Separación gravimétrica-magnética de baja intensidad con uso de las condiciones iniciales, 3.0° de ángulo de inclinación, 7.5 L/min y 397 rpm.

Balance Metalúrgico global

A continuación se muestran los gráficos correspondientes a las leyes y recuperaciones de Fe y Ti obtenidas en las corrientes F, C, M y T con el aumento del valor de pulsaciones.

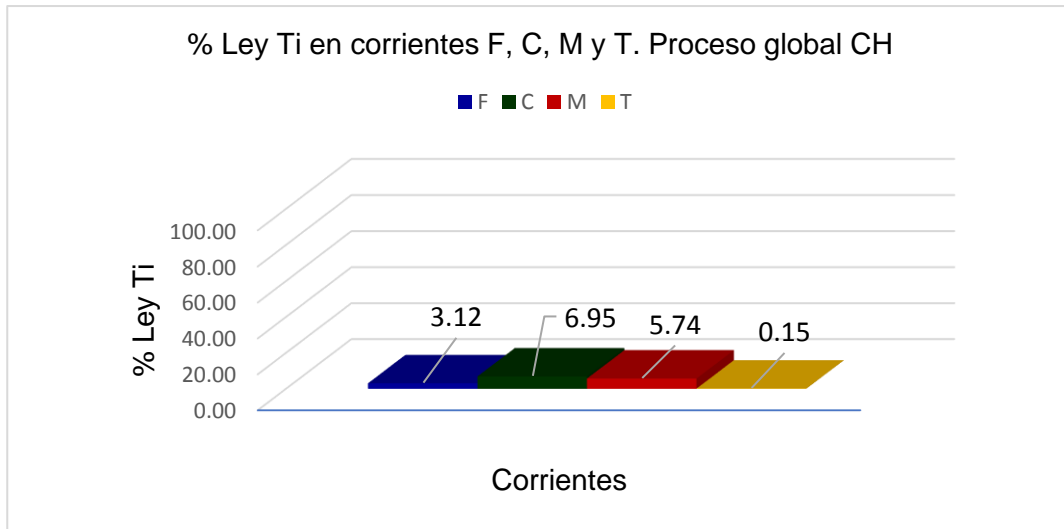


Figura 28. Porcentaje de ley de Ti en corrientes F, C, M y T. Concentración Híbrida gravimétrica-magnética de baja intensidad con 397 rpm.

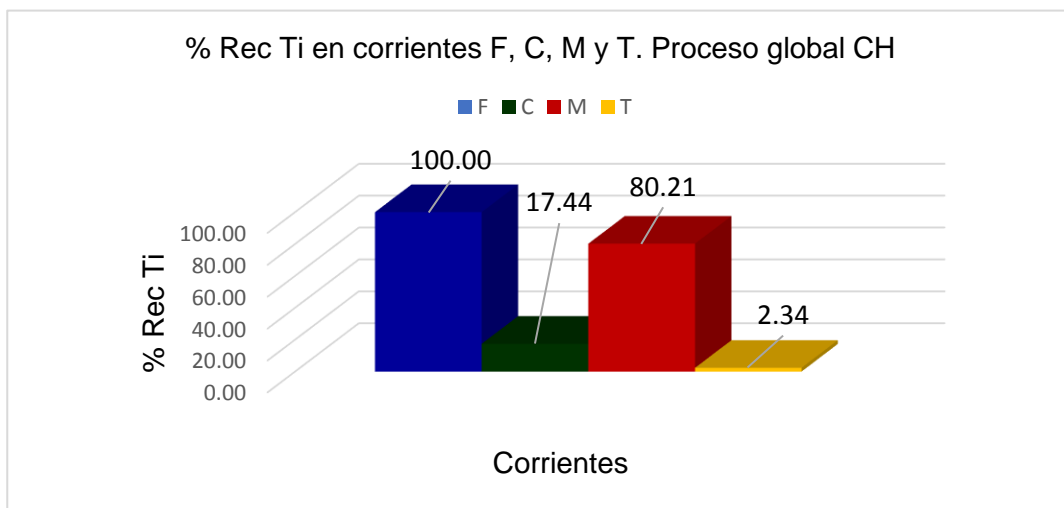


Figura 29. Porcentaje de recuperación de Ti en corrientes F, C, M y T. Concentración Híbrida gravimétrica-magnética de baja intensidad con 397 rpm.

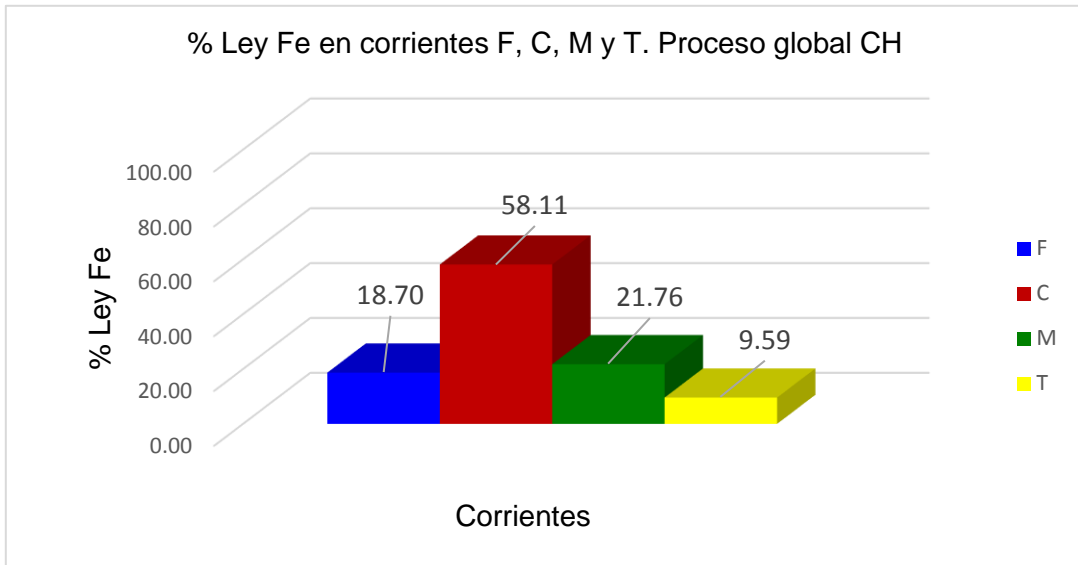


Figura 30. Porcentaje de ley de Fe en corrientes F, C, M y T. Concentración Híbrida gravimétrica-magnética de baja intensidad con 397 rpm.

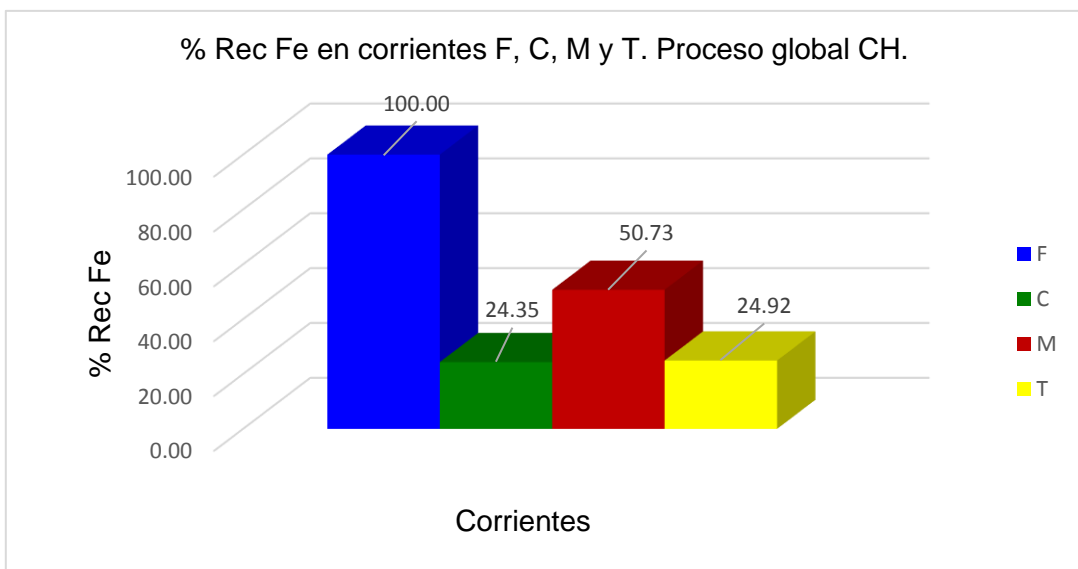


Figura 31. Porcentaje de recuperación de Fe en corrientes F, C, M y T. Concentración Híbrida gravimétrica-magnética de baja intensidad con 397 rpm.

La ley de titanio en la corriente M (medios) tuvo un aumento a un valor de 5 %, sin embargo la recuperación bajo a 80 (Ver **Figuras 28y 29**), este incremento no es producto del valor de las pulsaciones (397 rpm) en el equipo M.W, si no causa del aumento en la alimentación de la ley de Ti, pasando de 1.81 % de ley obtenido en la prueba 1 a 3.12 %, dicho incremento está directamente ligado a la forma de suministro de la carga alimentada hacia la M.W, de lo cual se hablará de manera posterior. En cuanto a la corriente C, el porcentaje de recuperación de titanio se eleva del 6.36 % (prueba 1) a 17.44, al contrario de la corriente de las colas (T), las cuales tienen una disminución de esta ley, con 2.34 %. En cuanto al porcentaje de recuperación de titanio, éste descendió en todas las corrientes (**Figura 29**). El aumento en las pulsaciones suministradas, respecto a las condiciones iniciales, tuvo de manera similar como consecuencia, ligeras disminuciones en las recuperaciones de hierro de los concentrados, (C, M y T) (**Figuras 31 y 31**), sin embargo; estas disminuciones no son representativas, ya que son prácticamente similares al proceso de la prueba 1.

Respecto a la distribución del mineral sobre la Mesa Wilfley a 397 rpm, se tuvo un cambio en la distribución del mineral, el aceleramiento de las vibraciones originó que las franjas del abanico formado de los concentrados se recorrieran hacia la parte inferior de esta, siendo confirmado por el aumento de la ley de titanio en el concentrado y su disminución en las colas, el control del proceso disminuyó de manera drástica, ya que a consecuencia de las altas vibraciones la caída del mineral se volvió agitada, depositando carga fuera del equipo de separación magnética de baja intensidad y la carga que fue depositada en el dispositivo tuvo una caída desorganizada, por lo que si bien el aumento en las pulsaciones no generó una diferencia significativa en las calidades de los concentrados, no es un recomendable para el proceso, ya que es fundamental tener un buen control de la Mesa Wilfley y la caída de mineral, para evitar perder carga con valores y tener un proceso limpio, sin fugas, recordando de igual manera, que el control de los proceso a nivel industrial involucra tanto a la calidad de este, como la seguridad del mismo.

Balance Metalúrgico en zona de medios. Dispositivo de separación magnética.

A continuación se muestran los gráficos correspondientes a las leyes y recuperaciones de Ti obtenidas en los concentrados magnéticos y no magnéticos de las diferentes corrientes de C.M. con 397 rpm.

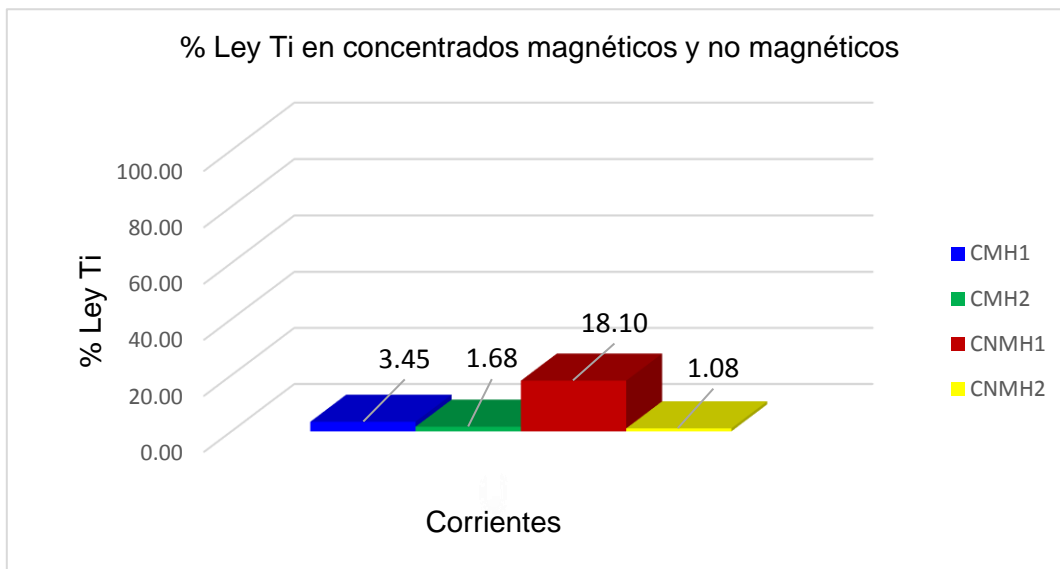


Figura 32. Porcentaje de ley de Ti en concentrados magnéticos y no magnéticos provenientes de las corrientes MH1 y MH2. Concentración Híbrida gravimétrica-magnética de baja intensidad con 397 rpm.

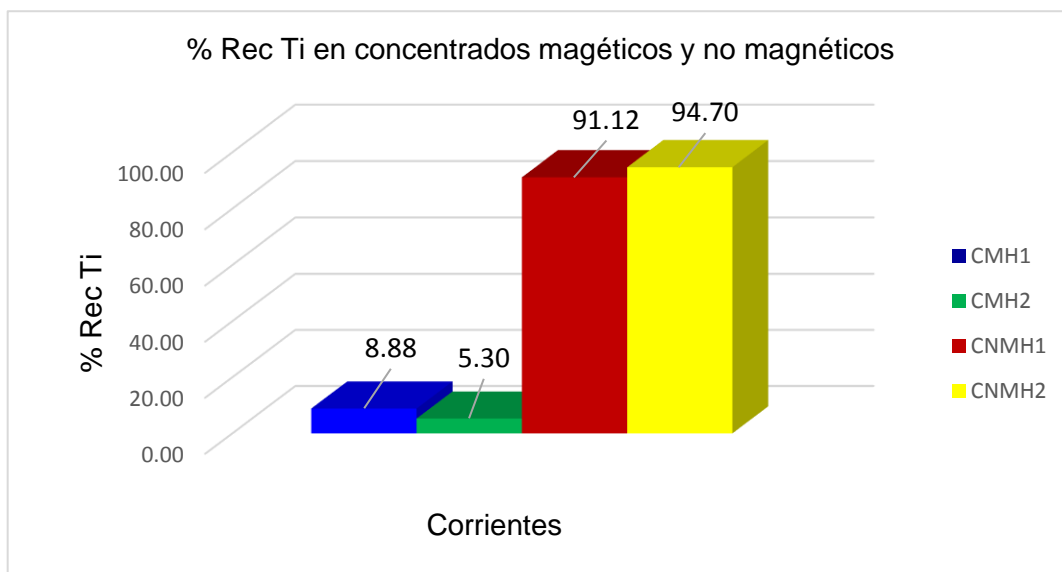


Figura 33. Porcentaje de recuperación de Ti en concentrados magnéticos y no magnéticos provenientes de las corrientes MH1 y MH2. Concentración Híbrida gravimétrica-magnética de baja intensidad con 397 rpm.

El mayor porcentaje en ley de Ti en los concentrados magnéticos corresponde a un valor de 3.45 % (**Figura 32**), perteneciente a la corriente CMH1 (corriente cercana al concentrado) con un 8.88 % de recuperación (**Figura 33**). De manera comparativa a los valores obtenidos en la prueba 1 (2.48 % ley Ti y 9.23 % recuperación de Ti) se tiene una leve disminución en estas leyes y recuperaciones, no obstante; de manera práctica son semejantes. En los concentrados no magnéticos se obtuvo un 18.10 % en ley de Ti en la corriente CNMH1, con una recuperación del 91.2 % (**Figuras 32 y 33** respectivamente). Notándose un aumento en el % de recuperación y una disminución en la ley respecto a las condiciones iniciales de operación.

3.6.3 Prueba 3. Separación gravimétrica-magnética de baja intensidad con uso de las condiciones iniciales, 3.0° de ángulo de inclinación, 7.5 L/min y 337 rpm.

Balance Metalúrgico global

A continuación se muestran los gráficos correspondientes a las leyes y recuperaciones de Ti y Fe obtenidas en las corrientes F, C, M y T con la disminución del valor de pulsaciones.

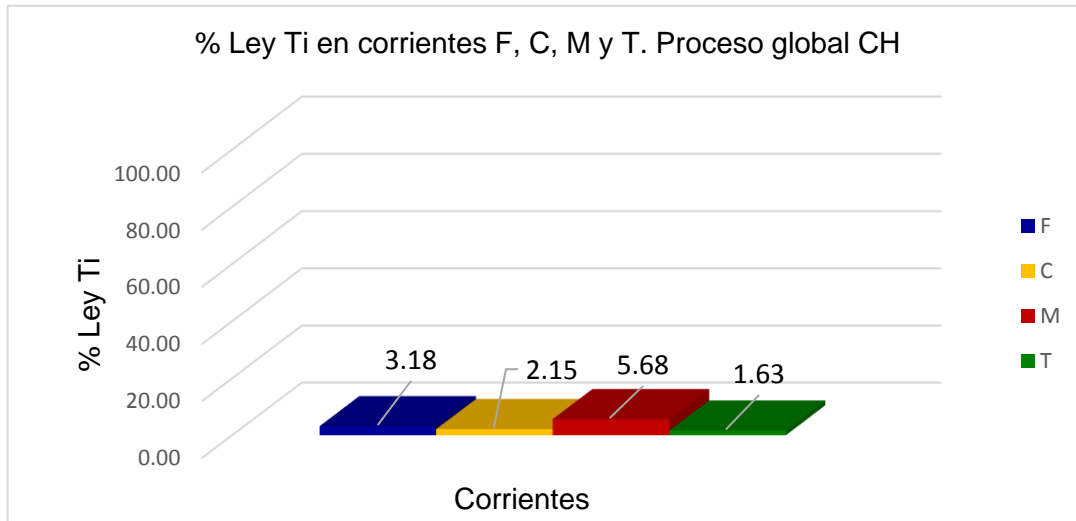


Figura 34. Porcentaje de ley de Ti en corrientes F, C, M y T. Concentración Híbrida gravimétrica-magnética de baja intensidad con 337 rpm.

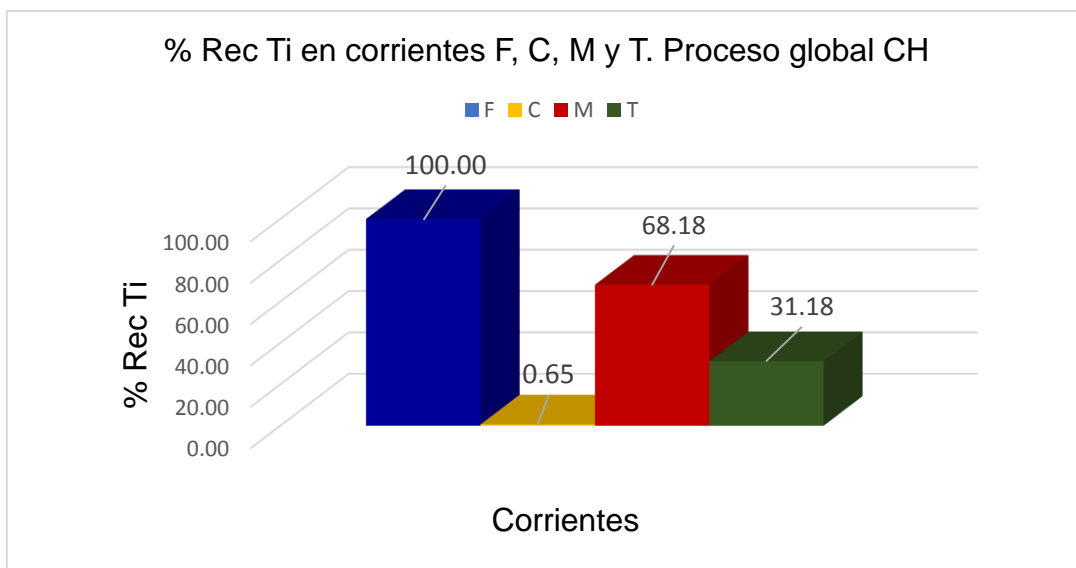


Figura 35. Porcentaje de recuperación de Ti en corrientes F, C, M y T. Concentración Híbrida gravimétrica-magnética de baja intensidad con 337 rpm.

Las corrientes de los concentrados sobre la Mesa Wilfley, en respuesta a la disminución de pulsaciones, se desplazaron hacia la parte superior de esta, lo cual también se ve reflejado en las leyes de Ti obtenidas en las corrientes; C, M y T del proceso global, ya que la corriente de los medios tuvo una disminución de la ley al adquirir un valor de 5.68 % (**Figuras 34 y 35**) con una disminución del porcentaje de recuperación (68.18 %). En la corriente de estériles o colas (T), la ley y recuperación de Ti aumenta de 0.20 % (prueba 1, ver **Figura 22**) a 1.63 % (**Figura 34**) y de 4.98 % a 31.18 respectivamente. Como bien se sabe, las pulsaciones proporcionan el empuje del mineral sobre la superficie de la mesa, por lo que en este caso, al tener menor empuje del necesario para una buena separación gravimétrica, las corrientes de los concentrados y medios fueron desviadas hacia las colas.

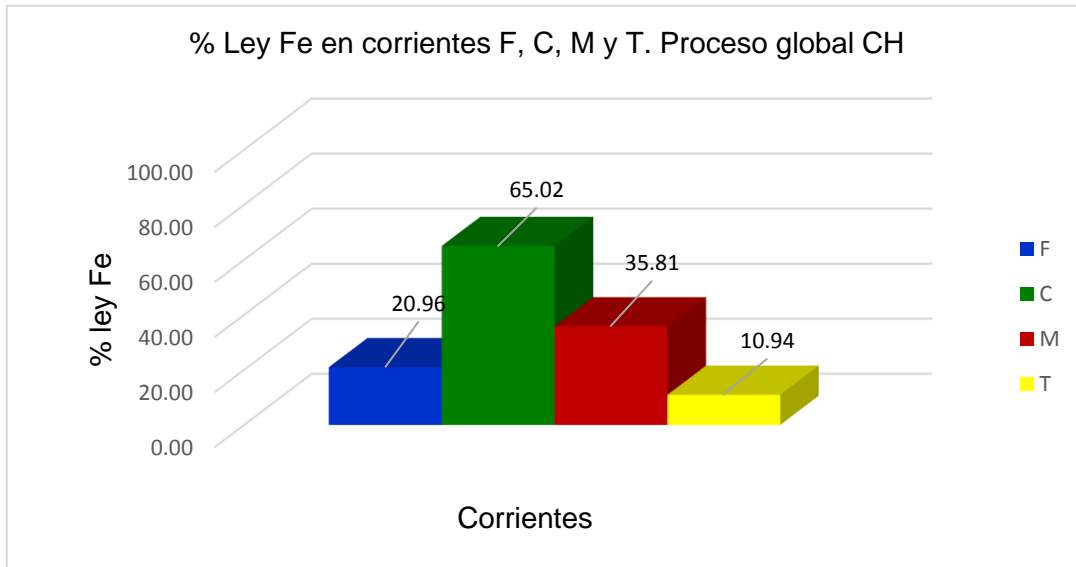


Figura 36. Porcentaje de ley de Fe en corrientes F, C, M y T. Concentración Híbrida gravimétrica-magnética de baja intensidad con 337 rpm.

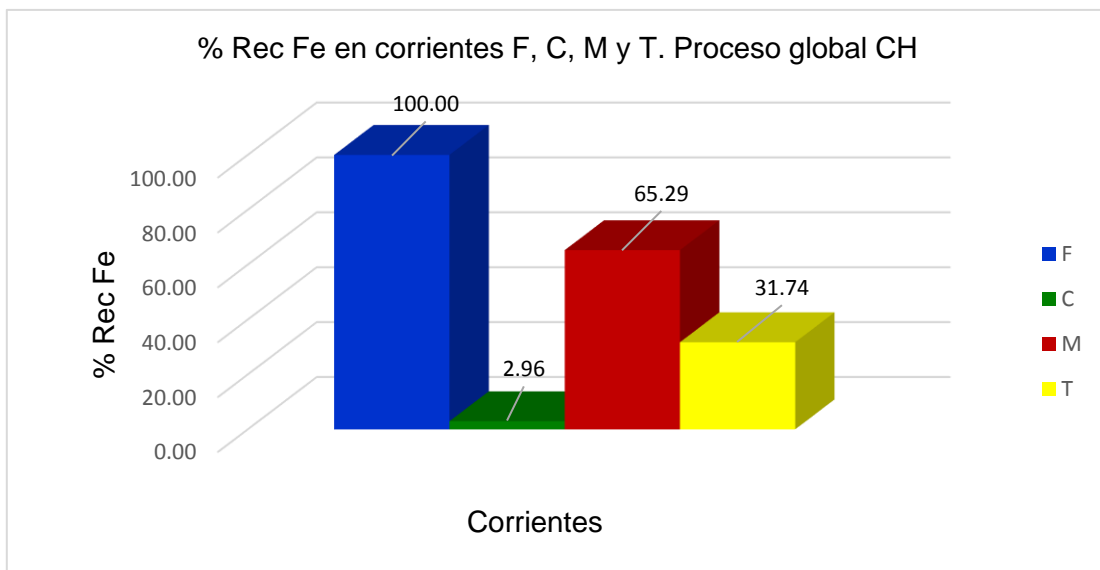


Figura 37. Porcentaje de recuperación de Fe en corrientes F, C, M y T. Concentración Híbrida gravimétrica-magnética de baja intensidad con 337 rpm.

En las leyes y recuperaciones pertenecientes a las diferentes corrientes de Fe, en el balance global del sistema híbrido, se tiene un descenso drástico en la recuperación del concentrado siendo del 2.96 % (**Figura 36**), teniendo en cuenta que en las pruebas anteriores fue del 39.56 % y 24.35 % (prueba 1 y prueba 2). En la corriente de medios hay un aumento en la ley y recuperación; 35.81 % y 65.29 % respectivamente (**Figuras 36 y 37**). De manera final en los estériles se tiene 10.94 porcentaje de ley de Fe y 31.74 porcentaje de recuperación Fe. Con lo anterior se ve el desplazamiento de ambos minerales (magnetita e ilmenita), empobreciendo el concentrado de valores, desviándolos hacia los medios y estériles, provocando que el dispositivo de separación magnética de baja intensidad captara mayor carga con partículas de magnetita que en consecuencia generó mayor atrapamiento de partículas de ilmenita en las partículas de magnetita y saturación más rápida en los ductos.

Balance Metalúrgico en zona de medios. Dispositivo de separación magnética.

A continuación se muestran los gráficos correspondientes a las leyes y recuperaciones de Ti obtenidas en los concentrados magnéticos y no magnéticos de las diferentes corrientes de C.M. con 337 rpm.

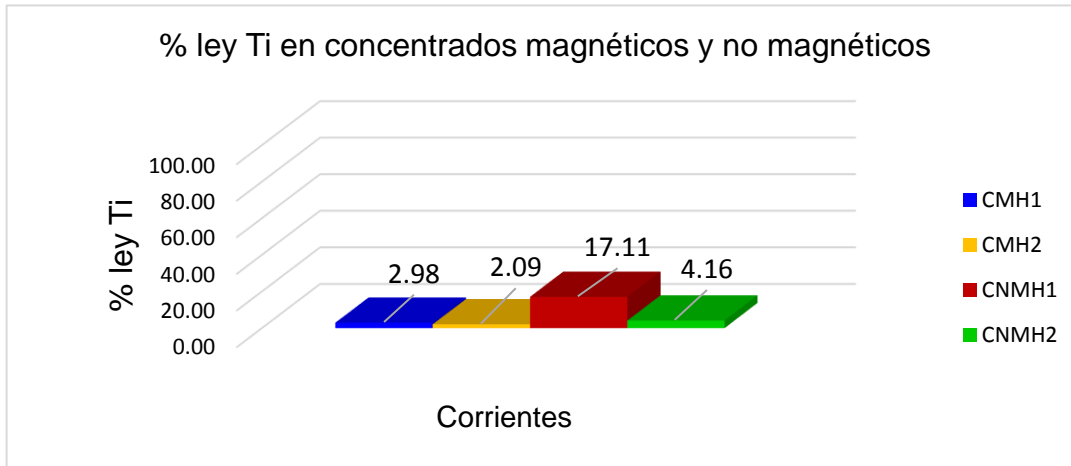


Figura 38. Porcentaje de ley de Ti en corrientes en concentrados magnéticos y no magnéticos provenientes de las corrientes MH1 y MH2. Concentración Híbrida gravimétrica-magnética de baja intensidad con 337 rpm.

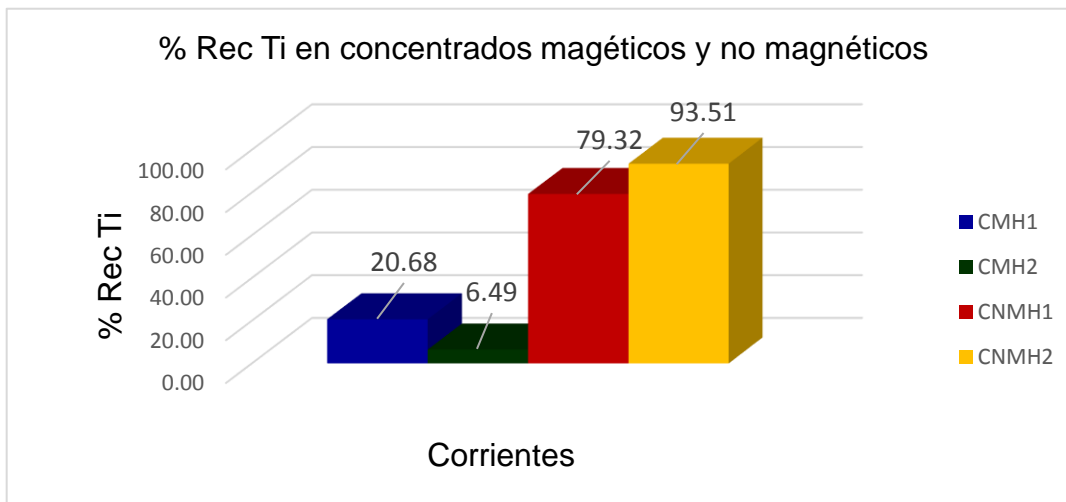


Figura 39. Porcentaje de recuperación de Ti en corrientes en concentrados magnéticos y no magnéticos provenientes de las corrientes MH1 y MH2. Concentración Híbrida gravimétrica-magnética de baja intensidad con 337 rpm.

Nuevamente se tiene la disminución de ley y recuperación de Ti obteniendo porcentajes de 17.11 y 79.23 respectivamente (ver **Figuras 38 y 39**), estas disminuciones corresponden aproximadamente del 5 % para la ley y 20% para la recuperación en comparación a la prueba realizada con las condiciones iniciales. En cuanto a los concentrados magnéticos CMH1 y CMH2, existe en general un aumento en las recuperaciones de titanio, siendo el mayor porcentaje de 20.68 para la primera corriente mencionada (**Figura 39**), indicando que se tuvo un mayor atrapamiento de las partículas de ilmenita en las de magnetita. Por lo que para el dispositivo de separación magnética de baja intensidad el descenso de las pulsaciones es desfavorable, ya que baja las eficiencias del proceso.

3.3.4. Prueba 4. Separación gravimétrica-magnética de baja intensidad con uso de las condiciones, 3.0° de ángulo de inclinación, 367 rpm y 12.5 L/min.

Balance Metalúrgico global

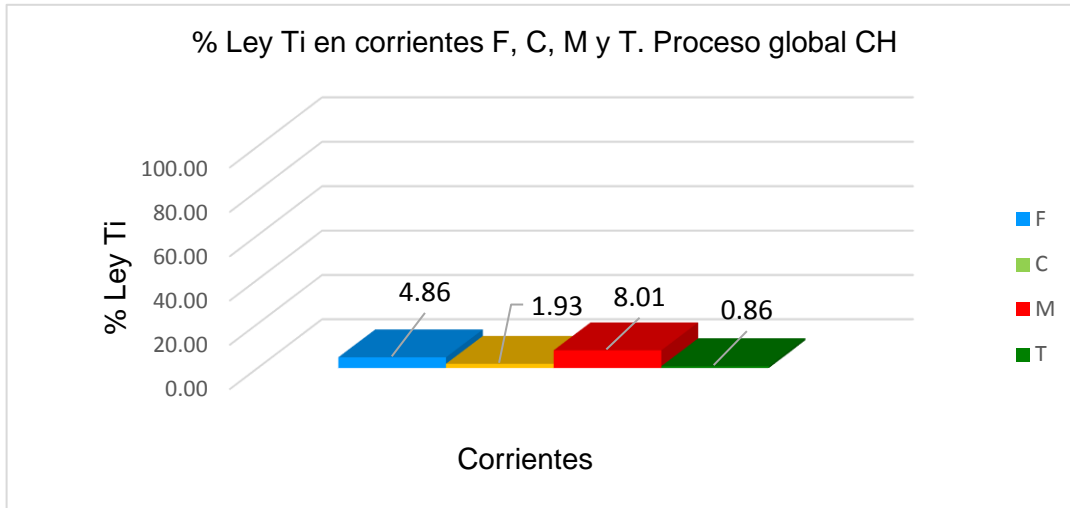


Figura 40. Porcentaje de ley de Ti en corrientes F, C, M y T. Concentración Híbrida gravimétrica-magnética de baja intensidad con 12.5 L/min.

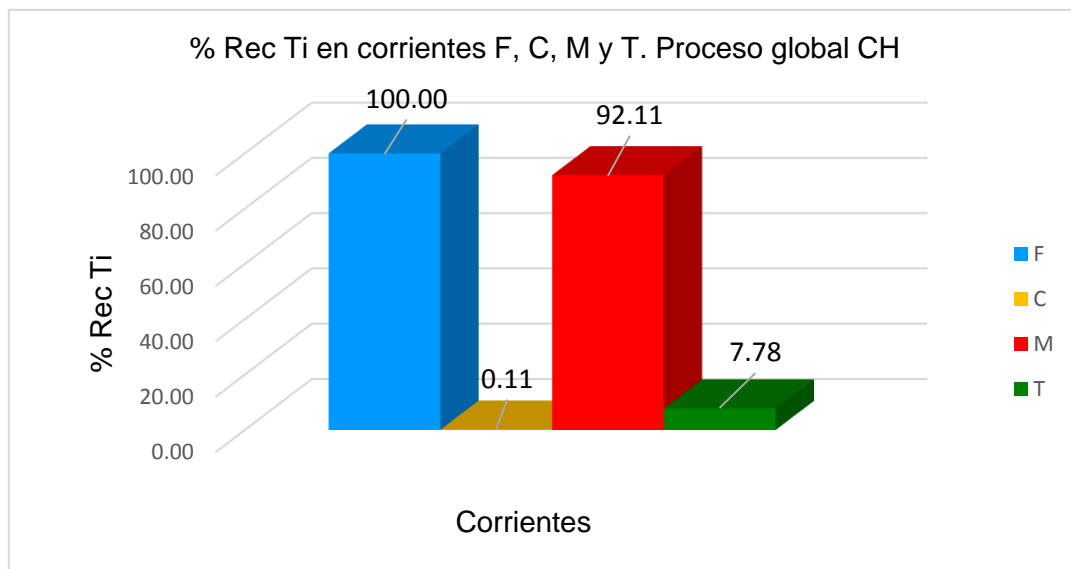


Figura 41. Porcentaje de recuperación de Ti en corrientes F, C, M y T. Concentración Híbrida gravimétrica-magnética de baja intensidad con 12.5 L/min

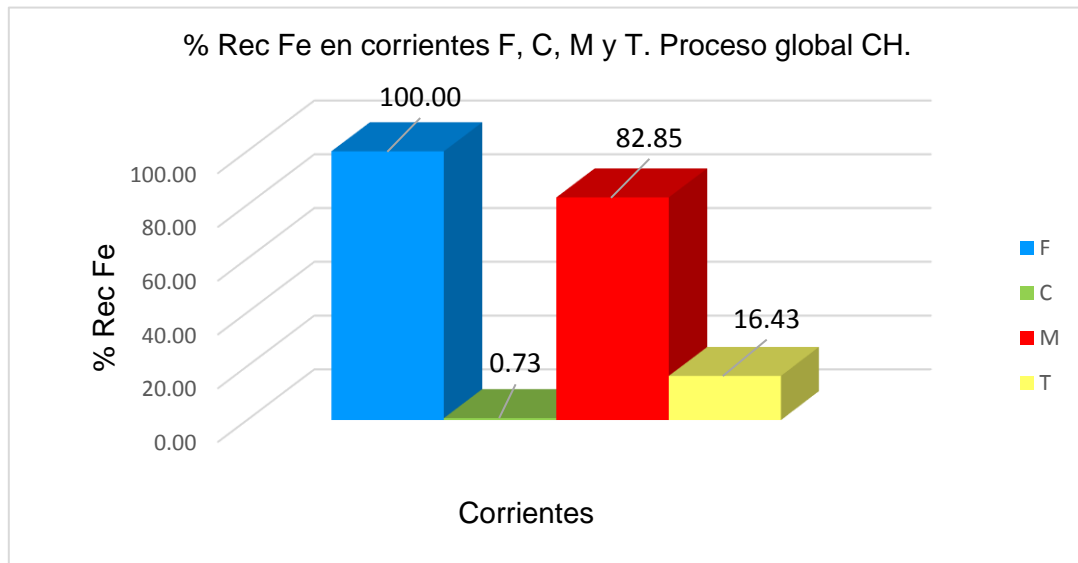


Figura 42. Porcentaje de recuperación de Fe en corrientes F, C, M y T. Concentración Híbrida gravimétrica-magnética de baja intensidad con 12.5 L/min

Con este incremento de flujo de agua, el concentrado de magnetita de la M.W fue prácticamente nulo, ya que la mayor cantidad del mineral, ingreso al dispositivo de separación magnética, esto reflejado en el % de recuperación de hierro del concentrado, siendo de 0.73 % y la recuperación en los medios (82.85 % ver **Figura 42**). En cuanto a las leyes y recuperaciones de titanio los mayores valores se obtuvieron en la corriente de los medios respecto a las pruebas 1, 2 y 3, con 8 % y 92 % respectivamente (Ver **Figuras 40 y 41**). El flujo elevado de agua provoco que la fuerza tangencial resultante de las pulsaciones y este, fuera mayor en la parte cercana a la alimentación de la carga y el centro de la M.W.

En la parte experimental, se tuvieron varias observaciones, las cuales son las siguientes; el mineral sobre la mesa no tuvo una buena separación de los componentes, la caída de este fue más rápida, lo que ocasionaba salpicaduras en el ingreso hacia el dispositivo y por lo tanto perdida de carga, el flujo de la pulpa a través de los ductos fue más acelerado, por lo que gran carga de magnetita no fue atraída por el campo magnético. Este aumento en el flujo fue más desfavorable para el proceso en comparación de las pulsaciones.

Balance Metalúrgico en zona de medios. Dispositivo de separación magnética.

A continuación se muestran los gráficos correspondientes a las leyes y recuperaciones de Ti obtenidas en los concentrados magnéticos y no magnéticos de las diferentes corrientes de C.M. en el balance de medios con 12.5 L/min.

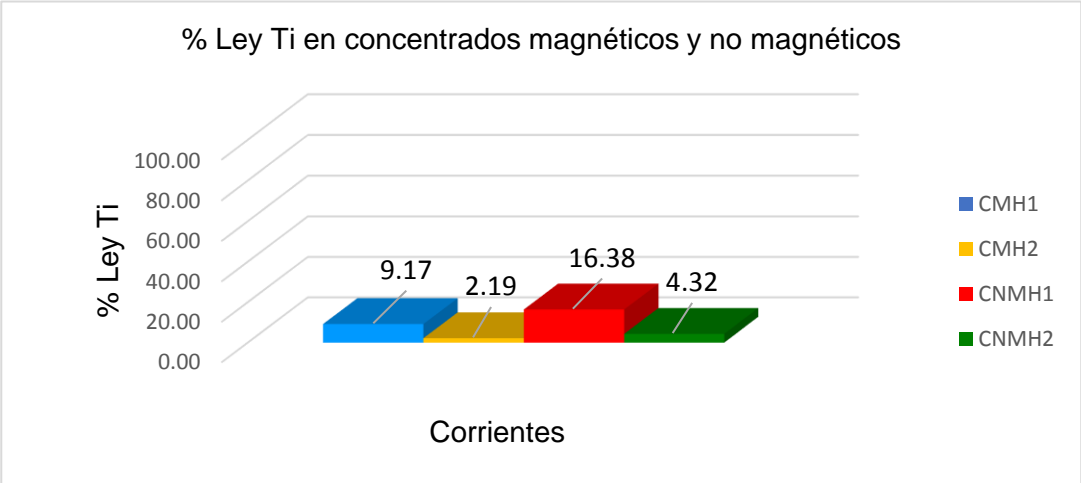


Figura 43. Porcentaje de ley de Ti en corrientes en concentrados magnéticos y no magnéticos provenientes de las corrientes MH1 y MH2. Concentración Híbrida gravimétrica-magnética de baja intensidad con 12.5 L/min.

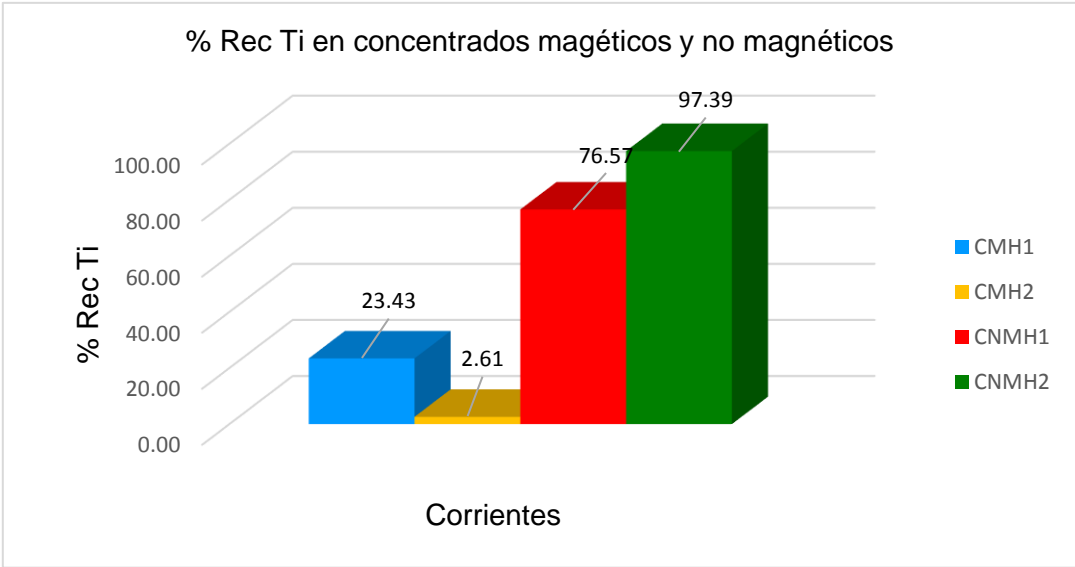


Figura 44. Porcentaje de recuperación de Ti en corrientes en concentrados magnéticos y no magnéticos provenientes de las corrientes MH1 y MH2. Concentración Híbrida gravimétrica-magnética de baja intensidad con 12.5 L/min.

Las **Figuras 43 y 44** reflejan en el proceso de separación magnética de baja intensidad una variación radical en el concentrado magnético y no magnético, al aumentar el flujo de agua (12.5 l/min). En CMH1 se logró una ley de Ti del 9.17 % y una recuperación baja del 23.43 % (ver **Figura 44**), lo que va en contra de lo que se busca en los concentrados magnéticos de esta tesis y se refleja la importancia de tener un proceso pre concentración gravimétrica con buenas condiciones de operación, ya que el dispositivo de separación magnética incrementa las eficiencias de los concentrados en conjunto con el equipo M.W, sin embargo, empleado de forma individual no es funcional. La de Ti ley en la corriente CNMH1 fue de 16.38 %, siendo la más baja respecto a las pruebas 1, 2 y 3.

3.3.5. Prueba 5. Separación gravimétrica-magnética de baja intensidad con uso de las condiciones, 3.0° de ángulo de inclinación, 367 rpm y 2.5 L/min.

De manera siguiente se muestran los resultados de la prueba 5 en la que se aplicaron 2.5 L/min de flujo de agua en las condiciones de concentración gravimétrica.

Balance metalúrgico global

En los gráficos de las **Figuras 45, 46, 47 y 48** se muestran la ley y recuperación de Ti y Fe correspondientes a las corrientes F, C, M y T.

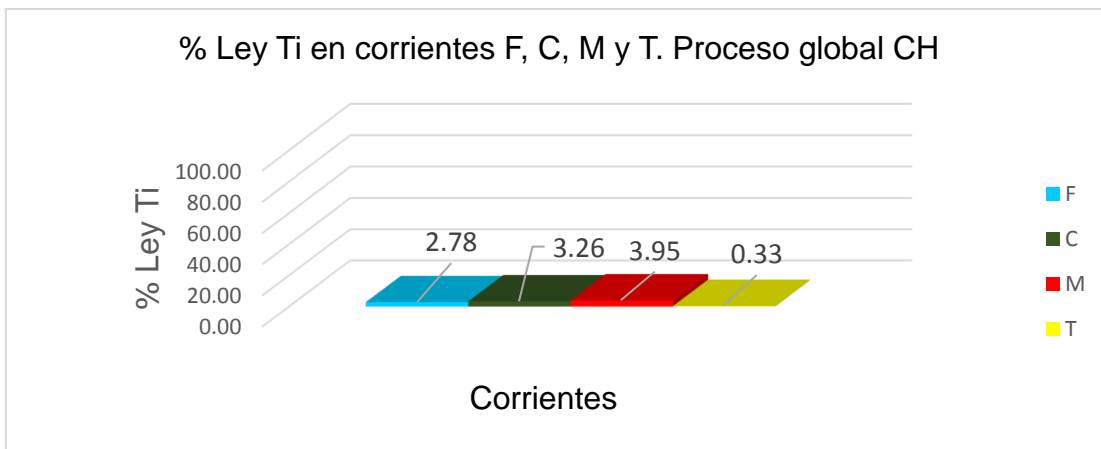


Figura 45. Porcentaje de ley de Ti en corrientes F, C, M y T. Concentración Híbrida gravimétrica-magnética de baja intensidad con 2.5 L/min.

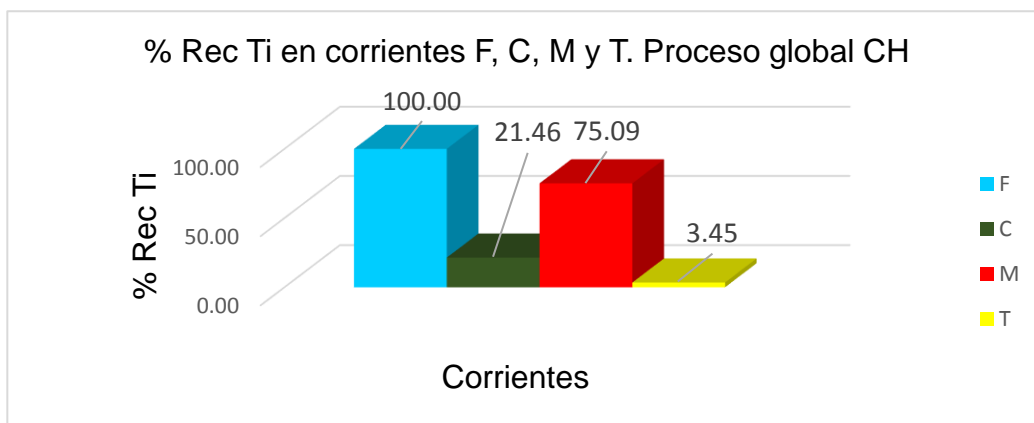


Figura 46. Porcentaje de recuperación de Ti en corrientes F, C, M y T. Concentración Híbrida gravimétrica-magnética de baja intensidad con 2.5 L/min.

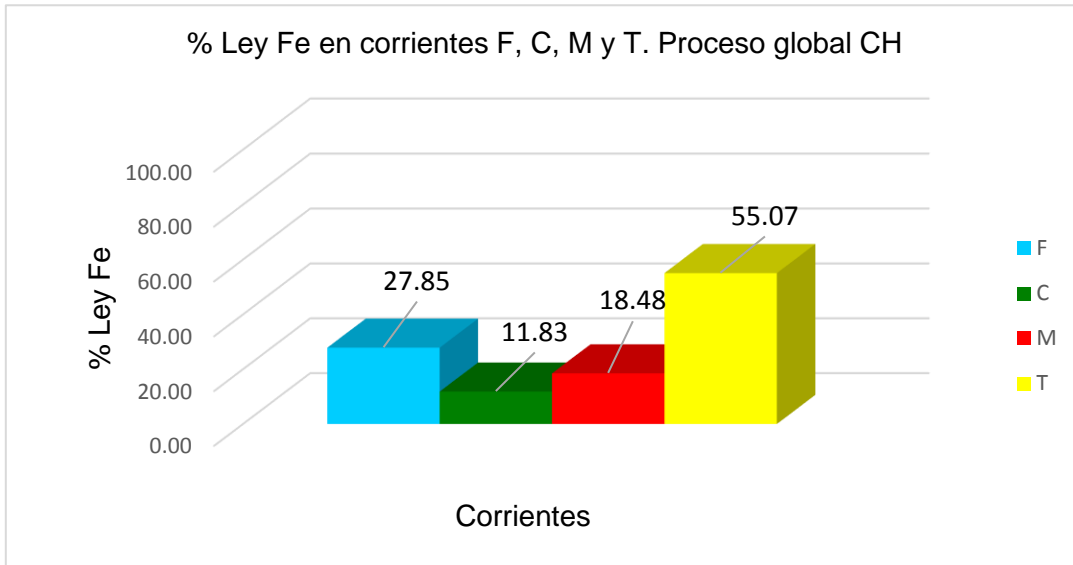


Figura 47. Porcentaje de ley de Fe en corrientes F, C, M y T. Concentración Híbrida gravimétrica-magnética de baja intensidad con 2.5 L/min.

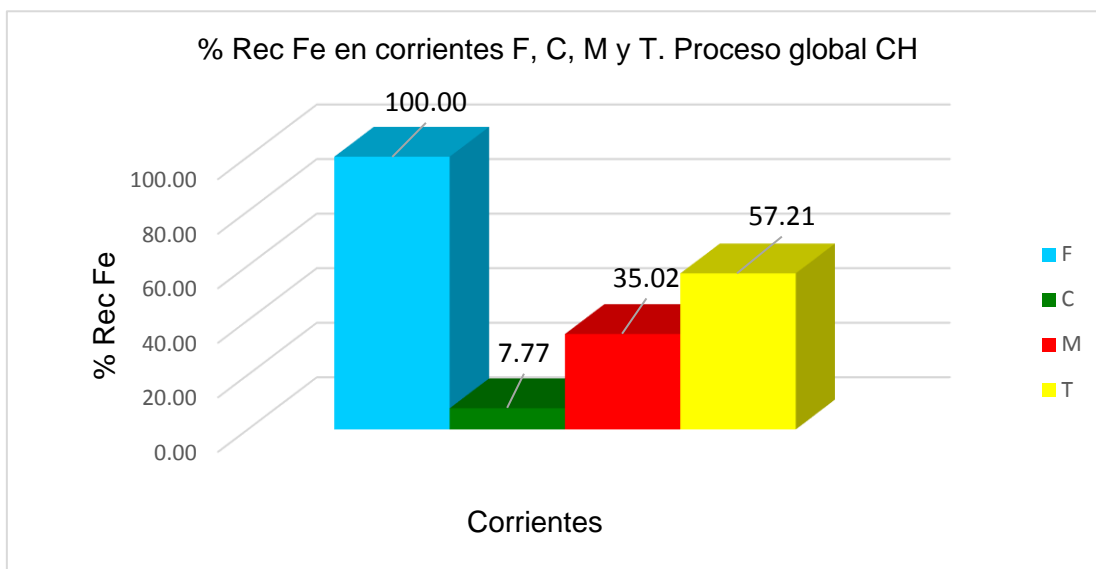


Figura 48. Porcentaje de recuperación de Fe en corrientes F, C, M y T. Concentración Híbrida gravimétrica-magnética de baja intensidad con 2.5 L/min.

El proceso global presenta una mayor ley de Fe en la corriente de estériles, del valor de 55.07 % y recuperación del 57.21 % (**Figuras 47 y 48**). Así pues, el efecto más notable consecuente a la disminución del flujo de agua es la ineficiencia de la capa del fluido para guiar las partículas del mineral hacia la zona del concentrado y medios. El concentrado comprende una ley del 3.26% de Ti y 21.46 % de recuperación (**Figuras 45 y 46**), siendo evidente un empuje de la ilmenita hacia esta corriente y teniendo una ley y recuperación baja de Fe (11.83 % y 7.77 % respectivamente). El flujo de agua fue insuficiente ya que una gran cantidad de mineral se retuvo sobre la Mesa Wilfley. De todas las variaciones realizadas en las variables, la concentración gravimétrica con flujo de agua de 2.5 L/ min fue la más desfavorable.

3.3.6. Comparación de leyes de hierro y titanio entre las cargas alimentadas en las diferentes pruebas.

Debido a que se observó en las pruebas 2, 3, 4 y 5, aumentos en las leyes de la corriente de medios respecto a las condiciones iniciales del proceso, a continuación se presentan gráficos comparativos de las leyes de Fe y Ti en la alimentación de cada prueba en las siguientes figuras y su análisis correspondiente.

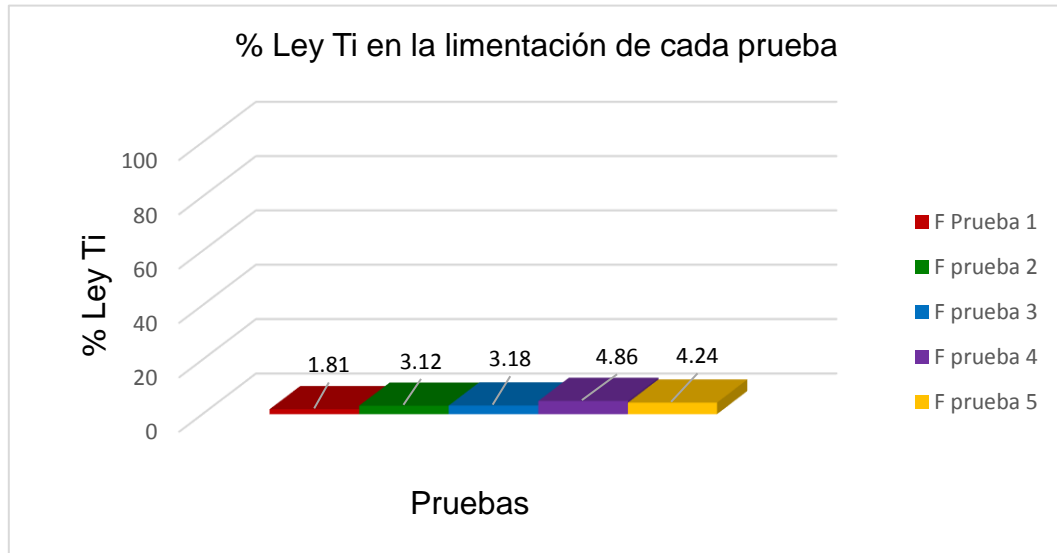


Figura 49. Porcentaje de Ley de Ti en la alimentación de las pruebas 1, 2, 3, 4 y 5.

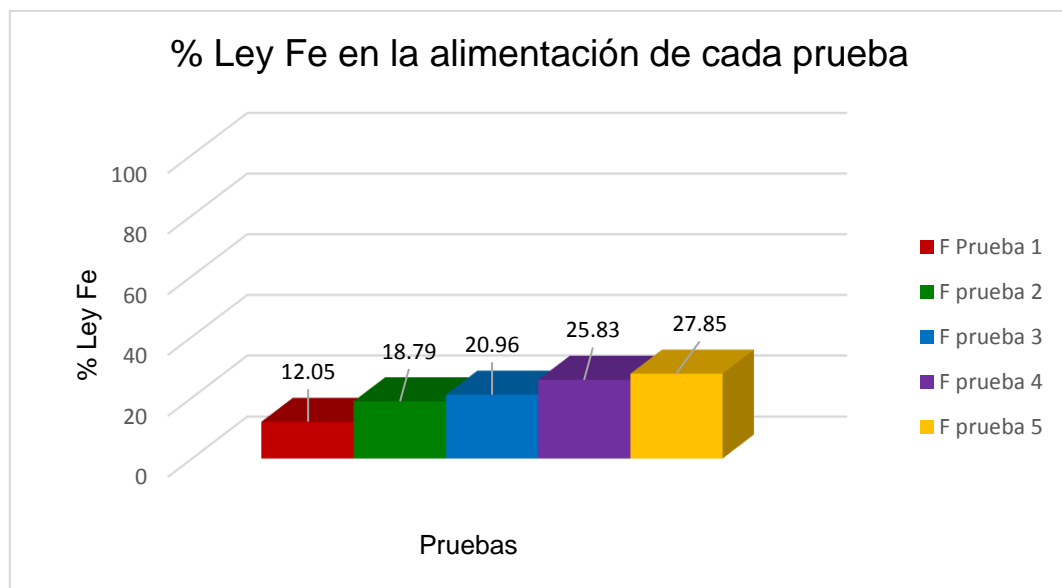


Figura 50. Porcentaje de Ley de Fe en la alimentación de las pruebas 1, 2, 3, 4 y 5.

Realizando un análisis general de las leyes y recuperaciones obtenidas en las diferentes pruebas, existen aspectos importantes a mencionar. Para la realización de las pruebas, se introdujo una cantidad de mineral de 4 Kg en la tolva de alimentación a Mesa Wilflye. Al ser un sistema de operación batch, es decir, de carga y descarga del concentrado, cada prueba tuvo una duración de 2 minutos, ya que de manera previa se determinó que, en este tiempo de operación no había saturación de material magnético en los ductos. Por tanto, la masa de mineral que es procesado por el sistema híbrido está sujeto al tiempo de saturación de las mangueras. Esta dificultad puede ser resulta, incrementado el diámetro de los ductos.

Tomando en cuenta lo antes mencionado, se puede abordar el aumento visible de las leyes de hierro y de titanio en la alimentación, tras la realización de cada prueba. Haciéndose una comparativa para las leyes de Ti y Fe, ilustradas en las **Figuras 49 y 50** respectivamente.

En la **Figura 49**, se observa el aumento de la ley de titanio conforme la realización de las pruebas, de la manera siguiente.

P1= 1.81 % Ley Ti < P2= 3.12 % Ley Ti < P3= 3.18 % Ley Ti < P4= 4.86 % Ley Ti > P5= 4.24 % Ley Ti

- P1: Prueba 1
- P2: Prueba 2
- P3: Prueba 3
- P4: Prueba 4
- P5: Prueba 5

Para las leyes de hierro en la alimentación se tiene el mismo fenómeno (ver **Figura 50**), con el siguiente incremento

P1= 12.05 % Ley Fe < P2= 18.79 % Ley Fe < P3= 20.96 % Ley Fe < P4= 25.83 %-Ley Fe < P5= 27.85 % Ley Fe

El aumento de las leyes en la alimentación antes descritos se debe al suministro de la alimentación hacia el equipo Mesa Wilfley, por medio del alimentador. En la **Figura 51** se muestra la Mesa Wilfley con el dispositivo alimentador.



Figura 51. Alimentador de carga hacia Mesa Wilfley.

El ingreso del flujo másico de sólidos hacia el equipo ocurre de la siguiente forma; en primera instancia, desciende desde la tolva hacia la parte trasera del alimentador, en la cual, se empieza a acumular el material. El alimentador posee una cierta inclinación, y a través de vibraciones y del material acumulado, se origina una trayectoria del mineral que va desde la parte trasera hasta la parte delantera, donde se da la caída de este hacia el canal de alimentación de la mesa (ver **Figura 51**). Los estériles presentan la menor densidad entre los componentes, por lo que puede que sean los primeros en acumularse en la parte final del alimentador, provocando así la disminución de la ley en las primeras pruebas. Al transcurrir las pruebas, es posible que la cantidad de valores se hubiese acumulado, justificando así el incremento en la ley de Fe y Ti.

Capítulo 4. Conclusiones

- Las condiciones más favorables para el proceso híbrido Mesa Wilfley-Concentración magnética son: ángulo de inclinación 3.0° , flujo de agua 7.5 L/min y 367 rpm en pulsaciones, con una recuperación de Ti del 88.6 %.
- Las condiciones anteriores, dieron como resultado 60.01% de ley de hierro en el concentrado de magnetita y 22 % de en grado de titanio en el concentrado de ilmenita.
- El incremento en las pulsaciones suministradas al equipo Mesa Wilfley son directamente proporcionales a los grados y recuperaciones del proceso híbrido, hasta un valor de 397 rpm.
- El flujo de agua suministrado al equipo Mesa Wilfley, es directamente proporcional a los grados y recuperaciones del proceso híbrido entre los valores 2.5 a 12.5 L/min, después de este último, se obtienen grados y recuperaciones bajos.

Bibliografía y mesografía

- [1] Wills, Barry. A., (2006), *Mineral processing technology*, Elsevier Science & Technology Books. Pp 238-245, 353-359.
- [2] Mular, A., Haibev, N., y Barratt, J., (2002). *Mineral processing plant design, practice and control*, USA, Society for mining, Metallurgy and exploration, pp 142-148, 947- 954.
- [3] Elsyever, P., (1965) *Mineral Processing*, Elsevier applied science publishers, London, pp. 256 257. 571-576, 582-585.
- [4] Fuerstenau, C., Han, N., (2009), *Principles of mineral processing*, USA, Society for Mining Metallurgy, and Exploration Inc., pp 173-184.
- [5] Premaratne, W, Rowson, N. (2003).,Physical Separation in Science and Engineering. 18-22 pp.
- [6] Rabie, Sayed. (2009). *Optimization of shaking table and dry magnetic separation on recovery of Egyptian placer cassiterite using experimental design technique*. The Journal of Ore Dressing. pp 1-9.
- [7] Williams, G. Steenkamp, J. (2006). Heavy mineral processing at Richards Bay Minerals. *Southern African Pirometallurgy*. Recuperado desde https://publication/237216272_Heavy_Mineral_Processing_at_Richards_Bay_Minerals
- [8]<https://www.911metallurgist.com/magnetite-concentration/> [Fecha de consulta, 18 de Julio del 2019]
- [9] <https://www.sandatlas.org/heavy-mineral-sand/> [Fecha de consulta, 21 de enero del 2019]

Anexo A

En el siguiente Figura se muestra el gráfico de % Ac(-) vs tamaño de partícula del mineral de playa con el que se trabajó.

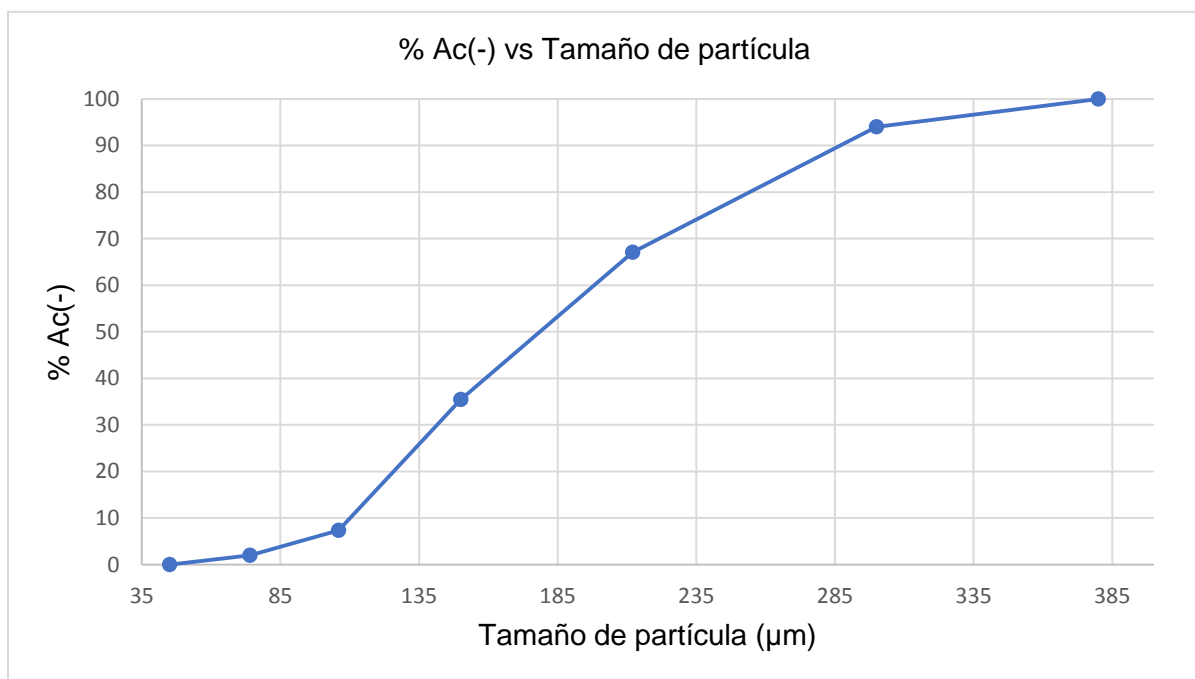


Figura 51. Gráfico % Ac (-) Vs Tamaño de partícula.

Anexo B

Balances metalúrgicos de proceso global de concentración híbrida y balances en zona de medios

Prueba 1. Condiciones de operación: 367 rpm, 7.5 l/min y 3.0 °.

Tabla 9. Balance metalúrgico del proceso global de concentración híbrida.

Producto	Peso por corriente (g.)	% Ley Fe	% Ley Ti	CM Fe (g)	CM Ti (g)	% Rec Fe	% Rec Ti
F	584.8	13.05	1.81	76.31	10.60	100.0	100.0
C	50.3	60.01	1.34	30.19	0.67	39.56	6.36
M	270.90	12.64	3.47	32.55	9.39	42.65	88.66
T	263.6	5.15	0.20	13.58	0.53	17.79	4.98

Tabla 10. Balance metalúrgico en zona de medios. Proceso SM. Prueba 1.

Producto	Peso por corriente (g.)	% Ley Fe	% Ley Ti	CM Fe (g)	CM Ti (g)	% Rec Fe	% Rec Ti
MH1	58.20	49.10	12.82	28.58	7.46	100.00	100.00
CMH1	27.70	57.14	2.48	15.83	0.69	55.39	9.23
CNMH1	30.50	41.80	22.21	12.75	6.77	44.61	90.77
MH2	212.70	1.87	0.91	3.97	1.93	100.00	100.00
CMH2	2.60	58.92	2.39	1.53	0.06	38.60	3.22
CNMH2	210.10	1.16	0.89	2.44	1.87	61.40	96.78

MEDIOS TOTALES	Peso por corriente (g.)	% Ley Fe	%Ley Ti	CM Fe (g)	CM Ti	% Rec Fe	% Rec Ti
	270.90	12.01	3.47	32.55	9.39	42.65	88.66

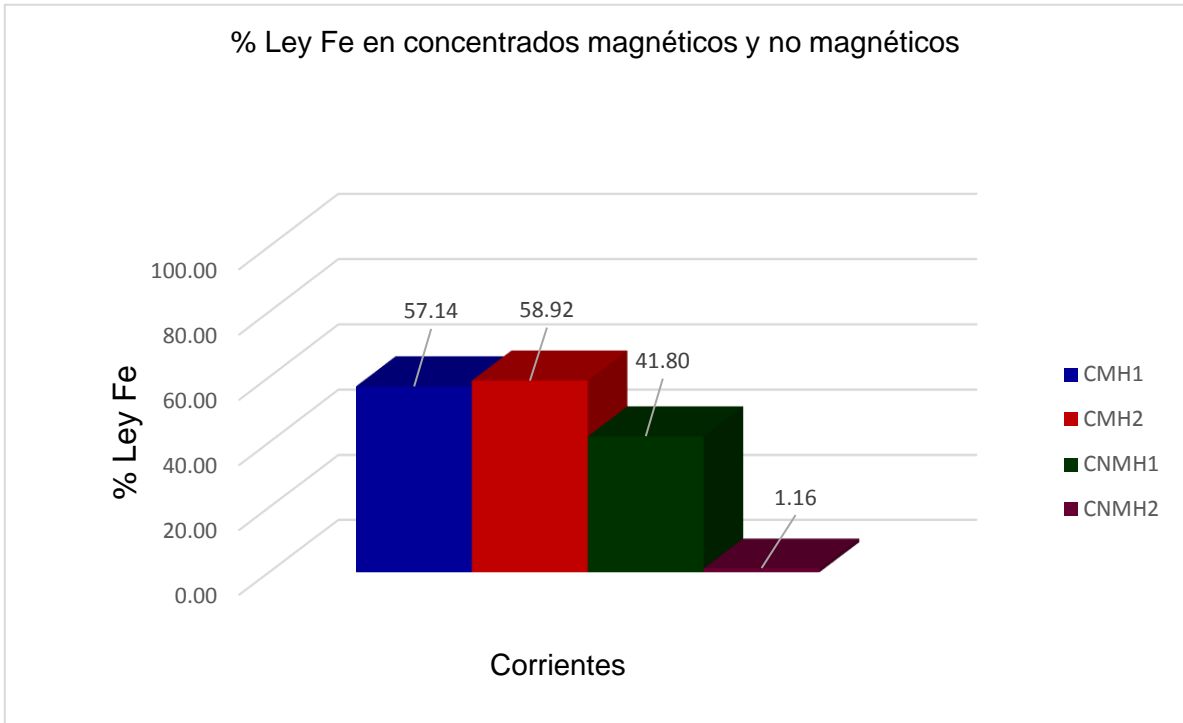
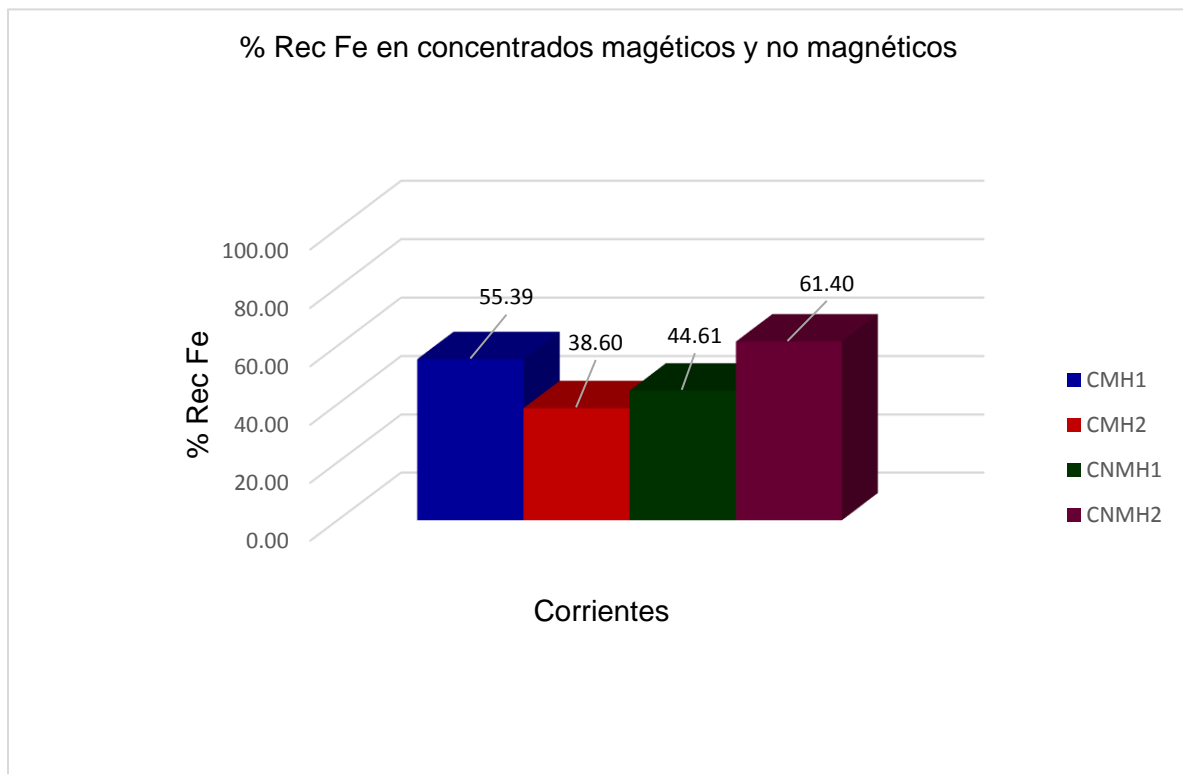


Figura 52. Gráfico de % ley de Fe en concentrados magnéticos y no magnéticos obtenidos en MH1 y MH2. SM.



Producto	Peso por corriente (g.)	% Ley Fe	% Ley Ti	CM Fe (g)	CM Ti (g)	% Rec Fe	% Rec Ti
F	579.4	18.70	3.12	108.33	18.08	100.00	100.00
C	45.4	58.11	6.95	26.38	3.15	24.35	17.44
M	252.50	21.76	5.74	54.95	14.50	50.73	80.21
T	281.5	9.59	0.15	27.00	0.42	24.92	2.34

Figura 53. Gráfico de % rec de Fe en concentrados magnéticos y no magnéticos obtenidos en MH1 y MH2. SM.

Prueba 2. Condiciones de operación: 397 rpm, 7.5 l/min y 3.0 °.

Tabla 11. Balance metalúrgico del proceso global de concentración híbrida.

Tabla 12. Balance metalúrgico en zona de medios. Proceso SM.

Producto	Peso por corriente (g.)	% Ley Fe	% Ley Ti	CM Fe (g)	CM Ti (g)	% Rec Fe	% Rec Ti
MH1	97.30	44.69	13.15	43.48	12.79	100.00	100.00
CMH1	32.90	53.74	3.45	17.68	1.14	40.66	8.88
CNMH1	64.40	40.06	18.10	25.80	11.66	59.34	91.12
MH2	155.20	7.39	1.10	11.47	1.71	100.00	100.00
CMH2	5.40	56.00	1.68	3.02	0.09	26.36	5.30
CNMH2	149.80	5.64	1.08	8.45	1.62	73.64	94.70
MEDIOS TOTALES	Peso por corriente (g.)	% Ley Fe	%Ley Ti	CM Fe (g)	CM Ti	% Rec Fe	% Rec Ti
	252.50	21.76	5.74	54.95	14.50	50.73	80.21

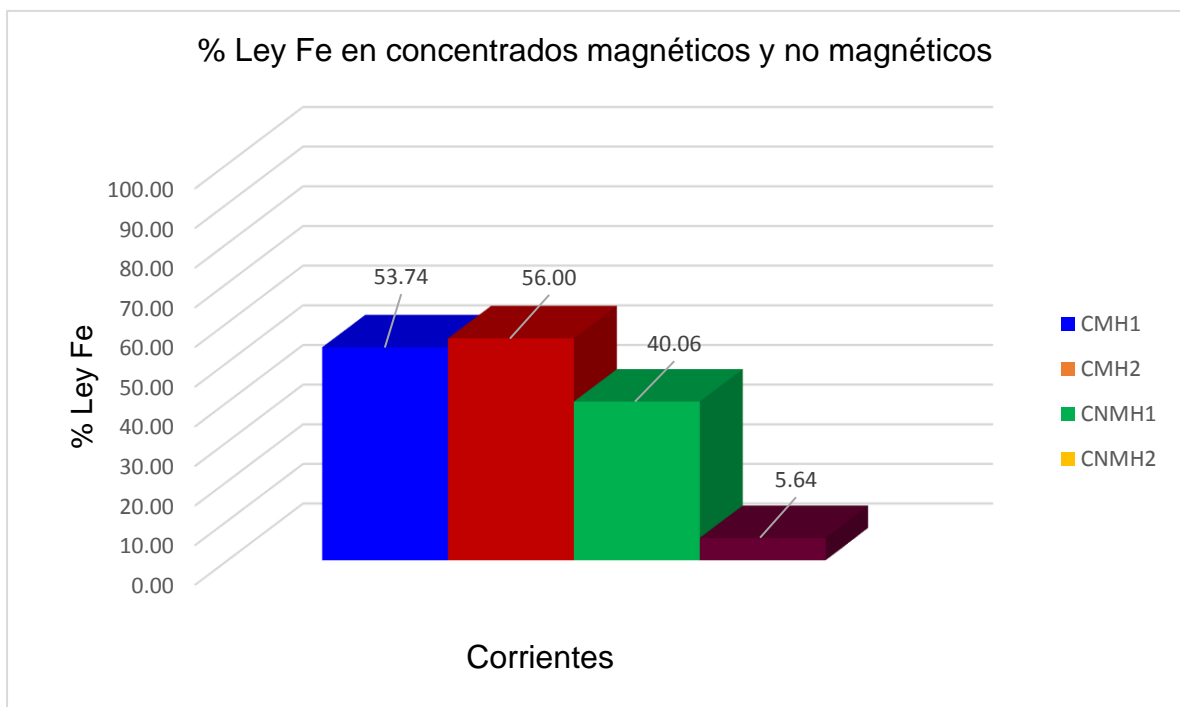


Figura 54. Gráfico de % ley de Fe en concentrados magnéticos y no magnéticos obtenidos en MH1 y MH2. SM.

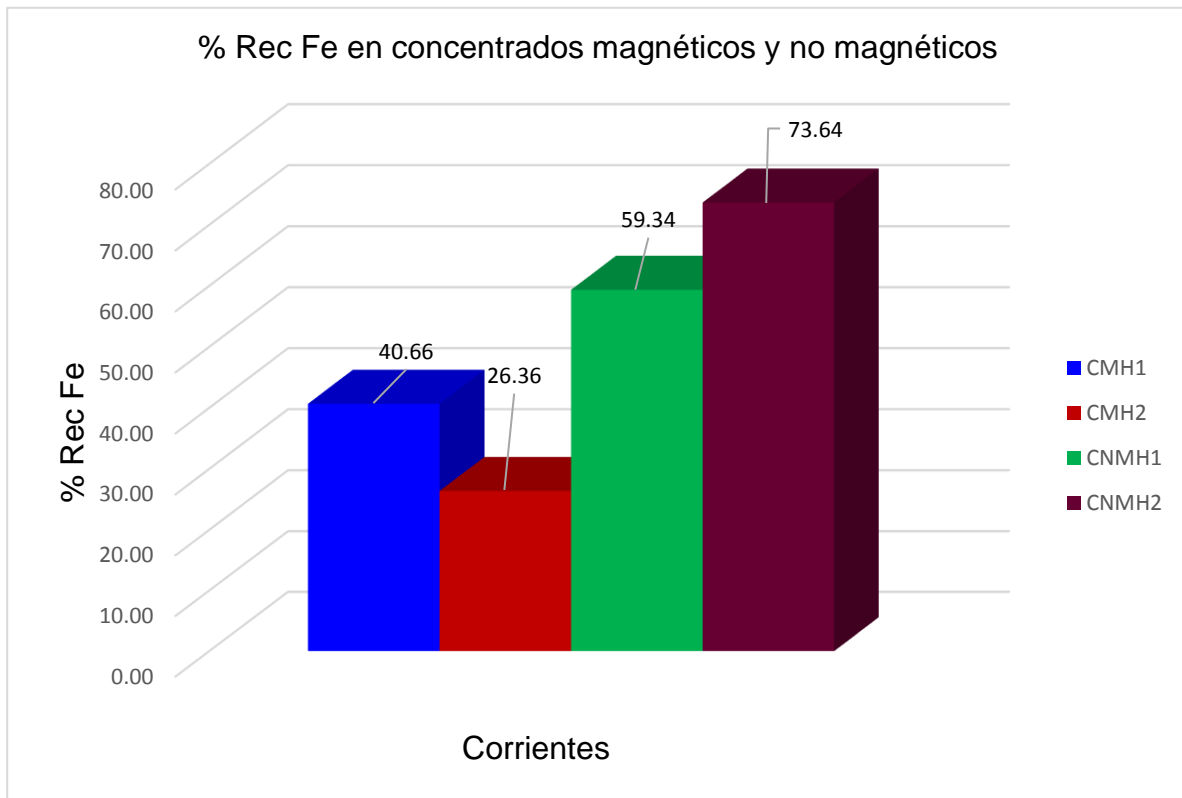


Figura 55. Gráfico de % rec. De Fe en concentrados magnéticos y no magnéticos obtenidos en MH1 y MH2. SM.

Prueba 3. Condiciones de operación: 337 rpm, 7.5 l/min, 3.0 °

Tabla 13. Balance metalúrgico del proceso global de concentración híbrida.

Producto	Peso por corriente (g.)	% Ley Fe	% Ley Ti	CM Fe (g)	CM Ti (g)	% Rec Fe	% Rec Ti
F	586.1	20.96	3.18	122.86	18.66	100	100
C	5.6	65.02	2.15	3.64	0.12	2.96	0.65
M	224.00	35.81	5.68	80.22	12.72	65.29	68.18

T	356.5	10.94	1.63	39.00	5.82	31.74	31.18
---	-------	-------	------	-------	------	-------	-------

Tabla 14. Balance metalúrgico en zona de medios. Proceso SM. Prueba 3

Producto	Peso por corriente (g.)	% Ley Fe	% Ley Ti	CM Fe (g)	CM Ti (g)	% Rec Fe	% Rec Ti
MH1	83.90	48.82	8.64	40.96	7.25	100.00	100.00
CMH1	50.30	50.25	2.98	25.28	1.50	61.71	20.68
CNMH1	33.60	46.68	17.11	15.68	5.75	38.29	79.32
MH2	140.10	28.02	3.91	39.26	5.48	100.00	100.00
CMH2	17.00	57.45	2.09	9.77	0.36	24.88	6.49
CNMH2	123.10	23.96	4.16	29.49	5.12	75.12	93.51
MEDIOS TOTALES	Peso por corriente (g.) 224.00	% Ley Fe 35.81	%Ley Ti 5.68	CM Fe (g) 80.22	CM Ti 12.72	% Rec Fe 65.29	% Rec Ti 68.18

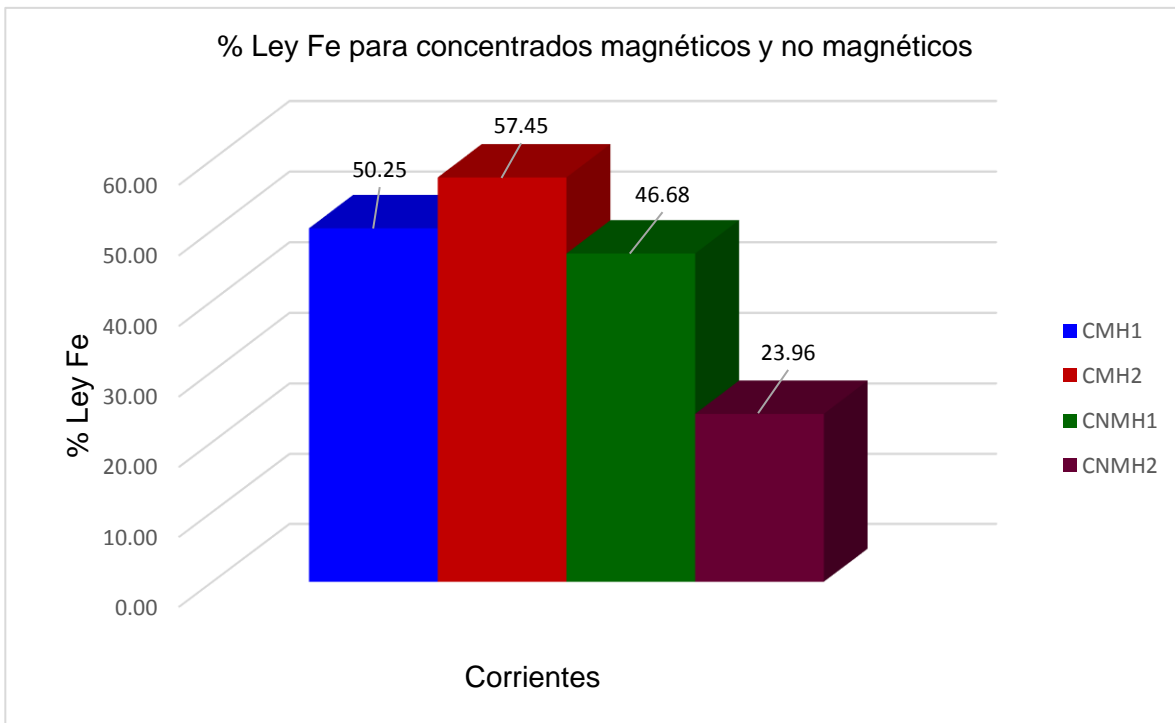


Figura 56. Gráfico de % ley de Fe en concentrados magnéticos y no magnéticos obtenidos en MH1 y MH2. SM.

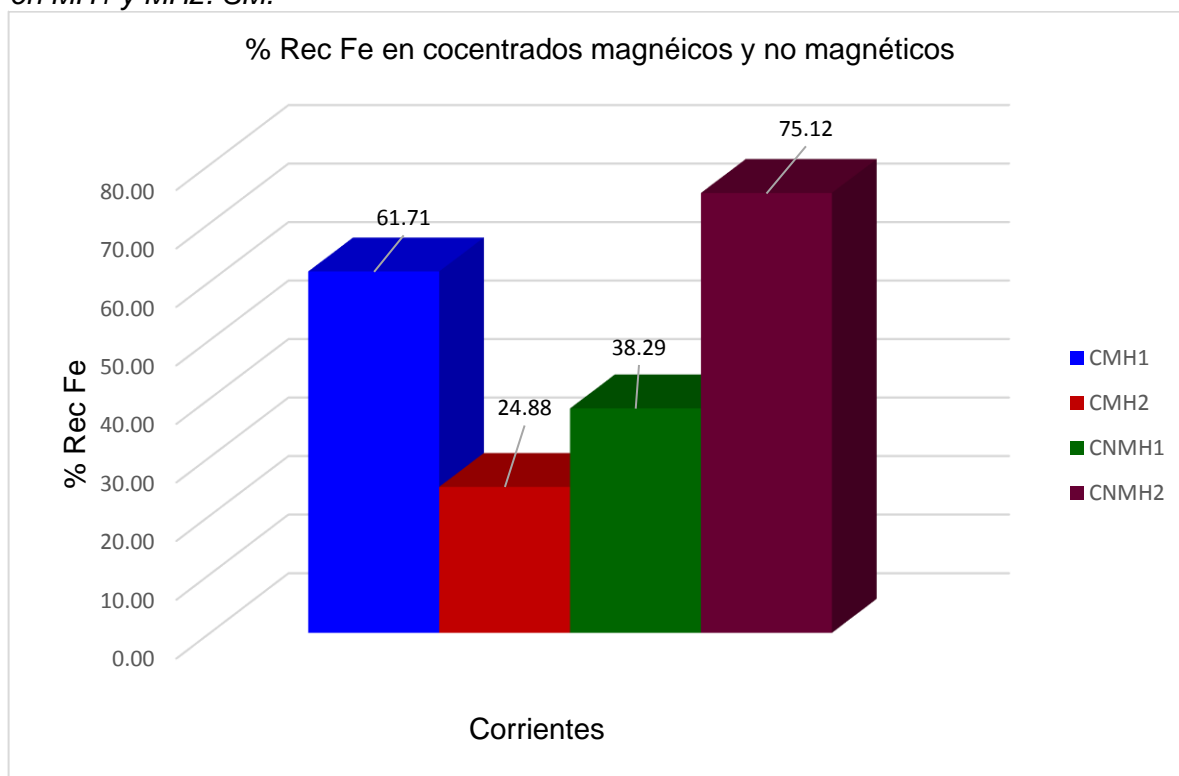


Figura 57. Gráfico de % rec de Fe en concentrados magnéticos y no magnéticos obtenidos en MH1 y MH2. SM.

Prueba 4. Condiciones: 367 rpm, 12.5 l/min y 3.0°

Tabla 14. Balance metalúrgico del proceso global de concentración híbrida.

Producto	Peso por corriente (g.)	% Ley Fe	% Ley Ti	CM Fe (g)	CM Ti (g)	% Rec Fe	% Rec Ti
F	608.2	25.83	4.86	157.07	29.53	100.00	100.00
C	1.7	66.60	1.93	1.15	0.03	0.73	0.11
M	339.49	38.33	8.01	130.13	27.20	82.85	92.11
T	267.0	9.66	0.86	25.80	2.30	16.43	7.78

Tabla 15. Balance metalúrgico en zona de medios. Proceso SM. Prueba 4

Producto	Peso por corriente (g.)	% Ley Fe	% Ley Ti	CM Fe (g)	CM Ti (g)	% Rec Fe	% Rec Ti
MH1	134.09	51.99	13.83	69.72	18.55	100.00	100.00
CMH1	47.39	63.99	9.17	30.33	4.35	43.50	23.43
CNMH1	86.70	45.44	16.38	39.39	14.20	56.50	76.57
MH2	205.40	29.41	4.21	60.41	8.65	100.00	100.00
CMH2	10.30	38.68	2.19	3.98	0.23	6.60	2.61
CNMH2	195.10	28.92	4.32	56.42	8.43	93.40	97.39
	134.09	51.99	13.83	69.72	18.55	100.00	100.00
MEDIOS TOTALES	Peso por corriente (g.)	% Ley Fe	%Ley Ti	CM Fe (g)	CM Ti (g)	% Rec Fe	% Rec Ti
	339.49	38.33	8.01	130.13	27.20	82.85	92.11

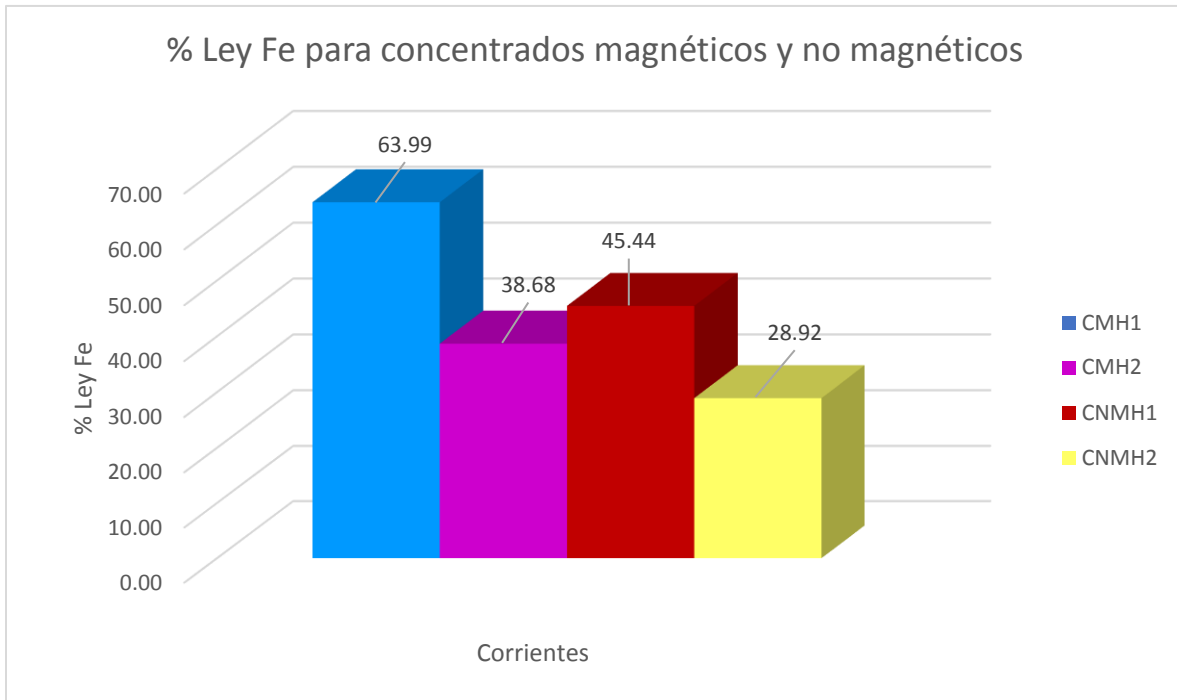


Figura 58. Gráfico de % ley de Fe en concentrados magnéticos y no magnéticos obtenidos en MH1 v MH2. SM.

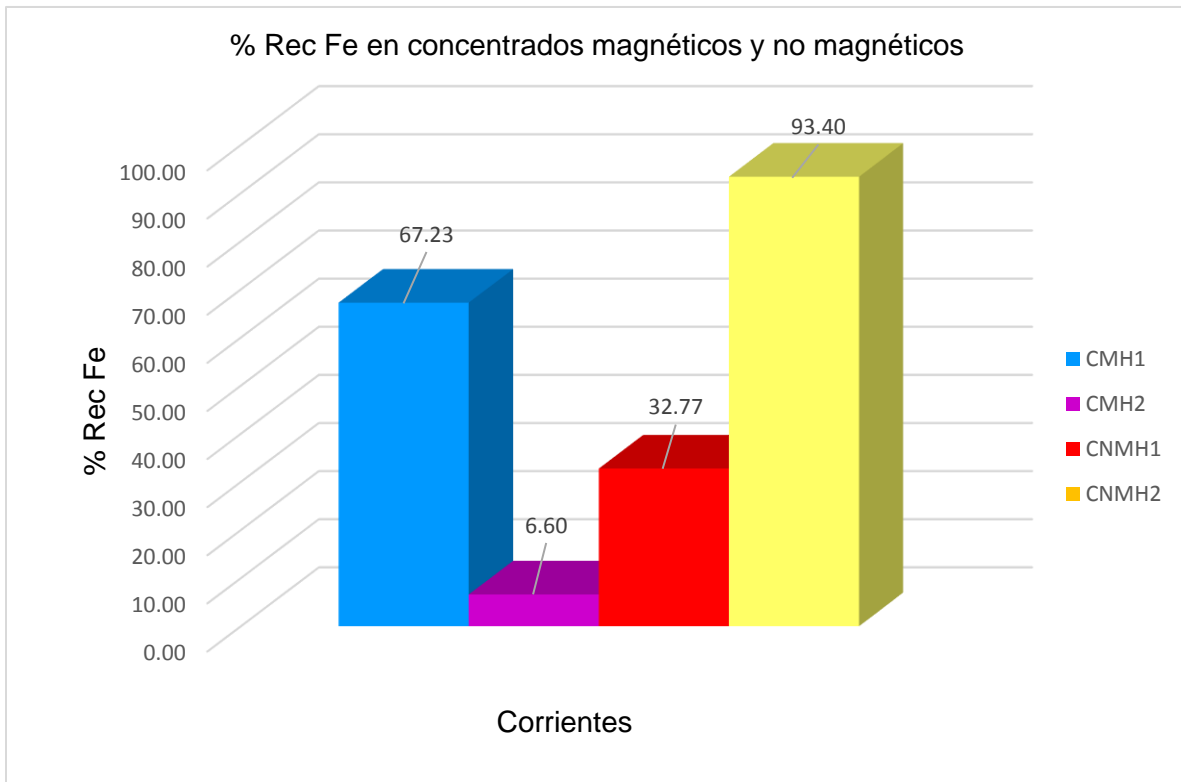


Figura 59. Gráfico de % rec de Fe en concentrados magnéticos y no magnéticos obtenidos en MH1 y MH2. SM.

Prueba 5. Condiciones: 367 rpm, 2.5 l/min y 3.0°

Tabla 16. Balance metalúrgico del proceso global de concentración híbrida.

Producto	Peso por corriente (g.)	% Ley Fe	% Ley Ti	CM Fe (g)	CM Ti (g)	% Rec Fe	% Rec Ti
F	554.6	27.85	4.24	154.48	23.52	100	100
C	101.4	11.83	11.26	12.00	11.42	7.77	48.55
M	292.70	18.48	3.95	54.09	11.57	35.02	49.19
T	160.5	55.07	0.33	88.38	0.53	57.21	2.26

Tabla 17. Balance metalúrgico en zona de medios. Proceso SM.

Producto	Peso por corriente (g.)	% Ley Fe	% Ley Ti	CM Fe (g)	CM Ti (g)	% Rec Fe	% Rec Ti
MH1	109.60	40.13	9.51	43.99	10.43	100.00	100.00
CMH1	23.50	57.28	3.57	13.46	0.84	30.60	8.06
CNMH1	86.10	35.45	11.14	30.53	9.59	69.40	91.94
MH2	183.10	5.52	0.62	10.11	1.14	100.00	100.00
CMH2	8.00	47.43	1.95	3.79	0.16	37.55	13.70
CNMH2	175.10	3.60	0.56	6.31	0.98	62.45	86.30
MEDIOS TOTALES	Peso por corriente (g.)	% Ley Fe	%Ley Ti	CM Fe (g)	CM Ti	% Rec Fe	% Rec Ti
	292.70	18.48	3.95	54.09	11.57	35.02	49.19

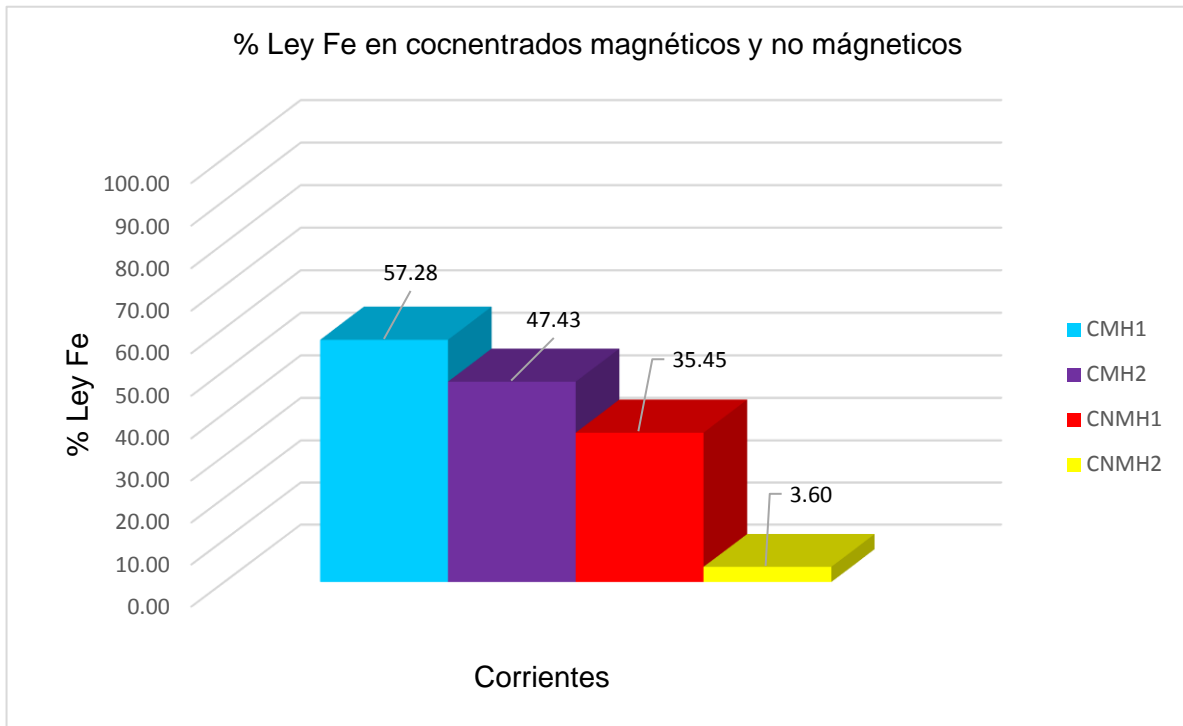


Figura 60. Gráfico de % ley de Fe en concentrados magnéticos y no magnéticos obtenidos en MH1 y MH2. SM.

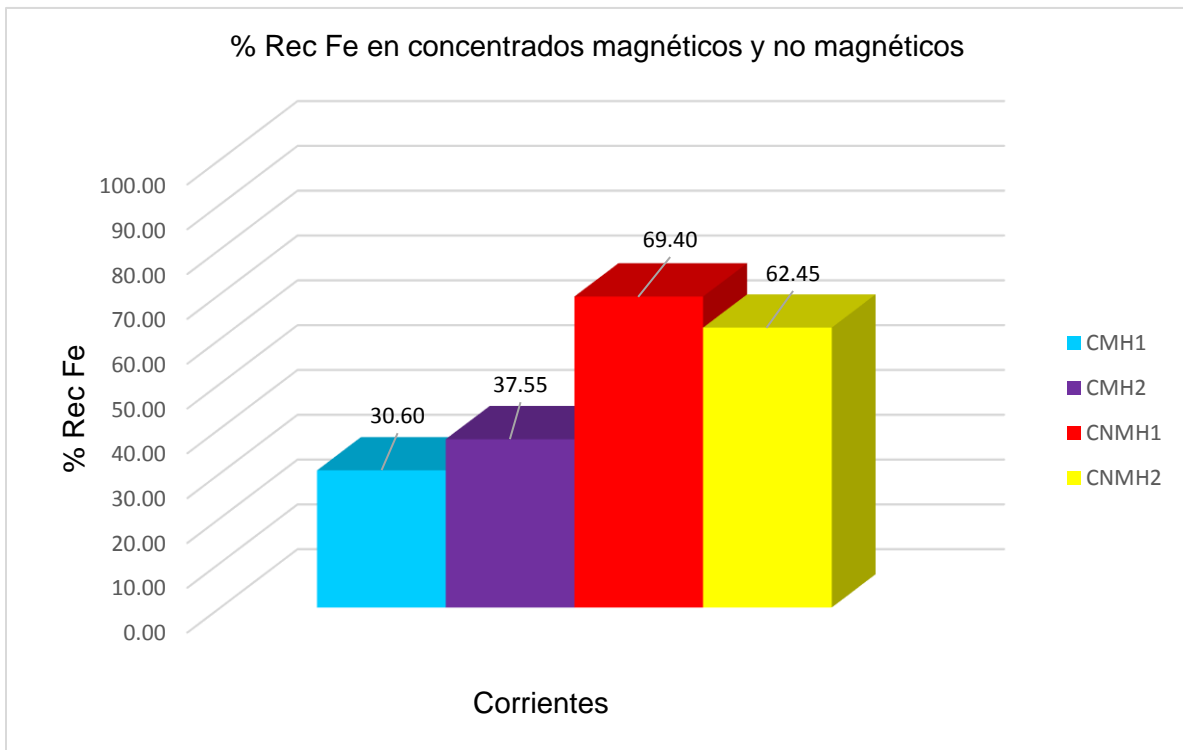


Figura 61. Gráfico de % rec. De Fe en concentrados magnéticos y no magnéticos obtenidos en MH1 y MH2. SM.