

**ESTUDIO DE CONCENTRACIÓN DE MINERALES DE HIERRO POR
MÉTODOS FÍSICOS PARA EL PROCESO DE SINTERIZACION EN
ACERÍAS PAZ DEL RIO S.A**

**LILI YOHANA ÁLVAREZ ROJAS
MILER ALFONSO ROJAS GALLO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2009

**ESTUDIO DE CONCENTRACIÓN DE MINERALES DE HIERRO POR
MÉTODOS FÍSICOS PARA EL PROCESO DE SINTERIZACION EN
ACERÍAS PAZ DEL RIO S.A**

**LILI YOHANA ÁLVAREZ ROJAS
MILER ALFONSO ROJAS GALLO**

**Proyecto de grado presentado como requisito Para optar el título de
Ingeniero Químico**

**Director
DIONISIO LAVERDE CATAÑO
Ingeniero Metalúrgico Ph.D.**

**Codirector
OCTAVIO ISAZA
Ingeniero Metalúrgico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2009

DEDICATORIA

*A Dios por la iluminación y fuerza que me brindas cada día,
Por entrar en mi vida y hacerme reflexionar sobre muchos errores.
Gracias por todas las bendiciones que haz derramado en mí y mi familia,
Por brindarme un hogar lleno de amor y alegría*

*A mis padres: Alberto Álvarez y Mery Rojas,
Que han sido mi ejemplo de vida, gracias
Por brindarme cariño, comprensión y apoyo incondicional,
Sin ustedes no habría podido llegar hasta este punto.
A mis hermanos: Oswaldo y Eduardo,
Por estar siempre a mi lado, con sus consejos
Apoyándome y dándome animo.*

*A dos seres maravillosos que han llegado a mi vida; Andrés y Nicolle
Que son mi fuerza, motivación y alegría.*

Lili Yohana Alvarez Rojas

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado a:

Dios, por estar acompañándonos siempre.

En memoria de mi querido padre, JOSE MIGUEL R, quien siempre estuvo y estará acompañándome en todos los problemas que se me puedan presentar.

A mi querida mamá, VITELVINA G, que siempre me ha dado el inmenso apoyo y amor para salir adelante y ha confiado en mí.

A todos mis hermanos, y todas las personas que algún día compartieron algo conmigo.

Miler Alfonso Rojas Gallo

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus sinceros agradecimientos a:

La escuela de Ingeniería Metalúrgica e Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander, por la oportunidad de crecer a nivel profesional y humano.

La empresa Acerías Paz del Rio S.A, por permitirnos desarrollar nuestro proyecto de grado en sus instalaciones.

Los miembros del laboratorio central de Control de Calidad de la empresa por su colaboración en la realización de las pruebas necesarias para este proyecto de grado.

Al Ph.D Dionisio Laverde Cataño, director del proyecto por sus recomendaciones y aportes para este proyecto.

Al Ingeniero Metalúrgico Octavio Isaza Tobías por su colaboración y apoyo en la ejecución de este proyecto.

Los ayudantes del laboratorio de beneficio de minerales de la escuela de Ingeniería Metalúrgica; Daniel, Javier, Ambrosio y Mario, por su disposición a ayudarnos en cualquier momento.

Gracias.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. FUNDAMENTO TEÓRICO	3
1.1 GENERALIDADES SOBRE EL MINERAL DE HIERRO	3
1.1.1 Definición.....	3
1.1.2 Características	3
1.1.3 Influencia del medio	3
1.1.4 Clasificación de los minerales de hierro	4
1.2 PROCESOS UTILIZADOS PARA LA CONCENTRACION DE HIERRO	4
1.2.1 Concentración magnética.....	4
1.2.2 Concentración por gravedad	6
1.2.3 La mesa Wilfley presenta un movimiento cíclico.....	6
1.2.4 Flotación espumante	6
2 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	10
2.1 ETAPA I CONOCIMIENTO DE LOS PROCESOS DE CONCENTRACIÓN PARA MINERAL DE HIERRO.....	11
2.2 ETAPA II CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA, FISICOQUÍMICA Y MINERALÓGICA.....	11
2.2.1 Caracterización geoquímica y mineralógica.....	12
2.2.2 Caracterización fisicoquímica.....	12

2.3	ETAPA III DESARROLLO EXPERIMENTAL DE LOS PROCESOS DE CONCENTRACION	13
2.3.1	Estudio de concentración magnética por vía seca	13
2.3.2	Estudio de concentración magnética por vía humedad	13
2.3.3	Estudio de concentración gravimétrica	15
2.3.4	Estudio del proceso de flotación espumante	16
2.4	ETAPA IV ANÁLISIS DE LOS PROCESOS DE CONCENTRACION DE MINERALES DE HIERRO	18
3	RESULTADOS Y ANÁLISIS	19
3.1	CARACTERIZACIÓN DE LOS MINERALES DE HIERRO	19
3.1.1	Composición química	19
3.1.2	Composición mineralógica	20
3.1.3	Caracterización fisicoquímica	20
3.2	ESTUDIO DE LOS PROCESOS DE CONCENTRACION APLICADOS AL MINERAL DE HIERRO	21
3.2.1	Separación magnética por vía seca	21
3.2.2	Separación magnética por vía húmeda	24
3.2.3	Concentración Gravimétrica	29
3.2.4	Flotación espumante	32
	CONCLUSIONES	35
	BIBLIOGRAFÍA	37

LISTA DE CUADROS

	Pág
Cuadro 1. Influencia de la intensidad magnética sobre los minerales	4
Cuadro 2. Condiciones de operación del equipo de separación magnética por vía húmeda.	14
Cuadro 3. Condiciones de operación de la mesa vibratoria Wilfley.	15
Cuadro 4. Reactivos y condiciones de operación de la celda de flotación... ..	18
Cuadro 5. Composición química de los minerales de estudio	19
Cuadro 6. Propiedades fisicoquímicas de los minerales de estudio	20
Cuadro 7. Razón de concentración de Hierro del mineral Paz del Río	22
Cuadro 8. Razón de concentración de Hierro del mineral Valle de Tencua	22
Cuadro 9. Razón de concentración de Hierro del mineral Paz del Río a diferentes intensidades de corriente.	26
Cuadro 10. Razón de concentración de Hierro del mineral Valle de Tencua a diferentes intensidades de corriente.	27
Cuadro 11. Influencia del ángulo de inclinación en los minerales.....	30
Cuadro 12. Razón de concentración gravimétrica de Hierro del mineral Paz del Río.....	31
Cuadro 13. Razón de concentración gravimétrica de Hierro del mineral Valle de Tencua	32
Cuadro 14. Razón de concentración gravimétrica de Hierro del mineral Ubala	32
Cuadro 15. Influencia de PH en el proceso de flotación	33

Cuadro 16. Influencia de la velocidad de agitación en el proceso de flotación 34

Cuadro 17. Influencia del tiempo en el proceso de flotación..... 34

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Celda de flotación	7
Figura 2. Esquema de la metodología empleada para el desarrollo del proyecto.	10

LISTA DE GRAFICAS

	Pág.
Grafica 1. Porcentaje en peso recuperado magnético Vs Tamaño de partícula	21
Grafica 2. %Fe total y %SiO ₂ total en el mineral Paz del Rio Vs Tamaño de partícula	23
Grafica 3. %Fe total y %SiO ₂ total en el mineral Valle de Tencua Vs Tamaño de partícula	24
Grafica 4. % en peso recuperado magnético en el mineral Paz del Rio Vs Tamaño de partícula.....	25
Grafica 5. % en peso recuperado magnético en el mineral Valle de Tencua Vs Tamaño de partícula	26
Grafica 6. %Fe total y % SiO ₂ total en el mineral a diferentes intensidades de corriente Vs Tamaño de partícula	28
Grafica 7. Fe total y % SiO ₂ total en el mineral a diferentes intensidades de corriente Vs Tamaño de partícula	29

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Pilas de almacenamiento ubicadas en la planta de belencito	41
Anexo B. metodología de los ensayos para la caracterización de los minerales	42
Anexo C. metodología empleada en los ensayos de concentración de minerales de hierro	47
Anexo D. composición mineralógica, difractogramas y distribución granulométrica de los minerales de estudio.....	60

RESUMEN

TITULO:

ESTUDIO DE CONCENTRACIÓN DE MINERALES DE HIERRO POR MÉTODOS FÍSICOS PARA LA UTILIZACIÓN EN EL PROCESO DE SINTERIZACIÓN EN ACERIAS PAZ DEL RIO S.A.*

AUTORES:

Lili Yohana Álvarez Rojas
Miler Alfonso Rojas Gallo**

PALABRAS CLAVES:

Mineral de Hierro, Concentración de minerales, Absorción atómica, % de recuperación, % SiO₂.

DESCRIPCIÓN

En este trabajo se presenta el estudio realizado a tres tipos de minerales de hierro que son empleados actualmente en la empresa ACERIAS PAZ DEL RIO S.A para la fabricación de acero. En la actualidad, estos minerales se utilizan tal y como son extraídos de la mina, sin embargo, el mineral fino empleado en el proceso de sinterización contiene grandes cantidades de impurezas (sílice especialmente) que es un elemento indeseado en el proceso de fundición y aceración debido a los altos costos necesarios para remover dichas impurezas; por esta razón se hace necesario hacer un estudio de beneficio en dichos minerales.

Mediante análisis mineralógico y químico se identificaron y cuantificaron las principales especies componentes de los minerales de estudio (Paz del Rio, Valle de Tencua y Ubala) empleados en sinterización. Luego de un estudio bibliográfico se plantearon cuatro métodos físicos de concentración: concentración magnética por vía seca, concentración magnética por vía húmeda, concentración gravimétrica y flotación espumante, estudiando el efecto de variables como tamaño de partícula, amperaje, ángulo de inclinación, pH, velocidad de agitación y tiempo de agitación. La evaluación técnica de los procesos de concentración de minerales se realizó a través de índices metalúrgicos como: %Recuperación y razón de concentración y como variable de respuesta se empleó el método de absorción atómica.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Química. Ph.D. Ing. Dionisio Laverde Cataño

SUMMARY

TITLE:

STUDY OF CONCENTRATION OF MINERALS OF IRON BY METHODS FISICOS FOR THE UTILIZATION IN THE PROCESS OF SINTERIZACION IN ACERIAS PAZ OF THE RIO S.A*

AUTHOR:

Lili Yohana Alvarez Rojas
Miler Alfonso Rojas Gallo **

KEY WORDS:

Fe Mineral, Mineral concentration, Atomic Absorption.

DESCRIPTION

We are going to present the study done about three kinds of Fe's minerals: Mineral de Paz del Rio, Valle de Tencua and mineral is Ubala, used in Acerías Paz del Río for making steel. These minerals have used in a right form as they are in the mine, however, the fine mineral has many impurities (silica) which they are elements no used in the smelting and steeling because of the expensive casts for removing the impurities, for this reason it is necessary to make a profit

According to the mineral and chemical analyse we found the main component of studing mineral. So there were four concentration phis methods (magnetic concentration dry, magnetic concentration wet, way gravimetric, and the floating method) it has been studied particle and, ampere olge, inclination angle, pH, velocity and agitation time and response variable it was used the method of Atomic Absorption.

* Work of degree

**Empower of Engineerings Físicoquímicas, School of Chemical Engineering. Ph.D. Ing. Dionisio Laverde Cataño

INTRODUCCIÓN

Los minerales de la industria de hierro y del acero son de gran importancia, pues forman parte de la mayoría de los productos de la vida diaria. El hierro se encuentra presente en la naturaleza en forma de óxidos, hidróxidos, carbonatos, silicatos y sulfuros. Los más utilizados por la siderurgia son los óxidos hidróxidos y carbonatos, gracias a sus propiedades físicas, es el metal más usado, con el 95% en peso de la producción mundial de metal. El uso más extenso del hierro se encuentra en la obtención de aceros estructurales; también se producen grandes cantidades de hierro fundido y de hierro forjado. El acero es indispensable debido a su bajo precio y dureza, especialmente en automóviles, barcos y componentes estructurales de edificios.

El mineral procesado en la planta Acerías Paz del Rio proviene de diferentes minas situadas en distintos puntos del departamento de Boyacá y Cundinamarca (Paz De Rio, Ubala y Valle de Tencua). Durante el proceso de explotación y transporte se produce gran cantidad de material particulado, el cual no puede ser alimentado directamente al alto horno, ya que los gases producidos por las reacciones químicas que allí suceden, arrastrarían con gran facilidad este mineral y se produciría como consecuencia una alta pérdida de materia prima.

Por esta razón este material particulado es sometido a un proceso de aglomeración llamado sinterización, donde se carga el mineral, mezclado con caliza y coque para ser sometido a un proceso de semifusión (sinterización), con el fin de tener un mineral con un mayor tamaño y posteriormente ser alimentado al alto horno para su procesamiento.

Actualmente el 60% de la alimentación total al alto horno proviene del proceso de sinterización.

Estos materiales finos de hierro tienen altos contenidos de sílice y cuarzo, denominados gangas, que son elementos indeseados en el proceso de aceración. Parte de la ganga puede ser separada del mineral de hierro antes de su envío a la siderurgia.

El objetivo de este proyecto es realizar un estudio de concentración y enriquecimiento, a nivel de laboratorio, de minerales de hierro colombianos mediante los procesos de concentración gravimétrica, separación magnética por vía seca y por vía húmeda y flotación espumante.

Con la culminación del presente trabajo de investigación se espera obtener resultados que permitan estimar la aplicabilidad de las técnicas de concentración.

Para el desarrollo de esta investigación se aplicaron procesos de trituración, molienda, separación magnética por vía seca y concentración magnética por vía húmeda, concentración gravimétrica y flotación espumante, encontrándose que la concentración magnética por vía húmeda mostró los mejores resultados ya que se logró disminuir el porcentaje de sílice hasta en un 67% en el mineral de Valle de Tencua, 32% en el mineral de Paz del Rio y aumentado su porcentaje de hierro en un 18% en el mineral de Valle de Tencua y 10% en el mineral de Paz del Rio.

1. FUNDAMENTO TEÓRICO

1.1 GENERALIDADES SOBRE EL MINERAL DE HIERRO

1.1.1 Definición. No son muchas las empresas dedicadas a extraer el mineral de hierro en el mundo; no es por ser poco rentable o que se necesite un conocimiento complejo, sino porque son pocos los minerales usados comercialmente como fuente de hierro. La razón es la cantidad de metal o ley que cada mineral contenga. Generalmente, se consideran minerales ricos los que contienen más de 55% de hierro. De riqueza media, a los que contienen de 30 a 55% de hierro y minerales pobres, a los de contenido inferior.

Las menas de hierro que utiliza la industria siderúrgica son mezclas de minerales de hierro y de materia estéril o ganga. Esta última suele estar constituida, principalmente por sílice, alúmina, cal y manganeso, que hacen que su riqueza sea inferior a la que teóricamente le corresponde.

1.1.2 Características. El hierro es un metal maleable, tenaz, de color gris plateado y presenta propiedades magnéticas; es ferromagnético a temperatura ambiente y presión atmosférica. Para obtener hierro en estado elemental, los óxidos se reducen con carbono y luego es sometido a un proceso de refinado para eliminar las impurezas presentes

1.1.3 Influencia del medio. Sin duda que la calidad y composición del mineral depende fuertemente de su región geográfica y también del período o edad geológica en que se formó. Esto último se apoya en estadísticas que indican descubrimientos, ubicaciones y eras geológicas durante los cuales

los depósitos han ido almacenándose: Cenozoica, Mesozoica, Paleozoica, Pre-Cambriana.

1.1.4 Clasificación de los minerales de hierro. De acuerdo con su composición química y mineralógica, los minerales de hierro se clasifican y agrupan en óxidos, carbonatos, sulfuros y silicatos. Por ejemplo, dentro de los óxidos están la magnetita, hematita, Ilmenita, y entre los carbonatos se encuentra la siderita. Los óxidos son la fuente más importante de hierro.

1.2 PROCESOS UTILIZADOS PARA LA CONCENTRACION DE HIERRO

1.2.1 Concentración magnética. Los separadores magnéticos aprovechan la diferencia en las propiedades magnéticas de los minerales componentes de las menas. Todos los materiales se alteran en alguna forma al colocarlos en un campo magnético. En la tabla 1 se presenta un listado de minerales y la intensidad magnética requerida para su separación. Los principales usos de la separación magnética son: a) eliminación o separación de fragmentos metálicos y; b) procesos de concentración y purificación magnética.

Cuadro 1. Influencia de la intensidad magnética sobre los minerales

Intensidad magnética requerida para la Separación (Gauss)	Mineral
500 – 5.000	Fuertemente magnéticos. Magnetita, franklinita, leucita, pirrotita.
5.000 – 10.000	Moderadamente magnéticos Ilmenita, biotita, granate, wolframita

Intensidad magnética requerida para la Separación (Gauss)	Mineral
10.000 – 18.000	Débilmente magnéticos Hematita, columbita, limonita, pirolusita, rodocrosita, siderita, manganita.
18.000 – 23.000	Pobrementemente magnéticos Rutilo, rodonita, dolomita, tantalita, cerusita, epídota, monacita, fergusonita,

Separación magnética por vía seca. Los separadores de rodillo inducido son fabricados con varias combinaciones de rodillos de tal forma que los no magnéticos van siendo rechazados en etapas sucesivas.

En estos separadores el material tratado debe estar seco para tener un flujo uniforme y debe encontrarse en el rango granulométrico de 8 a 150 mallas para alcanzar buenos resultados. Los mejores resultados son obtenidos utilizando rangos granulométricos estrechos.

Separación magnética por vía húmeda. Tres tipos de separadores magnéticos por vía húmeda son los más frecuentemente usados:

- ❖ *Separadores de tambor con magnetos permanentes y electromagnéticos:* son equipos utilizados como unidades de recuperación en plantas de medios densos, en la concentración de minerales de hierro ferro magnético
- ❖ *Filtros magnéticos:* son utilizados para eliminar o separar partículas ferro magnéticas finas de los líquidos o suspensiones de líquidos.
- ❖ *Separadores magnéticos de alta intensidad por vía húmeda:* son aplicados para la separación de materiales débilmente magnéticos de los sólidos contenidos en suspensión líquida.

1.2.2 Concentración por gravedad. La mesa Wilfley es un equipo que separa de manera relativamente fácil minerales pesados de minerales ligeros. Esta mesa aprovecha la densidad de los minerales para separarlos mediante un flujo de agua con un comportamiento laminar.

1.2.3 La mesa Wilfley presenta un movimiento cíclico. Un movimiento horizontal paralelo al flujo de agua y un movimiento brusco contrario al flujo del agua, lo que provoca que los minerales más pesados se separen del resto.

La muestra se vierte en la mesa por medio de un alimentador de vibración variable que la dosifica. Esta, al caer en el flujo de agua laminar, separa los minerales más ligeros, los que describen una trayectoria perpendicular al eje mayor de la mesa. Los minerales con densidades intermedias, al golpear la mesa, flotan siguiendo una trayectoria oblicua y muy cercana a los rizos longitudinales de la mesa. Los minerales pesados no flotan y solo se arrastran con el movimiento de la mesa en dirección del flujo de agua, siguiendo una trayectoria casi paralela al eje mayor de la mesa. Al final se obtiene un concentrado de minerales pesados con el cual se deberá seguir trabajando hasta obtener un concentrado mono – mineral.

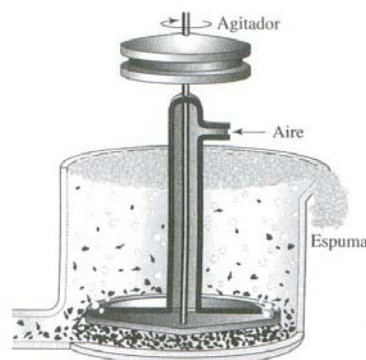
Los métodos de concentración gravitacional cuando pueden ser aplicados son preferidos en relación a los demás procesos físicos debido a que los costos favorecen su uso y además son menos contaminantes del medio ambiente

1.2.4 Flotación espumante. La flotación es un proceso físico-químico de separación ampliamente utilizado en el enriquecimiento de minerales, y desde hace algunos años en el tratamiento de aguas residuales. Es el proceso en el cual, algunos constituyentes minerales suben a la superficie de

la pulpa o flotan en ella, mientras que otros se hunden o permanecen en el seno de la misma. Este comportamiento está basado en las propiedades hidrofílicas e hidrofóbicas de los minerales, en la distinta capacidad de los minerales de adherirse a la superficie interfacial gas-líquido. Una de las variedades de este proceso es la flotación por espuma, que se basa en la repelencia natural o inducida de los minerales al agua (hidrofobicidad). En este caso, la pulpa se satura de gas, generalmente de aire, y las partículas flotables se adhieren a dichas burbujas.

Celda de flotación. Una celda de flotación es un recipiente de tipo tanque agitado, en el cual se introduce una suspensión acuosa de las dos sustancias a separar. La figura 1 indica la introducción de burbujas de aire en la parte inferior de la celda, en general debajo del sistema de agitación cuyo propósito es no solo de agitar la suspensión, sino también dividir las burbujas de aire hasta dimensiones mínimas. El sistema contiene un agente espumante que estabiliza la espuma formada y permite formar una espuma rígida casi seca. Esta espuma se descarga por un vertedero o mediante cualquier sistema de arrastre que pueda implementarse.

Figura 1. Celda de flotación



Agentes de flotación. Los reactivos de flotación se clasifican dependiendo de su papel en la flotación, en colectores, espumantes, y reguladores.

- **Colectores.** Compuestos orgánicos heteropolares que se absorben selectivamente sobre la superficie de las partículas, haciendo que estas se vuelvan hidrófobas (aerófilas), creando condiciones favorables para su adherencia a las burbujas de aire.

- **Espumantes.** Los espumantes son reactivos tensoactivos, que modifican la tensión superficial del agua y que producen una espuma estable. Una espuma consiste en un gas disperso en un líquido en una relación tal que la densidad aparente de la mezcla se aproxima más a la densidad del gas que a la del líquido. El tamaño de las burbujas y su estabilidad dependerán de la cantidad de espumante agregado; con un aumento de la cantidad de espumante disminuirá el diámetro de las burbujas pero aumentará la estabilidad de la espuma, debido al mayor espesor de su película. Sin embargo, si se supera una cierta concentración la espuma desaparece completamente.

- **Reguladores de la flotación.** El pH indica el grado de acidez o de alcalinidad de la pulpa. El pH se mide con un aparato llamado potenciómetro o con papel tornasol. Esta propiedad varía según el mineral y su procedencia. Los reguladores de pH tienen la misión de dar a cada pulpa el pH más adecuado para una flotación óptima.

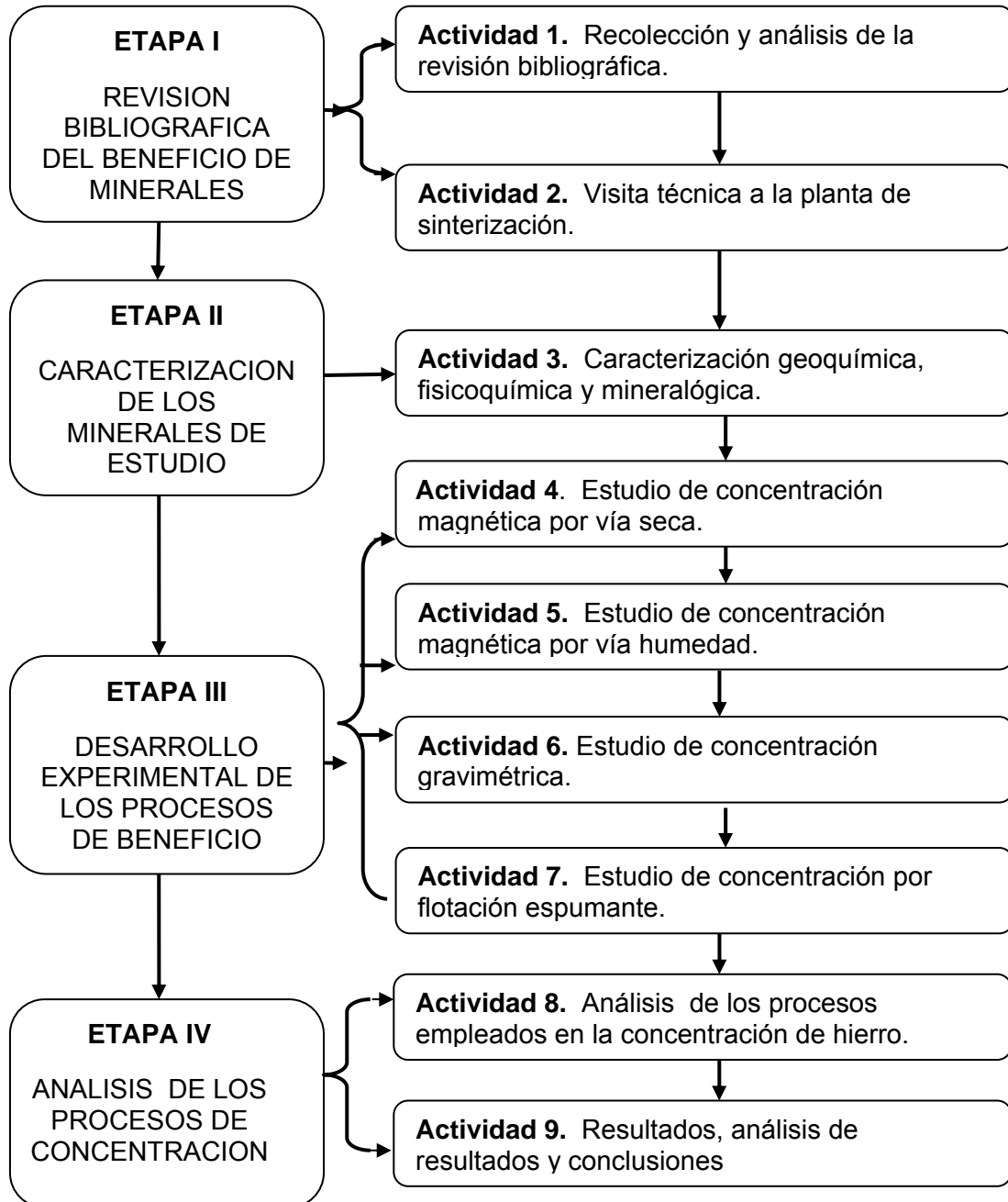
Al variar el pH de la pulpa, varían las propiedades y la solubilidad, tanto de los mismos reactivos de flotación como de los minerales.

Tipos de flotación por espuma:

- **Flotación directa.** La flotación directa es aquella en la que el mineral valioso sale en la espuma y la ganga se queda en el non-float.
- **Flotación inversa.** En este tipo de flotación el mineral valioso se queda como non-float y la ganga es la que flota.
- **Flotación colectiva (Bulk flotation).** Se dice flotación colectiva en el caso de que todos los minerales valiosos y de un solo tipo mineralógico (por ejemplo: sulfuros) salen en la espuma.

2 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Figura 2. Esquema de la metodología empleada para el desarrollo del proyecto.



En la figura 2, se muestran las etapas del proyecto y sus correspondientes actividades para el desarrollo y ejecución. A continuación se hace una breve descripción de ellas, enfatizando en sus respectivos objetivos y en la forma como se fueron desarrollando.

2.1 ETAPA I CONOCIMIENTO DE LOS PROCESOS DE CONCENTRACIÓN PARA MINERAL DE HIERRO

Esta etapa se realizó con el fin de adquirir la fundamentación teórica de los procesos físicos aplicables a los minerales de hierro. Además se realizó una visita técnica a la mina de hierro ubicada en Paz del Río, (Boyacá), para recolectar información y conocer más sobre el panorama minero y los procesos de explotación y transporte que actualmente aplican.

En la planta de Belencito se tomaron muestras de tres tipos de minerales (Ubalá, Paz del Río y Valle de Tencua) se recolectaron en diferentes puntos y a diferente profundidad en el área donde se almacena o se apila el mineral de hierro, para de esta forma obtener mejores resultados y poder tener una composición química homogénea del mineral. En el anexo A se encuentran las fotografías de las pilas de almacenamiento ubicadas en la planta de Belencito.

2.2 ETAPA II CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA, FISICOQUÍMICA Y MINERALÓGICA.

Esta etapa se realizó con el fin de determinar las diferentes características de cada uno de los minerales de hierro empleados en este estudio, que permitan clasificarlos y definir las operaciones y procesos más adecuados

para su concentración. Los métodos de análisis y ensayos utilizados para la caracterización de los minerales se presentan en el Anexo B.

Las muestras recolectadas fueron secadas en un horno y luego trituradas y molidas respectivamente hasta obtener un tamaño de partícula de 170 mallas Tyler. Por cuarteo mecánico se tomaron muestras representativas para realizar cada uno de los análisis que a continuación se describen.

2.2.1 Caracterización geoquímica y mineralógica. La caracterización de las menas de hierro se llevó a cabo para la determinación de las especies mineralógicas presentes y se utilizó la técnica de análisis por difracción de rayos X, la cual fue realizada en el Laboratorio de Difracción de Rayos X de la Escuela de Química de la Universidad Industrial de Santander, este análisis se determinó en forma cuantitativa, expresando los porcentajes de cada especie mineralógica.

2.2.2 Caracterización fisicoquímica. Esta caracterización fisicoquímica se aplicó a cada una de las diferentes menas utilizadas, con el fin de evaluar los siguientes parámetros: Humedad, PH de los minerales, Densidad real y Distribución granulométrica.

Para la determinación del porcentaje de humedad de los minerales, se tuvo en cuenta el transporte en envases sellados con el fin de evitar la pérdida del agua presente en cada muestra.

La determinación de PH de los minerales se realizó preparando una pulpa al 15% en volumen. Posteriormente manteniendo la pulpa en agitación, se hizo la lectura introduciendo papel PH y comparándolo con la lectura del PH metro, el valor registrado es el promedio de los datos.

La densidad real del mineral se determinó por el método picnométrico, cuyo procedimiento se describe en el Anexo A. La distribución granulométrica se determinó en seco y mediante tamizado a través de una serie de mallas: números 45, 70, 100, 140, 170.

2.3 ETAPA III DESARROLLO EXPERIMENTAL DE LOS PROCESOS DE CONCENTRACION

Los procesos de concentración de minerales de hierro estudiados se desarrollaron con el objetivo de obtener un mineral con menos ganga (sílice) para su posterior utilización en el proceso de sinterización. Los procesos evaluados fueron: separación magnética por vía seca, separación magnética por vía húmeda, Concentración por gravedad y flotación espumante.

2.3.1 Estudio de concentración magnética por vía seca. Esta prueba se realizó con el fin de separar la mayor cantidad de material magnético como la magnetita y la hematita que tienen estos minerales según los análisis químicos reportados en DRX y absorción atómica. Según la bibliografía este método es el más utilizado en concentración de minerales de hierro. El equipo utilizado se muestra en anexo C fig. C1. Para este proceso se tamizó y se seleccionaron los números de malla #45 - #70 - #100 - #140 - #170 - # >170, para el estudio. Para la preparación de la muestra se hizo un secado previo del mineral y se utilizó un peso de muestra inicial de 200 gr, el tiempo de operación fue 120 minutos. Para mejorar el rendimiento de separación se hizo pasar la muestra 5 veces por el separador magnético.

2.3.2 Estudio de concentración magnética por vía humedad. Estas pruebas se realizaron en el equipo de separación magnética de alta intensidad en húmedo, ubicado en la planta de aceros de la Escuela de

Ingeniería Metalúrgica de la UIS. Ver fotografía del equipo en la fig. C2 del anexo C.

Para la realización de este estudio de separación magnética, se prepararon soluciones de mineral al 10% en volumen para cada malla (#45 - #70 - #100 - #140 - #170 # >170), posteriormente cada solución fue sometida a un proceso de agitación continua a 1200 rpm en un agitador marca DENVER durante un tiempo de 10 minutos, con el fin de lograr una homogenización de la pulpa de mineral. Después de este procedimiento la solución fue vertida a la celda de separación magnética pasando por el lecho de esferas.

Esta celda fue modificada con el fin de controlar el tiempo de residencia del mineral, se diseñó un sistema de regulación de alimento y descargue de la pulpa. En cada prueba experimental se recogió el mineral y se llevó al horno de secado, con el fin de pesarlo y determinar sus propiedades con el método de absorción atómica. Las condiciones bajo las cuales se operó el equipo se presentan en la Tabla 2.

Cuadro 2. Condiciones de operación del equipo de separación magnética por vía húmeda.

Parámetro	Valor	Unidad
Tipo de corriente	Directa	
Amperaje aplicado	2 - 3 - 5	A
Volumen de pulpa	500	ml
Porcentaje de sólidos de la pulpa	10	% peso
Acidez de la pulpa	6	PH
Flujo de la pulpa	1.1	MI/s
Tiempo de residencia en el lecho	900	s

2.3.3 Estudio de concentración gravimétrica. Este proceso fue seleccionado aprovechando la diferencia de densidades entre la ganga y la mena. Este estudio se realizó en una mesa concentradora Wilfley. En la fig. C3. del anexo C se encuentra una fotografía de la mesa empleada. Como variable de respuesta se procedió a utilizar la técnica de absorción atómica según el número de malla, debido a que esta técnica es la más efectiva y hace posible cuantificar las especies en estudio más importantes. De esta manera se selecciona el tamaño granulométrico mas adecuado.

La preparación de las muestras del mineral en forma de pulpas se realizó disgregando por agitación mecánica los minerales en agua a 1200 rpm, fue necesaria la utilización de aspas de doble hélice invertida para generar turbulencias y obtener una pulpa homogénea. Ver fig. C4 del Anexo C. Para la selección del ángulo de inclinación se tuvo en cuenta el diámetro de las partículas, las vibraciones del motor y el caudal de agua. Las condiciones de operación de la mesa vibratoria se muestran en la tabla 3.

Cuadro 3. Condiciones de operación de la mesa vibratoria Wilfley.

Parámetro	Valor	Unidad
Tipo de corriente	Directa	
Angulo de inclinación	Variable de estudio	Grados
Velocidad	250	Imp*min
Cantidad de mineral	1000	gr
Mineral de alimentación	Mallas Tyler, 45 -70 – 100-140	
Porcentaje de sólidos de la pulpa	30	% peso
Acidez de la pulpa	6	PH
Flujos de agua	166.66	ml/s

2.3.4 Estudio del proceso de flotación espumante. El estudio del proceso de flotación se planteó como alternativa para la remoción de impurezas. Según la revisión bibliográfica, la flotación espumante no es muy recomendada para minerales de óxidos de hierro, sin embargo, se realizaron pruebas experimentales para determinar si este sistema se puede implementar con ciertos reactivos específicos.

Existe comercialmente en la industria reactivos que presentan características afines con los minerales de hierro, para este proyecto se evaluó como colector ácido oleico y se utilizó como espumante aceite de pino, como reguladores de pH se emplearon hidróxido de sodio y ácido sulfúrico.

El porcentaje de sólidos de la pulpa que se trabajó fue 15% en sólidos, las variables consideradas para el proceso fueron: Dosificación de reactivo, velocidad de agitación, PH y tiempo de flotación. Para tener un buen control de la flotación se debe tener en cuenta los siguientes parámetros:

- ❖ La dosificación de reactivo espumante debe estar controlada según el intervalo de tiempo en que se haga el barrido de la espuma; este intervalo de tiempo fue de 2 min.
- ❖ El PH de la pulpa se debe medir también en cada barrido ya que este es una variable de control importante en el proceso de flotación, el volumen de la celda se mantiene adicionando agua.
- ❖ El producto y el residuo se recolectan en una cubeta de muestras con su numeración respectiva para su posterior análisis.

Las muestras recolectadas en las cubetas se llevaron al horno de secado y luego pesaron para su posterior análisis. Las fotografías de los equipos

utilizados se encuentran en la fig. C5 del anexo C. En la tabla 4. se presentan las condiciones de operación de la celda de flotación.

Evaluación de la dosificación de reactivo. Se emplearon dos cantidades de colector y dos cantidades de espumante, este parámetro se evaluó manteniendo las mismas condiciones de operación para todos los minerales, para seleccionar la combinación con mejores resultados en la remoción de impurezas, permitiendo una alta recuperación del mineral.

Evaluación de pH. Primero se determinó en qué medio (ácido o básico) se efectuaba la espuma, para seleccionar el medio se empleó papel de pH y se verificó la cantidad de espuma generada en cada uno de los valores de pH. Ya con el medio seleccionado se procedió evaluar dos valores específicos de pH (9-12) y a las mismas condiciones de operación, para hacer la selección de pH óptimo se tomó como variable de respuesta el % Fe y el % SiO₂ evaluados por métodos de absorción atómica.

Evaluación de la velocidad de agitación en la pulpa. Estos ensayos se realizaron con el fin de evaluar las velocidades de agitación para analizar su influencia en la adsorción del reactivo sobre las impurezas y si es posible tratar de disminuir la alta agitación recomendada por la literatura (2200 rpm), debido a los altos costos de mantenimiento de los equipos que trabajan a estas revoluciones.

Evaluación del tiempo de flotación. Con el desarrollo de los ensayos de flotación se evaluó el tiempo de flotación en función del porcentaje de remoción de sílice.

Cuadro 4. Reactivos y condiciones de operación de la celda de flotación.

Parámetro	Valor	Unidad
Velocidad de agitación	Variable	rpm
Volumen de pulpa	1000	ml
Porcentaje de sólidos de la pulpa	15	% peso
Colector	Acido Oleico	gotas
Espumante	Aceite de Pino	gotas
Regulador de pH	H ₂ SO ₄ , NaOH	gotas
Acidez de la pulpa inicial	6	PH
Tiempo de intervalos de remoción	120	s

2.4 ETAPA IV ANÁLISIS DE LOS PROCESOS DE CONCENTRACIÓN DE MINERALES DE HIERRO

Esta etapa se realizó con el fin de analizar cada uno de los resultados obtenidos en las pruebas para seleccionar el sistema de beneficio más adecuado en cada uno de los minerales tratados, un proceso que permita obtener una composición química y mineralógica más adecuada para ser empleadas en el proceso de sinterización.

3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS MINERALES DE HIERRO

A continuación se presenta la caracterización geoquímica, metalúrgica y fisicoquímica de los tres tipos de minerales de estudio.

3.1.1 Composición química. En la tabla 5, se muestra la composición química de cada uno de los minerales de estudio, determinada por el método de absorción atómica.

Cuadro 5. Composición química de los minerales de estudio

MINERAL	PAZ DEL RIO	UBALA	VALLE DE TENCUA
ESPECIE QUIMICA	PORCENTAJE	PORCENTAJE	PORCENTAJE
SiO ₂	11,53	5,16	16,17
CaO	2,97	0,68	1,03
Fe	46,04	54,01	44,56
PPC	11,75	11,05	-
Al ₂ O ₃	5,63	1,68	9
MgO	0,5	0,33	0,44
S	0,1	0,012	0,009
P	1,15	0,14	-
Mn	0,16	2,57	0,79
Zn	0,08	-	
Na ₂ O	0,08	-	0,14

MINERAL	PAZ DEL RIO	UBALA	VALLE DE TENCUA
ESPECIE QUIMICA	PORCENTAJE	PORCENTAJE	PORCENTAJE
K ₂ O	0,04	-	0,29
H ₂ O	5,13	-	-
P ₂ O ₅	-	0,25	-
MnO	-	4,3	-

3.1.2 Composición mineralógica. Los resultados del análisis por Difracción de Rayos X de las menas reportaron la presencia de las especies mineralógicas que se muestran detalladamente en las tablas D1, D2 y D3 y los difractogramas que se encuentran en las figs. D1, D2 y D3 del anexo D. Según los resultados de DRX, vemos que los minerales presentan porcentajes elevados de materiales arcillosos (Illita, Caolinita, Goetita) y gran cantidad amorfos.

3.1.3 Caracterización fisicoquímica. Para la caracterización fisicoquímica se determinó la densidad real promedio, humedad y pH promedio en cada uno de los minerales de estudio cuyos valores se muestran en la tabla 6.

Cuadro 6. Propiedades fisicoquímicas de los minerales de estudio

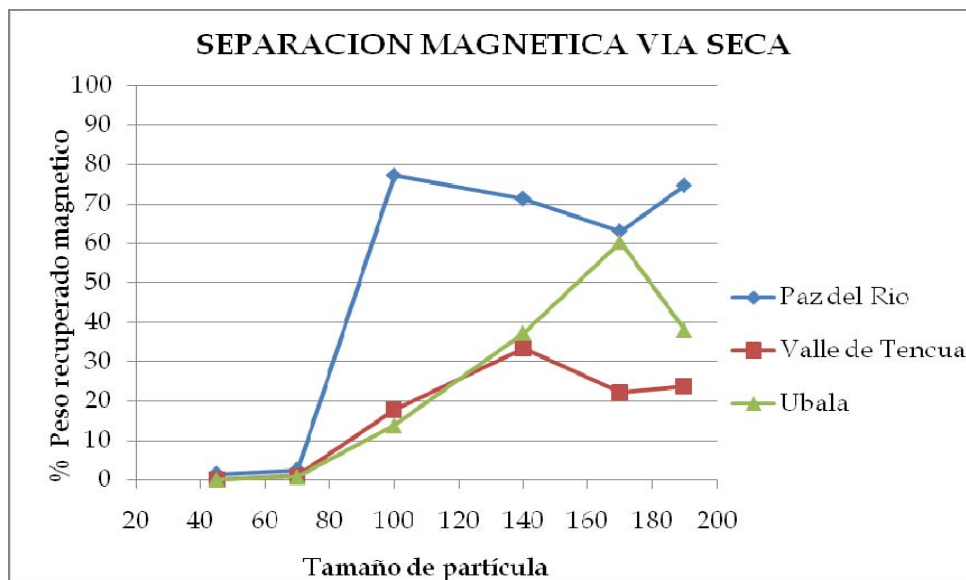
TIPO DE MINERAL	DENSIDAD REAL PROMEDIO (kg/m ³)	HUMEDAD (%)	PH PROMEDIO
Paz del Rio	2820	32	6
Ubala	2350	28	6
Valle de Tencua	2660	34	6

El análisis granulométrico se realizó en seco y presentó la distribución que se muestra en las tablas D4 y D5 del anexo D.

3.2 ESTUDIO DE LOS PROCESOS DE CONCENTRACIÓN APLICADOS AL MINERAL DE HIERRO

3.2.1 Separación magnética por vía seca. Los resultados de estas pruebas se dividen en tres partes; la primera es la evaluación por % en peso de mineral recuperado con respecto a la muestra inicial, la segunda evaluación de razón de concentración y la tercera evaluación según el análisis químico por la técnica de absorción atómica para los diferentes minerales.

Grafica 1. Porcentaje en peso recuperado magnético Vs Tamaño de partícula



❖ **Razon de concentracion.** Es la razón entre la masa de alimentación y la masa de concentrado. En la tabla 7 y 8 se presentan los resultados obtenidos para el hierro.

Cuadro 7. Razón de concentración de Hierro del mineral Paz del Río

CONCENTRACIÓN MAGNÉTICA POR VIA SECA	
Tamaño granulométrico	Razón de Concentración Hierro
45	0,88
70	0,88
100	1,00
140	0,98
170	0,96
>170	0,96

Cuadro 8. Razón de concentración de Hierro del mineral Valle de Tencua

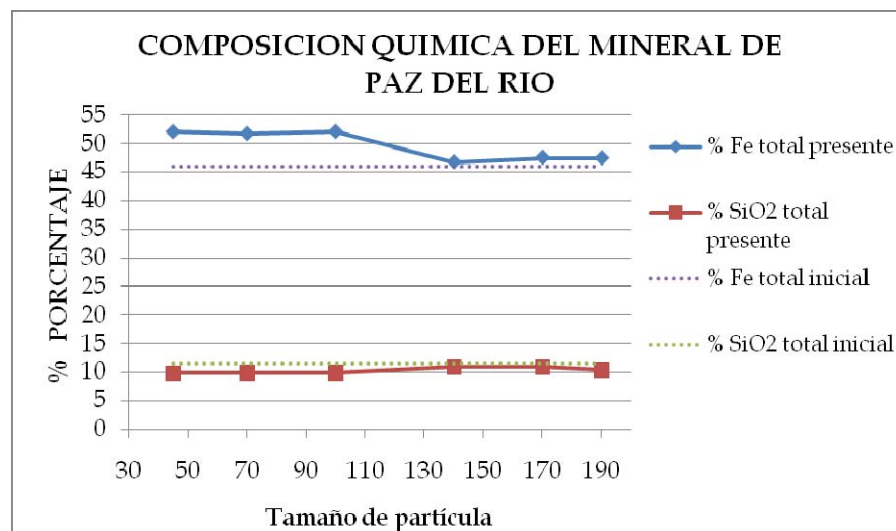
CONCENTRACIÓN MAGNÉTICA POR VIA SECA	
Tamaño granulométrico	Razón de Concentración Hierro
45	0,97
70	1,13
100	1,16
140	1,13
170	1,12
>170	1,09

❖ **Evaluación según composición química.** La composición química detallada se presenta en el anexo C, tablas C4 y C5, corresponden al material total recuperado en la primera evaluación y sus respectivas mallas, estos resultados de composición química determinan las mejores condiciones de operación del proceso.

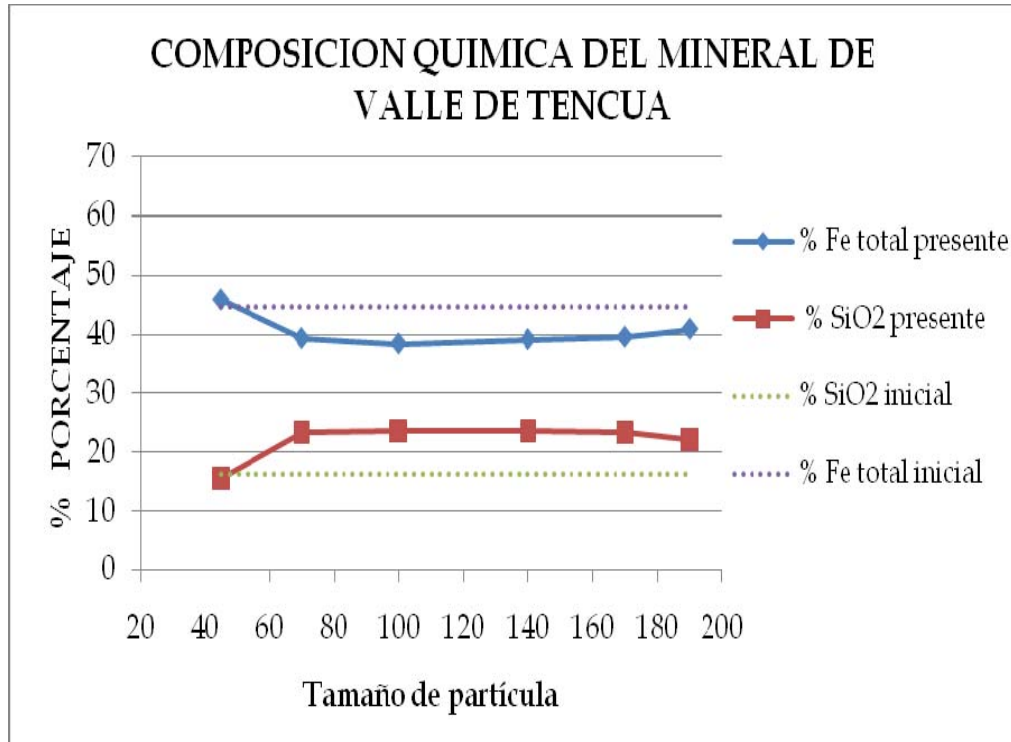
Los resultados indican que el mineral de Paz del Rio muestra resultados favorables debido a que existe un aumento en el contenido de hierro y por ende una disminución en el contenido de impurezas (SiO_2). Se nota que la malla Tyler numero 100 fue la que mejores resultados ofreció con respecto las demás mallas Tyler evaluadas con un % Fe de 52.17% y un % de sílice de 9.91%, corroborando la información que se obtuvo en la primera evaluación. Las mallas Tyler número 45 y 70 también presentan un aumento en la composición de hierro y una disminución en la composición de sílice pero no se pueden seleccionar debido a que su recuperación en peso es muy bajo. Este comportamiento se observa en la grafica 2.

Para el mineral de Valle de Tencua se nota que los valores de %Fe disminuyen a medida que disminuye el tamaño de partícula en comparación con su valor inicial, es decir, mineral sin ningún tipo de tratamiento, y él % de sílice aumenta notoriamente después de la malla Tyler número 45 como se muestra en la grafica 3. Lo cual indica que este método no es apropiado para este tipo de mineral.

Grafica 2. %Fe total y %SiO₂ total en el mineral Paz del Rio Vs Tamaño de partícula



Grafica 3. %Fe total y %SiO₂total en el mineral Valle de Tencua Vs Tamaño de partícula



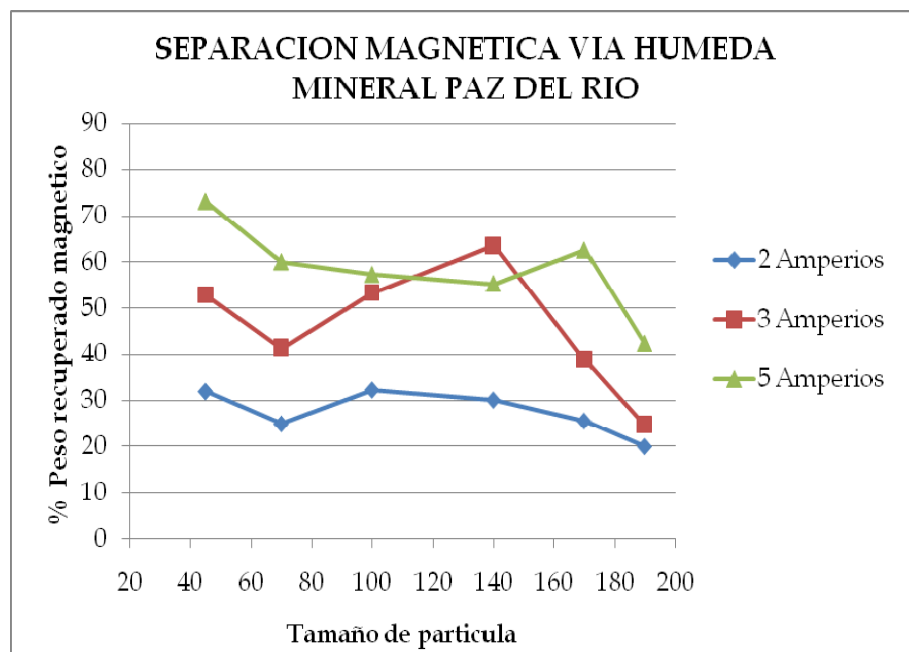
3.2.2 Separación magnética por vía húmeda. A continuación se presentan los resultados obtenidos en las pruebas de concentración magnética en húmedo descritos en la metodología.

❖ **Evaluación de relación entre el porcentaje en peso recuperado y amperaje aplicado.** En el anexo C tablas C6, C7 se presentan los resultados obtenidos variando el amperaje y el tamaño de partícula para cada mineral.

Se observa en el mineral de Paz del Río que las mallas Tyler número 45 y 170 evaluadas a 5 amperios y la malla Tyler 140 evaluada a 3 amperios presentan los puntos máximos de recuperación en porcentaje en peso con

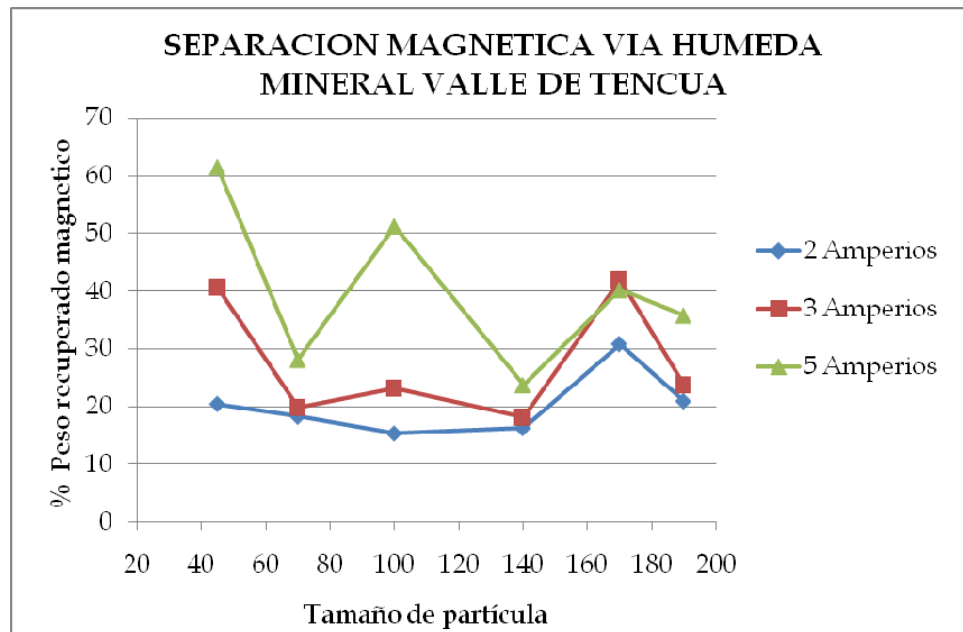
valores de 73.05%, 62.5%, 63.456% respectivamente. Se nota que a medida que se aumenta el amperaje aplicado aumentan los porcentajes de recuperación y al disminuir el tamaño de partícula tiende a disminuir el porcentaje de recuperación, tal y como se muestra en la grafica 4.

Grafica 4. % en peso recuperado magnético en el mineral Paz del Rio Vs Tamaño de partícula



En el mineral de Valle de Tencua, al igual que en el mineral de Paz del Rio, se aumenta el porcentaje de recuperación al aumentar el amperaje aplicado y se disminuye al disminuir el tamaño de partícula, las mallas Tyler que presentan mayor porcentaje de recuperación son la número 45, 100 y 170 evaluadas a 5 amperios y la 45 y 170 evaluadas a 3 amperios con valores de 61.5%, 51.26%, 40.238%, 40.58% y 41.928% respectivamente como se muestra en la grafica 5.

Grafica 5. % en peso recuperado magnético en el mineral Valle de Tencua Vs Tamaño de partícula



❖ **Razón de concentración.** En la tabla 9 y 10 se presentan los resultados obtenidos para los minerales a diferente amperaje aplicado y variando el tamaño granulométrico

Cuadro 9. Razón de concentración de Hierro del mineral Paz del Río a diferentes intensidades de corriente.

CONCENTRACION MAGNETICA POR VIA HUMEDA			
Tamaño granulométrico	Razón de Concentración Hierro (2 Amp)	Razón de Concentración Hierro (3 Amp)	Razón de Concentración Hierro (5 Amp)
45	0,97	0,93	1,01
70	1,13	0,98	0,96
100	1,16	0,95	0,97
140	1,13	0,92	0,94
170	1,12	0,90	0,95
>170	1,09	0,87	0,93

Cuadro 10. Razón de concentración de Hierro del mineral Valle de Tencua a diferentes intensidades de corriente.

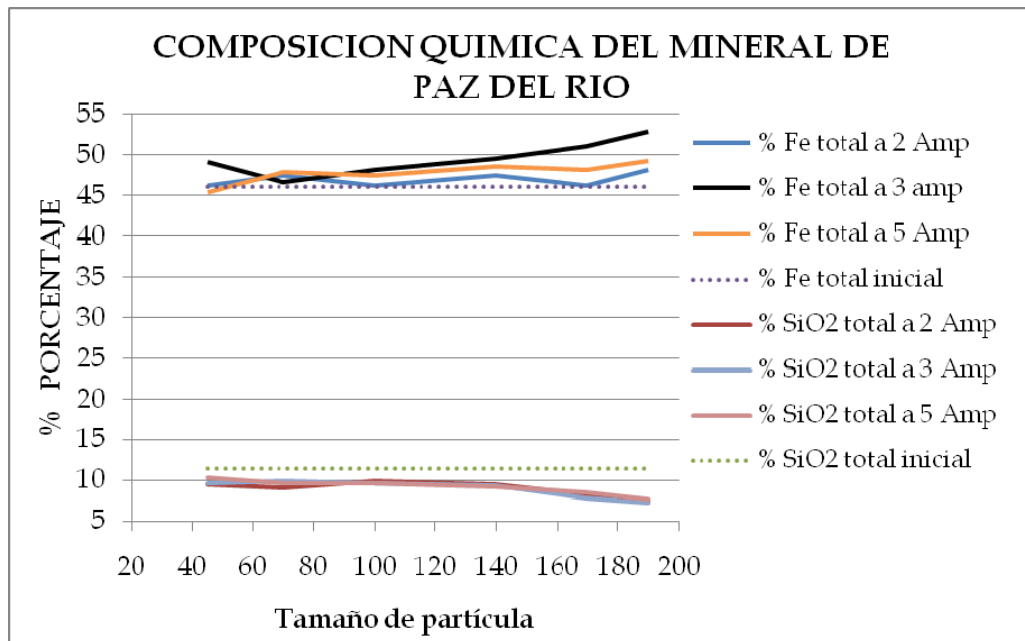
CONCENTRACIÓN MAGNÉTICA POR VIA HUMEDA			
Tamaño granulométrico	Razón de Concentración Hierro (2 Amp)	Razón de Concentración Hierro (3 Amp)	Razón de Concentración Hierro (5 Amp)
45	0,85	0,91	0,91
70	0,85	0,94	0,93
100	0,96	0,89	0,90
140	0,97	0,89	0,92
170	0,89	0,81	0,90
>170	0,86	0,81	0,85

❖ **Evaluación según composición química.** La composición química detallada del proceso se presenta en el anexo C tablas C8, C9, C10, C11, C12, C13.

Se observa que en el mineral de Paz del Rio se presenta un aumento en el porcentaje de hierro total y una disminución significativa en el porcentaje de Sílice total a medida que disminuye el tamaño de partícula, como se muestra en la grafica 6. Las mallas que presentan mayor rendimiento son las mallas Tyler numero 170 y <170 evaluadas a 3 amperios y a 5 amperios con porcentajes de Fe de 51%, 52.81%, 48.12%, 49.31% y porcentajes de SiO₂ de 7.87%, 7.27%, 8.61%, 7.76% respectivamente. Para seleccionar el tipo de malla Tyler más adecuado se debe tener en cuenta la evaluación de porcentaje de recuperación; luego estos tamaños de partícula presentan bajos rendimientos en porcentaje en peso y la malla con mejor resultado es la malla Tyler numero 140 evaluada a 3 amperios.

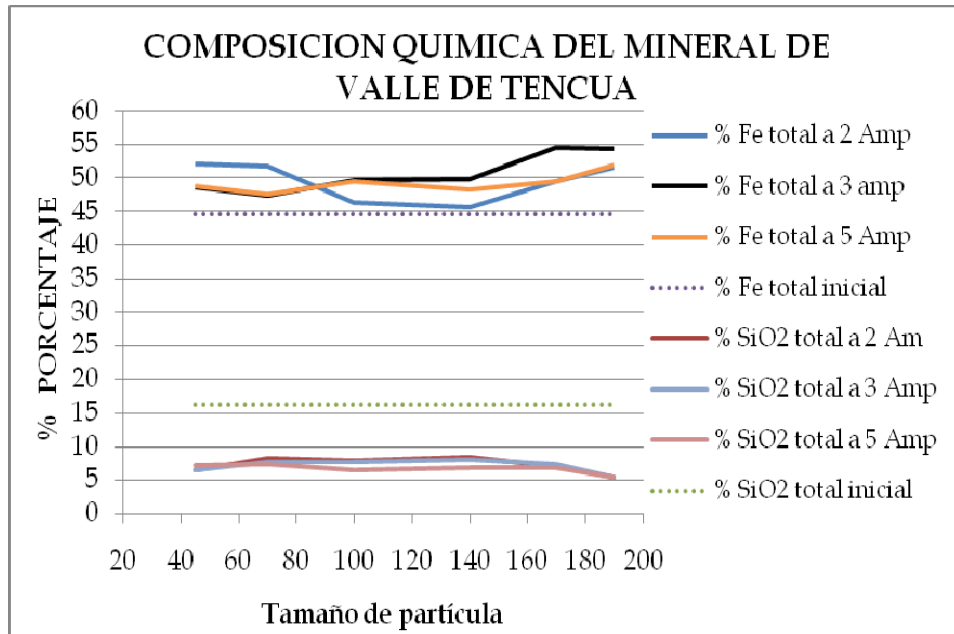
Se nota que este método presenta resultados favorables en cuanto a remoción de impurezas ya que se logra disminuir hasta un 32% en sílice, sin embargo el aumento de Fe solo es de 10%.

Grafica 6. %Fe total y % SiO₂ total en el mineral a diferentes intensidades de corriente Vs Tamaño de partícula .



En el mineral de Valle de Tencua se nota que este metodo brinda resultados eficientes en cuanto a la remocion de silice ya que se logra disminuir hasta un 67% su alto contenido y aumento de porcentaje hierro hasta un 18.5% como se indica en la grafica 7. Las mallas con mejores rendimientos en peso y composicion quimica son las mallas Tyler numero 170 evaluada a 3 amperios con % Fe de 54.59% y %SiO₂ de 7.29% y la malla Tyler numero 100 evaluada a 5 amperios con % Fe de 49.38% y %SiO₂ de 6.53%. Se observa que al igual que en el mineral de Paz del Rio, al disminuir el tamaño de partícula aumenta el porcentaje de Fe y disminuye el porcentaje de impurezas en el mineral de Valle de Tencua.

Grafica 7. Fe total y % SiO₂ total en el mineral a diferentes intensidades de corriente Vs Tamaño de partícula



3.2.3 Concentración Gravimétrica. A continuación se presentan los resultados obtenidos en las pruebas de concentración gravimétrica según parámetros analizados descritos en la metodología.

❖ **Evaluación del ángulo de inclinación.** En esta evaluación se determina el ángulo de inclinación más apropiado de la mesa Wilfley para tomarlo como parámetro de operación constante y realizar posteriormente los análisis de concentración analizando únicamente la variable diámetro de partícula y el comportamiento general del proceso; ver tabla 11. Para este procedimiento se emplearon las especificaciones que se muestran en la tabla 3 con el mineral de Paz del Rio.

Cuadro 11. Influencia del ángulo de inclinación en los minerales

ENSAYO	ANGULO DE INCLINACION	% DE RECUPERACION	% DE HIERRO	% DE SILICE
1	15°	29.3	48.6	10.11
2	30°	31.5	52.2	10.02
3	45°	28.3	48.2	11.03
4	60°	8.2	45.7	11.12

Analizando los resultados de la tabla se concluye que el ángulo de inclinación con el mejor indicador de concentración es el de 30°, este resultado será tomado como un valor constante en los siguientes ensayos.

❖ **Evaluación del porcentaje en peso recuperado por malla y composición química.** Con el valor del ángulo seleccionado anteriormente se hace un estudio de la influencia del tamaño de partícula en el porcentaje en peso recuperado magnético y la composición química, en el anexo C tablas C14, C15 y C16 se presentan los resultados detallados de la recuperación de mineral y en el anexo C tablas C17, C18 y C19 se presenta la composición química.

En la evaluación de estos datos se encuentra que los tres minerales de estudio tienen el mismo comportamiento, donde se presenta que los porcentajes de recuperación más elevados están en los medios pero su composición química no es tan favorable como la composición química de los concentrados. La malla con mejores resultados es la malla Tyler número 100 con % de recuperación de 32.074%, % Fe 50% y % SiO₂ 10.02% en el

mineral de Paz del Río, % de recuperación de 30.521%, % Fe 49.87% y % SiO₂ 11.67% en el de Valle de Tencua y % de recuperación de 31.04%, % Fe 57.93% y % SiO₂ 2.59% en el de Ubala, estos resultados se obtienen de los materiales concentrados.

A pesar que los resultados de % de remoción de sílice y porcentaje de hierro tanto de los medios como de los concentrados aumentan, no son muy significativos con respecto a su valor inicial, por tanto este método no es eficiente para aplicarlo como proceso de concentración de minerales de hierro.

❖ **Razón de Concentración.** En las tablas 12, 13 y 14 se presentan los resultados en el proceso de concentración gravimétrica para los tres minerales de estudio teniendo en cuenta el número de mallas Tyler empleadas en el proceso.

Cuadro 12. Razón de concentración gravimétrica de Hierro del mineral Paz del Río

CONCENTRACIÓN GRAVIMETRICA	
Tamaño granulométrico	Razón de Concentración Hierro
45	0,95
70	0,92
100	0,92
140	0,94

Cuadro 13. Razón de concentración gravimétrica de Hierro del mineral Valle de Tencua

CONCENTRACIÓN GRAVIMETRICA	
Tamaño granulométrico	Razón de Concentración Hierro
45	0,90
70	0,90
100	0,89
140	0,92

Cuadro 14. Razón de concentración gravimétrica de Hierro del mineral Ubala

CONCENTRACIÓN GRAVIMETRICA	
Tamaño granulométrico	Razón de Concentración Hierro
45	0,95
70	0,94
100	0,93
140	0,93

3.2.4 Flotación espumante. Se examinó el comportamiento general del sistema haciendo ensayos preliminares, se replantearon los parámetros de las variables y se aplicaron al proceso de concentración de los distintos tipos de mineral.

❖ **Evaluación según porcentaje en peso recuperado.** En esta etapa se determinó la cantidad recuperada de los diferentes minerales de estudio; en el anexo C, tablas C20, C21 y C22 se encuentran los resultados detallados del proceso de flotación por espuma utilizando Acido oleico

❖ **Evaluación de pH.** En las pruebas preliminares se determinó que en el medio básico es donde se presenta la flotación, sin embargo se realizaron ensayos variando el pH para definir en qué valor se obtienen los mejores resultados, como se muestra en la tabla 15.

Cuadro 15. Influencia de PH en el proceso de flotación

Valores de PH	Sílice removida %	Hierro recuperado %
9	0.12	30.3
12	0.094	21.6

Según la tabla de resultados el valor de PH más indicado es 9 ya que este muestra más estabilidad en la espuma y mejores resultados. Es importante mantener esta variable controlada con el pH metro, ya que es la de mayor influencia en el proceso de concentración y cualquier fluctuación altera el rendimiento.

❖ **Evaluación de la velocidad de agitación de la pulpa.** Estos ensayos se realizaron con el fin de tratar de reducir las revoluciones de agitación de la pulpa en el acondicionamiento, se evaluó el porcentaje de recuperación de hierro y el porcentaje de remoción de sílice a diferentes velocidades de agitación como se muestra en la tabla 16.

Cuadro 16. Influencia de la velocidad de agitación en el proceso de flotación

Velocidad de agitación	Sílice removida %	Hierro recuperado %
500	0.19	27.6
900	0.13	28.3
1200	0.093	28.5
1500	0.1	28

En los resultados se observa que las mejores condiciones de agitación fueron a 1200 rpm, sin embargo el incremento en el porcentaje de remoción no es muy significativo entre intervalos lo que hace pensar que la flotación está controlado por fenómenos fisicoquímicos.

❖ **Evaluación del tiempo de flotación.** Los resultados de estos ensayos indicaron que el tiempo de flotación fue de 12 min, en este tiempo se estabiliza el proceso. Para tiempos inferiores se observa que hay cambios significativos en el porcentaje de remoción lo que indica que aun no se ha completado el proceso. Este comportamiento se observa en la tabla 10.

Cuadro 17. Influencia del tiempo en el proceso de flotación

Tiempo de flotación (min)	Sílice removida %	Hierro recuperado %
2	0.03	20.3
5	0.1	23.5
8	1.2	27.8
12	0.094	30.6

CONCLUSIONES

- ❖ De acuerdo con los resultados de recuperación en %peso obtenidos por el proceso de separación magnética en vía seca de los tres minerales, el que presento mejores resultados fue el mineral de Paz del Rio con un porcentaje de 77.145%. Con respecto a la remoción de sílice y concentración de hierro, se presentaron variaciones leves en el porcentaje en comparación con la muestra de mineral inicial.
- ❖ La separación magnética de alta intensidad en húmedo mostró los mejores resultados en cuanto a remoción de sílice y concentración de hierro según la composición química de los minerales de estudio, el mineral de Valle de Tencua mostro el mejor comportamiento, donde se logro disminuir el contenido de sílice en un 67% y la concentración de Fe total se aumentó en un 18.5%; para el mineral de Paz del Rio la remoción de sílice fue de 32% y la concentración de Fe total aumento en 10%. Sin embargo en la recuperación en peso de mineral se obtienen bajos porcentajes
- ❖ Los resultados obtenidos por el método de concentración por gravedad (mesa vibratoria Wilfley) muestra que los tres minerales de estudio tienden al mismo comportamiento, y los porcentajes de recuperación más elevados están en los medios, llegando a valores alrededor del 50%. La remoción de sílice y concentración de hierro tanto en los concentrados como en los medios son muy bajos haciendo que este proceso no sea favorable en concentración de minerales de hierro.

❖ En el proceso de flotación se obtuvo una remoción de sílice significativa, pero su concentración de hierro disminuye notablemente, lo cual indica que se hace necesario la evaluación de otros reactivos de flotación como Keroseno oxidado y flotación inversa con aminas de cadena carbonada larga que no fueron utilizadas en el proceso debido a su escasez.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] PETERS A. T. Producción Siderúrgica. 1 edición, ciudad de México. 1987. Pág. 382.
- [2] FRANCO M., Eduardo, VARGAS P., Whilmar. Proyecto de grado “Enriquecimiento del Mineral de Hierro de Ubala”. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. Mayo, 2000. Pág. (27 - 64).
- [3] TAGGART Arthur F. Elementos de preparación de minerales. 1 edición. España. 1966.
- [4] VÁSQUEZ Q. Custodio., PARDAVE L. Walter. Procesamiento de materias primas y sólidos particulados. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 1996.
- [5] CONCHA Fernando, A.I.Q., Ph.D. Fundamentos de la clasificación. Universidad de Concepción de Chile. 1972. Pág. (36 - 67).
- [6] WILLS B.A. Tecnología de procesamiento de minerales. México. 1988. Pág. (37-421).
- [7] PIMIENTA S., Elvis I. Proyecto de grado “Concentración gravimétrica de las colas de cianuración de la mina reina de oro y del mineral de la mina providencia (Vetas, Santander) ”. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 1997. Pág. (7 - 59).

[8] ANGARITA C., José M. Proyecto de grado “Reducción directa del mineral de hierro en un baño de hierro fundido ”. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 1969. Pág. (36 - 40).

[9] CASTRO S. Fundamentos fisicoquímicos de la flotación de minerales. Universidad de Concepción de Chile. 1980. Pág. (80 - 118).

[10] GAUDIN., A. M. Flotación. Second edition. New york, London. 1957. Pág. (9 - 326).

[11] MATTENELLA, Lilian Ester. Selección de espumantes para concentración de minerales mediante flotación por espuma; Universidad Nacional de Catamarán, 2003.

[12] Fundamentos de flotación
www.alipso.com/monografias/flotacion

[13] Manual de entrenamiento en concentración de minerales. *Proyecto “Capacitación de Mineros en Escuela Minera de Chiripujio” Servicio Nacional de Geología y Técnico de Minas – SERGEOTECMI*

[14] QUIALA, Niurka Varela; PEREZ, Luis Brossard. Influencia de las soluciones alcalizadas en la flotación de minerales. Universidad del Oriente. 2002.

[15] GUZMAN RIVERA, Levi. Metodología de evaluación y selección de espumantes. Moly-cop Adesur S.A. Lima, Perú.

[16]Proceso de fabricación del acero
www.ipac.es/acero/fabricacion.asp

[17] Glosario Geológico Minero. INGEOMINAS: Instituto Colombiano de Minería y Geología.

www.ingeminas.gov.co/component/option,com_glossary/limit,25/limitstart,450/

[18] PARDAVE LIVIA, Walter, VASQUEZ QUINTERO, Custodio, OREJUELA PARRA, Oscar Augusto. Beneficio de minerales de yeso provenientes de la mina de la nacuma “Municipio de los santos”. 2007.

[19] Análisis granulométrico

www.gama-peru.org/libromedmin/capitulo/5/5-4-2-1-4.htm

[20] PAVEZ, Osvaldo. Concentración de minerales II. Universidad de Atacama. Facultad de ingenierías, departamento de metalurgia.2005

ANEXOS

ANEXO A. PILAS DE ALMACENAMIENTO UBICADAS EN LA PLANTA DE BELENCITO

Figura A1. Fotografías de las pilas de almacenamiento de los minerales de estudio.



Descarga de mineral a la planta



Mineral de Paz del Rio



Mineral de Valle de Tencua

ANEXO B. METODOLOGÍA DE LOS ENSAYOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LOS MINERALES

A continuación se muestra la metodología de cada uno de los ensayos realizados para la caracterización de los minerales.

☑ PREPARACION DE LAS MUESTRAS PARA SU ANALISIS POR DIFRACCION (DRX).

➤ Preparación y montaje de las muestras.

Las muestras fueron pulverizadas en un mortero de ágata y llevada a un tamaño de 38 μm (400 mesh). El espécimen seleccionado de la muestra fue montado en un porta muestra de aluminio mediante la técnica de llenado lateral.

➤ Toma de datos de difracción.

Se realizo en un difractómetro de polvo marca RIGAKU modelo D/MAX IIIB bajo las siguientes condiciones:

Voltaje		40(kV)
Corriente		20(mA)
Rendijas (Slits)	DS	1.0°
	RS	0.3mm
	SS	1.0°
Muestreo		0.02° 2theta
Rango de medición		2-70° 2theta

Radiación Cuka1

Monocromador Grafito

Identificación de fases

Tipo de barrido a pasos

Velocidad de barrido 2 segundos

Cuantificación de fases

Tipo de barrido a pasos

Tiempo de muestreo 2 segundos

➤ Análisis por Difracción de Rayos-X

Identificación de fases

El análisis cualitativo de las fases presentes en la muestra se realizó mediante comparación del perfil observado con los perfiles de difracción repostados en la base de datos PDF-2 del *International Centre for Diffraction Data (ICDD)*.

Cuantificación de fases

El análisis cuantitativo de las fases encontradas se realizó mediante el refinamiento por el Método de Rietveld del perfil observado habiéndole agregado a la muestra una cantidad conocida de un estándar interno

(Aluminum oxide, -100mesh, 99%. Corundum, α phase. Aldrich No. 23,474-5) correspondiente al 20%.

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD

Las muestras obtenidas de la pila de almacenamiento fueron transportadas en recipientes sellados herméticamente para lograr el mayor grado de conservación de las muestras.

Materiales y equipos

- Balanza analítica, Estufa, Desecador

Procedimiento

1. Pesarse 10g de muestra en un vidrio de reloj.
2. Calentar en una estufa durante 1h entre 105 y 110 °C.
3. Dejar enfriar la muestra en un desecador.
4. Pesarse la muestra y repetir el procedimiento hasta peso constante.

Contenido de humedad:

$$\% H = \left(\frac{W_m - W_s}{W_m} * 100 \right)$$

Donde:

W_m: Peso de la muestra

W_s: Peso de la muestra seca

DETERMINACIÓN DEL NIVEL DE ACIDEZ

Materiales y reactivos

- Potenciómetro con electrodo, balanza, vasos de precipitados, solución buffer, agua destilada, mineral.

Procedimiento

La preparación del potenciómetro se realiza con soluciones buffer de pH conocido, de la siguiente manera:

1. Lavar los electrodos con agua destilada y secarlos.
2. Introducir los electrodos en una solución buffer.
3. verificar la temperatura.
4. Colocar el botón del potenciómetro en la posición para leer pH y calibrar al valor de la solución buffer.
5. Volver el botón pH a su posición de solución inicial.
6. Sacar los electrodos de la solución buffer.

De esta manera el potenciómetro está listo para tomar el pH de la muestra.

Determinación del pH con agua destilada.

1. Tomar 10 g de mineral.
2. Llevarlo a un recipiente de vidrio adicionando 10 ml de agua destilada.
3. leer el pH con el pH metro.

DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD REAL

Materiales y reactivos

- Picnómetro, balanza analítica, líquido y mineral.

Procedimiento

1. Secar la muestra a una temperatura entre 110 ± 5 °C.
2. La granulometría del material debe ser -4.75 mm.
3. Pesar el picnómetro vacío, M_f , previamente limpio y seco (secar en estufa).

4. Introducir dentro del picnómetro el mineral en estudio (ocupando entre la mitad y las $\frac{3}{4}$ del volumen del picnómetro) y pesar, restando la masa del picnómetro vacío M_f , y así determinar el peso de la muestra seca M_o (para muestras con tamaño de partícula mayores a 2 mm el peso mínimo de la muestra es de 20 g, para tamaños máximos de 4.75 mm son 100 g).
5. Adicionar líquido para humectar completamente el sólido y sacar las burbujas de aire que estén presentes.

El líquido elegido debe poseer las siguientes características:

- Humectar completamente el mineral.
 - Penetrar fácilmente en el interior de los poros de la muestra.
 - No debe presentar ninguna reacción con el sólido.
6. completar con el líquido hasta llenar el picnómetro (tener en cuenta la tapa y el capilar) y pesar, M_b .
 7. Vaciar el picnómetro y limpiarlo.
 8. Llenar el picnómetro con el líquido elegido y pesar, M_a .
 9. Introducir el termómetro en el agua y registrar la temperatura, T con 0.5°C de precisión.
 10. calculo de la densidad

$$\rho = \left(\frac{M_o \times \rho_l}{[M_o + (M_a - M_b)]} \right)$$

En donde:

M_o = Gramos de la muestra sólida seca

M_a = Gramos del picnómetro lleno con agua

ρ_l = Densidad del líquido

M_b = Peso del picnómetro lleno con agua y muestra sólida

ANEXO C. METODOLOGÍA EMPLEADA EN LOS ENSAYOS DE CONCENTRACIÓN DE MINERALES DE HIERRO

SEPARACIÓN MAGNÉTICA VIA SECA

Figura C1. Fotografía del equipo utilizado para la separación magnética en vía seca



Tabla C1. Resultados de los ensayos de separación magnética vía seca.

Mineral de Paz del Rio

SEPARACION MAGNETICA VIA SECA (MINERAL PAZ DEL RIO)																	
# malla Tyler	peso (g)	1 pasada			2 pasada			3 pasada			4 pasada			5 pasada			TOTAL L
		NR (g)	RM (g)	PD (g)	NR (g)	RM (g)	PD (g)	NR (g)	RM (g)	PD (g)	NR (g)	RM (g)	PD (g)	NR (g)	RM (g)	PD (g)	% PR Total
45	200	197	2	1	196,5	0,424	0,076	191,09	0,25	5,16	188,23	0,111	2,749	187,66	0,061	0,509	1,423
70	200	196,5	3	0,5	195,716	0,784	0	195,266	0,45	0	194,846	0,42	0	191,42	0,3	3,126	2,477
100	200	143,2	52,3	4,5	101,11	40,87	1,22	71,55	29,43	0,13	51,54	19,14	0,87	38,091	12,55	0,899	77,145
140	200	154	44,8	1,2	118,9	35,1	0	84,03	28,07	6,8	63,75	20,26	0,02	48,8	14,27	0,68	71,25
170	200	164,5	34,5	1	125,61	32,72	6,17	98,59	26,54	0,48	80,08	18,15	0,36	64,82	14,08	1,18	62,995
<170	200	139,14	60,49	0,37	106,3	32,74	0,1	82,56	23,11	0,63	62,76	18,94	0,86	48,317	13,88	0,563	74,58

NR = Mineral no recuperado

RM = Mineral magnético recuperado

PD = Perdidas en el proceso

% PR Total = Porcentaje de mineral magnético recuperado total

Tabla C2. Resultados de los ensayos de separación magnética vía seca.

Mineral de Ubala

SEPARACION MAGNETICA VIA SECA (MINERAL DE UBALA)																	
# malla Tyler	peso (g)	1 pasada			2 pasada			3 pasada			4 pasada			5 pasada			TOTAL
		NR (g)	RM (g)	PD (g)	NR (g)	RM (g)	PD (g)	NR (g)	RM (g)	PD (g)	NR (g)	RM (g)	PD (g)	NR (g)	RM (g)	PD (g)	% PR Total
45	200	195,856	0,156	3,988	193,416	0,045	2,395	193,416	0	0	193,416	0	0	193,416	0	0	0,1005
70	200	198,86	1,02	0,12	194,614	0,59	3,656	194,614	0	0	194,614	0	0	194,614	0	0	0,805
100	200	190,429	9,251	0,32	183,329	6,812	0,288	177,369	4,909	1,051	173,54	3,565	0,264	170,279	3,05	0,211	13,7935
140	200	174,081	25,621	0,298	155,85	18,31	0,131	142,261	13,237	0,352	133,05	9,164	0,047	124,85	8,19	0,01	37,156
170	200	165,712	34,033	0,255	133,92	31,679	0,113	112,662	20,93	0,328	92,02	20,38	0,28	78,262	13,5	0,24	60,261
<170	200	176,944	21,647	1,409	158,814	17,61	0,52	142,934	15,677	0,203	131,034	11,12	0,78	120,184	9,75	1,11	37,902

NR = Mineral no recuperado

RM = Mineral magnético recuperado

PD = Perdidas en el proceso

% PR Total = Porcentaje de mineral magnético recuperado total

Tabla C3. Resultados de los ensayos de separación magnética vía seca.

Mineral de Valle de Tencua

SEPARACION MAGNETICA VIA SECA...							
# malla Tyler	peso (g)	1 pasada			2 pasada		
		NR (g)	RM (g)	PD(g)	NR (g)	RM (g)	PD(g)
45	200	197,202	0,117	2,681	195,939	0,063	1,2
70	200	198	1	1	194,959	0,376	2,665
100	200	188,8	10,2	1	179,529	8,155	1,116
140	200	175,6	23,3	1,1	162,863	12,356	0,381
170	200	188,7	11,2	0,1	177,567	9,434	1,699
<170	200	183,9	14,152	1,948	173,467	9,76	0,673

... (MINERAL VALLE DE TENCUA)									
3 pasada			4 pasada			5 pasada			TOTAL
NR (g)	RM (g)	PD(g)	NR (g)	RM (g)	PD(g)	NR (g)	RM (g)	PD(g)	% PR total
195,939	0	0	195,939	0	0	195,939	0	0	0,09
189,519	0,334	5,106	188,539	0,273	0,707	188,419	0,115	0,005	1,049
171,629	6,62	1,28	165,629	5,783	0,217	160,199	4,688	0,742	17,723
150,573	11,322	0,968	139,09	10,422	1,061	129,118	9,022	0,95	33,211
169,167	8,028	0,372	159,167	7,96	2,04	150,716	7,6	0,851	22,111
164,1	8,61	0,757	155,87	7,58	0,65	148,2	7,14	0,53	23,621

NR = Mineral no recuperado

RM = Mineral magnético recuperado

PD = Perdidas en el proceso

% PR Total = Porcentaje de mineral magnético recuperado total

Tabla C4. Composición química del mineral Paz del Rio concentrado por separación magnética vía seca

MINERAL PAZ DE RIO						
CONCENTRACION MAGNETICA VIA SECA						
Parámetro Analizado	Malla 45	Malla 70	Malla 100	Malla 140	Malla 170	Malla >170
% SiO ₂	9,89	9,94	13,59	12,45	10,89	10,43
% CaO	2,26	2,39	3,1	3,11	3	3,07
% Al ₂ O ₃	4,68	4,64	4,82	4,59	4,49	4,96
% MgO	0,41	0,36	0,43	0,42	0,39	0,4
% MnO	0,17	0,12	0,22	0,21	0,2	0,18
% PPC	7,68	7,41	10,23	10,58	10,7	10,72
% Zn	----	----	----	----	----	----
% P ₂ O ₅	2,14	2,22	2,97	3,13	3,13	3,13
% Fe total	52,14	51,8	45,9	46,8	47,6	47,5
% FeO	25,89	20,13	19,57	19,2	18,21	17,52
% Fe ₂ O ₃	45,86	51,76	43,94	45,21	47,88	48,5

Tabla C5. Composición química del mineral Valle de Tencua concentrado por separación magnética vía seca

MINERAL VALLE DE TENCUA						
CONCENTRACION MAGNETICA VIA SECA						
Parámetro Analizado	Malla 45	Malla 70	Malla 100	Malla 140	Malla 170	Malla >170
% SiO ₂	15,56	23,37	23,67	23,69	23,33	22,13
% CaO	1,39	1,3	1,36	1,21	1,23	1,18
% Al ₂ O ₃	5,67	8,23	8,53	8,06	7,89	7,19
% MgO	0,41	0,47	0,54	0,48	0,51	0,51
% MnO	0,34	0,55	0,63	0,76	0,77	0,84
% PPC	----	----	9,01	8,65	8,48	8,41
% Zn	0,04	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01
% P ₂ O ₅	0,58	0,33	0,41	0,33	0,33	0,33
% Fe total	45,86	39,28	38,38	39,1	39,5	40,87
% FeO	0	4,19	0,58	0,98	0,98	0,53
% Fe ₂ O ₃	65	51,52	54,24	54,84	55,39	57,01

☑ **SEPARACIÓN MAGNÉTICA DE ALTA INTENSIDAD EN HÚMEDO**

Figura C2. Fotografía del Concentrador magnético de alta intensidad.



Tabla C6. Resultados de los ensayos de separación magnética vía húmeda.
Mineral Paz de Rio

SEPARACION MAGNETICA VIA HUMEDA (Mineral Paz Del Rio)							
# malla	peso (g)	2 Amperios		3 Amperios		5 Amperios	
		Magnético (g)	% peso	Magnético (g)	% peso	Magnético (g)	% peso
45	50	15,965	31,93	26,37	52,74	36,525	73,05
70	50	12,495	24,99	20,688	41,376	29,97	59,94
100	50	16,125	32,25	26,64	53,28	28,61	57,22
140	50	15,05	30,1	31,728	63,456	27,63	55,26
170	50	12,805	25,61	19,368	38,736	31,25	62,5
<170	50	10,05	20,1	12,33	24,66	21,165	42,33

Tabla C7. Resultados de los ensayos de separación magnética vía húmeda.

Mineral Valle de Tencua

SEPARACION MAGNETICA VIA HUMEDA (Mineral Valle de Tencua)							
# malla	peso (g)	2 Amperios		3 Amperios		5 Amperios	
		Magnético (g)	% peso	Magnético (g)	% peso	Magnético (g)	% peso
45	50	10,23	20,46	20,29	40,58	30,75	61,5
70	50	9,14	18,28	9,98	19,96	14,09	28,18
100	50	7,67	15,34	11,61	23,22	25,63	51,26
140	50	8,14	16,28	9,12	18,24	11,9	23,8
170	50	15,43	30,86	20,964	41,928	20,119	40,238
<170	50	10,47	20,94	11,92	23,84	17,91	35,82

Tabla C8. Composición química del mineral Paz del Rio concentrado por separación magnética vía húmeda a 2 Amperios.

MINERAL PAZ DE RIO						
SEPRACION MAGNETICA VIA HUMEDA 2 AMPERIOS						
Parámetro Analizado	Malla 45	Malla 70	Malla 100	Malla 140	Malla 170	Malla >170
%SiO ₂	9,58	9,15	10	9,55	8,24	7,57
%Fe	46,25	47,5	46,25	47,5	46,25	48,13

Tabla C9. Composición química del mineral Paz del Rio concentrado por separación magnética vía húmeda a 3 Amperios.

MINERAL PAZ DE RIO						
SEPARACION MAGNETICA VIA HUMEDA 3 AMPERIOS						
Parámetro Analizado	Malla 45	Malla 70	Malla 100	Malla 140	Malla 170	Malla >170
%SiO ₂	9,6	9,87	9,6	9,35	7,87	7,27
%Fe	49,12	46,56	48,12	49,44	51	52,81

Tabla C10. Composición química del mineral Paz del Rio concentrado por separación magnética vía húmeda a 5 Amperios.

MINERAL PAZ DE RIO						
SEPRACION MAGNETICA VIA HUMEDA 5 AMPERIOS						
Parámetro Analizado	Malla 45	Malla 70	Malla 100	Malla 140	Malla 170	Malla >170
%SiO ₂	10,36	9,63	9,74	9,32	8,61	7,76
%Fe	45,34	47,93	47,46	48,59	48,12	49,31

Tabla C11. Composición química del mineral Valle de Tencua concentrado por separación magnética vía húmeda a 2 Amperios.

MINERAL VALLE DE TENCUA						
SEPRACION MAGNETICA VIA HUMEDA 2 AMPERIOS						
Parámetro Analizado	Malla 45	Malla 70	Malla 100	Malla 140	Malla 170	Malla >170
%SiO ₂	6,4	8,23	7,83	8,39	6,88	5,34
%Fe	52,18	51,87	46,25	45,62	49,56	51,56

Tabla C12. Composición química del mineral Valle de Tencua concentrado por separación magnética vía húmeda a 3 Amperios.

MINERAL VALLE DE TENCUA						
SEPRACION MAGNETICA VIA HUMEDA 3 AMPERIOS						
Parámetro Analizado	Malla 45	Malla 70	Malla 100	Malla 140	Malla 170	Malla >170
%SiO ₂	6,39	7,56	7,71	7,98	7,29	5,34
%Fe	48,65	47,34	49,65	49,87	54,59	54,43

Tabla C13. Composición química del mineral Valle de Tencua concentrado por separación magnética vía húmeda a 5 Amperios.

MINERAL VALLE DE TENCUA						
SEPRACION MAGNETICA VIA HUMEDA 5 AMPERIOS						
Parámetro Analizado	Malla 45	Malla 70	Malla 100	Malla 140	Malla 170	Malla >170
%SiO2	7,25	7,38	6,53	6,79	6,93	5,4
%Fe	48,73	47,5	49,38	48,13	49,38	51,88

CONCENTRACION POR GRAVEDAD

Figura C3. Fotografía de la Mesa Wilfley empleada en concentración gravimétrica.





Tabla C14. Resultados de los ensayos de concentración gravimétrica.

Mineral Paz de Rio

MINERAL PAZ DE RIO				
CONCENTRACION GRAVIMETRICA				
# Malla	Cantidad utilizada(g)	% Recuperación Concentrado	% Recuperación Medios	% Recuperación Colas
45	1000	28.42	43.304	28.276
70	1000	31.88	34.755	33.365
100	1000	32.074	35.542	32.384
140	1000	30.53	36.022	33.448

Tabla C15. Resultados de los ensayos de Concentración Gravimétrica.

Mineral Valle de Tencua

MINERAL VALLE DE TENCUA				
CONCENTRACION GRAVIMETRICA				
# Malla	Cantidad utilizada(g)	% Recuperación Concentrado	% Recuperación Medios	% Recuperación Colas
45	1000	27.578	13.222	59.2
70	1000	27.396	26.877	45.727
100	1000	30.521	21.555	47.924
140	1000	26.896	27.83	45.274

Tabla C16. Resultados de los ensayos de Concentración Gravimétrica.

Mineral Ubala

MINERAL DE UBALA				
CONCENTRACION GRAVIMETRICA				
# Malla	Cantidad utilizada(g)	% Recuperación Concentrado	% Recuperación Medios	% Recuperación Colas
45	1000	29.661	54.338	16.001
70	1000	30.239	51.33	38.431
100	1000	31.04	40.52	28.44
140	1000	30.368	39.73	29.902

Tabla C17. Composición química del mineral Paz del Rio concentrado por gravedad

CONCENTRACION GRAVIMETRICA								
Parámetro Analizado	Malla 45		Malla 70		Malla 100		Malla 140	
	Concentrado	Medios	Concentrado	Medios	Concentrado	Medios	Concentrado	Medios
% SiO ₂	11,15	11,13	10,57	12,89	10,02	10,94	11,12	11,53
% Fe total	48,1	47,9	49,6	47,2	50	48	48,9	47,33

Tabla C18. Composición química del mineral Valle de Tencua concentrado por gravedad

CONCENTRACION GRAVIMETRICA								
Parámetro Analizado	Malla 45		Malla 70		Malla 100		Malla 140	
	Concentrado	Medios	Concentrado	Medios	Concentrados	Medios	Concentrado	Medios
% SiO ₂	12,04	16,05	12,2	14,77	11,67	14,64	11,96	14,23
% Fe total	49,2	45	49,23	46,4	49,87	46,61	49,3	46,53

Tabla C19. Composición química del mineral Ubala concentrado por gravedad

CONCENTRACION GRAVIMETRICA								
Parámetro Analizado	Malla 45		Malla 70		Malla 100		Malla 140	
	Concentrado	Medios	Concentrado	Medios	Concentrados	Medios	Concentrado	Medios
% SiO ₂	2,97	4,6	2,65	5,24	2,59	5,13	2,63	5,19
% Fe total	56,78	55,82	57,2	55,45	57,93	55,38	57,46	55,71

FLOTACION ESPUMANTE

Tabla C20. Resultados de los ensayos de flotación. Mineral Paz del Rio

FLOTACION ESPUMANTE			
MINERAL PAZ DE RIO			
# Malla	PH	Cantidad utilizada(g)	Recolección(g)
170	9	200	82,57
170	12	200	79,38

Tabla C21. Resultados de los ensayos de flotación. Mineral Valle de Tencua

FLOTACION ESPUMANTE			
MINERAL VALLE DE TENGUA			
# Malla	PH	Cantidad utilizada(g)	Recolección(g)
170	9	200	111,38
170	12	200	72,46

Tabla C22. Resultados de los ensayos de flotación. Mineral Ubala

FLOTACION ESPUMANTE			
MINERAL UBALA			
# Malla	PH	Cantidad utilizada(g)	Recolección(g)
170	9	200	73,35
170	12	200	89,76

Figura C4. Fotografía del equipo y aspas utilizadas en flotación y dispersión de la pulpa



Celda de flotación



Aspas de doble

Hélice

ANEXO D. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA, DIFRACTOGRAMAS Y DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DE LOS MINERALES DE ESTUDIO

Tabla D1. Composición mineralógica del mineral de Paz del Rio

MINERAL PAZ DE RIO			
FASE		NOMBRE	CUANTITATIVO
Cristalinos	SiO ₂	Cuarzo	2,7 % (D:E =0,1)
	Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	Antigorita	13,7 % (D:E =0,7)
	FeCO ₃	Siderita	4,9 % (D:E =0,1)
	Fe ₂ CO ₃	Hematita	19,4 % (D:E =0,3)
	(K, H ₃ O) Al ₂ Si ₃ Al O ₁₀ (OH) ₄	Illita	6,7 % (D:E =0,4)
	Al ₂ (Si ₂ O ₅) (OH) ₄	Caolinita	N.D.
	Fe O (OH)	Goetita	21,2 % (D.E =0,3)
	MgCO ₃	Magnesita	N.D.
	(Cu ₆ Zn) (SO ₄) ₂ (OH) ₁₀ (H ₂ O) ₃	Schulenbergita	1,4 % (D.E =0,2)
	Mg SiO ₃	Perovskita	0,8 % (D.E =0,2)
Total cristalinos			70,80%
Amorfos			29,20%

Tabla D2. Composición mineralógica del mineral de Ubala

MINERAL ÚBALA			
FASE		NOMBRE	CUANTITATIVO
Cristalinos	SiO ₂	Cuarzo	3,4 % (D.E = 0,1)
	FeCO ₃	Siderita	0,8 % (D.E = 0,1)
	Fe ₂ CO ₃	Hematita	17,8 % (D.E = 0,3)
	Fe O (OH)	Lepidocrocita	2,5 % (D.E = 0,5)
	(K, H ₃ O) Al ₂ Si ₃ Al O ₁₀ (OH) ₄	Illita	N.D.
	Al ₂ (Si ₂ O ₅) (OH) ₄	Caolinita	N.D.
	Fe O (OH)	Goetita	41,9 % (D.E = 0,5)
Total cristalinos			63,40%
Amorfos			36,60%

Tabla D3. Composición mineralógica del mineral de Valle de Tencua

MINERAL VALLE DE TENCUA			
	FASE	NOMBRE	CUANTITATIVO
Cristalinos	SiO ₂	Cuarzo	13,2 % (D.E = 0,2)
	Fe O (OH)	Goetita	17,9 % (D.E = 0,3)
	Fe ₂ CO ₃	Hematita	15,7 % (D.E = 0,3)
	Ca CO ₃	Calcita	0,2 % (D.E = 0,1)
	(K, H ₃ O) Al ₂ Si ₃ Al O ₁₀ (OH) ₄	Illita	42,6 % (D.E = 0,8)
	Al ₂ (Si ₂ O ₅) (OH) ₄	Caolinita	N.D.
	TiO ₂	Rutilio	1,6 % (D.E = 0,1)
	Fe O (OH)	Lepidocrocit a	0,9 % (D.E = 0,1)
Total cristalinos			92,10%
Amorfos			7,90%

Figura D1. Difractograma del mineral de Paz del Rio



Figura D2. Difractograma del mineral de Ubala

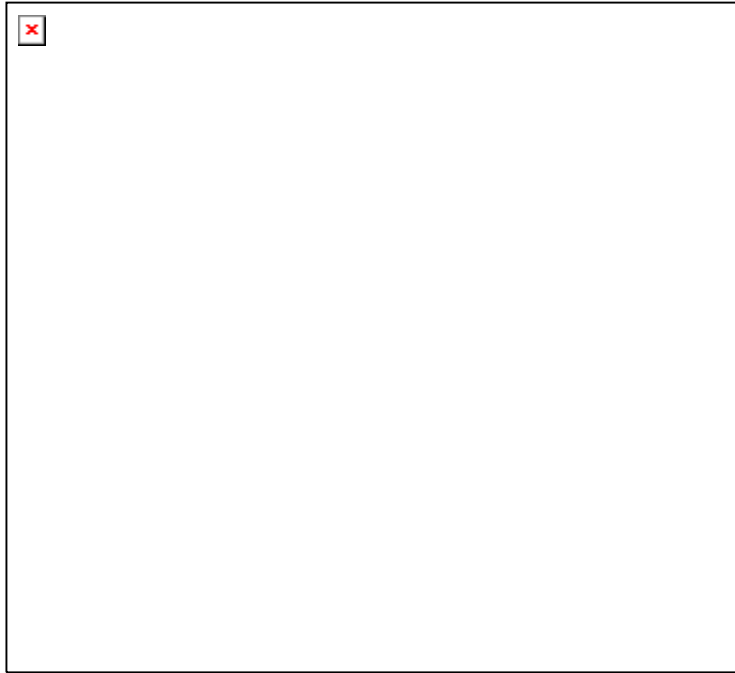


Figura D3. Difractograma del mineral de Valle de Tencua



DISTRIBUCION GRANULOMETRICA DE LOS MINERALES

Tabla D4. Distribución granulométrica mineral Paz del Rio

MINERAL PAZ DEL RIO (1000 g)			
# MALLA	RETENIDO (g)	% RETENIDO	% PASANTE
16	514,689	51,4689	48,5311
45	63,31	6,331	42,2001
70	258,85	25,885	16,3151
100	5,289	0,5289	15,7862
140	57,418	5,7418	10,0444
170	22,219	2,2219	7,8225
<170	78,16	7,816	0,0065

Tabla D5. Distribución granulométrica mineral Valle de Tencua

MINERAL VALLE DE TENCUA (1000 g)			
# MALLA	RETENIDO (g)	% RETENIDO	% PASANTE
16	434,51	43,451	56,549
45	28,739	2,8739	53,6751
70	392,47	39,247	14,4281
100	8,294	0,8294	13,5987
140	41,297	4,1297	9,469
170	41,943	4,1943	5,2747
<170	52,743	5,2743	0,0004